e- ISSN:2458-7575

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

Bilecik Şeyh Edebali University

Journal of Science

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 11, Sayı 2, 2024 / Valume 11, Number 2, 2024 ISSN 2458-7575

Sahibi / *Publisher*

Prof. Dr. Zafer Asım KAPLANCIKLI (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 BAKINER

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Burak DİKİCİ (burakdikici@gmail.com)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Osman Zeki OKUYUCU (osman.okuyucu@bilecik.edu.tr)
Matematik Bölümü, Fen Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Tuba YURDAKADİM (tugba.yurdakadim@bilecik.edu.tr)
Matematik Bölümü, Fen Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur YÜZGEÇ (ugur.yuzgec@bilecik.edu.tr)
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

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

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 11, Sayı 2, 2024 / Valume 11, Number 2, 2024 ISSN 2458-7575

Alan Editörleri / Field Editors

Doç. Dr. Fatih APAYDIN (fatih.apaydin@bilecik.edu.tr)
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Rafig GURBANOV (rafig.gurbanov@bilecik.edu.tr)
Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Doç. Dr. Şenay BALBAY (senay.balbay@bilecik.edu.tr)
Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Eralp ŞENER (eralp.sener@bilecik.edu.tr)
Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Meryem GÖKTAŞ (meryem.goktas@bilecik.edu.tr)
Makine ve Metal Teknolojileri, Meslek Yüksekokulu, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Musa ÖZKAN (musa.ozkan@bilecik.edu.tr)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 11, Sayı 2, 2024 / Valume 11, Number 2, 2024 **ISSN 2458-7575**

SAHİBİ / *PUBLISHER*

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi adına Rektör Prof. Dr. Zafer Asım KAPLANCIKLI

Prof. Dr. Zafer Asım KAPLANCIKLI (Rector) on behalf of Bilecik Seyh Edebali University

BAŞ EDİTÖR / *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/bseufbd**

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 11, Sayı 2, 2024 / Valume 11, Number 2, 2024 ISSN 2458-7575

Hakem Listesi / Reviewer Board

Prof. Dr. Atilla Gencer Devecioğlu / Dicle Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Enerji Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Belgin Karabacakoğlu / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Mühendislik-Mimarlık Fakültesi/Kimya Mühendisliği Bölümü/Kimyasal Teknolojiler Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Burcu Ertit Taştan / Gazi Üniversitesi/ Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu/ Dişçilik Hizmetleri Bölümü/ Ağız ve Diş Sağlığı Pr./

Prof. Dr. Filiz Dadaşer Çelik / Erciyes Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Çevre Mühendisliği Bölümü/Çevre Bilimleri Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Mehmet Aydın / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi/Endüstriyel Tasarım Bölümü/Endüstriyel Tasarım Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Mehmet Karataş / Necmettin Erbakan Üniversitesi/ Fen Fakültesi/ Biyoteknoloji Bölümü/ Biyoteknoloji Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Murat Koru / Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi/Teknoloji Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Termodinamik Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Musa Demirci / Bursa Uludağ Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/Matematik Bölümü/Cebir ve Sayılar Teorisi Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Mustafa Serdar Karakaş / Konya Teknik Üniversitesi/ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Rabia Aktaş Karaman / Ankara Üniversitesi/ Fen Fakültesi/ Matematik Bölümü/ Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Uğur Yüzgeç / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/Bilgisayar Yazılımı Anabilim Dalı/

Prof. Dr. Yavuz Kesicioğlu / Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi/ Fen-Edebiyat Fakültesi/ Matematik Bölümü/ Analiz ve Fonksiyonlar Teorisi Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Abdulaziz Kaya / Gaziantep Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü/ Malzeme Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Ali Çelik / Ali Çelik / Eskişehir Teknik Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü/Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Ali Hikmet Değer / Karadeniz Teknik Üniversitesi/ Fen Fakültesi/ Matematik Bölümü/ Analiz ve Fonksiyonlar Teorisi Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Ardahan Eski / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Meslek Yüksekokulu/Elektronik ve Otomasyon Bölümü/Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Pr./

Doç. Dr. Berçem Kıran Yıldırım / Marmara Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Kimya Mühendisliği Bölümü/Temel İşlemler ve Termodinamik Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Elis Soylu Yılmaz / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Fen Fakültesi/Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü/Cebir ve Sayılar Teorisi Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Eray Arslan / Vienna University of Technology/

Doç. Dr. Gülden Gök / Aksaray Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Çevre Mühendisliği Bölümü/Çevre Bilimleri Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Mehmet Koç / Eskişehir Teknik Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Muharrem Pul / Kırıkkale Üniversitesi/ Kırıkkale Meslek Yüksekokulu/ Elektrik ve Enerji Bölümü/ İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Pr./

Doç. Dr. Müslüm Özışık / Yıldız Teknik Üniversitesi/ Kimya-Metalurji Fakültesi/ Matematik Mühendisliği Bölümü/ Matematik Mühendisliği Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Nuray Canikoğlu / Sakarya Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü/Seramik Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Sevde Üstün Odabaşı / Ondokuz Mayıs Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Çevre Mühendisliği Bölümü/Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı/

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

Cilt 11, Sayı 2, 2024 / Volume 11, Number 2, 2024 ISSN 2458-7575

Hakem Listesi / Reviewer Board

Doç. Dr. Taha Ceylani / Muş Alparslan Üniversitesi/ Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu/ Gıda İşleme Bölümü/ Gıda Kalite Kontrolü ve Analizi Pr./

Doç. Dr. Tuba Yağcı Gurbanov / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/ Fen Fakültesi/ Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü/ Genel Biyoloji Anabilim Dalı/

Doç. Dr. Zehra Yiğit Avdan / Eskişehir Teknik Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Çevre Mühendisliği Bölümü/Çevre Bilimleri Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Ali Öztürk / Necmettin Erbakan Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Makine Mühendisliği Bölümü/ Mekanik Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Aytaç Perihan Akan / Hacettepe Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Çevre Mühendisliği Bölümü/ Çevre Bilimleri Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Emrah Kaygusuz / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/ Fen Fakültesi/ Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü/ Genetik Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Emre Güngör / Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi/ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi/ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/ Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Hayrullah Özimamoğlu / Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi/ Fen-Edebiyat Fakültesi/ Matematik Bölümü/ Cebir ve Sayılar Teorisi Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi İlker Burak Giresunlu / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/Fen Fakültesi/Matematik Bölümü/Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Neşe İşler Acar / Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi/Fen-Edebiyat Fakültesi/Matematik Bölümü/Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan Yayla / Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü/ Bilgisayar Donanımı Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Serkan Aslıyüce / Amasya Üniversitesi/ Fen-Edebiyat Fakültesi/ Matematik Bölümü/ Uygulamalı Matematik Anabilim Dalı/

Dr. Öğr. Üyesi Yunus Demirtaş / Siirt Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Enerji Anabilim Dalı/

Arş. Gör. Dr. Aysun İnan Genç / Kastamonu Üniversitesi/Fen Fakültesi/Biyoloji Bölümü/Genel Biyoloji Anabilim Dalı/

Arş. Gör. Kübra Solak / Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi/Çorlu Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü/Termodinamik Anabilim Dalı/

Öğr. Gör. Fethi Ahmet Çakmak / Manisa Celâl Bayar Üniversitesi/Soma Meslek Yüksekokulu/Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü/Makine Pr./

Öğr. Gör. Dr. Sibel Söylemez / Gazi Üniversitesi/ Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu/ Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü/ Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Pr./

Dr. Hızlan Hıncal Ağuş / World Medıcıne Türkiye/

Dr. Sefa Tunçer / DT Cloud/

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

11. Cilt – 2. Sayı, 2024 Volume 11 – Issue 2, 2024

e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

İÇİNDEKİLER

Araştırma Makaleleri / Research Articles

1	**İkame Kutularının Lineer Olmama Değerini Optimize Etme** *Fırat Artuğer*	236-243
2	**Huntington Hastalığı ile İlişkili ERN1 ve TRAF2 Genlerindeki Yanlış Anlamlı SNP'lerin In Silico Değerlendirilmesi** *Nurbanu Tanrıverdi, Ömer Faruk Karasakal, Mesut Karahan*	244-254
3	**Pb-Cd in Maternal Blood and Affecting Factors** *Yılmaz Altuner, Yeşim Ömür, Suzan Onur*	255-269
4	**A New Method for Solving Fisher-Type Equations** *Murat Düz, Ahmad Issa*	270-275
5	**Gene Expression Profiling with Transcriptomic Data Analysis In Small Cell Lung Cancer** *Gözde Öztan*	276-284
6	**Karbon Elyaf Takviyeli PoliEterEterKeton Kompozitin Farklı Malzemelere Karşı Sürtünme ve Aşınma Performanslarının Karşılaştırılması** *Hüseyin Ünal, Salih Hakan Yetgin*	285-293
7	**Fdm Yöntemiyle Üretilen Pla Malzemelerde Dolgu Deseninin Mekanik Özelliklere Etkisi** *Ömer Adanur, Oğuz Koçar, Ahmet Serdar Güldibi*	294-307
8	**Fibonacci Numbers Sequence Derived From Suborbital Graphs for the Modular Group Γ** *Seda Öztürk*	308-315
9	**(1+1)-Boyutlu Benjamin-Bona-Mahony (BBM) Denkleminin Modifiye Edilmiş Kudryashov Metodu ile Soliton Çözümleri** *Sait San, Zeynep Aydın*	316-324
10	**Groupoid and Semigroup Construction on Isosceles Triangular Numbers** *Ahmet Emin, Ümit Sarp*	325-334
11	**Mikrodalga Uygulamaları İçin Al2O3/Cam/ZrO2 Seramiklerinin Yoğunlaştırılması ve Karakterizasyonu** *Oğuzhan Bilaç*	335-342
12	**Evsel Katı Atıkta Sıfır Atık Uygulanabilirliği: Bursa Örneği** *Samet Öztürk, Nour Aljbili*	343-358
13	**Grey Relationship Analysis of Cutting Forces and Surface Roughness in Turning using Cryo-treated and Untreated Cutting Tools** *Şehmus Baday, Hüseyin Gürbüz, Onur Ersöz*	359-368

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science

11. Cilt – 2. Sayı, 2024 Volume 11 – Issue 2, 2024

e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

14	**Interactive Use of Deep Learning and Ethereum Blockchain for the Security of IIoT Sensor Data** *Emrullah Şahin, Naciye Nur Arslan, Fırat Aydemir*	**369-384**
15	**Isı Yalıtımının Farklı Dış Duvar Modellerindeki Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi** *Mehmet Kan*	**385-393**
16	**Effects of Thin Cell Layer Technique and Nutrient Media Contents of Regeneration and Browning Characteristics of the *Laurus nobilis* L. Explants** *Büşra Toska1, Halide Hande Güngör, Aynur Gürel*	**394-406**
17	**Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Sisteminde R404A Alternatifi GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanılmasının Termodinamik Analizi** *Nazan Sevtap Can, Ragıp Yıldırım, Arzu Şencan Şahin*	**407-421**
18	**The Efficient Robust Conformable Methods for Solving the Conformable Fractional Cahn-Allen Equation** *Özkan Avit, Halil Anaç*	**422-436**

Derleme Makaleleri / Review Articles

19	**Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Çevresel Sürdürülebilirlik Uygulamaları: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi** *Gözde Çolak Bayram, Burçin Atılgan Türkmen, Gamzenur Özsin*	**437-450**
20	**Defne Uçucu Yağının Fitokimyasal İçeriği ve Farmakolojik Etkilerinin Değerlendirilmesi** *Şeyda Güneş, Melek Karaaslan, Burçin Ergene*	**451-468**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 236-243, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1323521
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

İkame Kutularının Lineer Olmama Değerini Optimize Etme

Optimizing Nonlinearity Value of Substitution Boxes

Fırat Artuğer[1*]

Geliş / Received: 06/07/2023 ***Revize / Revised: 14/09/2023*** ***Kabul / Accepted: 16/10/2023***

ÖZ

Şifreleme algoritmalarında en önemli gereksinimlerden bir tanesi karıştırma olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle şifrelenecek verinin etkin bir şekilde karıştırılması gerekmektedir. İkame kutusu (s-box), bu gereksinimi sağlayan en önemli yapılardan bir tanesidir. Bu yapının en önemli özelliklerinden biri olan lineer olmama değeri ne kadar yüksek olursa karıştırmayı o kadar sağlıklı bir şekilde yerine getirecektir. İkame kutularının elde edilmesinde birçok teknik kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en çok kullanılan, optimizasyon tekniğidir. Bu teknikte, başlangıçta genellikle kaos yardımıyla bir s-box elde edilir. Daha sonra bir optimizasyon tekniği kullanılarak elemanların konumları değiştirilir. Uygunluk değeri olarak lineer olmama kriteri kullanılır. Yeni konumlandırmalardan sonra lineer olmama değeri arttığında s-box yapısı güncellenmektedir. Bu çalışmada öncelikle s-box yapılarında lineer olmama değerinin nasıl optimize edildiği açıklanmıştır. Daha sonra sinüs kosinüs algoritması kullanılarak bir s-box optimize edilmiştir. Elde edilen s-box yapısının, 500 iterasyon sonunda lineer olmama değeri 108 olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca bir s-box yapısının diğer performans kriterleri de açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler- İkame kutusu (s-box), Kaos, Lineer olmama, Optimizasyon

ABSTRACT

One of the most important requirements in encryption algorithms is called confusion. For this reason, the data to be encrypted must be effectively mixed. Substitution box (s-box) is one of the most important structures that meet this requirement. The higher the nonlinearity value, which is one of the most important features of this structure, the healthier the mixing will be. Many techniques are used to obtain substitution boxes. It is the most used optimization technique among these techniques. In this technique, an s-box is obtained initially, usually with the help of chaos. The positions of the elements are then changed using an optimization technique. The nonlinearity criterion is used as the fitness value. When the nonlinearity value increases after new positioning, the s-box structure is updated. In this study, first, explains how the nonlinearity value is optimized in s-box structures. Then an s-box is optimized using the sine cosine algorithm. The nonlinearity value of the obtained s-box structure was observed to be 108 at the end of 500 iterations. Other performance criteria of an s-box structure are also described.

Keywords- Substitution box (s-box), Chaos, Nonlinearity, Optimization

[1]*Sorumlu yazar iletişim: firatartuger@munzur.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-4096-0458
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tunceli, Türkiye

I. GİRİŞ

Hayatımızın neredeyse tamamen dijitalleştiği günümüzde veri en değerli varlıktır. Verilerin hem depolanması hem de iletilmesi anında en önemli sorunlardan bir tanesi güvenliktir. Günümüzde verilerin güvenliğini sağlayan en temel teknik simetrik şifreleme algoritmalarıdır. Simetrik şifreleme algoritmaları, blok ve akış olmak iki üzere iki temel tekniğe dayanmaktadır. Akış şifrelemede bitler tek tek şifrelenir. Bu algoritmalar hızlı ve güvenlidir. Ancak verinin boyutu arttıkça uygulaması neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Bir diğer teknik ise blok şifrelemedir. Günümüz blok şifreleme standardı AES algoritmasıdır ve 8 bit güçlü bir s-box yapısı kullanılmaktadır [1]. Blok şifrelemede veri bloklara bölünür ve her blok kendi içinde şifrelenir. Daha sonra şifrelenmiş bloklar birleştirilerek şifreli veri elde edilir. Blok şifreleme algoritmalarının güvenliği sağlamasındaki en temel yapı taşlarından bir tanesi s-box yapılarıdır. Çünkü s-box, blok şifreleme algoritmasının genellikle lineer olmayan tek birimidir. Lineer olmama değeri ne kadar yüksek olursa s-box o kadar güçlü olacaktır. 8 bit bir s-box 256 değer içermektedir. Buda güçlü bir s-box aramak için arama uzayının 256! olduğu anlamına gelmektedir. Bu geniş arama uzayında güçlü bir s-box aramak oldukça zor bir problemdir. Bu tarz problemlerin çözümü için optimizasyon teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Bir s-box matematiksel olarak denklem 1 ‘de verildiği gibi ifade edilebilir. Yani elemanların başka elemanlarla yer değiştirdiği lineer olmayan bir haritalama işlemidir [2]. Güçlü s-box yapıları geliştirmek için literatürde birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki kaos tabanlı yaklaşımlardır. Kaos tabanlı yaklaşımlar genellikle kaotik haritalara dayanmaktadır [3-8]. Kaos tabanlı yöntemler rastgele oluşturuldukları için güçlüdür. Ancak bu yöntemler ile geliştirilen s-box yapılarının genellikle lineer olmama değeri düşüktür. Bu değerin düşük olması şifreleme algoritmasını diferansiyel saldırılara karşı dirençsiz hale getirmektedir. Buda bu yöntemlerin en önemli dezavantajıdır. Ancak son yıllarda bu dezavantajı gidermek için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir [9, 10]. Bu yaklaşımlar sayesinde kaotik s-box yapılarını performansı iyileştirilmiştir. Bir diğer yaklaşım ise matematiksel dönüşümlerdir [11-13]. Matematiksel dönüşümler ile geliştirilen s-box yapıları genellikle istatistiksel olarak oldukça güçlüdürler ve lineer olmama değerleri yüksektir. Ancak, pratik ve cebirsel olarak yapılabilecek şifre çözümleme saldırılarına karşı çeşitli zayıflıkları mevcuttur. Bunlardan farklı olarak hücresel otomata modelleri [14,15], DNA-RNA zincir yapıları [16-18] kullanılarak s-box yapıları oluşturulmuştur. Son olarak s-box yapılarında lineer olmama değerini arttırmak için optimizasyon yöntemleri sıklıkla kullanılmıştır. Bu teknikler ile s-box yapılarının lineer olmama değeri arttırılabilmektedir. Ancak bu algoritmaların hesaplama karmaşıklığı yüksektir. Buda bu yöntemlerin dezavantajı olarak görülebilir.

Şu ana kadar literatürde yapılan optimizasyon tabanlı s-box geliştirme yöntemlerine kısaca değinilmiştir. Farah ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması kullanılarak yeni bir s-box üreteci önerilmiştir. Bu yöntem, toplam sekiz turdan meydana gelmektedir. Her tur iki dönüşümden oluşur. Bunlardan birincisi satır sola kaydırma ve diğeri ise sütun yönünde döndürme işlemidir. Bu operasyonlar sayesinde lineer olmama değeri 106.5 olan bir s-box geliştirilmiştir [19]. Ahmed ve arkadaşları tarafından ateş böceği optimizasyon algoritmasını kullanan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde de başlangıç s-box ‘ı için kaotik harita kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, uygunluk fonksiyonu yardımıyla rehberli arama yapılarak lineer olmama değeri 107.5 olan bir s-box üretilmiştir [20]. Zamli, güvenlik uygulamalarında kullanılabilecek etkili bir s-box için uyarlanabilir ajan kahramanlar ve korkaklar algoritması olarak tanımlanan yeni bir metasezgisel algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma ajan kahramanlar ve korkaklar algoritmasına dayanmaktadır. Başlangıç popülasyonu için ise literatürde sıklıkla kullanılan kaotik haritalardan biri olan çadır haritası kullanılmıştır. Bu yeni metasezgisel algoritma sayesinde lineer olmama değeri 109.75 olan güçlü bir s-box elde edilmiştir [21]. Alhadawi ve arkadaşları tarafından guguk kuşu arama algoritmasına dayanan yeni bir s-box üreteci önerilmiştir. Başlangıç popülasyonu ayrık zamanlı kaotik haritalara dayanmaktadır. Bu yöntemin temel avantajı, Genetik algoritma ve Parçacık sürü optimizasyonu algoritmalarına kıyasla verimli rastgelelik ve daha düşük ayarlanabilir parametreler yardımıyla gösterilmesidir. Bu yaklaşım sayesinde lineer olmama değeri 108.5 olan bir s-box elde edilmiştir [22]. Wang ve arkadaşları tarafından etkili bir s-box geliştirmek için genetik algoritmaya dayanan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yöntemde boole fonksiyonu s-box ‘ın kromozomu olarak alınır. Başlangıç popülasyonunu için yine kaotik yaklaşımlar temel alınmıştır. Genetik algoritmanın etkili çaprazlama ve mutasyon birimleri sayesinde lineer olmama değeri 110.25 ‘e kadar arttırılmıştır [23]. Artuğer ve Özkaynak tarafından yapılan çalışmada genetik algoritmanın çaprazlama ve mutasyon birimleri farklı bir şekilde kullanılarak lineer olmama değerini 111.75 ‘e kadar çıkarmıştır [24]. Alhadawi ve arkadaşları tarafından ateş böceği optimizasyon algoritması bir kez daha s-box üretiminde kullanılmıştır. Başlangıç popülasyonu için kaotik haritalardan yararlanılmıştır. Bu yöntemde optimizasyon, sabit bir uygunluk fonksiyonunu azaltarak iyi çözümleri hızlı bir şekilde aramaktadır. Bu algoritma sayesinde lineer olmama değeri 107 olan bir s-box üretilmiştir [25]. Ahmad ve Al-Solami ‘nin yaptığı çalışmada kesirli sıralı zaman gecikmeli hopfield sinir ağına dayanan yeni bir algoritma önerilmiştir. Algoritmanın evrimi lineer olmama değerini arttırmak üzerine kurulmuştur. Bu yöntemde lineer olmama değeri 111.25 olarak hesaplanmıştır [26]. Wang ve arkadaşları tarafından, s-box elde etme problemi bir gezgin satıcı problemine uyarlanmıştır. Optimizasyon için genetik algoritma, başlangıç popülasyonu için ise kaos kullanılmıştır. Bu

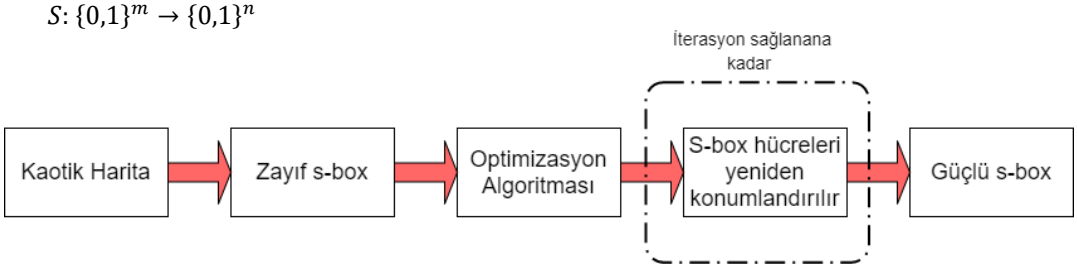
çalışmada genetik algoritmanın evrim süreci sayesinde lineer olmama değeri 108 olan bir s-box üretilmiştir [27]. Ahmad ve arkadaşları tarafından en popüler metasezgisel algoritmalardan biri olan karınca kolonisi optimizasyon algoritmasına dayanan yeni bir yöntem önerilmiştir. Başlangıç s-box ‘ı için yine kaos kullanılmıştır. Bu yöntemde, s-box elde etme problemi yine bir gezgin satıcı problemine dönüştürülerek arama gerçekleştirilmiştir. Bu sayede lineer olmama değeri 107 olan bir s-box elde edilmiştir [28]. Chen tarafından tavlama metodu kullanılarak yeni bir s-box üreteci geliştirilmiştir. Bu yöntemde yine kaotik haritalara dayanmaktadır. Bu sayede lineer olmama değeri 104 olan bir s-box üretilmiştir [29]. Khan ve arkadaşları tarafından güvenli bir şifreleme algoritması geliştirmek için güçlü s-box ‘lar kullanmayı benimseyen yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde s-box üretiminde parçacık sürü optimizasyonu kullanılmaktadır. Başlangıç popülasyonu rastgele üretilmektedir. Buradaki temel felsefe parçacık konumlarının s-box üretiminde kullanılmasıdır. Bu yöntem ile 112 lineer olmama değerine ulaşılmıştır [30]. Hematpour ve Ahadpour tarafından parçacık sürü optimizasyonunu kullanılarak yeni bir s-box üreteci geliştirilmiştir. Lineer olmama değeri 106.5 olan bir s-box elde edilmiştir [31]. Zamli ve arkadaşları tarafından, futboldan esinlenilerek geliştirilmiş tiki-taka optimizasyon algoritmasına dayanan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yöntemde başlangıç popülasyonu için 5 farklı kaotik haritadan bir tanesi seçilebilmektedir. Buda algoritmayı çeşitlendirmektedir. Bu algoritma ile 109.25 lineer olmama değerine sahip olan bir s-box üretilmiştir [32]. Tian ve Lu tarafından, bir diğer önemli optimizasyon algoritmalarından biri olan bakteriyel yiyecek arama optimizasyonuna dayanan yeni bir s-box üreteci önerilmiştir. Başlangıç popülasyonu için iç içe geçmiş lojistik harita temel alınmıştır. Bu algoritma optimizasyon aşamasında uygunluk fonksiyonları olarak doğrusal olmayan ve diferansiyel tekdüzeliği kullanması sayesinde lineer olmama değeri 107.5 olan bir s-box elde etmiştir [33]. Alzaidi ve arkadaşları tarafından, son yıllarda geliştirilen güçlü optimizasyon algoritmalarından biri olan sinüs kosinüs algoritmasına dayalı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde başlangıç popülasyonu için yeni bir kaotik harita kullanılmıştır. Bu algoritmanın güçlü kaotik dinamikleri sayesinde lineer olmama değeri 109.5 olan bir s-box üretilmiştir [34]. Ahmad ve arkadaşları tarafından güçlü s-box yapıları üretmek için parçacık sürüsü optimizasyonu kullanılmıştır. Bu yöntemde başlangıç popülasyonu için zengin dinamiklere sahip olan Renyi haritası kullanılmıştır. Bu yöntemde lineer olmama değeri 111.5 ‘e kadar arttırılmıştır [35]. Kang ve Wang ‘ın yaptığı çalışmada genetik operasyonlar kullanılarak lineer olmama değeri 108 olarak elde edilmiştir [36]. Zamli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada çıplak köstebek faresi algoritması kullanılarak 109.75 lineer olmama değerine ulaşılmıştır [37].

Çalışmanın ikinci bölümünde ikame kutularının nasıl optimize edildiği açıklanmış olup, sinüs kosinüs algoritması kullanılarak yeni bir s-box üreteci oluşturulmuştur. Üçüncü bölümde elde edilen s-box yapısı analiz edilmiş olup, literatürdeki diğer çalışmalarla performans karşılaştırması yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise sonuçlar tartışılmış olup önerilerde bulunulmuştur.

II. İKAME KUTULARININ OPTİMİZASYONU

İkame kutularında en önemli kriter lineer olmama değeridir. Bu yüzden optimizasyon teknikleri uygulandığında genellikle uygunluk değeri olarak lineer olmama kullanılır. Bu yöntemlerin uygulanmasında öncelikle kaotik bir harita veya farklı bir teknikle bir s-box elde edilir. Bu s-box yapısının elde edilmesi oldukça kolaydır. Kaotik haritanın başlangıç parametreleri belirlenir ve bu harita ile bir değer üretilir. Daha sonra bu değer bir tam sayıya dönüştürülür ve [0-256] aralığında olabilmesi için 256 değerine göre mod işlemi uygulanır. Son olarak elde edilen bu değer ikame kutusunda yoksa eklenir. Varsa yeni bir değer üretilerek süreç devam eder. Bu şekilde 256 hücre dolana kadar bu işleme devam edilir. Bu şekilde bir s-box yapısı elde edilmiş olunur. Ancak bu yapı kriptografik olarak zayıf özellikler gösterecektir. Özellikle lineer olmama değeri 107 ‘nin altında kalacaktır. AES algoritmasında bu değer 112 ‘dir. 112 değerine ulaşılamasa bile buna yakın değerler elde edilmesi istenmektedir. Optimizasyon burada devreye girmektedir. Optimizasyon algoritmasının burada kullanımı çok çeşitli olsa bile, genellikle bu algoritmalardan bir tanesiyle iki veya daha fazla hücre belirlenir ve konumları değiştirilir ya da örneğin genetik algoritmada çaprazlama sürecinde satırlar veya sütunlar yer değiştirilip lineer olmama değeri arttırılabilmektedir. Bu şekilde lineer olmama değeri arttığında s-box güncellenir. Belli bir iterasyona kadar bu süreç uygulandığında lineer olmama değerinin oldukça arttığı görülmektedir. İkame kutularının optimizasyon süreci için temel sistem modeli şekil 1 ‘de verilmiştir.

$$S: \{0,1\}^m \rightarrow \{0,1\}^n \tag{1}$$



Şekil 1. S-box yapılarının optimizasyonu için sistem modeli

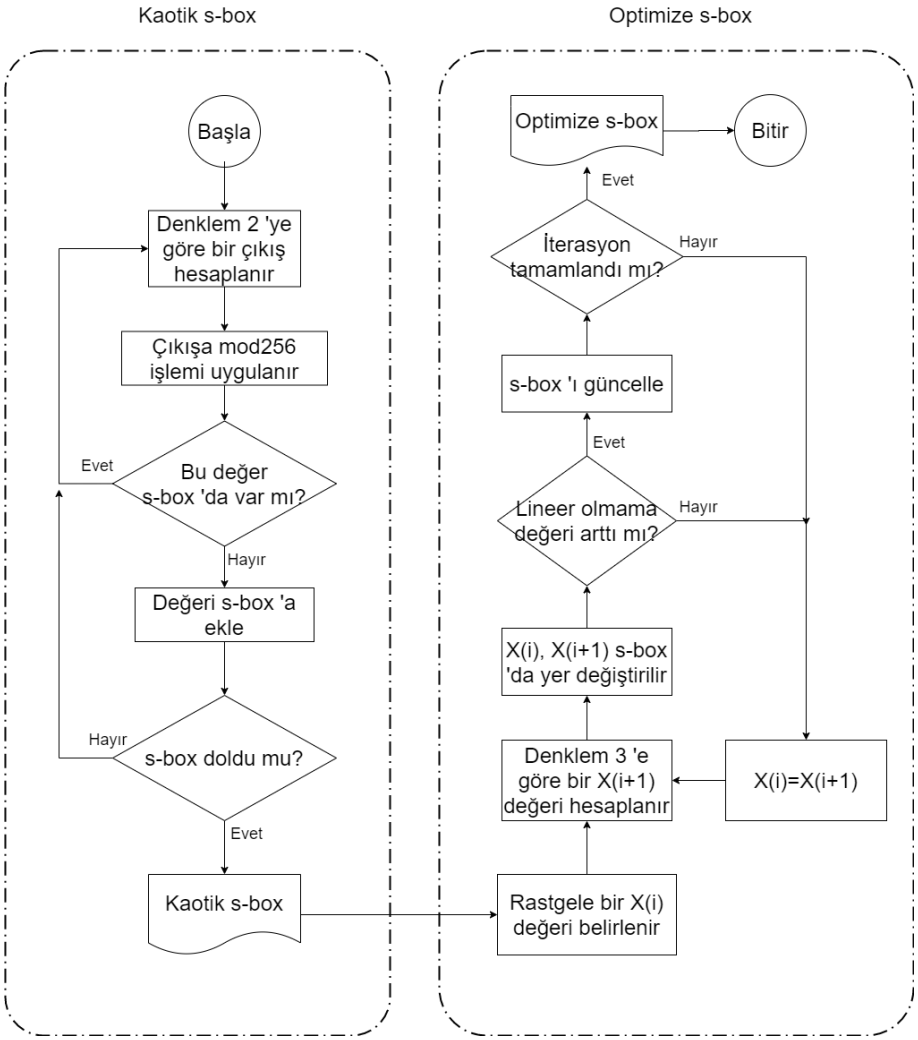
Bu çalışmada sinüs kosinüs algoritması kullanılarak bir s-box yapısı optimize edilmiştir. Başlangıç için kaotik çadır harita kullanılmıştır. Çadır haritanın matematiksel modeli denklem 2 ‘de verilmiştir.

$$x_{n+1} = \begin{cases} ax_n & x_i < 0.5 \\ a(1-x_n) & x_i \geq 0.5 \end{cases}, \quad x_n \in [0,1], \quad a \in [1,2] \tag{2}$$

Sinüs kosinüs algoritması, optimizasyon problemlerini çözmek için matematiksel sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının döngüsel modellerini kullanan popülasyon tabanlı etkili bir optimizasyon algoritmasıdır. Yakın zamanda Seyedali Mirjalili tarafından önerilmiş ve çoğu optimizasyon algoritmasından çok daha hızlı bir yakınsamaya sahip olduğu kanıtlanmıştır [38]. X_i^t 'nin konumunu r_4 parametresine göre güncellemek için denklem 3 kullanır. Denklem 3 ‘de verilen X_i^{t+1} değeri s-box yapısında X_i^t ile konum değiştirecek olan değer olacaktır.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \, x \, sin(r_2) \, x \, |r_3 \, x \, P_i^t - X_i^t|, & r_4 < 0.5 \,) \\ X_i^t + r_1 \, x \, cos(r_2) \, x \, |r_3 \, x \, P_i^t - X_i^t|, & r_4 \geq 0.5 \,) \end{cases} \tag{3}$$

$Burada$ X_i^t i. boyutunun t. İterasyonundaki güncel çözümüdür. r_1, r_2, r_3, r_4 rastgele sayılardır. Özellikle r_4, 0 ile 1 aralığında rastgele bir sayıdır. P_i i. boyuttaki hedef noktanın pozisyonudur. Yani başlangıçta rastgele bir X_i^t değeri seçilir. Daha sonra bu değere göre bir X_i^{t+1} değeri elde edilerek bunların konumları değiştirilir. Bu işlemden sonra lineer olmama değeri arttığında s-box güncellenir. X_i^t değeri bir sonraki adımda X_i^{t+1} değeri yapılarak belli bir iterasyona kadar algoritma devam ettirilir. Kaotik bir s-box yapısını üretip lineer olmama değerini optimize etmek için önerilen algoritmanın akış diyagramı şekil 2 ‘de verilmiştir. Önerilen algoritma belirlenen iterasyon sayısına göre tek döngüde çalıştığı için O(n) karmaşıklığına sahiptir.



Şekil 2. Önerilen algoritmanın akış diyagramı

III. ANALİZ SONUÇLARI

Bir s-box yapısının performansını analiz etmek için literatürde var olan farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bunlar; Bijektiflik, Katı Çığ Kriterleri (SAC), Lineer olmama, Bit Bağımsızlık Kriteri (BIC) ve giriş/çıkış XOR dağılımı kriterleridir. Bijektiflik, birebir ve örten bir fonksiyon anlamına gelmektedir. Yani 256 değer içeren s-box yapısında, 0 ile 256 arasındaki değerlerinden her birinin sadece bir kere kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada önerilen s-box yapısı ve literatürdeki diğer çoğu çalışma bu kriteri sağlamaktadır. Daha etkin bir karıştırma işlemi için s-box yapılarının bijektif olması önerilmektedir. SAC kriteri, girdi verisinde bir bit değiştiğinde, çıktı verisinde meydana gelecek olan değişikliği ölçmektedir [39]. Bu değişikliğin 0.5 veya buna yakın bir değer olması istenir. Yani girdide bir bit değiştiğinde çıktıda bitlerin yarısına yakınının değişmesi beklenmektedir. Bu sayede saldırganların bitleri değiştirerek yapabilecekleri herhangi bir saldırının önüne geçilmiş olunur. Lineer olmama kriteri, affine dönüşümünde boole işlevinin bit sayısındaki değişikliğini ifade eder. Bu kriter bir s-box yapısındaki en önemli değer olarak görülmektedir. Bu değerin olabildiğince yüksek olması istenir. Günümüz standardı olan AES algoritmasında bu değer 112 ‘dir. BIC kriteri, Webster ve Tavares tarafından önerilmiş olup, i ve j olarak tanımlanan iki bitin bağımsız bir şekilde değişmesi gerektiği ve herhangi birinin diğerinden çıkarılmasının mümkün olmadığı bir olayın meydana gelişinin bağımsızlığına dayanmaktadır [39]. BIC kriterinde hem lineer olmama değerinin olabildiğince yüksek olması, hem de SAC değerinin 05 ‘e yakın olması beklenmektedir. XOR dağılım kriteri Biham ve Shamir tarafından sunulmuştur [40]. Girişlerdeki XOR değerleri ile çıkışta meydana gelen XOR değerleri aynı olasılığa sahip olmalıdır. Yani, bir s-box ‘ın giriş ve çıkış olasılık dağılımına olabildiğince izin verilmediğinde, bu yapı diferansiyel kriptanalize karşı dirençli hale gelebilmektedir.

Bu çalışmada öncelikle kaotik çadır harita kullanılarak tablo 1 ‘de verilen s-box yapısı elde edilmiştir. Daha sonra sinüs kosinüs algoritması ile 500 iterasyonda optimize edilmiş s-box yapısı tablo 2 ‘de verilmiştir. Lineer olmama değeri 102.75 ‘den 108 ‘e çıkmıştır. Bu değer literatürdeki birçok optimizasyon tabanlı s-box yapısını geride bırakmaktadır. Ayrıca literatürdeki diğer optimizasyon tabanlı s-box geliştirme yöntemlerinin performans değerleri de incelenmiştir. Bu değerler tablo 3 ‘de verilmektedir. Bu tabloda görüldüğü gibi birçok optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmanın temel amacı lineer olmama değerini optimize etmek olduğu için çalışmalar bu değere göre kıyaslanmıştır.

Tablo 1. Çadır harita ile elde edilen s-box

	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
0	18	175	83	92	247	196	130	111	65	137	103	191	52	5	105	152
1	50	45	42	51	142	117	226	96	78	81	39	13	46	84	159	80
2	236	195	228	16	144	14	118	141	59	114	32	178	97	169	66	139
3	31	148	170	172	102	100	121	164	47	217	154	71	86	158	95	136
4	238	205	143	180	156	12	87	157	218	250	230	7	219	239	112	231
5	6	48	21	147	58	120	210	153	69	55	22	116	24	109	168	34
6	101	8	249	211	193	93	75	146	225	0	44	1	177	150	253	165
7	68	4	187	113	245	190	233	108	188	135	199	125	56	173	110	27
8	216	162	73	10	115	184	181	122	185	9	208	251	123	19	227	207
9	53	94	140	119	194	134	106	244	242	204	223	126	11	192	163	243
A	174	99	43	72	167	3	202	63	176	252	203	128	38	240	186	85
B	40	2	212	220	35	132	235	255	155	221	28	29	36	133	62	88
C	241	182	61	161	232	179	160	41	23	171	145	201	82	37	224	206
D	67	229	166	183	127	104	57	60	49	138	209	91	64	151	234	77
E	248	254	237	131	215	76	17	70	213	20	30	189	214	149	26	98
F	129	222	200	54	246	107	198	33	15	197	74	90	79	89	25	124

Tablo 2. Tablo 1 ‘de verilen s-box yapısının optimize edilmiş hali

	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
0	18	175	83	81	247	196	130	111	65	137	103	191	52	132	105	152
1	50	45	209	51	142	117	226	96	78	92	55	13	46	84	159	80
2	236	188	228	16	144	14	118	141	59	114	32	178	97	169	66	244
3	181	148	48	172	102	100	121	164	47	217	154	71	86	158	95	136
4	238	205	239	180	156	12	87	157	218	250	230	7	219	143	220	231
5	6	170	21	147	58	120	210	153	69	39	22	116	24	109	168	34

6	101	166	249	211	193	93	75	146	225	0	44	1	177	150	253	165
7	68	140	187	113	245	190	233	108	195	135	199	125	56	173	110	27
8	36	162	73	10	115	184	31	122	185	9	208	251	123	19	227	207
9	53	29	4	119	194	134	106	139	242	204	223	126	11	192	163	213
A	174	99	43	72	167	3	202	63	176	252	203	128	38	240	186	85
B	40	2	212	112	35	5	235	255	155	221	28	94	216	133	189	88
C	241	232	61	161	182	179	160	41	23	171	145	201	82	37	224	206
D	67	229	8	183	127	104	57	60	49	138	42	91	64	151	234	77
E	248	254	237	131	215	76	17	70	243	20	30	62	214	149	26	98
F	129	222	200	54	246	107	198	33	15	197	74	90	79	89	25	124

Tablo 3. Optimizasyon tabanlı s-box üretme yöntemlerinin performans karşılaştırması

	Lineer olmama			**BIC**		**SAC**	**Max.**
Optimizasyon Tekniği	**Ort**	**Min**	**Max**	**Lineer O.**	**SAC**	**Ort**	**XOR**
Öğretme-öğrenme algoritması [19]	**106.5**	104	110	105.2	0.4984	0.5120	10
Ateşböceği algoritması [20]	**107.5**	106	108	104.3	0.5001	0,4944	10
Uyarlanabilir ajan kahramanlar ve korkaklar algoritması [21]	**109.75**	108	112	104.35	0.5009	0.5068	10
Guguk kuşu arama algoritması [22]	**108.5**	106	110	103.85	0.5011	0.4995	10
Genetik algoritma [23]	**110.25**	110	112	104.07	0.5021	0.4953	10
Genetik algoritma [24]	**111.75**	110	112	104	0.5033	0.4968	12
Ateşböceği algoritması [25]	**107**	106	108	104.6	0.4974	0.496	10
Kesirli sıralı zaman gecikmeli hopfield sinir ağı algoritması [26]	**111.25**	110	112	102.57	0.5034	0.5007	10
Genetik algoritma [27]	**108**	108	108	90	0.4950	0.5068	10
Karınca kolonisi algoritması [28]	**107**	106	110	105.5	0.5010	0.5015	10
Tavlama algoritması [29]	**104**	102	106	103.2	0.4971	0.4980	10
Parçacık sürü optimizasyonu [30]	**112**	112	112	110	0.5134	0.5431	-
Parçacık sürü optimizasyonu [31]	**106.5**	104	108	105.85	0.4995	0.5036	10
Tiki-Taka algoritması [32]	**109.25**	106	110	104.07	0.5005	0.5017	10
Bakteriyel yiyecek arama optimizasyonu [33]	**107.5**	106	110	103.7	0.5025	0.5093	10
Sinüs kosinüs algoritması [34]	**109.5**	108	110	104.07	0.5020	0.4985	10
Parçacık sürü optimizasyonu [35]	**111.5**	108	112	110.28	-	0.5022	6
Genetik algoritma [36]	**108**	-	-	-	-	-	-
Çıplak köstebek faresi algoritması [37]	**109.75**	-	-	104.14	0.5041	0.4998	10
Kaotik çadır harita (Tablo 1)	**102.75**	100	106	103.71	0.4966	0.4978	12
Sinüs kosinüs algoritması (Tablo 2)	**108**	106	110	103.57	0.4976	0.4939	10

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şifreleme algoritmalarında en önemli gereksinimlerden bir tanesi karıştırma işlemidir. Bu işlem blok şifreleme algoritmalarında genellikle s-box yapıları ile gerçekleştirilir. Çünkü s-box lineer olmayan bir yapıdır ve veriyi etkin bir şekilde karıştırır. Güçlü s-box yapıları elde etmek için birçok teknik kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi optimizasyon tekniğidir. Bu çalışmada öncelikle s-box yapılarının nasıl optimize edildiği açıklanmıştır. Daha sonra çadır harita yardımıyla elde edilen güçsüz bir s-box, sinüs kosinüs algoritması ile optimize edilmiştir. Başlangıçtaki güçsüz s-box yapısının lineer olmama değeri 500 iterasyon sonunda 102.75 ‘den 108 ‘e çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca literatürde kullanılan diğer değerlendirme kriterleri de açıklanmış olup önerilen s-box yapısı analiz edilmiştir. Yapılan optimizasyon işlemi sonunda lineer olmama ve XOR dağılımı değerlerinde artış olmuştur. Diğer kriterler için çoğu çalışmada benzer değerler elde edilmektedir. Bunlardan bir tanesi SAC değeridir. SAC değeri bu çalışmada 0.5 değerine oldukça yakın bir değerdir.

Ayrıca literatürdeki diğer optimizasyon tabanlı s-box geliştirme yönteminin performans değerleri incelenmiştir. Tablo 3 'e bakıldığında bu yöntemler arasında sadece bir çalışmanın 112 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç aslında optimum çözümün henüz elde edilemediğini gösteriyor. Gelecek çalışmalarda araştırmacılar için sıcak bir konu olmaya devam edecektir. Özellikle yeni geliştirilen metasezgisel algoritmalar farklı şekillerde kullanılarak daha etkin sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu algoritmalar hem zaman bakımından hem de kriptografik özellikler olarak daha iyi sonuçlar verebilir.

KAYNAKLAR

[1] J. Daemen and V. Rijmen, ''AES proposal: Rijndael,'' in Proc. 1st Adv. Encryption Conf., CA, USA, 1998, pp. 1–45.
[2] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2021). An effective method to improve nonlinearity value of substitution boxes based on random selection. *Information Sciences*, 576, 577-588.
[3] Liu, G., Yang, W., Liu, W., & Dai, Y. (2015). Designing S-boxes based on 3-D four-wing autonomous chaotic system. *Nonlinear dynamics*, 82(4), 1867-1877.
[4] Liu, L., Zhang, Y., & Wang, X. (2018). A novel method for constructing the S-box based on spatiotemporal chaotic dynamics. *Applied sciences*, 8(12), 2650.
[5] Özkaynak, F., Çelik, V., & Özer, A. B. (2017). A new S-box construction method based on the fractional-order chaotic Chen system. *Signal, Image and Video Processing*, 11(4), 659-664.
[6] Khan, M., & Shah, T. (2015). An efficient construction of substitution box with fractional chaotic system. *Signal, Image and Video Processing*, 9(6), 1335-1338.
[7] Özkaynak, F., & Yavuz, S. (2013). Designing chaotic S-boxes based on time-delay chaotic system. *Nonlinear Dynamics*, 74(3), 551-557.
[8] Çavuşoğlu, Ü., Zengin, A., Pehlivan, I., & Kaçar, S. (2017). A novel approach for strong S-Box generation algorithm design based on chaotic scaled Zhongtang system. *Nonlinear dynamics*, 87(2), 1081-1094.
[9] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2020). A novel method for performance improvement of chaos-based substitution boxes. *Symmetry*, 12(4), 571.
[10] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2022). A method for generation of substitution box based on random selection. *Egyptian Informatics Journal*, 23(1), 127-135.
[11] Anees, A., & Chen, Y. P. P. (2020). Designing secure substitution boxes based on permutation of symmetric group. *Neural Computing and Applications*, 32(11), 7045-7056.
[12] Javeed, A., Shah, T., & Ullah, A. (2020). Construction of non-linear component of block cipher by means of chaotic dynamical system and symmetric group. *Wireless Personal Communications*, 112(1), 467-480.
[13] Siddiqui, N., Khalid, H., Murtaza, F., Ehatisham-Ul-Haq, M., & Azam, M. A. (2020). A novel algebraic technique for design of computational substitution-boxes using action of matrices on Galois field. *IEEE Access*, 8, 197630-197643.
[14] Alexan, W., ElBeltagy, M., & Aboshousha, A. (2022). Rgb image encryption through cellular automata, s-box and the lorenz system. *Symmetry*, 14(3), 443.
[15] Haque, A., Abdulhussein, T. A., Ahmad, M., Falah, M. W., & Abd El-Latif, A. A. (2022). A Strong Hybrid S-Box Scheme Based on Chaos, 2D Cellular Automata and Algebraic Structure. *IEEE Access*, 10, 116167-116181.
[16] Farhan, A. K., Ali, R. S., Yassein, H. R., Al-Saidi, N. M. G., & Abdul-Majeed, G. H. (2020). A new approach to generate multi S-boxes based on RNA computing. *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, 16(1), 331-348.
[17] Mohamed, A. G., Korany, N. O., & El-Khamy, S. E. (2021). New DNA coded fuzzy based (DNAFZ) S-boxes: Application to robust image encryption using hyper chaotic maps. *IEEE Access*, 9, 14284-14305.
[18] Basha, H. A. M. A., Mohra, A. S. S., Diab, T. O. M., & El Sobky, W. I. (2022). Efficient image encryption based on new substitution box using DNA coding and bent function. *IEEE Access*, 10, 66409-66429.
[19] Farah, T., Rhouma, R., & Belghith, S. (2017). A novel method for designing S-box based on chaotic map and teaching–learning-based optimization. *Nonlinear dynamics*, 88(2), 1059-1074.
[20] Ahmed, H. A., Zolkipli, M. F., & Ahmad, M. (2019). A novel efficient substitution-box design based on firefly algorithm and discrete chaotic map. *Neural Computing and Applications*, 31(11), 7201-7210.
[21] Zamli, K. Z. (2021). Optimizing S-box Generation based on the Adaptive Agent Heroes and Cowards Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 115305.
[22] Alhadawi, H. S., Majid, M. A., Lambić, D., & Ahmad, M. (2021). A novel method of S-box design based on discrete chaotic maps and cuckoo search algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 7333-7350.
[23] Wang, Y., Zhang, Z., Zhang, L. Y., Feng, J., Gao, J., & Lei, P. (2020). A genetic algorithm for constructing bijective substitution boxes with high nonlinearity. *Information Sciences*, 523, 152-166.
[24] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2022). SBOX-CGA: substitution box generator based on chaos and genetic algorithm. *Neural Computing and Applications*, 34(22), 20203-20211.
[25] Alhadawi, H. S., Lambić, D., Zolkipli, M. F., & Ahmad, M. (2020). Globalized firefly algorithm and chaos for designing substitution box. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 102671.

[26] Ahmad, M., & Al-Solami, E. (2020). Evolving dynamic S-boxes using fractional-order hopfield neural network based scheme. *Entropy*, 22(7), 717.
[27] Wang, Y., Wong, K. W., Li, C., & Li, Y. (2012). A novel method to design S-box based on chaotic map and genetic algorithm. *Physics Letters A*, 376(6-7), 827-833.
[28] Ahmad, M., Bhatia, D., & Hassan, Y. (2015). A novel ant colony optimization based scheme for substitution box design. *Procedia Computer Science*, 57, 572-580.
[29] Chen, G. (2008). A novel heuristic method for obtaining S-boxes. *Chaos, Solitons & Fractals*, 36(4), 1028-1036.
[30] Khan, L. S., Hazzazi, M. M., Khan, M., & Jamal, S. S. (2021). A novel image encryption based on rossler map diffusion and particle swarm optimization generated highly non-linear substitution boxes. *Chinese Journal of Physics.*
[31] Hematpour, N., & Ahadpour, S. (2021). Execution examination of chaotic S-box dependent on improved PSO algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33(10), 5111-5133.
[32] Zamli, K. Z., Kader, A., Din, F., & Alhadawi, H. S. (2021). Selective chaotic maps Tiki-Taka algorithm for the S-box generation and optimization. *Neural Computing and Applications*, 1-18.
[33] Tian, Y., & Lu, Z. (2017). Chaotic S-box: Intertwining logistic map and bacterial foraging optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
[34] Alzaidi, A. A., Ahmad, M., Ahmed, H. S., & Solami, E. A. (2018). Sine-cosine optimization-based bijective substitution-boxes construction using enhanced dynamics of chaotic map. *Complexity*, 2018.
[35] Ahmad, M., Khaja, I. A., Baz, A., Alhakami, H., & Alhakami, W. (2020). Particle swarm optimization based highly nonlinear substitution-boxes generation for security applications. *IEEE Access*, 8, 116132-116147.
[36] Kang, M., & Wang, M. (2022). New Genetic Operators for Developing S-Boxes With Low Boomerang Uniformity. *IEEE Access*, 10, 10898-10906.
[37] Zamli, K. Z., Din, F., & Alhadawi, H. S. (2023). Exploring a Q-learning-based chaotic naked mole rat algorithm for S-box construction and optimization. *Neural Computing and Applications*, 1-23.
[38] Mirjalili, S. (2016). SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-based systems*, 96, 120-133.
[39] Webster, A. F., & Tavares, S. E. (1985, August). On the design of S-boxes. In Conference on the theory and application of cryptographic techniques (pp. 523-534). Springer, Berlin, Heidelberg.
[40] Biham, E., & Shamir, A. (1991). Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems. *Journal of CRYPTOLOGY*, 4(1), 3-72.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 244-254, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1329328
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi- Research Article

Huntington Hastalığı ile İlişkili *ERN1* ve *TRAF2* Genlerindeki Yanlış Anlamlı SNP'lerin *In Silico* Değerlendirilmesi

In Silico Evaluation of Missense SNPs in *ERN1* and *TRAF2* Genes Associated with Huntington's Disease

Nurbanu Tanrıverdi[1], Ömer Faruk Karasakal[2*], Mesut Karahan[3]

Geliş / Received: 18/07/2023 ***Revize / Revised: 19/10/2024*** ***Kabul / Accepted: 07/11/2023***

ÖZ

Huntington hastalığı (HD), kromozomun 4. kolundaki HTT genindeki CAG trinükleotidlerinin tekrarı sonucu beyin nöronlarında ciddi dejenerasyona neden olan ve ölümle sonuçlanabilecek bir hastalıktır. Bu çalışma, Huntington hastalığı ile ilişkili *ERN1* ve *TRAF2* genlerinin yanlış anlamlı SNP'lerinde potansiyel olarak zararlı etkileri olanların biyoinformatik yazılım araçları kullanılarak belirlenmesini ve bunların proteinlerin fonksiyonları ve stabilizasyonu üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesini amaçlamıştır. Yanlış anlamlı SNP'lerin potansiyel olarak zararlı etkilerini tahmin etmek için SNAP2, SIFT, PolyPhen-2 (HumDiv ve HumVar), SNPs&GO, PhD-SNP, PANTHER ve Meta-SNP, protein stabilizasyonu için I-Mutant 2.0 ve MUpro, üç boyutlu modelleme için Project HOPE, gen-gen etkileşimleri için GeneMANIA ve protein-protein etkileşimlerinin belirlenmesi için STRING yazılım araçları kullanıldı. Huntington hastalığı ile ilişkili *ERN1* ve *TRAF2* genleri için 7 farklı programda 8 yazılım aracı kullanılarak 7'si ve üzerinde ortak zararlı etkiye sahip olan varyantlar seçildi. Sonuç olarak hastalıkla ilişkili olduğu düşünülen *ERN1* ve *TRAF2* genleri için toplam 4 varyant belirlendi. *ERN1* geni için rs138082110 (S224C), rs199512451 (G133R), rs370210153 (P623Q) varyantlarının, *TRAF2* geni için ise rs144405558 (C469R) varyantının olası zararlı etkiye sahip olabileceği çalışma sonucunda belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Huntington hastalığı ile ilgili yapılacak ileri araştırmalarda ve deneysel çalışmalarda fayda sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler- Huntington Hastalığı, ERN1, TRAF2, Biyoinformatik Analiz

ABSTRACT

Huntington's disease (HD) is a disease that results from the repetition of CAG trinucleotides in the HTT gene in the 4th arm of the chromosome, causing severe degeneration of brain neurons and may result in death. This study aimed to identify those with potentially harmful effects in the missense SNPs of *ERN1* and *TRAF2* genes associated with Huntington's disease, using bioinformatics software tools, and to evaluate their impact on the functions and stabilization of proteins. SNAP2, SIFT, PolyPhen-2 (HumDiv and HumVar), SNPs&GO, PhD-SNP, PANTHER

[1]İletişim: tanriverdi.nurbanu@outlook.com (https://orcid.org/0009-0000-7934-3476)
Fen Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoloji Anabilim Dalı, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[2*] Sorumlu Yazar İletişim: omerfaruk.karasal@uskudar.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-7803-3249)
Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Laboratuvar Teknikleri, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
[3]İletişim: mesut.karahan@uskudar.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8971-678X)
Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Laboratuvar Teknikleri, Üsküdar Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

and Meta-SNP to predict potentially deleterious effects from missense SNPs, I- Mutant 2.0 and MUpro for protein stabilization, Project HOPE for three-dimensional modeling, GeneMANIA for gene-gene interactions and STRING software tools for determination of protein-protein interactions were used. For *ERN1* and *TRAF2* genes associated with Huntington's disease, variants with 7 or more common deleterious effects were selected using 8 software tools in 7 different programs. As a result, a total of 4 variants were identified for the *ERN1* and TRAF2 genes, which were thought to be associated with the disease. As a result of the study, it was determined that the rs138082110 (S224C), rs199512451 (G133R), rs370210153 (P623Q) variants for the ERN1 gene and the rs144405558 (C469R) variant for the *TRAF2* gene may have potentially harmful effects. The data obtained as a result of these studies will be beneficial in further research and experimental studies on Huntington's disease.

Keywords- Huntington's Disease, ERN1, TRAF2, Bioinformatics Analysis

I. GİRİŞ

Huntington hastalığı (HD), nadir görülen bir hastalık olmakla birlikte, otozomal kalıtsal hastalık olup, istem dışı anormal hareketlere, bilişsel ve davranışsal bozukluklara neden olan ölümle sonuçlanabilen nörodejeneratif bir hastalık olarak tanımlanmaktadır [1,2] Huntington hastalığının Asya ve Afrika popülasyonlarında görülme sıklığı düşük, Batı Avrupa popülasyonlarında ise görülme sıklığı yüksek olarak bildirilmiştir. Dünya genelinde ise insidansının 5-10 kişi/100.000 olduğu görülmektedir [3]. Huntington hastalığında her hastanın kendine özgü bulguları bulunmaktadır. Bazı ilaç ve tedavi yöntemleri görülse dahi henüz net bir tedavi sürecinin olmadığı literatürde bildirilmiştir [4]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda Endoplazmik retikulum stres faktörünün nörodejeneratif hastalık patolojisi arasında ilişki olduğu tespit edilmiştir [5,6]. Endoplazmik retikulum stres faktörü nörodejeneratif hastalıklar gibi birçok hastalığın başlangıcında ve ilerlemesinde önemli etki göstermektedir [7]. Endoplazmik retikulum stresi sırasında ortaya çıkan yanlış katlanmış ya da katlanmamış olan proteinlerin birikmesi sonucunda katlanmamış protein tepkisinin (UPR) parçası olarak apoptozu indüklemektedir [8,9]. Aynı zamanda ER membranında bulunan *ERN1, PERK* ve *ATF6* katlanamamış protein (UPR) tepkisini aktive ederek apoptozu başlatmaktadır [10]. ER stres yolaklarından olan *ERN1* ve *TRAF2* genlerinin (https://www.genome.jp/kegg/pathway.html) ER stres yollarının detaylı incelenmeleri sonucunda Mhtt birikimlerinin otofaji akışının inhibisyonundan kaynaklandığı belirtilmiştir [11]. ER stres faktörlerinden olan *ERN1* Huntington hastalığı patogenezine katılabilmektedir. ER stres faktörleri giderilemediğinde *ERN1* hücre ölümünü indükleyerek apoptozu başlatmaktadır [6]. Yüksek ER stresi altında kalan *ERN1* mRNA'nın işlevini bozarak antiapoptatik proteinlerde mRNA'ların parçalanması ile hücrelerin ölümüne neden olarak apoptoz meydana gelmektedir [12,13]. *ERN1* ve *TRAF2* kompleksi MAP/JNK yolunu aktive ederek otofajiyi başlatarak apoptozu desteklemektedir [14]. Ayrıca *ERN1 ve TRAF2* kompleksleri apoptoz sinyal düzenleyicilerden olan kinaz1 (ASK1) ve JNK'ye ilave olarak NF-κB sinyalinin etkinleştirilmesine dahil olmaktadır [15,16]. *ERN1* ve *TRAF2* yolaklarının daha ileri boyutlarının incelenmesi sonucunda otofajik inhibisyona bağlı olarak hücrelerde ölüme neden olduğu bulunmuştur [11]. Genetik hastalıklarda ve otonom sinir sistemi hastalıkları ile ilişkili olan genlerin kapsamlı araştırılmasında SNP analizlerinden faydalanılmaktadır [17]. Bu analizler ile birlikte hedef genlerin tespiti, elde edilen verilerin analizi açısından kolaylıklar sağlaması, hastalıklardaki anormal semptomların incelenmesi ve ilaç keşif çalışmalarının yapılmasına yardımcı olmayı hedeflemesinin yanı sıra maliyet açısında etkin bir avantajda sağlamaktadır [18]. Huntington Hastalığına neden olan CAG tekrarı ile oluşan mutant genlerin SNP çalışmaları ile susturulabileceği düşünülmektedir [19]. Tek nükleotit polimorfizm (SNP) çalışmaları kanser, diyabet, cilt hastalıkları ve nörodejeneratif hastalıklar gibi çoklu gen hastalıklarının tanınıp çalışılmasında önemli yer sağlamaktadır [20].

SNP'ler bireylerdeki hastalıklara yatkınlık ve tedaviye yanıtlarındaki farklılıklarından dolayı klinik araştırmalar açısından önemli bir yere sahiptir [21]. DNA polimorfizm çeşitlerinde birincil polimorfizm olan ve DNA dizilimindeki değişikliklere neden olabileceği düşünülen polimorfizm olan Restriksiyon Parçaları Uzunluk Polimorfizm'leri (RFLP), daha sonra çok sayıda genetik hastalıkların haritalanmasında ve bu hastalıklardan sorumlu olan genleri izole eden Değişken Sayılı Bitişik Tekrarlar (VNTR) olan ikincil polimorfizmler keşfedilirken, üçüncül polimorfizm olarak bireyler arasında farklılık meydana getiren ve kimliklendirme yaptığı düşünülen mikrosatelit (Short Tandem Repeats-STR) ve takiben kopya sayısı çeşitliliği ile dördüncü polimorfizm olarak adlandırılan Tek Nükleotit Polimorfizmleri tanımlanmıştır [22,24]. SNP'ler DNA'da kodlanan ve kodlanmayan dizilerinde ya da genler arası bölgelerinde görülebilmektedir [24]. Kodlanma bölgesinde bulunan

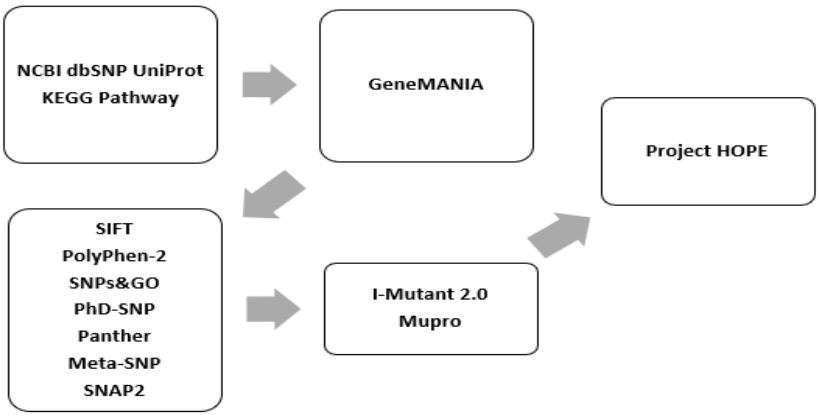
SNP'ler sinonim ve sinonim olmayan bölgeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Sinonim olan SNP'ler kendi içinde yanlış anlamlı ve anlamsız olmak üzere iki kategoride incelenmektedir. Anlamsız SNP'ler durdurma kodonlarında oluşan mutasyonlar sonucunda farklı fonksiyonel özelliğe sahip protein oluşumuna neden olmaktadır [25]. Yanlış anlamlı SNP'ler ise bir amino asidi kodlayan kodonun farklı bir amino asidi kodlaması sonucunda proteinleri işlevsiz hale getirerek hastalık oluşumuna neden olabilmektedir [26]. DNA dizisindeki farklılıklardan oluşan polimorfizmler hastalıklar ile ilişkilendirilebilmektedir [27]. Huntington hastalığına neden olan kalıtsal polimorfizmlerin araştırılması, Huntington hastalığı ile ilişkili genlerin belirlenmesinde de önemli bir rol oynamaktadır [28].

Bu çalışmada Huntington hastalığı ile ilişkili olduğu bilinen *ERN1* ve *TRAF2* genlerindeki yanlış anlamlı SNP'lerin tespit edilerek farklı ve literatürde yaygın olarak tercih edilen biyoinformatik internet tabanlı yazılım araçlarını kullanılarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan *in siliko* analizde 7 farklı programda 8 yazılım aracı kullanılarak 7'si ve üzerinde ortak zararlı etkiye sahip olan varyantlar belirlenerek olası zararlı etkiye sahip olduğu tahmin edilen SNP'lerin aynı zamanda proteinin işlevini, yapısını ve stabilizasyonu üzerine etkileri değerlendirilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

A. Veri Eldesi ve İş Akışı

Huntington hastalığı ile ilişkili olan *ERN1* ve *TRAF2* genlerindeki yanlış anlamlı SNP'lerin *in siliko* analizlerini yapabilmek için kullanılan biyoinformatik yazılım araçları şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Biyoinformatik Akış Şeması

B. Biyoinformatik Analizler

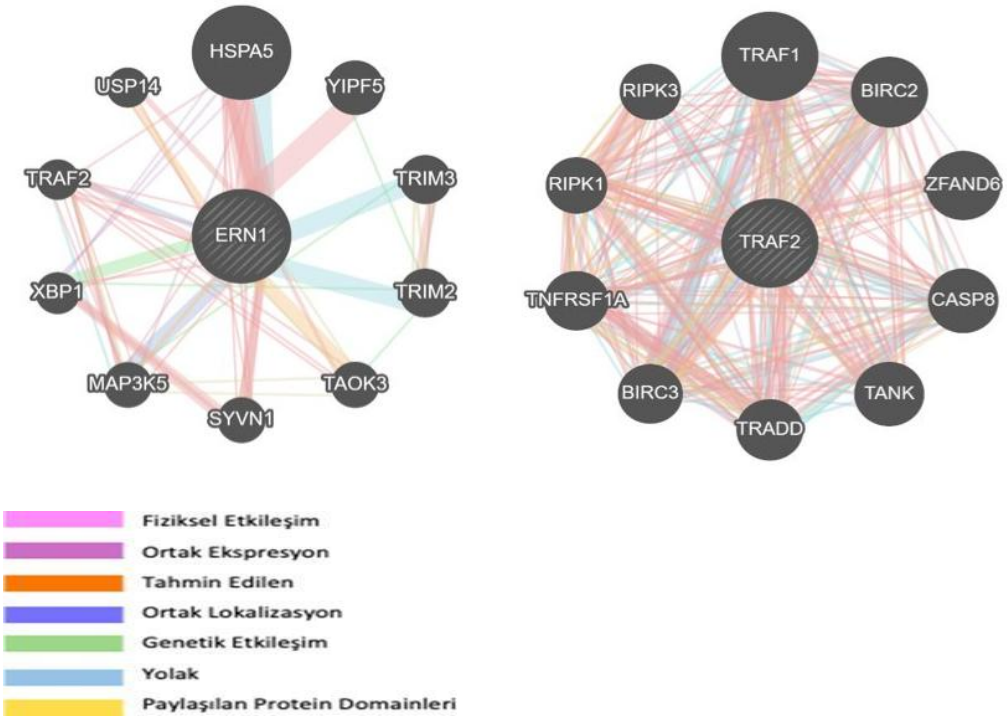
NCBI veri tabanından elde edilen bilgilere göre *ERN1* geni için toplam 33486 SNP sayısından 740 adet yanlış anlamlı SNP, *TRAF2* geni için ise 23398 SNP sayısından 434 adet yanlış anlamlı SNP tespit edilmiştir. Bu yanlış anlamlı SNP'lerde internet tabanlı kamuya açık yazılım araçları kullanılarak olası zararlı etkiye sahip olanlar tahmin edilmiştir. Yazılım araçlarından SIFT, bir proteindeki aminoasit ikamelerinin fenotipik olarak zararlı veya tolere edilebilir etkiye sahip olup olmayacağını tahmin etmektedir [29]. PolyPhen-2, proteinlerin aminoasit dizilerindeki değişimi, protein yapısını ve işlevi üzerindeki olası etkisini tahmin etmektedir [30]. SNPs&GO, proteinin fonksiyonel verilerini kullanarak olası zararlı SNP'lerin tahmini için kullanılmaktadır [31]. PhD-SNP, insanlarda hastalıkla ilişkili olduğu düşünülen zararlı SNP'leri tahmin etmektedir [32]. SNAP2, çeşitli sekansları ve varyant boyutlarını değerlendirerek varyantların fonksiyonel işlev ve etkilerini belirlemektir [33]. PANTHER, gen ve proteinlerin sınıflandırılması ve analizleri için tasarlanmış yazılım programıdır [34]. Meta-SNP protein varyasyonlarının hastalıkla ilişkili olup olmadığını ve polimorfizm olarak sınıflandırılıp sınıflandırılmayacağını belirlemede kullanılan yazılım aracıdır [35]. Proteinlerin stabilizasyonuna olan etkileri için MUpro ve I-Mutant 2.0 kullanılmıştır. I-Mutant 2.0, proteinlerin yapısında ya da protein dizilerinden tek bir alandaki varyasyon üzerindeki değişimi analiz etmek için kullanılan yazılım aracıdır. [36]. Mupro, tek bölgedeki aminoasit dizilişindeki varyasyonların protein stabilitesi ve katlanmaları üzerine etkisini tahmin etmede kullanılmaktadır [37]. Project HOPE, varyantların amino asit ikamesinin yapısal özelleri birlikte boyut, yük ve hidrofobikliği açısından değerlendirme yapmasının yanı sıra protein yapılarının üç boyutlu (3B) modelleri ile ilgili rapor

vermektedir [38]. Gen-gen etkileşimleri için kullanılan GeneMANIA, en temel anlamda çok amaçlı fonksiyonel veri kanallarını kullanarak belirlenen genlerin diğer genlerle olan fonksiyonel ilişkisini bulmak için kullanılmaktadır [39]. Protein-Protein etkileşimlerinin belirlenmesi için kullanılan STRING yazılım aracı ile işlevsel protein-protein etkileşimlerini ve biyolojik süreçleri ile birlikte fiziksel etkileri değerlendirilmiştir [40].

III. BULGULAR

A. ERN1 ve TRAF2 Gen-Gen Etkileşimleri

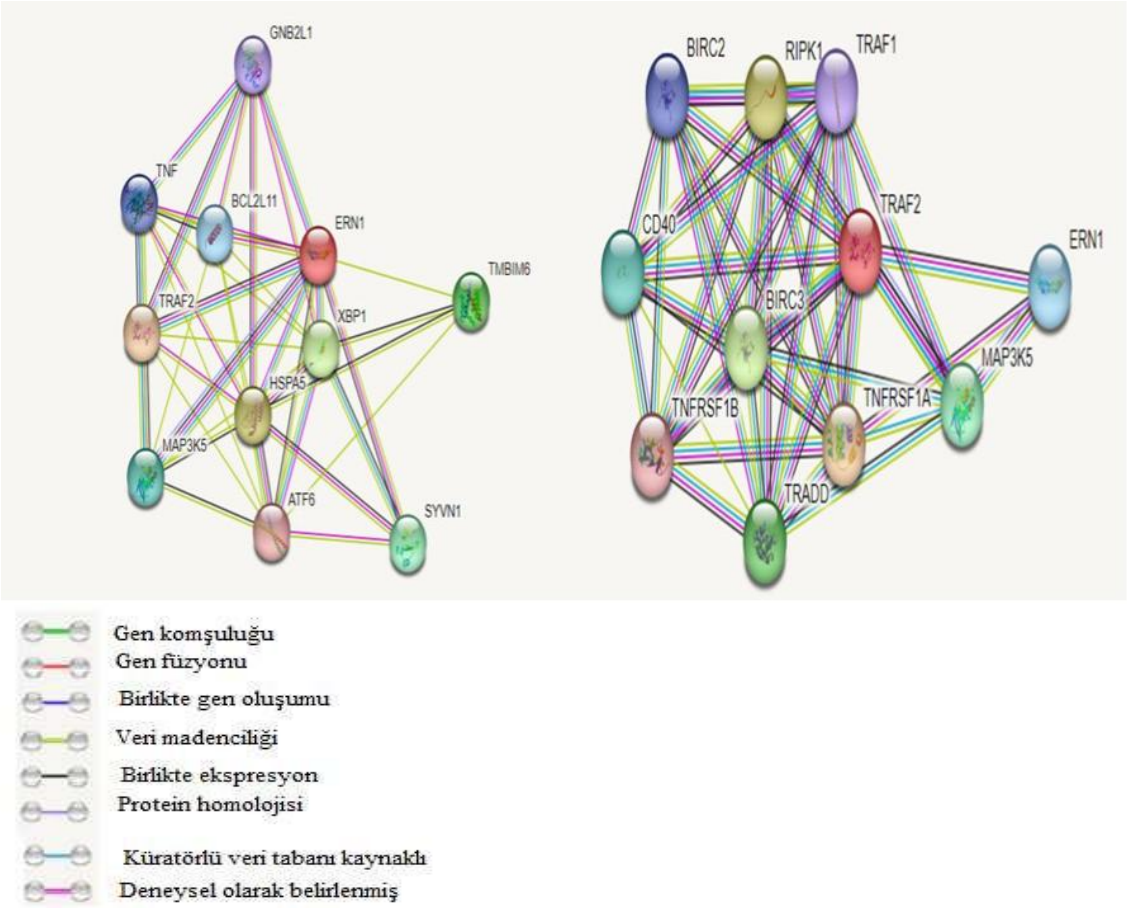
GeneMANIA Birden fazla genlerin birbiri ile etkileşimlerini tahmin etmede kullanılan yazılım aracıdır [41]. *ERN1* ve *TRAF2* genleri için GeneMANIA yazılım aracından elde edilen gen-gen etkileşimleri Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. *ERN1* ve *TRAF2* gen-gen etkileşimi

B. ERN1 ve TRAF2 Protein-Protein Etkileşimleri

Biyomoleküller ağlar arasında protein-protein etkileşimleri çok yönlülük ve özgüllüğün belirlenmesi ile birlikte hem fiziksel hem de fonksiyonel ilişkileri birleştirmeyi amaçlamıştır [42]. Protein- protein etkileşimleri hücresel biyolojik süreçleri önemli ölçüde etkilediğinden dolayı bu etkileşimlerin tanımlanması yaşam aktivitelerinin yapısına katkı sağlamaktadır [43]. *ERN1 ve TRAF2* genleri için STRING yazılım aracından elde edilen protein-protein etkileşimleri Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. *ERN1* ve *TRAF2* protein-protein etkileşimi

ERN1 ve *TRAF2* genlerinde yapılan *in silico* analizler sonucunda *ERN1* geninde yer alan yanlış anlamlı SNP'lerden 3 varyantın, *TRAF2* de ise 1 varyantın olası zararlı etkiye sahip olduğu bulunmuştur. *ERN1* ve *TRAF2* genlerine ait yazılım araçlarından alınan bu bilgiler Tablo 1'de gösterilmektedir. *ERN1* ve *TRAF2* genlerinde tespit edilen varyantların I-Mutant 2.0 ve MUpro programlarının veri analizleri sonucunda tüm varyantların protein stabilizasyonuna olan etkisinin azalan olduğu tespit edilmiştir ve Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. *ERN1* ve *TRAF2* Genleri SNP analizleri yazılım araçlarındaki tahmin sonuçları

SNP NUMARASI	***ERN1* GEN rs138082110**	***ERN1* GEN rs199512451**	***ERN1* GEN rs370210153**	***TRAF2* GEN rs144405558**
Amino asit değişimi	(S224C)	(G133R)	(P623Q)	(C469R)
Snap2 Sonucu	Etkili	Etkili	Etkili	Etkili
SNAP2 Skoru	30	38	57	51
SNAP2 Doğrulama Oranı	%66	%91	%66	%85
SIFT Sonucu	Zararlı	Zararlı	Zararlı	Zararlı
SIFT Skoru	0.032	0.001	0.002	0
Polyphen2 (HumDiv) Sonucu	Muhtemelen Zararlı	Muhtemelen Zararlı	Muhtemelen Zararlı	Olası Zararlı
Polyphen2 (HumDiv) Skoru	0.990	1	0.998	0.999
Polyphen2 (HumVar) Sonucu	Muhtemelen Zararlı	Muhtemelen Zararlı	Muhtemelen Zararlı	Olası Zararlı
Polyphen2 (HumVar) Skoru	0.999	0.999	0.986	0.993
SNPs&GO Sonucu	-	-	-	Hastalık İlişkili

SNPs&GO Skoru	-	-	-	8
PhD-SNP	Hastalık İlişkili	Hastalık İlişkili	Hastalık İlişkili	Hastalık İlişkili
RI	3	5	1	6
PANTHER	Olası Zararlı	Olası Zararlı	Olası Zararlı	Olası Zararlı
Pdel Skoru	0.85	0.89	0.85	0.85
Meta-SNP Sonucu	Hastalık İlişkili	Hastalık İlişkili	Hastalık İlişkili	Hastalık İlişkili
Meta SNP Skoru	0.651	0.747	0.568	0.824
I-Mutant 2.0 Tahmin sonucu	Azalan	Azalan	Azalan	Azalan
Güvenlik İndeksi Gİ	4	8	9	6
MUpro Analiz Sonucu	Azalan	Azalan	Azalan	Azalan
Serbest Enerji Değişim Değeri (DDG)	-13.752.949	-0.37544877	-92377539	-1,0368671

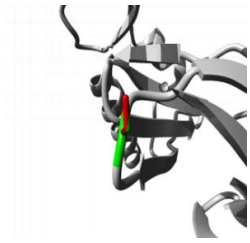
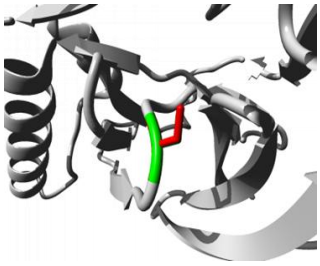
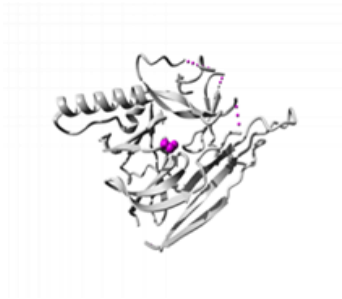
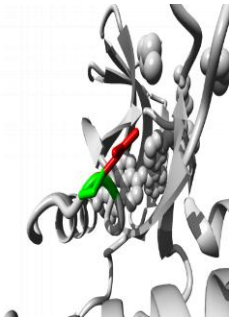
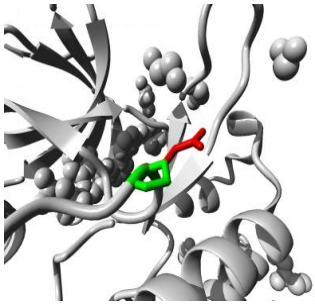
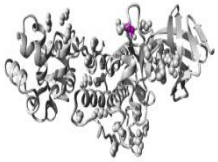
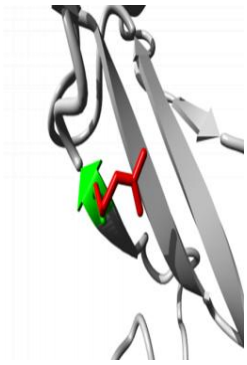
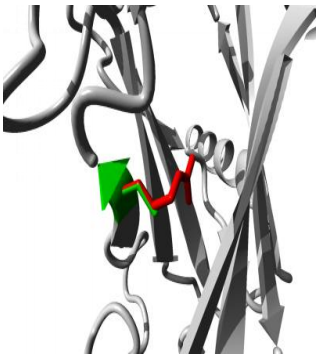
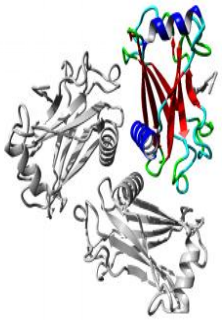
C. Project HOPE Sonuçları

Project HOPE mutasyonların yapısal etkilerini analiz etmede kullanılan yazılım aracıdır [44]. *ERN1 ve TRAF2* genlerine ait varyasyonlar Project HOPE sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Üç boyutlu modellemeleri ise Tablo 3' te gösterilmiştir.

Tablo 2. *ERN1* ve *TRAF2* genine ait yabanıl ve mutant tip aminoasitlerin Project Hope yazılım aracı sonuçları

SNP NUMARASI	**AMİNO ASİT DEĞİŞİMİ**	
ERN1 **rs138082110 S224C**		S224C varyantında 224. pozisyonda Serin amino asidinin Sistein amino asidine değişimi
ERN1 **rs199512451 G133R**		G133R varyantında 133. pozisyonunda Glisin amino asidinin Arjinin amino asidine değişimi
ERN1 **rs370210153 P623Q**		P623Q varyantında 623. pozisyonunda Prolin amino asidinin Glutamin amino asidine değişimi
TRAF2 **rs144405558 C469R**		C469R varyantında 469. pozisyonunda Sistein amino asidinin Arjinin amino asidine değişimi

Tablo 3. *ERN1* ve *TRAF2* genine ait varyasyonların üç boyutlu gösterimi

SNP Numarası	**Polimorfizm Bölgelerinin Yakından Görünümleri** (Protein gri renkte gösterilmiş olup, yabanıl (yeşil) ve mutant (kırmızı) rezidüler tablo içerisinde ilgili sütunda gösterilmiştir.)		**Mutant Proteinin üç boyutlu görünümü**
rs138082110 ***ERN1*** **S224C**			
rs370210153 ***ERN1*** **P623Q**			
rs144405558 ***TRAF2*** **C469R**			

SNP'lerin Project HOPE yazılım aracılığı ile belirlenen özellikleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. *ERN1* ve *TRAF2* Genleri İçin Yabanıl ve Mutant Varyantların Sonuçları

SNP NUMARASI	**AMİNO ASİT DEĞİŞİMİ**	**YABANIL TİP ÖZELLİK**			**MUTANT TİP ÖZELLİK**		
		BOYUT	**YÜK**	**HİDROFOBİKLİK**	**BOYUT**	**YÜK**	**HİDROFOBİKLİK**
ERN1 rs138082110	S224C	-	-	>	-	-	<
ERN1 rs199512451	G133R	<	Nötr	>	>	+Yük	<
ERN1 rs370210153	P623Q	>	-	<	<	-	>

TRAF2 rs144405558	C469R	<	Nötr	>	>	+Yük	<

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada Huntington hastalığı ile ilişkili *ERN1* ve *TRAF2* genlerindeki yanlış anlamlı SNP'lerin *in silico* analizi verilerinde *ERN1* geni için NCBI dbSNP veri tabanında 740 adeti yanlış anlamlı SNP olmak üzere toplamda SNP sayısı 33486 olarak tespit edilmiştir. *ERN1* geninde yer alan yanlış anlamlı SNP'lerin *in silico* yazılım araçları ile değerlendirilmesi sonucunda kamuya açık internet tabanlı yazılım araçlarında ortak zararlı etkiye sahip olduğu tespit edilenleri rs138082110 (S224C), rs199512451(G133R) ve rs370210153 (P623Q)'dir. *TRAF2* için ise toplam SNP sayısı 23398, yanlış anlamlı SNP sayısı 434 olarak belirlenmiştir ve rs14440558 (C469R) referans numaralarına sahip SNP'nin olası zararlı etkiye sahip olduğu tahmin edilmiştir.

2021 yılında yapılan bir çalışmada, Huntington hastalığında patolojik protein HTT'yi hedeflemek için varsayılan proteinlerin agregasyonunu önlediği bilinen çeşitli etkin peptitleri karşılaştırılmalı olarak Swiss-model *in silico* yazılım aracı kullanarak analizleri gerçekleştirilmiş ve hastalığın tedavisinde kullanılmak üzere yeni peptidler keşfetmişlerdir [45]. Aynı yılda yapılan başka bir çalışmada, nörodejeneratif hastalıklarda etkisi olan *GOT1* geni ve mutasyonlarını, PROVEAN, Mutation Assesor, PANTHER, PolyPhen-2, PMut, SNAP, PhD-SNP, SNPs&GO, I-Mutant in silico yazılım araçları kullanarak SNP analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarında L36R, W162C, L345P olmak üzere 4 mutasyonun *GOT1* geni üzerinde zararlı etkiye neden olduğunu bulmuşlardır [46]. 2019 yılında gerçekleştirilen farklı bir çalışmada ise, BDNF varyantlarının proteinler üzerindeki zararlı mutasyonların belirlenmesinde, PhD-SNP, P-Mut, PolyPhen-2, SIFT, SNAP, SNPs&GO, VarMod, NP Effect 4.0, mutasyonların işlevi ve kararlılığını üzerindeki etkilerini analiz etmek içinse I-Mutant 2.0 *in silico* yazılım aracını kullanmışlardır. Araştırma sonucunda, BDNF'nin insanlarda en yaygın olan mutasyonu V66M'nin hastalıkla ilişkili olacağı sonucuna varmışlardır [47]. Yukarıda örneklendirilen bazı çalışmalarda görüldüğü üzere i*n silico* araştırmaların polimorfizm çalışmalarında sıklıkla kullanıldığı literatürde görülmektedir. Huntington hastalığı ile ilgili 2021 yılında yapılan deneysel bir çalışmada, araştırmacı *ERN1* ve Tip 2 Diyabet (T2D) ilişkisini incelemek amacıyla, *ERN1* geninin SNP'leri ile Tip 2 Diyabet riski arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Çalışmaya 1558 T2D hastası (586 erkek ve 972 kadın) ve 1611 (618 erkek ve 993 kadın) sağlıklı birey dahil etmiştir. *ERN1*'in düzenleyici bölgesinde yer alan rs196914 ve rs9911085 gibi iki yaygın SNP geni, MassArray Analyzer-4 sistemi ile genotiplenmiştir. rs196914-rs9911085 'nin aşırı kilolu ve obez deneklerde (yani BMI>25 kg/m2) T2D riski ile ilişkili olduğu sonucunu bulmuştur (p=0.004). [48]. 2020 yılında ABD'deki 7 tesiste, HD'li 202 denekten, CAG tekrarlarının sayısını ve boyutunu, SNP'lerin varlığını, heterozigotluğunu ve uzun okumalı dizileme ve fazlama kullanılarak mutant *HTT* aleli üzerinde SNP'lerin bulunup bulunmadığını belirlemek amacıyla merkezi olarak işlenen kan örnekleri sağlamışlardır. Çalışmaları sonucunda, SNP1 ve/veya SNP2'nin heterozigotluğu146 (%72) kişide tanımlanmışlardır. Bu 2 polimorfizm, bireylerin %61'inde (%95 yüksek yoğunluk aralığı: %55, %67) yalnızca Mhtt aleli ile ilişkilendirildiğini tespit etmişlerdir [49]. 2013'te deneysel bir çalışmada *ise, o*ksidatif strese verilen yanıtlarla ilişkilendirilen, *OGG1* ve *XPC* genlerindeki tek nükleotid polimorfizmlerinin (SNP) HD'nin başlangıç yaşı ile ilişkili olup olmadığını değerlendirmek amacıyla, HD'li 299 bireyde ve 582 kontrolde 9 SNP genotiplenmiştir. *OGG1* ve *XPC* haploitlerinin HTT içindeki CAG tekrarlarının sayısından bağımsız olarak başlangıçta genç yaşla ilişkili olduğu bulmuşlardır. Ayrıca bu iki haploitten bir tanesinde, daha düşük bir 8-*oxoG* onarım aktivitesi ile ilişkili olan ve özellikle hücresel redoks durumuna duyarlı OGG1 -326Cys (rs1052133) aleli içerdiğini söylemektedirler. Çalışma sonucunda, oksidatif stresin HD başlangıcındaki yaşı belirlemedeki potansiyel rolü olduğunu vurgulamışlardır [50]. 2010 yılında, HD'li 91 İtalyan denekten kan DNA'sı üzerinde yapılan bir çalışmada, mutant Cys326 alel (Ser326Cys + Cys326Cys) taşıyıcılarının, genişlemiş HD alelinin (P = 0.049) artan sayıda CAG tekrarına sahip olma eğiliminde olduklarını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak HD'li bireyler ve sağlıklı deneklerden oluşan kontrol grupları arasında, *hOGG326* Ser200Cys aleli ve genotip frekanslarında fark bulunmadığı ve bu durum sonucunda HD deneklere tercihli alel iletimi olmadığını çalışmacılara düşündürmüştür [51].

ERN1 geninde, G133R varyantında mutant tip rezidü, yabanıl tip rezidüden boyut olarak büyüktür. Bu boyut farklılığı nedeniyle mutant rezidünün proteinin çekirdeğine sığamayabileceği düşünülebilmektedir. P623Q varyantında ise, yabanıl tip rezidü mutant tipe göre boyut olarak büyüktür ve bu sebeple protein çekirdeğinde boş bir alan oluşumuna sebep olabileceği öne çıkmaktadır. *TRAF2* geninde ise C469R varyantında mutant tip rezidü yabanıl tipe göre büyüktür ve bu boyut farklılığı yapının bozulmasına neden olabilir. *ERN1* geninde S224C ve

G133R varyantlarında mutant tip rezidü, yabanıl tip rezidüye göre daha az hidrofobiktir. Bu durum sonucunda etkileşim kayıpları meydana gelebilmektedir. *TRAF2* geninde hidrofobik etkileşimler değerlendirildiğinde ise C469R varyantında mutant tip rezidü, yabanıl tip rezidüye göre daha az hidrofobiktir ve hidrofobiklik farklılığından dolayı proteinde etkileşim kayıplarının ortaya çıkabileceği düşünülebilir [38]. Hidrofobik etkiler, proteinlerin katlanmasında itici güç olsalar bile, elektrostatik etkileşimler proteinlerin katlanması, esneklik, stabilitesi ve fonksiyonlarında önemli rol oynamaktadır [52]. *ERN1* geni G133R varyantında elektriksel yük açısından yabanıl rezidü nötr mutant rezidü ise pozitif olarak belirlenmiştir. Yük verilerinde aynı yüke sahip olan ligandlar birbirlerini itebilmektedir [38].

ERN1 ve *TRAF2* genlerinde olası zararlı etkiye sahip olduğu tüm programlarca tespit edilen SNP'lerinin protein stabilizasyonları üzerine etkilerini araştırmak için I-Mutant 2.0 ve MUpro yazılım araçları kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda her iki programda da *ERN1* geninde rs138082110 (S224C), rs199512451(G133R), rs370210153 (P623Q) *TRAF2* geninde ise rs144405558 (C469R) SNP'lerinin protein stabilitesini azalttığı tespit edilmiştir.

V. SONUÇLAR

Huntington hastalığı ile ilişkilendirilen *ERN1* ve *TRAF2* genleri için yüksek riskli olabileceği tahmin edilen toplamda 4 varyant saptanmıştır. Yanlış anlamlı SNP'lerin olası zararlı etkilerini tahmin etmek için SNAP2, SIFT, PolyPhen-2 (HumDiv ve HumVar), SNPs&GO, PhD-SNP, PANTHER ve Meta-SNP, protein stabilizasyonu için I-Mutant 2.0 ve MUpro, üç boyutlu modelleme için Project HOPE yazılım araçları kullanılmıştır. *ERN1* genine ait rs138082110 (S224C), rs199512451(G133R), rs370210153 (P623Q), *TRAF2* genine ait rs144405558 (C469R) polimorfizmlerinin zararlı olabileceği belirlenmiştir. Gen-gen etkileşimlerinin değerlendirilmesi için GeneMANIA yazılım aracı kullanılmış ve *ERN1* geni için maksimum etkileşimli ilk 5 gen *YIPF5, TRIM2, TRIM3, HSPA5* ve *TAOKK3* olarak tespit edilmiştir. *TRAF2* geni için ise *TANK, BIRC2, TRAF1, ZFAND6, CASP8* genleri yazılım aracı ile belirlenmiştir. Protein-protein etkileşimleri içi kullanılan STRING yazılım aracılığı ile *ERN1* ve *TRAF2* genlerinin işlevsel protein-protein etkileşimlerini ve fiziksel etkileri araştırılmıştır. *ERN1* geni için TRAF2, HSPA5, SYVN1, XBP1, TMBIM6, *TRAF2* geni için ise RIPK1, TNFRSF1A, MAP3K5, BIRC, TRADD proteinleri tespit edilmiştir.

Huntington hastalığı ile yapılan bu çalışma sonucunda *ERN1* ve *TRAF2* genlerindeki yüksek riskli olabileceği tahmin edilen SNP'lerin, ileride gerçekleştirilecek farklı genotipleme araştırmalarında SNP seçimi konusunda destek sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada *in silico* olarak zararlı etkilerinin olabileceği tahmin edilen bu SNP'lerin *ERN1* ve *TRAF2* genleri ile yapılacak olan deneysel çalışmalarda tercih edilebileceği bildirilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Pantiya, P., Thonusin, C., Chattipakorn, N., & Chattipakorn, S. C. (2020). Mitochondrial abnormalities in neurodegenerative models and possible interventions: Focus on Alzheimer's disease, Parkinson's disease, Huntington's disease. *Mitochondrion*, *55*, 14-47.

[2] Lemoine, L., Lunven, M., Fraisse, N., Youssov, K., Bapst, B., Morgado, G., ... & Bachoud-Lévi, A. C. (2023). The striatum in time production: The model of Huntington's disease in longitudinal study. *Neuropsychologia*, 179, 108459.

[3] Schapira, A. H., Olanow, C., Greenamyre, J., & Bezard, E. (2014). Slowing of neurodegeneration in Parkinson's disease and Huntington'sdisease: future therapeutic perspectives. *The Lancet*, 545-555.

[4] Dong, X., & Cong, S. (2021). MicroRNAs in Huntington's disease: Diagnostic biomarkers or therapeutic agents *Frontiers in cellular neuroscience*, 15, 705348.

[5] Kim, S., Kim, D. K., Jeong, S., & Lee, J. (2022). The common cellular events in the neurodegenerative diseases and the associated role of endoplasmic reticulum stress. *International journal of molecular sciences*, *23*(11), 5894.

[6] Chen, L., Bi, M., Zhang, Z., Du, X., Chen, X., Jiao, Q., & Jiang, H. (2022). The functions of IRE1α in neurodegenerative diseases: beyond ER stress. *Ageing Research Reviews*, 101774.

[7] da Silva, D. C., Valentão, P., Andrade, P. B., & Pereira, D. M. (2020). Endoplasmic reticulum stress signaling in cancer and neurodegenerative disorders: Tools and strategies to understand its complexity. *Pharmacological Research*, *155*, 104702.

[8] Krammes, L., Hart, M., Rheinheimer, S., Diener, C., Menegatti, J., Grässer, F., ... & Meese, E. (2020). Induction of the Endoplasmic-reticulum-stress response: MicroRNA-34a targeting of the IRE1α-branch.

Cells, *9*(6), 1442.
[9] Wu, H., Ng, B. S., & Thibault, G. (2014). Endoplasmic reticulum stress response in yeast and humans. *Bioscience reports*, *34*(4), e00118.
[10] Shi, M., Chai, Y., Zhang, J., & Chen, X. (2022). Endoplasmic reticulum stress-associated neuronal death and innate immune response in neurological diseases. *Frontiers in immunology*, *12*, 794580.
[11] Maity, S., Komal, P., Kumar, V., Saxena, A., Tungekar, A., & Chandrasekar, V. (2022). Impact of ER stress and ER-mitochondrial crosstalk in Huntington's disease. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(2), 780.
[12] Ajoolabady, A., Lindholm, D., Ren, J. & Pratico, D. (2022). Alzheimer hastalığında ER stresi ve UPR: Mekanizmalar, patogenez, tedaviler. *Hücre ölümü ve hastalığı*, *13* (8), 706.
[13] Spencer, B. G., & Finnie, J. W. (2020). The role of endoplasmic reticulum stress in cell survival and death. *Journal of Comparative Pathology*, *181*, 86-91.
[14] Esmaeili, Y., Yarjanli, Z., Pakniya, F., Bidram, E., Łos, M. J., Eshraghi, M., ... & Zarrabi, A. (2022). Targeting autophagy, oxidative str
[15] Asveda, T., Priti, T., & Ravanan, P. (2023). Exploring microglia and their phenomenal concatenation of stress responses in neurodegenerative disorders. *Life Sciences*, 121920.
[16] Wang, C., Chang, Y., Zhu, J., Ma, R., & Li, G. (2022). Dual role of IRE1α-XBP1 signaling in neurodegenerative diseases. *Neuroscience*.ess, and ER stress for neurodegenerative disease treatment. *Journal of Controlled Release*, *345*, 147-175.
[17] Yarar, E. Z. (2021). Psikopatolojilerde gen-çevre etkileşimi: Stresle ilgili genetik ve epigenetik süreçler. *Klinik Psikoloji Dergisi*, *5*(3), 275-288.
[18] Ekşi, M. (2019). *SNP Mikroarray Yöntemi ile Kalıtsal Metabolik Hastalıklardan Sorumlu Genlerin Tanımlanması*. Yıldırım Beyazıt Üniversitesi/Sağlık Bilimleri Enstitüsü/Tıbbi Genetik Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. 24,24s, Ankara.
[19] Shin, J. W., Hong, E. P., Park, S. S., Choi, D. E., Zeng, S., Chen, R. Z., & Lee, J. M. (2022). PAM-altering SNP-based allele-specific CRISPR-Cas9 therapeutic strategies for Huntington's disease. *Molecular Therapy-Methods & Clinical Development*, *26*, 547-561.
[20] Sattari, A., Nicknafs, F. ve Noroozi, R. (2020). Uzun kodlamayan RNA'lardaki tek nükleotid polimorfizmlerinin insan hastalıklarına duyarlılıktaki rolü. *Ekolojik Genetik ve Genomik*, *17*, 100071.
[21] Özlem, G. Ö. K., Aslan, A., & Erman, O. (2017). İnsan ENCODE, HapMap ve 1000 Genom Projeler. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 33(2), 35-42.
[22] Tavacı, İ., Bülbül, Ö., Filoğlu, G., & Altunçul, H. (2020). X Kromozomunda Bulunan 15 SNP Lokusunun Türkiye Populasyonundaki Polimorfizmi. *Turkiye Klinikleri Journal of Forensic Medicine & Forensic Sciences*, *17*(3).
[23] Şenışık, M., Bülbül, Ö., & Filoğlu, G. (2023). Adli DNA Fenotipleme: Erkek Tipi Kellik: Geleneksel Derleme. *Turkiye Klinikleri Journal of Forensic Medicine & Forensic Sciences*, *20*(1).
[24] Kaman, T., Karasakal, Ö. F., Oktay, E. Ö., Ulucan, K., & Konuk, M. (2019). In silico approach to the analysis of SNPs in the human APAF1 gene. *Turkish Journal of Biology*, 43(6), 371-381.
[25] Robert, F., & Pelletier, J. (2018). Exploring the impact of single-nucleotide polymorphisms on translation. *Frontiers in genetics*, *9*, 507.
[26] Sukhumsirichart, W. (2018). Polymorphisms. In (Ed.), Genetic Diversity and Disease Susceptibility. IntechOpen.
[27] Fareed, M. M., Ullah, S., Aziz, S., Johnsen, T. A., & Shityakov, S. (2022). In-silico analysis of non-synonymous single nucleotide polymorphisms in human β-defensin type 1 gene reveals their impact on protein-ligand binding sites. Computational Biology and Chemistry, 98, 107669.
[28] Fidanoğlu, P. (2013). *Genom Ebadındaki Türk Popülasyonu Tnp Verilerinin Veri Tabanının Hazırlanması ve Sonuçların Hapmap Işığında Değerlendirilmesi*. Ankara Üniversitesi. Biyoteknoloji Enstitüsü Temel Biyoteknoloji Doktora Tezi, 7s, Ankara
[29] Ng, P. C., & Henikoff, S. (2001). Predicting deleterious amino acid substitutions. *Genome research*, *11*(5), 863-874.
[30] Adzhubei, I., Jordan, D. M., & Sunyaev, S. R. (2013). Predicting functional effect of human missense mutations using PolyPhen-2. *Current protocols in human genetics*, *76*(1), 7-20.
[31] Capriotti, E., & Altman, R. B. (2011). Improving the prediction of disease-related variants using protein three-dimensional structure. *BMC bioinformatics*, 12(4), 1-11.
[32] 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*(22), 2729-2734.
[33] Hecht, M., Bromberg, Y., & Rost, B. (2015). Better prediction of functional effects for sequence variants. *BMC genomics*, *16*(8), 1-12.
[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] Capriotti, E., Altman, R. B., & Bromberg, Y. (2013). Collective judgment predicts disease-associated single nucleotide variants. *BMC genomics*, *14*, 1-9.
[36] Bava, K. A., Gromiha, M. M., Uedaira, H., Kitajima, K., & Sarai, A. (2004). ProTherm, version 4.0: thermodynamic database for proteins and mutants. *Nucleic acids research*, *32*(suppl_1), D120-D121.
[37] 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.
[38] Venselaar, H., Te 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*(1), 1-10.
[39] Warde-Farley, D., Donaldson, S. L., Comes, O., Zuberi, K., Badrawi, R., Chao, P., ... & 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.
[40] Szklarczyk, D., Kirsch, R., Koutrouli, M., Nastou, K., Mehryary, F., Hachilif, R., ... & von Mering, C. (2023). The STRING database in 2023: protein–protein association networks and functional enrichment analyses for any sequenced genome of interest. *Nucleic acids research*, *51*(D1), D638-D646.
[41] Mustafa, M. I., Murshed, N. S., Abdelmoneim, A. H., & Makhawi, A. M. (2020). In silico analysis of the functional and structural consequences of SNPs in human ARX gene associated with EIEE1. *Informatics in Medicine Unlocked*, *21*, 100447
[42] Szklarczyk, D., Gable, A. L., Nastou, K. C., Lyon, D., Kirsch, R., Pyysalo, S., ... & von Mering, C. (2021). The STRING database in 2021: customizable protein–protein networks, and functional characterization of user-uploaded gene/measurement sets. *Nucleic acids research*, *49*(D1), D605-D612.
[43] Kermani, A. G., Kamandi, A., & Moeini, A. (2022). Integrating graph structure information and node attributes to predict protein-protein interactions. *Journal of Computational Science*, *64*, 101837.
[44] Yang, Z., Liu, M., Wang, B., & Wang, B. (2021). Classification of protein domains based on their three-dimensional shapes (CPD3DS). *Synthetic and Systems Biotechnology*, *6*(3), 224-230.
[45] Kohli, H., Kumar, P., & Ambasta, R. K. (2021). In silico designing of putative peptides for targeting pathological protein Htt in Huntington's disease. *Heliyon*, 7(2).
[46] Saxena, S., Murthy, T. K., Chandramohan, V., Yadav, A. K., & Singh, T. R. (2021). Structural and functional analysis of disease-associated mutations in GOT1 gene: An in silico study. *Computers in Biology and Medicine*, 136, 104695.https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104695
[47] De Oliveira, C. C. S., Pereira, G. R. C., De Alcantara, J. Y. S., Antunes, D., Caffarena, E. R., & De Mesquita, J. F. (2019). In silico analysis of the V66M variant of human BDNF in psychiatric disorders: An approach to precision medicine. *Plos one*, 14(4), e0215508. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215508
[48] Yu, K. E. (2022). Genetic Variation of Ern1 and Susceptibility To Type 2 Diabetes. *Научные результаты биомедицинских исследований*, 8(3), 268-277
[49] Claassen, D. O., Corey-Bloom, J., Dorsey, E. R., Edmondson, M., Kostyk, S. K., LeDoux, M. S., ... & Panzara, M. A. (2020). Genotyping single nucleotide polymorphisms for allele-selective therapy in Huntington disease. *Neurology Genetics*, 6(3).
[50] Berger, F., Vaslin, L., Belin, L., Asselain, B., Forlani, S., Humbert, S., ... & Hall, J. (2013). The impact of single-nucleotide polymorphisms (SNPs) in OGG1 and XPC on the age at onset of Huntington disease. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 755(2), 115-119.*
[51] Coppedè, F., Migheli, F., Ceravolo, R., Bregant, E., Rocchi, A., Petrozzi, L., ... & Migliore, L. (2010). The hOGG1 Ser326Cys polymorphism and Huntington's disease. *Toxicology*, *278*(2), 199-203.
[52] Kumar, S., & Nussinov, R. (2002). Close-range electrostatic interactions in proteins. *ChemBioChem*, 3(7), 604-617.https://doi.org/10.1002/1439-7633(20020703)

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 255-269, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1358233
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Pb-Cd in Maternal Blood and Affecting Factors

Maternal Kanda Kurşun-Kadmiyum ve Etkileyen Faktörler

Yılmaz Altuner[1], Yeşim Ömür[2], Suzan Onur[3*]

Geliş / Received: 13/09/2023 ***Revize / Revised: 15/11/2023*** ***Kabul / Accepted: 04/12/2023***

ABSTRACT

The exposure to Pb-Cd during pregnancy has negative effects on both the mother and the baby. Karabuk province, which is the center of the iron and steel industry, is a region with a high risk of Pb-Cd exposure. This study was designed to determine the levels of lead and cadmium in maternal blood samples and the factors influencing them. After the ethical committee approval from Karabük Training and Research Hospital Ethical Committee, descriptive and analytical analyses were started on the blood samples collected from 100 pregnant women in their third trimester with the childbirth between 01.09.2018-01.09.2019 in Karabük Training and Research Hospital Obstetrics and Gynecology Clinic. The study, conducted in a descriptive and analytical manner, utilized a 32-question survey form prepared by the researchers and venous blood samples collected simultaneously. For the Pb-Cd analysis, a 3 ml venous blood sample was obtained from pregnant women using a sterile syringe into hemogram tubes with purple caps containing Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA). The collected samples were preserved in a -20°C refrigerator immediately after labeling and were kept until they were taken for analysis. Maternal blood samples were analyzed using the Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) Graphite System method. According to the analysis results, the mean maternal blood Pb levels of pregnant women with an average age of 28.3±5.37 were found to be 0.89±0.22 µg/dl, and Cd levels were 0.26±0.07 µg/dl. Maternal blood Pb-Cd levels were compared each other according to five parameters which are socio-demographic aspect, obstetrical variables, location characteristics, dietary history, and cosmetic use. Based on these parameters any statistically significant results were obtained. However, blood lead levels were significantly different in pregnant women who smoked ($p=0.001$) and were exposed to secondhand smoke ($p<0.05$) compared to non-smokers and those not exposed to secondhand smoke. On the other hand, there was no significant difference in blood Cd levels with respect to exposure to secondhand smoke ($p>0.05$). Since exposure to Pb-Cd is not a short-term exposure, but rather long-term exposure to low concentrations in daily life, and because their half-lives are long-term. These results obtained from this study can shed light on future studies which aimed to determine the effect of long- term exposure of heavy metals on pregnant women and infants.

Keywords- Cadmium, Heavy Metal, Lead, Maternal Blood

[1]Contact: ayilmaz@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8162-2842)
Department of Midwifery, Karabuk University, Faculty of Health Sciences
[2]Contact: yesim610611@gmail.com (https://orcid.org/0000-0001-5572-854X)
Department of Midwifery, Karabuk University, Faculty of Health Sciences
[3]*Corresponding Author Contact: suzanonur@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-8145-6090)
Department of Physiotherapy and Rehabilitation, Karabuk University, Faculty of Health Sciences

ÖZ

Gebelik döneminde Pb-Cd'ye maruziyet anne ve bebek üzerinde olumsuz etkiler oluşturur. Demir çelik endüstrisinin merkezi olan Karabük ili, Pb-Cd maruziyeti bakımından oldukça riskli bir bölgedir. Bu çalışma maternal kanda Pb-Cd düzeylerini ve etkileyen faktörleri belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Etik kurul izinleri alındıktan sonra, 01.09.2018-01.09.2019 tarihleri arasında, Karabük Eğitim ve Araştırma Hastanesi Kadın Hastalıkları ve Doğum Polikliniği'ne doğum veya kontrol/izlem yapmak üzere gelen üçüncü trimesterdeki gebeler (n=100) araştırmanın örneklemini oluşturmuştur. Tanımlayıcı ve analitik tipte gerçekleştirilen çalışmanın veri toplama araçları olarak, araştırmacılar tarafından hazırlanan 32 soruluk bir anket formu ve eş zamanlı alınan venöz kan kullanılmıştır. Pb-Cd analizi için gebeden, Etilen Diamin Tetraasetik Asit (EDTA) içeren mor kapaklı hemogram tüplerine, steril enjektör aracılığıyla 3 ml'lik venöz kan örneği alınmıştır. Alınan numuneler etiketlendikten hemen sonra -20°C soğutucuda analize gidene kadar muhafaza edilmiştir. Maternal kan numuneleri, AAS (Atomik Absorbsiyon Spektroskopisi) Grafit Sistem yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, yaş ortalamaları 28,3±5,37 olan gebelerin maternal kan Pb düzeyleri ortalama 0,89±0,22 µg.dl-1, Cd düzeyleri ise 0,26±0,07 µg.dl-1 olarak bulunmuştur. Maternal kan Pb-Cd düzeyleri; gebelerin sosyo-demografik, doğurganlık özellikleri, beslenme, kozmetik kullanımı ve lokasyon değişkenleri ile karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı bir sonuç elde edilmemiştir. Ancak sigara içen ($p=0.001$) ve sigara dumanına maruz kalan gebelerde ($p<0.05$) kan Pb düzeyleri, sigara içmeyenlere ve sigara dumanına maruz kalmayanlara oranla anlamlı farklılık göstermiştir. Diğer taraftan, kan Cd düzeyleri ile sigara dumanına maruz kalma açısından anlamlı bir farklılık bulunmamıştır ($p>0.05$). Pb-Cd'ye maruz kalma kısa süreli bir maruziyet olmadığından, günlük yaşamda düşük konsantrasyonlara uzun süreli maruz kalma ve yarı ömrü de uzun vadeli olmasından dolayı, yürütülen bu çalışmanın sonuçları özellikle ağır metallere uzun süre maruz kalan gebeler ve bebekler üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yapılacak olan çalışmalara ışık tutabilir.

Anahtar Kelimeler- Ağır Metal, Kadmiyum, Kurşun, Maternal Kan

I.INTRODUCTION

Technological advancements, which play a significant role in for human beings, also generate substantial amounts of waste [1, 2]. Artificial agricultural fertilizers, chemicals, industrial waste, petroleum and its derivatives, inorganic salts, radioactivity, detergents, pesticides, waste heat, and heavy metals are some important pollutants that disrupt the ecological balance dramatically [3, 4].

It is well-known that the exposure of environmental pollution which derived from the chemical pollutants have a long-term detrimental effect on cellular development [5]. Metals that have high concentrations but can show toxic effects even at low levels are called heavy metals [6]. There are more than 60 heavy metals, including copper, cobalt, lead, mercury, chromium, cadmium, and zinc are found trace amounts in the nature. [7, 8, 9]. Heavy metals have toxic and/or carcinogenic effects in the biological organisms and accumulate their metabolism. Their intake into the body is faster, while their metabolism and elimination are slower [7, 10]. Elements found in the human body at the mg/l (ppm) or (ppb) level are defined as heavy metals and these elements are taken into the human body through air, water, food and cigarettes. Metals that are not useful for the body, that are not excreted even if they are taken in very little, and that cause toxic effects over time are called toxic metals [11].

Many biological and chemical substances in our environment such as industrial waste and environmental pollutants, addictive substances, X-ray devices, heavy metals such as copper, mercury, lead, cadmium and arsenic, pesticides and psychotropic drugs and food additives cause toxic effects in living organisms acutely or chronically, directly or indirectly [12]. According to toxicokinetics, heavy metals can be analyzed in the body through various biological materials such as nails, teeth, saliva, bones, urine, stool, whole blood (plasma, whole blood), breast milk and cord blood [13]. Inhalation, oral intake, and/or dermal exposure of heavy metals can cause acute and/or chronic poisoning. During both the intrauterine and postpartum period long-term exposure of chemical pollutants have damaging effects on the baby's physiological systems especially nervous system [14, 15].

Lead (Pb) and cadmium (Cd) are among the top 10 heavy metals according to the Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)'s Priority Hazardous Substances 2007 [16].

Pb which is a heavy metal found naturally in the earth's crust and has a toxic effect [17], is mainly transmitted by inhalation (gasoline, cigarettes, etc.), water, food, transplacental route during pregnancy, dust, soil, paints, skin contact, solder on food cans and cosmetic products [18-20].

Cd, which can be rapidly converted to cadmium oxide in the air and has the highest solubility in water, is a toxic heavy metal that spreads very rapidly in nature [21]. Cd is a ubiquitous heavy metal that continuously

diffuses into the environment as a result of human economic activities, has negative effects on human health, has toxic effects on multiple organs and systems and is ubiquitous. It is transmitted to the human body through occupational exposure, inhalation, diet, smoking and passive smoking or drinking water [22]. Sources of Cd affecting human life are refined foods, electricity industry, water pipes, coal burning, tea, coffee, smoking, flue gases from industrial production, fertilizers used in the seed stage, shellfish, ceramics, rubber, textiles, leather industry, plastics, fruits [23-25]. Cd has become an important environmental pollutant with industrialization. Cd from emission sources passes into the air and then into water and soil. A lot of Cd accumulates in heavy traffic, highways and their surroundings, factories and industrial zones [26]. Cd is not normally found in the organism and has toxic effects for every system. It accumulates in the kidney and liver as a result of lifelong exposure. Cd is toxic to all organisms even in very small amounts. It can cause birth anomalies, genetic mutations and cancer [27, 28].

Pregnancy, in which many changes occur simultaneously, is an important turning point for women and family life [29, 30]. It is a process in which physical, hormonal, psychological and social changes are experienced in the body in order to ensure the growth and development of the fetus and to prepare the mother's body for birth and requires adaptation to these changes. Changes in the body can return to normal within the first 6-8 weeks after birth [29, 31, 32]. In the third trimester, organs mature for extrauterine life and the fetus begins to gain weight rapidly. The body takes a round appearance and subcutaneous fat tissues are seen [33]. At the end of this period, if there are no fetal, placental and maternal adverse factors, term delivery occurs [34].

Pregnant women and fetuses are potentially highly sensitive to environmental pollutants. There are some studies in the literature related to prenatal Pb exposure. In these studies different biological materials were collected such as maternal venous blood or cord blood, nails, urine, and hair at different trimesters and measuring the level of Pb in these biological materials [35, 36]. The maternal Pb exposure level changes in a correlation with the Pb level passed through the fetus. For example, during pregnancy, Pb stored in the bones can easily pass from the placenta to the fetus, called prenatal Pb exposure. Intrauterine Pb exposure during pregnancy can lead to developmental delays, behavioral disorders, and low IQ. Although a significant portion of Pb is stored in the bones, it can still pass into the placenta, fetus brain, and breast milk. The lead accumulation rate in infants is low but it increases with the age and long-term Pb exposure [14].

Chronic exposure to Cd increases the risk of liver and prostate cancer. Some of the detrimental effects of the Cd exposure include osteoporosis, tooth loss, loss of the sense of smell, and anemia [37]. Exposure to Cd during pregnancy is harmful both the mother and the fetus because the placenta cannot create a barrier against Cd [38]. Furthermore, exposure to Cd has been associated with low birth weight, a decrease in newborn length and head circumference, as well as neurobehavioral and physiological developmental disorders [39]. Blood Cd levels are 4-5 times higher in smokers compared to non-smokers [40]. A person who smokes 20 cigarettes a day is exposed to 2-4 µg Cd [41]. Cadmium causes serious damage to reproductive organs such as ovaries and testes and embryos [42]. After Cd is ingested through vapor, it accumulates entirely in the liver. Cigarette smoke is a major source of vapor exposure, with smokers having Cd levels 4-5 times higher than non-smokers [40]. One cigarette contains around 1-2 µg of Cd. Repeated cigarette exposure causes Cd to reach toxic levels [43]. Cd level in the blood indicates the accumulation of Cd absorption in the last 3-4 months [44].

It has been known that there are limited number of clinical and experimental studies related to Pb-Cd levels and its effects during maternal period. In this study our main aim is to determine the levels of Pb-Cd, which are toxic heavy metals, in maternal blood samples and try to understand their detrimental effects, both the mother and the baby and, interpret their effects on maternal and infant health, and make recommendations for taking necessary measurements to eliminate these potential risks of these two heavy metals.

II. METHODS

Karabuk University received ethical approval for this research with the decision number 4/7 from the Karabük University Non-Interventional Ethics Committee on July 4, 2018.

Population and Sample of the Research: The population of the study consisted of all pregnant women who applied to the Obstetrics and Gynecology Outpatient Clinic of Karabuk University Training and Research Hospital between 01.09.2018-01.09.2019 for delivery or control/monitoring; the sample consisted of 100 pregnant women who voluntarily agreed to participate in the study, who could understand and speak Turkish, who had been residing in Karabuk province and its districts for at least one year, who were in the third trimester of pregnancy and who were determined by random sampling method.

***Data Collection Instruments*:** In this descriptive and analytical study, a 32-question questionnaire prepared by the researchers and venous blood drawn simultaneously were used as data collection tools.

Data Collection and Evaluation Methods and Data Analysis: Data in the study were collected using a data collection form created by the researchers. In the first stage, Pregnant women in the third trimester who

applied to Karabuk University Training and Research Hospital Obstetrics and Gynecology Outpatient Clinic for delivery or control/monitoring purposes were provided with information about the purpose, significance, and procedures of the research, and informed voluntary consent was obtained. The data collection form was administered to pregnant women who agreed to participate in the study through face-to-face interviews.

In the second stage of the study, pregnant women were seated to obtain a blood sample, and 3 ml of blood was drawn with a syringe from the inner elbow vein, or alternatively, from the hand if the vein was thin or deep. After removing the needle tip, the obtained blood was transferred to a hemogram tube with a purple cap containing Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) to prevent coagulation and obtain whole blood/plasma. To prevent clot formation inside the tubes, the blood was mixed 5-6 times immediately after collection but not shaken. A label with the pregnant woman's identity information was attached to the sample tube. The samples were preserved in a -20°C refrigerator immediately after labeling until they were taken for analysis. Pb and Cd analyses were conducted in a specialized toxicology laboratory. When a sufficient sample size was reached, the samples were transported to the toxicology laboratory by the researcher himself, following the cold chain rules, for analysis. Measurements of the collected blood samples in the study were performed using the Perkin Elmer AAnalyst 600 Zeeman model electrothermal atomic absorption spectroscopy (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy). In this analysis method, blood samples are diluted with matrix modifiers buffer, which contains sodium dihydrogen phosphate, nitric acid, and Triton X-100. The instrument operates in the furnace program defined for the method. The reading time for each sample is 5 minutes. Atomic absorption spectrometry (AAS) is a single-element technique that measures the concentrations of elements. The principle is based on the measurement of the decrease in light intensity due to the absorption of electromagnetic waves emitted from the radiation source by the gaseous atoms. The radiation emitted from the hollow cathode lamp specific to the element to be measured is passed through the current flame and measured by the detector. The sample to be analyzed is sent into the flame. If the relevant element is present in the sample, the emitted radiation from the lamp is absorbed, resulting in a decrease in light intensity. The amount of absorbed radiation is directly related to the change in the concentration of the element in the sample.

Data Analysis Methods: Before proceeding to significance tests, the parametric test assumptions of normal distribution were assessed using the Shapiro-Wilk test and homogeneity of variances was evaluated using the Levene's test for the obtained data [45]. In the examination of maternal blood Pb and Cd levels in terms of the obtained variables, Mann-Whitney U test was used for comparisons between two groups, and the Kruskal-Wallis test was used for comparisons involving more than two groups. Correlations between Pb and Cd levels and continuous variables were determined using Spearman Rank correlation analysis. Results were interpreted as follows: $p < 0.05$ was considered statistically significant, while $p>0.05$ was considered statistically not significant.

III. RESULTS

The findings obtained as a result of the study conducted to investigate the Pb-Cd level in the blood of the pregnant women in the third trimester of pregnancy with an age range of 17-42 years and the factors affecting it were classified and tabulated as follows;

- Findings related to the comparison of Pb levels in maternal blood with variables such as socio-demographic aspect, obstetrical variables, dietary history and cosmetic use, smoking habits, exposure to secondhand smoke and location characteristics of pregnant women (Tables 1-5),

- Findings related to the comparison of Cd levels in maternal blood with variables such as socio-demographic aspect, obstetrical variables, dietary history and cosmetic use, smoking habits, exposure to secondhand smoke and location characteristics of pregnant women (Table 6-10).

Results Obtained by Comparison of Maternal Blood Pb Levels with Socio-Demographic Aspect of Pregnant Women

In our study, it was determined that maternal blood Pb level was 0.89±0.22 $\mu g.dl^{-1}$ and a statistically significant relationship was found between Pb levels and age ($p<0.05$). However, no significant relationship was found between Pb levels and height, previous weight, and weight gain ($p>0.05$). When the Pb levels were compared with the socio-demographic characteristics of the pregnant women, no statistically significant difference was observed between the groups ($p>0.05$) (Table 1).

Table 1. Comparison of Socio-Demographic Aspect and Blood Pb Levels of Pregnants

	n	**Arith. Cover. ± SD**	**Min-Max**
Lead Level	100	0.89±0.22	0.52-1.54
Age	100	28.3±5.37	17-42

Size	100	160.4±5.72	144-172	
Weight gained	100	11.63±5.68	1-28	
Socio-demographic characteristics	**n**	**r** [1]	**p**	
Age	100	0.214	**0.032***	
Size	100	-0.056	0.578	
Weight gained	100	0.034	0.741	

		n	**Arith. Cover. ± SD**	**Rank Avg.**	**Statistical analysis**
Educational Status	Primary school	18	0.86±0.220	45.97	H^1 = 5.292 p=0.259
	Middle school	19	0.85±0.247	44.61	
	High school	27	0.95±0.236	59.04	
	University and Above	33	0.88±0.186	51.36	
	Not Literate	3	0.75±0.185	28.67	
Job	Housewife	69	0.90±0.22	51.68	H=1.370 p=0.713
	Officer	16	0.86±0.19	46.88	
	Employee	8	0.81±0.19	42.06	
	Free	7	0.89±0.29	56.79	
Spouse Education	Primary school	18	0.88±0.23	48.92	H=0.254 p=0.968
	Middle school	28	0.91±0.25	52.36	
	High school	32	0.88±0.20	50.95	
	University/School	22	0.87±0.21	48.77	
Spouse Profession	Officer	21	0.83±0.20	41.57	H=7.473 p=0.113
	Employee	28	0.85±0.21	47.63	
	Private sector	16	0.96±0.22	60.16	
	Self-employment	29	0.95±0.24	57.60	
	Unemployed	6	0.77±0.02	77.42	
Permanent Residence	Bay	10	0.94±0.27	52.95	H=0.464 p=0.793
	District	33	0.88±0.25	47.33	
	City	56	0.89±0.19	51.04	

* p<0.05, r [1] :correlation coefficient, H [1] :Kruskal Wallis H Test

Results Obtained by Comparing Maternal Blood Pb Levels with Obstetrical Variables of Pregnant Women

Maternal blood Pb levels were compared between pregnant women based on their obstetrical variables. It was found that the maternal blood Pb level in women who gave birth to low birth weight was 0.83±0.17 $\mu g.dl^{-1}$, while it was 0.89±0.22 $\mu g.dl^{-1}$in women who did not give birth, and this difference was not statistically significant (p>0.05). In all pregnant women, when maternal blood Pb levels were compared based on the history of pregnancy termination, it was determined that the average Pb level was 0.89±0.25 $\mu g.dl^{-1}$ in those who had undergone curettage and 0.89±0.21 $\mu g.dl^{-1}$-1 in those who had not, and this difference was not statistically significant (p>0.05). When maternal blood Pb levels were examined based on the presence of pregnancy-related hypertension (HT), it was found that those with hypertension had an average Pb level of 0.90±0.09 $\mu g.dl^{-1}$, while those without had 0.89±0.22 $\mu g.dl^{-1}$, and this difference was not statistically significant. Similarly, when gestational diabetes (GD) was considered, those with GD had an average Pb level of 0.98±0.28 $\mu g.dl^{-1}$, while those without had 0.87±0.21 $\mu g.dl^{-1}$, and this difference was not statistically significant (Table 2).

Table 2. Comparison of Variables Related to obstetrical variables of Pregnants with Blood Pb Levels

Variables		**n**	**Arith. Cover. ± SD**	**Rank Avg.**	**Statistical analysis**
Did you give birth to a low-birth-weight baby?	Yes	5	0.83±0.17	46.20	z [1] =-0.340 p=0.734
	No	95	0.89±0.22	50.73	
Have you had an abortion before?	Yes	21	0.89±0.25	50.29	z = -0.038 p = 0.970
	No	79	0.89±0.21	50.56	
Do you have HT during pregnancy?	Yes	5	0.90±0.09	57.30	z = -0.538 p = 0.591
	No	95	0.89±0.22	50.14	
Have you had GD during pregnancy?	Yes	11th	0.98±0.28	60.64	z = -1.229 p = 0.219
	No	89	0.87±0.21	49.25	

* p<0.05, z [1] :Mann Withney U

Results Obtained by Comparison of Maternal Blood Pb Levels with Dietary History and Cosmetic Use of Pregnant Women

When the Pb levels in the pregnant women participating in the study were compared with their dietary history and cosmetic use, no statistically significant difference was found (p>0.05) (Table 3).

Table 3. Comparison of Variables Related to Dietary History and Cosmetic Use of Pregnants with Blood Pb Levels

Variables		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Did you dye your hair while pregnant?	Yes	12	0.93±0.19	57.46	z^1=-0.886
	No	88	0.88±0.22	49.55	p=0.376
Did you use make-up products during pregnancy?	Yes	53	0.87±0.20	49.88	z = -0.225
	No	47	0.90±0.24	51.19	p = 0.822
Have you used skin lightening cream in the last year?	Yes	15	0.89±0.17	53.13	z = -0.459
	No	84	0.89±0.23	49.44	p = 0.646
Did you use herbal medicine during pregnancy?	Yes	7	0.89±0.23	49.14	z = -0.128
	No	93	0.89±0.22	50.60	p = 0.898
Do you consume canned food during pregnancy?	Yes	23	0.95±0.28	57.76	z = -1.172
	No	77	0.87±0.20	48.64	p = 0.241
Do you consume fish and seafood during pregnancy?	Yes	87	0.27±0.89	51.52	z = -0.912
	No	13	0.26±0.83	43.65	p = 0.362
Frequency of coffee consumption?	1 per day	15	0.85±0.07	47.20	H^1=4.088
	2 or more per day	2	0.95±0.06	52.00	p=0.537
	1 per week	25	0.92±0.07	54.18	
	1 per month	13	0.81±0.08	36.58	
	1 in a few months	6	0.91±0.03	52.75	
	I don't consume	39	0.90±0.08	53.63	

* p<0.05, z^1:Mann Withney U z statistic, H^1:Kruskal Wallis H Test

Results of Maternal Blood Pb Levels and Smoking Habits and Exposure to Secondhand Smoke of Pregnant Women

In this study, when the Pb level in the maternal blood was compared according to the smoking habit (1.29±0.30 µg/dl^{-1}) and not smoking habit (0.88±0.16 µg/dl^{-1}), the results were found to be statistically significant (p=0.001). Furthermore, a statistically significant difference was obtained according to whether the pregnant women were in smoking environments (0.97±0.25 µg/dl^{-1}) or not (0.85±0.15 µg/dl) $^{-1}$ (p<0.05). Accordingly, it was determined that the Pb levels of pregnant women in smoking environments were higher than those in non-smoking environments and it was statistically significant (Table 4).

Table 4. Comparison of Findings Related to Smoking Habit and Exposure to Secondhand Smoke in Pregnancy with Blood Pb Levels

Variables		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Do you smoke?	Yes	9	1.29±0.30	86.65	z^1 = -4,156;
	No	91	0.88±0.16	46.48	**p=0.001** *
Have you been in a smoking environment?	Yes	50	0.97±0.25	56.29	z=-2,447;
	No	50	0.85±0.15	41.81	**p=0.014** *

* p<0.05, z^1:Mann Withney U standard z statistic

Results Obtained by Comparison of Maternal Blood Pb Levels and Location Characteristics of Pregnant Women

When the Pb level in the maternal blood was compared with the location characteristics of the pregnant women and the frequency of house staining, the findings were not found to be statistically significant (p>0.05) (Table 5).

Table 5. Comparison of Pregnants' Location Characteristics and Blood Pb Levels

Variables		Lead Level			
		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Is your house close to the factory?	Yes	20	0.90±0.24	53.90	z^1 = -0.586

	No	80	0.88±0.22	49.65	p=0.558
Is your house close to the bus station?	Yes	22	0.84±0.20	46.27	z = -0.774
	No	78	0.90±0.22	51.69	p=0.439
Is your house near the main street?	Yes	76	0.88±0.23	49.38	z = -0.690
	No	24	0.89±0.18	54.06	p=0.490
Is your house close to the train station?	Yes	14	0.85±0.31	43.00	z = -1.043
	No	86	0.89±0.20	51.72	p=0.297
Do you often paint your house?	Yes	17	0.83±0.18	45.06	z = -0.849
	No	83	0.90±0.23	51.61	p=0.396

* p<0.05, z [1] :Mann Withney U z statistic

Results Obtained by Comparison of Maternal Blood Cd Levels with Socio-Demographic Aspect of Pregnant Women

In our study, it was determined that the maternal blood Cd level was 0.26±0.07 µg/dl^{-1}, and the relationship between Cd levels and age, height, previous weight, and weight gain was not statistically significant (p>0.05). When Cd levels were compared with the variables constituting the socio-demographic aspect of pregnant women, no statistically significant difference was found between the groups (p>0.05); however, a statistically significant difference was found between the groups constituting the "occupation" variable (p=0.021) and the "spouse's occupation" variable (p=0.034) (p<0.05). When the "occupation" subgroups were examined in detail in terms of Cd levels, a significant difference was found between civil servants and self-employed individuals (p=0.036), while no statistically significant difference was observed between the other subgroups when compared within themselves (Table 6).

Table 6. Comparison of Socio-Demographic Aspect and Blood Cd Levels of Pregnants

		n	Arith. Cover. ± SD	Min-Max	
Cadmium Level		100	0.26±0.07	0.12-0.43	
Age		100	28.3±5.37	17-42	
Size		100	160.4±5.72	144-172	
Weight gained		100	11.63±5.68	1-28	
		n	**Arith. Cover. ± SD**	**Rank Avg.**	**Statistical analysis**
Educational Status	Primary school	18	0.28±0.084	58.97	H[1] = 2.733 p=0.603
	Middle school	19	0.26±0.074	49.45	
	High school	27	0.26±0.061	49.28	
	University and Above	33	0.25±0.085	46.44	
	Not Literate	3	0.30±0.087	62.00	
Job	Housewife	69	0.27±0.08	52.67	H=9.733 **p=0.021**
	Officer	16	0.23±0.08	37.66	
	Employee	8	0.23±0.05	37.13	
	Free	7	0.32±0.05	73.71	
Spouse Education	Primary school	18	0.30±0.08	63.47	H=5.215 p=0.157
	Middle school	28	0.25±0.07	47.48	
	High school	32	0.27±0.08	50.69	
	University/School	22	0.25±0.07	43.45	
Spouse Profession	Officer	21	0.24±0.08	39.57	H=10.422 **p=0.034**
	Employee	28	0.25±0.06	45.57	
	Private sector	16	0.29±0.08	58.38	
	Self-employment	29	0.27±0.07	53.26	
	Unemployed	6	0.34±0.08	77.42	
Permanent Residence	Bay	10	0.31±0.05	68.55	H=5.75 p=0.056
	District	33	0.27±0.08	52.06	
	City	56	0.25±0.07	45.47	

* p<0.05, H [1] : Kruskal Wallis H Test

Results Obtained by Comparing Maternal Blood Cd Levels with Obstetrical Variables of Pregnant Women

No statistically significant difference was found in the results of the analysis performed according to the blood Cd level and obstetrical variables of the pregnant women who participated in the study (p>0.05). In addition, no statistically significant difference was found in maternal blood Cd levels according to the presence of pregnancy-related HT and GD (p>0.05) (Table 7).

Table 7. Comparison of Variables Related to Obstetrical Variables of Pregnants with Blood Cd Levels

Variables		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Did you give birth to a low-birth-weight baby?	Yes	5	0.23±0.07	38.40	z^1=-0.958; p=0.338
	No	95	0.27±0.08	51.56	
Have you had an abortion before?	Yes	21	0.25±0.07	46.50	z=-0.712; p=0.477
	No	79	0.27±0.08	51.56	
Do you have HT during pregnancy?	Yes	5	0.26±0.05	48.30	z=-0.174; p=0.862
	No	95	0.26±0.08	50.62	
Have you had GD during pregnancy?	Yes	11th	0.28±0.06	58.50	z=-0.971; p=0.332
	No	89	0.26±0.08	49.51	

* p<0.05, z [1] :Mann Withney U

Results Obtained by Comparison of Maternal Blood Pb Levels with Dietary History and Cosmetic Use of Pregnant Women

When the maternal blood Cd level was compared with the dietary history and cosmetic use of pregnant women in the study, no statistically significant difference was found (p>0.05) (Table 8).

Table 8. Comparison of Variables Related to Dietary History and Cosmetic Use of Pregnants with Blood Cd Levels

Variables		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Did you dye your hair while pregnant?	Yes	12	0.27±0.07	56.33	z [1] =-0.744 p=0.457
	No	88	0.26±0.08	49.70	
Did you use make-up products during pregnancy?	Yes	53	0.27±0.07	52.24	z = -0.636 p=0.525
	No	47	0.26±0.08	48.54	
Have you used skin lightening cream in the last year?	Yes	15	0.26±0.07	47.07	z=-0.430 p=0.667
	No	84	0.27±0.08	50.52	
Did you use herbal medicine during pregnancy?	Yes	7	0.25±0.08	43.93	z=-0.622 p=0.534
	No	93	0.27±0.07	50.99	
Do you consume canned food during pregnancy?	Yes	23	0.28±0.08	57.76	z= -1.370 p=0.171
	No	77	0.26±0.08	48.33	
Do you consume fish and seafood during pregnancy?	Yes	87	0.27±0.08	51.22	z= -0.641 p=0.521
	No	13	0.26±0.08	45.69	
Coffee frequency?	1 per day	15	0.26 ±0.07	50,50	H^1=4.860 p=0.433
	2 or more per day	2	0.30 ±0.06	65.25	
	1 per week	25	0.26±0.07	54.52	
	1 per month	13	0.26±0.08	37.58	
	1 in a few months	6	0.26±0.03	63.58	
	I don't consume	39	0.26±0.08	49.46	

* p<0.05, z [1] :Mann Withney U z statistic, H [1] :Kruskal Wallis H Test

Results of Maternal Blood Cd Levels and Smoking Habits and Exposure to Secondhand Smoke of Pregnant Women

No statistically significant difference was observed between smoking habit and exposure to secondhand smoke during pregnancy and blood Cd level (p>0.05) (Table 9).

Table 9. Comparison of Findings Related to Smoking Habit and Exposure to Secondhand Smoke in Pregnancy with Blood Cd Levels

Variables		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Do you smoke?	Yes	9	0.25±0.09	43.78	z [1] = -0.730; p=0.466
	No	91	0.27±0.08	51.16	
Have you been in a smoking environment?	Yes	50	0.27±0.08	52.43	z = -0.666; p=0.505
	No	50	0.26±0.08	48.57	

* p<0.05, z [1] :Mann Withney U z statistic

Results Obtained by Comparison of Maternal Blood Cd Levels and Location Characteristics of Pregnant Women

There was no statistically significant difference between Cd levels and characteristics depending on the location of the pregnant women (p>0.05) (Table 10).

Table 10. Comparison of Pregnants' Location Characteristics and Blood Cd Levels

Variables		Lead Level			
		n	Arith. Cover. ± SD	Rank Avg.	Statistical analysis
Is your house close to the factory?	Yes	20	0.25±0.08	42.95	z 1 = -1.303
	No	80	0.27±0.08	52.39	p=0.193
Is your house close to the bus station?	Yes	22	0.26±0.08	49.48	z = -0.150
	No	78	0.27±0.08	50.73	p=0.881
Is your house near the main street?	Yes	76	0.26±0.08	47.59	z = -1.786
	No	24	0.28±0.06	59.71	p=0.074
Is your house close to the train station?	Yes	14	0.25±0.08	45.71	z = -0.666
	No	86	0.27±0.08	51.28	p=0.505
Do you often paint your house?	Yes	17	0.24±0.09	42.03	z = -1.323;
	No	83	0.27±0.07	52.23	p=0.186

*p<0.05, z [1]:Mann Withney U

IV. DISCUSSION

Chemical pollutants causing environmental pollution have a long-term impact on cellular development [5]. Pb-Cd, among these pollutants, leads to serious health problems in all living organisms [46]. Pregnant women and fetuses, in particular, are highly sensitive to environmental pollutants [35]. When Pb accumulates in the body for a long time, it passes from the mother to the placenta and fetus during pregnancy and from breast milk to the baby after birth [14, 15].

Moving from the fact that high concentrations of heavy metals adversely affect all living organisms in the ecosystem, there is limited research in Turkey on the factors influencing Pb-Cd levels, especially in pregnant women. Therefore, this study, aimed at determining Pb-Cd values, was conducted in the city of Karabuk, which is among the few cities in our country with a notable Iron and Steel Industry. In this context, the study sample consisted of pregnant women in the third trimester who visited the Obstetrics and Gynecology Clinic of Karabuk Training and Research Hospital for childbirth and follow-up.

In our study, it was determined that the average Pb level in maternal venous blood is 0.89±0.22 µg/dl^{-1}, and the average Cd level is 0.26±0.07 µg/dl^{-1}. In a study conducted by Oktem (2018) in Karabuk, the average maternal venous blood Pb level was found to be 1.97±0.74 µg/dl^{-1}, and the Cd level was 0.73±0.24 µg/dl^{-1} [47]. Durska (2001) reported maternal venous blood Pb-Cd levels as 2.75 µg/dl and 0.09 µg/dl, respectively [48]. In a study by Iwai-Shimada et al. (2019) aiming to determine the prenatal Pb-Cd exposure level, they found that the maternal blood Pb level was 8.65-13.5 µg/dl^{-1}, and the Cd level was 0.74-1.79 µg/dl^{-1} [49]. While studies conducted in different regions observe similar and high Pb-Cd levels, the values in our study were found to be lower. These results, contrary to the reported Pb-Cd levels in pregnant women, suggest that factors affecting the accumulation of these heavy metals in the bodies of pregnant women living in the industrial city of Karabuk may be different.

In our study, Pb levels showed variations concerning certain socio-demographic aspect among pregnant women, while for some variables, no significant differences were observed (Table 1). When examining the maternal blood Pb levels in terms of demographic characteristics of pregnant women, a statistically significant relationship was found between Pb levels and age (p=0.032). Nakayama et al. (2019), in a study conducted in Japan to determine maternal blood Pb-Cd levels and determinants, concluded that the main determinants of Pb levels were the mother's age and whether she consumed alcoholic beverages [50]. In our study, it was determined that blood Pb levels varied on average between 0.75-0.95 µg/dl^{-1} according to the educational level. This result is parallel to the findings of Durska (2001) [48]. In Oktem's (2018) study, the average Pb level was found to be between 1.87-2.23 µg/dl^{-1} according to educational level [47]. Blood Pb levels in our study varied between 0.81-0.90 µg/dl based on the occupations of pregnant women, between 0.87-0.91 µg/dl^{-1} based on the educational level of spouses, and between 0.77-0.96 µg/dl^{-1} based on the occupation of spouses. No significant difference was observed in Pb-Cd levels in the blood concerning education and occupation, and this result was found to be parallel to the results of Oktem (2018) [47]. Considering that 69% of the participating pregnant women were homemakers,

16% were civil servants, 8% were workers, and 7% had worker status, it can be said that whether they were working or not, the pregnant women in the study had low Pb exposure.

In our study, no significant difference was found in the Pb levels of pregnant women according to obstetrical variables (Table 2). Accordingly, the average Pb level of mothers who gave birth to low-birth-weight babies and those who did not was determined to be between 0.83-0.89 μg/dl^{-1}. The average Pb level of those who had undergone curettage previously was found to be 0.89 μg/dl^{-1}. Motawei et al. (2012), in their study aiming to determine whether the blood Pb level in preeclamptic pregnant women exceeded normal limits, found a significant association between preeclampsia and high Pb levels in the blood [51]. Yazbeck et al. (2009), in their study, found the Pb level to be significantly higher in cases of pregnancy-induced hypertension (2.2±1.4 μg/dl^{-1}) compared to normotensive patients (1.9±1.2 μg/dl^{-1}; p=0.02) [52]. However, in our study, no significant difference was observed in the blood Pb levels between pregnant women with and without hypertension. The average Pb levels of pregnant women with and without hypertension ranged between 0.89-0.90 μg/dl^{-1}. Additionally, the average Pb levels of pregnant women with and without gestational diabetes mellitus (GDM) were determined to be 0.87-0.98 μg/dl^{-1}. Soomro et al. (2018) found a long-term environmental exposure to Pb-Cd to be associated with GDM in their studies [53]. It can be stated that the presence or absence of GDM and hypertension did not affect the Pb-Cd levels in the pregnant women participating in our study. Furthermore, women diagnosed with pregnancy-induced hypertension had Cd values of 0.26 μg/dl, and those with or without GDM had Cd values ranging from 0.26-0.28 μg/dl^{-1}. Oguri et al. (2019), in their study in Japan to determine the relationship between maternal blood Pb-Cd concentrations and GDM, concluded that Pb-Cd concentrations were slightly higher in women with GDM compared to those without GDM, but these differences were not statistically significant [54].

In a study conducted by Al-Jawadi et al. (2009), they found that coffee consumption is an important determinant for Pb levels [55]. However, in our study, no significant difference in blood Pb levels (0.81-0.95 μg/dl^{-1}) was observed based on the frequency of coffee consumption during pregnancy (Table 3).

In our study, a significant difference was found in Pb levels between pregnant women who smoked and those who did not, with higher Pb levels observed in pregnant women who smoked. Additionally, it was determined that Pb levels showed significant differences based on the exposure of pregnant women to secondhand smoke ($p<0.05$) (Table 4). Menai et al. (2012) also found a significant difference in Pb levels between pregnant women who smoked and those who did not during the pregnancy period ($p<0.05$) [56]. Therefore, pregnant women exposed to secondhand smoke had higher Pb levels.

In Oktem's study (2018), the blood Pb level was found to be 1.81-2.29 μg/dl^{-1} according to the continuous residence, while in our study, this value was determined to be 0.88-0.94 μg/dl^{-1} [47]. However, Falcon et al. (2002) and Röllin et al. (2009), in their studies, demonstrated that the blood Pb levels of individuals living in urban and rural areas significantly differed, with women living in urban areas having higher blood Pb levels [57, 58]. The pregnant women participating in our study were found to generally reside in locations far from the Iron and Steel factory and areas with heavy traffic. Therefore, it was considered that the similar blood Pb levels according to the residence might be related to this fact. When examining Pb levels in terms of location characteristics in our study, the average Pb values were found to be 0.88-0.90 μg/dl concerning the proximity of the house to the Iron-Steel factory, 0.88-0.90 μg/dl^{-1} concerning the proximity of the house to the bus station, and averages ranging from 0.88-0.89 μg/dl^{-1} concerning the proximity of the house to the main street. It was determined that the Pb levels of pregnant women did not show a significant difference according to these location characteristics (Table 5). Durska (2001) also found in her study that the Pb level was not related to the location of the house [48]. In contrast to these studies, Kim et al. (2019), in their study to determine the impact of an electronic waste recycling factory in the Guiyu town in southeast China on heavy metal concentration in pregnant women, found that the geometric mean of maternal blood Pb concentration in Guiyu was 1.74 times higher than that of women in Haojiang. This study concluded that living in the area where the electronic waste recycling factory is located poses a higher risk of exposure to heavy metals [59].

In our study, while Cd levels of pregnant women showed differences in some variables concerning their socio-demographic aspect, they did not show differences in some other variables. When examining the average Cd levels of variables that did not show significant differences, it was determined that they ranged between 0.25-0.30 μg/dl^{-1} for education level, 0.25-0.30 μg/dl^{-1} for spouse's education level, and 0.25-0.31 μg/dl^{-1} for residence (Table 6). While no significant difference was observed in blood Cd levels based on education level in our study, significant differences were observed in terms of occupation (p=0.036) and spouse's occupation (p=0.034). Accordingly, it was found that the Cd level of pregnant women who were self-employed (0.32±0.05 μg/dl^{-1}) was higher than those who were civil servants (0.23±0.08 μg/dl^{-1}). When examined in terms of spouse's occupation, it was determined that the Cd levels of pregnant women whose spouses were unemployed (0.34±0.08 μg/dl^{-1}) were higher than those whose spouses were civil servants (0.24±0.08 μg/dl^{-1}).

In our study, no significant difference was observed in blood Cd levels based on the obstetrical variables of pregnant women (Table 7). In this context, it was found that the average Cd values ranged between 0.23±0.27 µg/dl^{-1} based on the condition of giving birth to low-birth-weight babies. This result is consistent with the findings of Zhang et al. (2004). Indeed, the study found no significant relationship between Cd levels and birth weight [59]. Sun et al. (2014) reported that Cd exposure significantly affected newborn birth weight [61], and Huang et al. (2017) determined a significant relationship between high maternal urinary Cd and low birth weight [62]. In Zhang et al.'s (2004) study, it was observed that Cd levels ranged between 0.25-0.27 µg/dl^{-1} based on the previous history of curettage among pregnant women [60]. In Durska's (2001) study, although there was a significant difference in Cd levels between women who had previously undergone curettage and those who had not, women who had undergone curettage had higher Cd levels [48]. Omeljaniuk et al. (2018) found that in women who had a miscarriage, blood Pb level was 35.54±11.0 µg/l, Cd level was 2.73±2.07 µg/l, while in the control group (35 women in the first trimester of pregnancy and after delivery), Pb was 27.11 ± 4.6 µg/l, and Cd was 1.035±0.59 µg/l. When compared, blood Pb-Cd levels were found to be higher in women who had a miscarriage and it was concluded that smoking habits significantly influenced this situation [63].

In our study, it was found that blood Cd levels ranged between 0.26-0.30 µg/dl^{-1} based on the frequency of coffee consumption during pregnancy (Table 8). In a study conducted by Osorio-Yáñez et al. (2018), urinary Cd was found to be negatively associated with coffee consumption [64].

When looking at the Cd levels based on the exposure to secondhand smoke during pregnancy, it was found that the Cd level was between 0.25-0.27 µg/dl^{-1} for the smoking habits and between 0.26-0.27 µg/dl^{-1} for being in a smoking environment (Table 9). However, Menai et al. (2012) found that pregnant women who smoked had higher Cd levels, and this was associated with low birth weight [56]. Higher Cd levels in pregnant women who smoke have also been observed in other studies [14, 65, 66]. Zhu et al. (2018), in their study aiming to determine the relationship between chronic exposure to secondhand smoke and toxic metal accumulation in hair in pregnant women, concluded that long-term passive smoking could potentially increase Pb-Cd levels [67].

When examining Cd levels in terms of location characteristics, it was found that the average Cd values ranged between 0.25-0.27 µg/dl^{-1} based on the proximity of the house to the Iron-Steel factory, between 0.26-0.27 µg/dl^{-1} based on the proximity of the house to the bus station, and the averages ranged between 0.26-0.28 µg/dl^{-1} based on the proximity of the house to the main street. Cd levels of pregnant women participating in the study did not show a significant difference based on the location characteristics (Table 10). This result is consistent with the findings of Durska (2001) [48]. However, according to the research conducted by Tavakkali and Khanjani (2016), high exposure to Cd was found in industrial workers and those with environmental exposure due to living in industrial areas [68], which contradicts the results of our study.

V. RESEARCH AND PUBLICATION ETHICS

In the study conducted on maternal blood Pb and Cd levels and the factors affecting them, the ethical principles and guidelines for research and publication were meticulously followed. The following ethical considerations were taken into account during the planning, implementation, and reporting phases of the research:

Institutional Ethical Approval: The study obtained ethical approval from the non-ınterventional ethics committee of Karabuk University (Approval Number: 4/7, Date: 04.07.2018).

Informed Consent: Informed consent was obtained from all participants. The purpose of the study, data collection procedures, and the potential risks and benefits were explained to each participant, and their written consent was obtained.

Confidentiality: The privacy and confidentiality of the participants were strictly maintained. Personal information was anonymized, and the data was stored securely to prevent unauthorized access.

Data Collection Tools: The data collection tools were developed based on a comprehensive literature review and were designed to respect the rights and privacy of the participants.

Data Collection Procedure: Data collection was carried out with the utmost care and consideration for the well-being of the participants. Blood samples were collected using appropriate medical procedures.

Data Analysis and Reporting: The data analysis was conducted rigorously and transparently, following standard statistical methods. The results were reported accurately and without bias.

Authorship and Acknowledgments: Authorship was determined in accordance with the contributions of individuals to the research. All contributors were appropriately acknowledged in the publication.

Plagiarism and Citations: Plagiarism was strictly avoided in the research, and all sources of information and previous studies were properly cited and referenced.

Publication Ethic: The research adheres to the principles of responsible and ethical publication. It was not simultaneously submitted to multiple journals, and the publication guidelines of the selected journal were followed.

Conflict of Interest: Any potential conflict of interest was disclosed, and the research was conducted impartially and without bias.

Overall, the research followed ethical standards and guidelines to ensure the integrity, credibility, and reliability of the study findings and the responsible dissemination of research results.

VI. CONCLUSION

The exposure to Pb-Cd during pregnancy has negative effects on both the mother and the baby. Karabuk province, which is the center of the iron and steel industry, is a region with a high risk of Pb-Cd exposure. This study aims to determine the levels of Pb-Cd in maternal blood and the factors influencing them. According to the analysis results, the mean maternal blood Pb levels of pregnant women with an average age of 28.3±5.37 were found to be 0.89±0.22 µg/dl, and Cd levels were 0.26±0.07 µg/dl. When maternal blood Pb-Cd levels were compared with the socio-demographic aspect, obstetrical variables, dietary history, cosmetic use and location characteristics of pregnant women, no statistically significant results were obtained. However, in smokers and pregnant women exposed to secondhand smoke, blood Pb levels showed significant differences compared to non-smokers and those not exposed to secondhand smoke. On the other hand, no significant difference was found in blood Cd levels concerning exposure to secondhand smoke.

According to the results of this study, smoking, either actively or passively, has been indicated as a significant factor in maternal blood Pb-Cd levels. Women planning for pregnancy and pregnant women should be educated, made aware of the short and long-term adverse effects of smoking, and smoking habits should be controlled. There is existing evidence in the literature regarding the negative effects of heavy metal exposure on pregnant women and fetuses. The relatively low metal-loaded air pollution due to the distance from the factory and the majority of participating pregnant women being away from the factory, bus station, and train station may have contributed to the lower metal burden in maternal blood in our study. More comprehensive studies are needed to better investigate the factors contributing to Pb-Cd toxicity.

Although Pb-Cd levels were not found to be high in pregnant women residing in Karabuk province, the findings obtained in the scope of this research will contribute to the literature with a more extensive sample size upon replication.

RECOMMENDATIONS

-To inform women of reproductive age and pregnant individuals about the risks associated with heavy metal exposure, particularly Pb-Cd, public awareness campaigns should be organized.

-Increased awareness should be emphasized on the adverse effects of smoking, both active and passive, during pregnancy, on maternal blood Pb-Cd levels. The importance of avoiding such exposures during pregnancy should be highlighted.

-By integrating preconception counseling services into routine healthcare practices, women should be provided with information about the potential risks of heavy metal exposure, and lifestyle changes should be encouraged before conception.

-Routine monitoring programs should be established, especially in industrial areas or regions with potential environmental pollution, to assess heavy metal levels in pregnant women.

-Maternal blood Pb-Cd levels should be regularly checked during prenatal care visits, and interventions should be promptly implemented upon identifying potential risks.

-Encouraging additional research with larger sample sizes is essential to comprehensively investigate factors contributing to Pb-Cd toxicity in pregnant women.

-Longitudinal studies should be conducted to examine the long-term effects of heavy metal exposure on both maternal and fetal health.

-Efforts should be made to develop and implement policies aimed at reducing heavy metal exposure in the general population, with a specific focus on vulnerable groups such as pregnant women.

-Collaboration between health authorities and industries should be promoted to develop strategies for minimizing environmental impacts of industrial activities, reducing heavy metal emissions, and ensuring environmental safety.

-Research findings should be shared with healthcare professionals and integrated into clinical practice to enable informed decision-making and personalized care for pregnant individuals.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research has been accepted as a Master's thesis in the Department of Midwifery at Karabuk University in 2022.

THANKS

This study was supported by the Karabuk University Scientific Research Projects Coordination Unit under the project code "KBÜBAP-18-YL-178". We would like to express our gratitude to the Karabuk University Scientific Research Projects Coordination Unit and the healthcare professionals working at the Karabuk Training and Research Hospital who provided assistance during the project.

REFERENCES

[1] Sağlam, N., & Cihangir, N. (1995). *Ağır metallerin biyolojik süreçlerle biyosorbisyonu çalışmaları.* Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi. 11(11):157-161.
[2] Asri, F.Ö., Sönmez, S., & Çıtak, S. (2007). *Kadmiyumun çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri*. Derim. 24(1):32-39.
[3] Hu, H. (2000). *Exposure to metals.* Occupational and Environmental Medicine. 27:983-996.
[4] Webb, D., & Gagnon, M.M. (2002). *Biomarkers of exposure in fish inhabiting the Swan-Canning Estuary, Western Australia-a preliminary study.* Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery. 9(4):259-269.
[5] Köse, L. (2005). *Sıçan Wistar albino Merkezi Sinir Sisteminde Total Lipid ve Protein Miktarı Üzerine Kadmiyum Sülfatın CdSO4 Etkisi.* Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
[6] Pandey, G., & Madhuri, S. (2014). *Heavy metals causing toxicity in animals and fishes*. Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences, 2(2):17-23.
[7] Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., & Timur, S. (2003). *Metallerin çevresel etkileri-I.* Metalurji *Dergisi.* 136:47-53.
[8] Omaye, S.T. (2004). *Food and Nutritional Toxicology*. CRC Press, New York.
[9] Şener, Ş. (2010). *Çevre için jeoloji; Ağır metallerin çevresel etkileri*. SDUGEO. 1(3):33-35.
[10] Kanter, M., Unsal, C., Aktas, C., & Erboga, M. (2016). *Neuroprotective effect of quercetin against oxidative damage and neuronal apoptosis caused by cadmium in hippocampus.* Toxicology and Industrial Health, 32(3):541-550.
[11] Kale, E., Sürücü H.A., Ertem, M., & Canoruç, N. (2012). *Evaluation of blood lead, cadmium, chromium and total antioxidant levels of car park workers*. Turkish Journal of Family Practice, 16(2):61-67.
[12] Alam, G., & Jones, B.C. (2014). *Toxicogenetics: in search of host susceptibility to environmental toxicants*. Frontiers in genetics, 5:327.
[13] Barbosa, J.F., Tanus-Santos, J.E., Gerlach, R.F., & Parsons, P.J. (2005). *A critical review of biomarkers used for monitoring human exposure to lead: advantages, limitations, and future needs*. Environmental Health Perspectives, 113(12):1669-1674.
[14] Öztan, O., Yalçın, S., Alıyev, V., Gülay-Kurtay, D., & Söylemezoglu. T. (2009). *Ankara'da yaşayanların plasental toksik metal ve iz element düzeyleri.* Kadın Doğum Dergisi. 7(3):1699-1703.
[15] Özkan, E., Taşlıpınar, M. Y., & Yeşilkaya, Ş. (2018). *Ağır metal zehirlenmeleri*. http://www.jcam.com.tr/files/KATD-1599.pdf.
[16] ATSDR (2007). Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) CERCLA Priority List of Hazardous Substances. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, GA (http://www.atsdr.cdc.gov/cercla/07list.html. (29.05.2018).
[17] Bal, C., Büyükşekerci, M., Alagüney, M.E., Gündüzöz, M, Hocaoğlu, A., Güngör, O.T., & Yılmaz, Ö.H. (2015). *The trace element pattern in occupational lead exposed workers.* The Turkish Journal of Occupational / Environmental Medicine and Safety, 1(2):12-20.
[18] Vural, N. (2005). *Toksikoloj.* Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları No:73, Ankara, s:504-579.
[19] Bozalan, M.Y. (2011). *Oyuncaklardaki Kurşun Düzeyinin Atomik Absorbsiyon Spektrometre ile Tayini*. Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
[20] Centro Laboratuvarları. (2019). *"Kurşun Zehirlenmesi*", Lab Tests http://www.labtestsonline.org.tr/understanding/conditions/l.eadpoison/start/3.(12.11.2019).
[21] İlhan, A., Dündar, C., Öz, N., & Kılınç, H. (2002). *Asit Yağmurlari Ve Hava Kirliliği Değerlendirme Raporu,* Teknik Rapor T.C. Çevre Ve Orman Bakanliği Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara S:1-361.

[22] Geng, H.X., & Wang, L. (2019). *Cadmium:* toxic effects on placental and embryonic development. Environmental Toxicology and Pharmacology, 67:102-107.
[23] Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., & Timur, S. (2004). *Metallerin Çevresel Etkileri-I. İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.* Metalurji Dergisi, *136*, 47-53.
[24] Özkan, G. (2009). *Endüstriyel Bölge Komşuluğunda Kıyısal Kırsal Alandaki Hava Kalitesi; Muallimköy'de Partikül Madddede ve Topraktaki Ağır Metal Kirliliği*. Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
[25] Karaöz, B. (2014). *Farelerde Kadmiyum Uygulamasının Fertilite Parametreleri Üzerine Etkisi*. Ege Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
[26] Aydoğdu, N., Kanter, M., Erbaş, H., & Kaymak, K. (2007). *Kadmiyuma bağlı karaciğer hasarında taurin, melatonin ve asetilsisteinin nitrik oksit, lipid peroksidasyonu ve bazı antioksidanlar üzerindeki etkileri.* Erciyes Tıp Dergisi, 29(2):89-96.
[27] Kaya, E.E., Kışlalı, F.M., Sarıcı, D., & Kurban, Y. (2019). *Yenidoğan bebeklerin göbek kordon kanında kurşun ve civa düzeyleri.* Jinekoloji Obstetrik ve Neonatoloji Tıp Dergisi, 16(1):4-8.
[28] Raikwar, M.K., Kumar, P., Singh, M., & Singh, A. (2008). *Toxic effect of heavy metals in livestock health.* Veterinary World, 1(1):28.
[29] Okumuş, F. (2014). *The reality of vaginal douche in Turkey*. Florence Nightingale Hemşirelik Dergisi, 22(1):53-62.
[30] Akkaş, S.Ç. (2014). *Gebelik Döneminde Eşler Arası Uyum*. Adnan Menderes Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aydın.
[31] Ezmerli, N.M. (2000). *Exercise in pregnancy*. Prim Care Update Ob Gyns, 7:260-265.
[32] Karataş, T., & Mete, S. (2012). *Gebelikte bulantı kusma sorunu yaşama durumu ile sosyal destek arasındaki ilişkinin incelenmesi.* Dokuz Eylül Üniversitesi Hemşirelik Yüksekokulu Elektronik Dergisi, 5(2):47-52.
[33] Taşkın, L.(2011). *Yüksek Riskli Gebelik ve Doğum El Kitabı*. IX. Baskı, Palmiye Yayıncılık, Ankara.
[34] Taşkın, L.(2009). *Doğum ve Kadın Sağlığı Hemşireliği*, IX. Baskı, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara.
[35] Stillerman, K.P., Mattison, D.R., Giudice, L. C., & Woodruff, T. J. (2008). *Environmental exposures and adverse pregnancy outcomes: A review of the science*. Reproductive Sciences. 15(7):631-650.
[36] Örün, E., & Yalçın, S. (2011). *Kurşun, Cıva, Kadmiyum: Çocuk sağlığına etkileri ve temasın belirlenmesinde saç örneklerinin kullanımı*. Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi. 3(2):73-81.
[37] Yağmur, B., Hakerlerler, H., & Kılınç, R. (2003). *Gübreler ve insan sağlığı*. Çiftçi Dergisi, (2).
[38] Kippler, M., Hoque, A. W., Raqib, R., Öhrvik, H., Ekström, E. C., & Vahter, M. (2010). *Accumulation of cadmium in human placenta interacts with the transport of micronutrients to the fetus*. Toxicology Letters. 192(2):162-168.
[39] Kippler, M., Tofail, F., Hamadani, J. D., Gardner, R. M., Grantham-McGregor, S. M., Bottai, M., & Vahter, M. (2012). *Early-life cadmium exposure and child development in 5-year-old girls and boys: a cohort study in rural Bangladesh*. Environmental Health Perspectives. 120(10):1462-1468.
[40] Munisamy, R., Ismail, S.N.S., & Praveena, S.M. (2013). *Cadmium exposure via food crops: a case study of intensive farming area.* American Journal Applied Science, 10(10):1252-1262.
[41] Boğa, A. (2007). *Ağır metallerin özellikleri ve etki yolları.* Arşiv, 16:218-230.
[42] Siu, E.R., Mruk, D.D., Porto, C.S., & Cheng, C.Y. (2009). *Cadmium-induced testicular injury.* Toxicology and Applied Pharmacology, 238(3):240-249.
[43] Baker, J.R., Edwards, R.J., Lasker, J.M., Moore, M.R., & Satarug, S. (2005). *Renal and hepatic accumulation of cadmium and lead in the expression of CYP4F2 and CYP2E1.* Toxicology Letters, 159(2):182-191.
[44] Järup, L., & Åkesson, A. (2009). *Current status of cadmium as an environmental health problem.* Toxicology and Applied Pharmacology, 238(3):201-208.
[45] Kesici, T., & Kocabaş, Z. (1998). *Biyoistatistik.* Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi, file:///C:/Users/pc1/Downloads/Biyoistatistik%20(1).pdf-297.
[46] Yıldız, N. (2001). *Toprak kirletici bazi ağır metallerin (Zn, Cu, Cd, Cr, Pb, Co ve Ni) belirlenmesinde kullanılan yöntemler*. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi. 32(2):207-213.
[47] Öktem, Ö. (2018). *Gebelerde Kanda Kurşun Kadmiyum Düzeyleri ve Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi*. Karabük Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
[48] Durska, G. (2001). *Levels of lead and cadmium in pregnant women and newborns and evaluation of their impact on child development*. Annales Academiae Medicae Stetinensis. 47-49.
[49] Iwai-Shimada, M., Kameo, S., Nakai, K., Yaginuma-Sakurai, K., Tatsuta, N., Kurokawa, N., & Satoh, H. (2019). *Exposure profile of mercury, lead, cadmium, arsenic, antimony, copper, selenium and zinc in maternal blood, cord blood and placenta: the Tohoku Study of Child Development in Japan.* Environmental Health and Preventive Medicine. 24(1): 35.

[50] Nakayama, S. F., Iwai-Shimada, M., Oguri, T., Isobe, T., Takeuchi, A., Kobayashi, Y., ...& Kawamoto, T. (2019). *Blood mercury, lead, cadmium, manganese and selenium levels in pregnant women and their determinants: the Japan Environment and Children's Study (JECS).* Journal of exposure science & environmental epidemiology, 29(5), 633-647.

[51] Motawei, S. M., Attalla, S. M., Gouda, H. E., El-Harouny, M. A., & El-Mansoury, A. M. (2013). *Lead level in pregnant women suffering from pre-eclampsia in Dakahlia, Egypt*. Int J Occup Environ Med (The IJOEM). 4(1):187-36.

[52] Yazbeck, C., Thiebaugeorges, O., Moreau, T., Goua, V., Debotte, G., Sahuquillo, J., ...& Huel, G. (2009). *Maternal blood lead levels and the risk of pregnancy-induced hypertension: the EDEN cohort study*. Environmental health perspectives, 117(10), 1526-1530.

[53] Soomro, M. H., Baiz, N., Huel, G., Yazbeck, C., Botton, J., Heude, B., ...& EDEN mother-child cohort study group. (2019). *Exposure to heavy metals during pregnancy related to gestational diabetes mellitus in diabetes-free mothers*. Science of the total environment, 656, 870-876.

[54] Oguri, T., Ebara, T., Nakayama, S. F., Sugiura-Ogasawara, M., & Kamijima, M. (2019). *Association between maternal blood cadmium and lead concentrations and gestational diabetes mellitus in the Japan Environment and Children's Study*. International archives of occupational and environmental health, 92(2), 209-217.

[55] Al-Jawadi, A. A., Al-Mola, Z. W., & Al-Jomard, R. A. (2009). *Determinants of maternal and umbilical blood lead levels: a cross-sectional study*. Mosul, Iraq. BMC Research Notes, 2(1), 47.

[56] Menai, M., Heude, B., Slama, R., Forhan, A, Sahuquillo, J., Charles, M. A., & Yazbeck, C. (2012). *Association between maternal blood cadmium during pregnancy and birth weight and the risk of fetal growth restriction*: *The EDEN mother–child cohort study*. Reproductive Toxicology. 34(4):622-627.

[57] Falcón, M., Vinas, P., Osuna, E., & Luna, A. (2002). *Environmental exposures to lead and cadmium measured in human placenta. Archives of Environmental Health:* An International Journal, 57(6):598-602.

[58] Röllin, H.B., Rudge, C.V., Thomassen, Y., Mathee, A., & Odland, J.Ø. (2009). *Levels of toxic and essential metals in maternal and umbilical cord blood from selected areas of South Africa-results of a pilot study.* Journal of Environmental Monitoring, 11(3):618-627.

[59] Kim, S., Xu, X., Zhang, Y., Zheng, X., Liu, R., Dietrich, K., & Chen A. (2019). *Metal concentrations in pregnant women and neonates from informal electronic waste recycling.* Journal Of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 29(3), 406-415.

[60] Zhang, Y. L., Zhao, Y. C., Wang, J. X., Zhu, H. D., Liu, Q. F., Fan, Y. G., & Liu, A. P. (2004). *Effect of environmental exposure to cadmium on pregnancy outcome and fetal growth: a study on healthy pregnant women in China*. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 39(9):2507-2515.

[61] Sun, H., Chen, W., Wang, D., Jin, Y., Chen, X., & Xu, Y. (2014). *The effects of prenatal exposure to low-level cadmium, lead and selenium on birth outcomes.* Chemosphere, 108:33-39.

[62] Huang. K., Li, H., Zhang, B., Zheng, T., Li, Y., Zhou, A., & Jiang, M. (2017). *Prenatal cadmium exposure and preterm low birth weight in China.* Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 27(5):491-496.

[63] Omeljaniuk, W. J., Socha, K., Soroczynska, J., Charkiewicz, A. E., Laudanski, T., Kulikowski, M., ...& Borawska, M. H. (2018). Cadmium and lead in women who miscarried. *Clin. Lab*, *64*, 59-67.

[64] Osorio-Yáñez, C., Gelaye, B., Enquobahrie, D. A., Qiu, C., & Williams, M. A. (2018). *Dietary intake and urinary metals among pregnant women in the Pacific Northwest*. Environmental Pollution, *236*, 680-688.

[65] Åkesson, A., Berglund, M., Schütz, A., Bjellerup, P., Bremme, K., & Vahter, M. (2002). *Cadmium exposure in pregnancy and lactation in relation to iron status.* American Journal of Public Health, 92(2):284-287.

[66] Al-Saleh, I., Shinwari, N., Mashhour, A., Mohamed, G.E.D., & Rabah, A. (2011). *Heavy metals (lead, cadmium and mercury) in maternal, cord blood and placenta of healthy women.* International Journal of Hygiene and Environmental Health, 214(2):79-101.

[67] Zhu, Y., Li, Z., Pang, Y., Huo, W., Li, N., Li, Z., ...& Wang, B. (2018). *Association between chronic exposure to tobacco smoke and accumulation of toxic metals in hair among pregnant women*. Biological trace element research. 185(2), 302-310.

[68] Tavakkoli, L., & Khanjani, N. (2016). *Environmental and occupational exposure to cadmium in Iran: a systematic review.* Reviews on environmental health, 31(4), 457-463.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 270-275, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1315932
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

A New Method for Solving Fisher-Type Equations

Fisher Tipi Denklemleri Çözmek İçin Yeni Bir Metod

Murat DÜZ[1], Ahmad ISSA[2*]

Geliş / Received: 17/06/2023 ***Revize / Revised: 22/11/2023*** ***Kabul / Accepted: 16/12/2023***

ABSTRACT

In this article, we implemented the Fourier Adomian Decomposition Method (FADM) which depends on the Fourier transform method and the Adomian decomposition method to solve Fisher-type equations. Besides, two examples are represented to show the accuracy and validity of the proposed method.

Keywords- Fourier Transform Method, Fisher Equation, Adomian Decomposition Method

ÖZ

Bu makalede, Fisher tipi denklemleri çözmek için Fourier dönüşüm metodu ve Adomian Ayrıştırma Metoduna bağlı Fourier Adomian ayrıştırma metodunu (FADM) uyguladık. Ayrıca önerilen metodun dogrulugunu göstermek için iki örnek verildi.

Anahtar Kelimeler- Fourier Dönüşüm Metodu, Fisher Denklem, Adomian Ayrıştırma Metodu

[2]*Corresponding Author Contact: ahmad93.issa18@gmail.com(https://orcid.org/0000-0001-7495-3443)
Mathematics, Karabuk University, Department of Mathematics, Faculty of Science, Karabuk University, Karabuk, Türkiye
[1]Contact: mduz@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/ 0000-0003-2387-4045)
Mathematics, Karabuk University, Department of Mathematics, Faculty of Science, Karabuk University, Karabuk, Türkiye

I. INTRODUCTION

The Fisher-type equations are a class of partial differential equations commonly used to model the spatial dynamics of population growth and propagation. Named after biologist and statistician R.A. Fisher, these equations play a crucial role in understanding the spread and distribution of biological species, epidemics, and other phenomena with spatial components [1,2]. Several methods for solving Fisher-type equations have been developed by many researchers. Humaira and Shah [3] have employed Laplace Adomian decomposition method to solve the general Fisher's equation. In [4], Yıldırım and Bayram, implemented the reduced differential transform method (RDTM) to construct explicit /exact solutions of Fisher-type equations. Ağırseven and Öziş [5] used the homotopy perturbation method for solving Fisher type equations. In addition, Bhalekar and Patade [6] used the decomposition method to give an analytical solution to Fisher's equation. Other methods for the Fishers equation are the Exp-function method [7], Q-function method [8], Adomian decomposition method [9], Laplace transform, and new homotopy perturbation methods [10]. In this article, we propose a method, namely, The Fourier Adomian Decomposition Method (FADM) to solve Fisher-type equations given by

$$u_t = u_{xx} + \alpha u(1-u). \tag{1}$$

The paper is organized as follows: In Section 2, basic definitions and theorems related to the Fourier transform and Adomian decomposition method. In Section 3, some examples have been given for the solution of the fisher equation by using FADM. Finally, we have given a conclusion.

In this article, the Fisher-type equations have been solved using the proposed method for several reasons: Firstly, FADM is known for its versatility, it can handle nonlinear problems like Fisher-type equations with relative ease. Its ability to break down complex problems into more manageable parts makes it a valuable tool in the researcher's toolbox. Secondly, FADM has a solid theoretical foundation. Leveraging the Fourier transform and the Adomian polynomials, it provides a systematic and efficient way to approximate solutions. This method allows you to express the solution as a series, making it easier to work with and potentially yielding more accurate results. Finally, FADM often proves computationally efficient, especially when dealing with problems that might be challenging for other numerical methods. This can save valuable time and resources in the research process. The choice to use FADM boils down to its adaptability, theoretical robustness, and computational efficiency, which are essential when tackling complex Fisher-type equations.

II. PRELIMINARIES AND THEOREMS

Definition 2.1. : [12] The Fourier transform of $f(t)$ is given by

$$\mathcal{F}[f(t)] = F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t).e^{-iwt}dt \tag{2}$$

Definition 2.2. : [12] The inverse Fourier transform of $F(w)$ is given by

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(w)] = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} F(w).e^{iwt}dt \tag{3}$$

Theorem 2.1.[11-12] (Linearity of Fourier Transform) If $\mathcal{F}[f_1(t)] = F_1(w)$, $\mathcal{F}[f_2(t)] = F_2(w)$, then

$$\mathcal{F}[r_1.f_1(t) + r_2.f_2(t)] = r_1.F_1(w) + r_2.F_2(w),$$

where r_1, r_2 are arbitrary constants.

Theorem 2.2.[11-12] Let $f(t)$ be continuous or partially continuous in $(-\infty,\infty)$, and $f(t), f'(t), f''(t), \dots, f^{(n-1)}(t) \to 0$ for $|t| \to \infty$. Also, if $f(t), f'(t), f''(t), \dots, f^{(n-1)}(t)$ are absolutely integrable in $(-\infty,\infty)$, then

$$\mathcal{F}\left[f^{(n)}(t)\right] = (iw)^n\mathcal{F}[f(t)] \tag{4}$$

Definition 2.3. The Dirac delta function is given by

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}$$

Some properties of the Dirac Delta distribution are as follows [12]:

i. $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1$

ii. $\int_{-\infty}^{\infty} f(t).\delta(t-t_0)dt = f(t_0)$ (5)

iii. $\int_{-\infty}^{\infty} f(t).\delta^{(n)}(t-t_0)dt = (-1)^n.f^{(n)}(t_0)$ (6)

iv. $(t-t_0)^n\delta^{(n)}(t_0) = (-1)^n n!\,\delta(t-t_0)$ (7)

Where $\delta(t-t_0)$ is given by

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t \neq t_0 \\ \infty, & t = t_0 \end{cases}$$

Theorem 2.3. [11-12] The Fourier transform of $\delta(t)$ is 1.

Theorem 2.4.[11-13] The Fourier transforms for some functions are following

$i)\mathcal{F}[1] = 2\pi.\delta(w)$

$ii)\ \mathcal{F}[t^n] = 2\pi.i^n.\delta^{(n)}(w)$

$iii)\mathcal{F}[e^{iw_0t}] = 2\pi\delta(w-w_0)$

$iv)\mathcal{F}[e^{at}] = 2\pi\delta(w+ia)$

Lemma 1. The Fourier Transform of Partial derivative functions are following:

$$\mathcal{F}\left[\frac{\partial f}{\partial x}\right] = iwF(w,y) \quad (8)$$

$$\mathcal{F}\left[\frac{\partial f}{\partial y}\right] = \frac{\partial F(w,y)}{\partial y} \quad (9)$$

$$\mathcal{F}\left[\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right] = -w^2F(w,y) \quad (10)$$

$$\mathcal{F}\left[\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right] = \frac{\partial^2 F(w,y)}{\partial y^2} \quad (11)$$

III. FADM FOR FISHER'S EQUATION

In this section, we will show the reliability of the proposed method and its compatibility with some real physical processes.

Consider the following general form of the nonlinear diffusion equation with the specified initial condition:

$$u_t = u_{xx} + F(u) \quad (12)$$

$$u(x,0) = f(x) \quad (13)$$

where $F(u)$ is a continuous nonlinear function that satisfies the conditions

$$F(0) = F(1) = 0$$
$$F'(0) > 0 > F'(1)$$
$$F(u) > 0, 0 < u < 1$$

The methodology consists of applying Fourier transform first on both sides of Eq. (12)

$$\mathcal{F}(u_t) = \mathcal{F}(u_{xx}) + \mathcal{F}(F(u))$$

Using the differentiation property of Fourier transform, we get

$$\frac{\partial U(w,t)}{\partial t} = (iw)^2U(w,t) + \mathcal{F}(F(u)) \quad (14)$$

The second step in the Fourier Adomian decomposition method is that we represent solution as an infinite series given by

$$u(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x,t) = u_0(x,t) + u_1(x,t) + u_2(x,t) + \cdots$$

Where the component $u_n(x,t), n \geq 0$ will be determined in a recursive manner.

Also, by applying inverse Fourier transform to Eq (14), our required recursive relation is given below

$$\mathcal{F}^{-1}\left[\frac{\partial U(w,t)}{\partial t}\right] = -\mathcal{F}^{-1}\left(w^2U(w,t)\right) + \mathcal{F}^{-1}\left(\mathcal{F}\left(F(u)\right)\right)$$

$$\frac{\partial u_{n+1}}{\partial t} = -\mathcal{F}^{-1}\left(w^2U_n(w,t)\right) + \mathcal{F}^{-1}\left(\mathcal{F}(A_n)\right), n \geq 0$$

Where $u_0 = u(x,0) = f(x)$ from the initial condition, and $A_n's$ are the Adomian polynomials.

Example 1: [3,5,6,9,10] Consider the following Fisher's equation

$$u_t = u_{xx} + \alpha u(1-u) \tag{15}$$

with initial condition $u(x,0) = \lambda$ for $\alpha = 1$

The exact solution of Eq (15) is

$$u(x,t) = \frac{\lambda e^t}{1-\lambda+\lambda e^t}$$

By using Fourier transform of Eq (15), we obtain

$$\mathcal{F}(u_t) = \mathcal{F}(u_{xx}) + \mathcal{F}(u) - \mathcal{F}(u^2)$$

$$\frac{\partial U(w,t)}{\partial t} = (iw)^2 U(w,t) + \mathcal{F}(u) - \mathcal{F}(u^2)$$

Now, using the inverse Fourier transform of the previous equation, we obtain

$$\mathcal{F}^{-1}\left[\frac{\partial U(w,t)}{\partial t}\right] = -\mathcal{F}^{-1}\big(w^2 U(w,t)\big) + \mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(u)\big) - \mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(u^2)\big)$$

$$\frac{\partial u_{n+1}}{\partial t} = -\mathcal{F}^{-1}\big(w^2 U_n(w,t)\big) + u_n - \mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(A_n)\big)$$

The first few components of $u_n(x,t)$ are given by

$$u_0 = \lambda,\ \ A_0 = u_0^2, \quad U_0(w,t) = \mathcal{F}(u_0) = \mathcal{F}(\lambda) = 2\pi\lambda.\delta(w)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = -\mathcal{F}^{-1}\big(w^2 U_0(w,t)\big) + u_0 - \mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(A_0)\big) = u_0 - u_0^2 = \lambda - \lambda^2$$

$$u_1 = \lambda t - \lambda^2 t,\ A_1 = 2u_0.u_1 = 2\lambda(\lambda t - \lambda^2 t), U_1(w,t) = \mathcal{F}(u_1) = 2\pi\delta.(\lambda t - \lambda^2 t)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = -\mathcal{F}^{-1}\big(w^2 U_1(w,t)\big) + u_1 - \mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(A_1)\big) == -\mathcal{F}^{-1}\big(w^2 2\pi\delta(\lambda t - \lambda^2 t)\big) + (\lambda t - \lambda^2 t) - 2\lambda(\lambda t - \lambda^2 t)$$
$$= \lambda t - \lambda^2 t - 2\lambda^2 t + 2\lambda^3 t$$

$$u_2 = \frac{\lambda t^2}{2} - \frac{3\lambda^2 t^2}{2} + \lambda^3 t^2,$$

$$A_2 = 2u_0.u_2 + u_1^2 = (2\lambda^2 - 5\lambda^3 + 3\lambda^4)t^2$$

$$U_2(w,t) = \mathcal{F}(u_2) = 2\pi\delta\left(\frac{\lambda t^2}{2} - \frac{3\lambda^2 t^2}{2} + \lambda^3 t^2\right)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} = -\mathcal{F}^{-1}\big(w^2 U_2(w,t)\big) + u_2 - \mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(A_2)\big)$$
$$= -\mathcal{F}^{-1}\left(w^2 2\pi\delta\left(\frac{\lambda t^2}{2} - \frac{3\lambda^2 t^2}{2} + \lambda^3 t^2\right)\right) + \frac{\lambda t^2}{2} - \frac{3\lambda^2 t^2}{2} + \lambda^3 t^2 - (2\lambda^2 - 5\lambda^3 + 3\lambda^4)t^2$$
$$= \frac{\lambda t^2}{2} - \frac{3\lambda^2 t^2}{2} + \lambda^3 t^2 - (2\lambda^2 - 5\lambda^3 + 3\lambda^4)t^2$$

$$u_3 = \left(\frac{\lambda}{2} - \frac{7\lambda^2}{2} + 6\lambda^3 - 3\lambda^4\right)\frac{t^3}{3}$$

$$\vdots$$

and so on. Therefore, on taking the sum of the above iterations, we get

$$u(x,t)=\sum_{n=0}^{\infty}u_n(x,t)=\lambda+(\lambda-\lambda^2)t+\left(\frac{\lambda}{2}-\frac{3\lambda^2}{2}+\lambda^3\right)t^2+\left(\frac{\lambda}{6}-\frac{7\lambda^2}{6}+2\lambda^3-\lambda^4\right)t^3+\cdots$$

Which leads to the exact solution of equation (15)

$$u(x,t)=\frac{\lambda e^t}{1-\lambda+\lambda e^t}$$

Example 2[5, 6] Consider the following Fisher's equation

$$u_t=u_{xx}+6u(1-u) \tag{16}$$

with initial condition $u(x,0)=\frac{1}{(1+e^x)^2}$

By using Fourier transform of Eq (16), we obtain

$$\mathcal{F}(u_t)=\mathcal{F}(u_{xx})+6\mathcal{F}(u)-6\mathcal{F}(u^2)$$

$$\frac{\partial U(w,t)}{\partial t}=(iw)^2U(w,t)+6\mathcal{F}(u)-6\mathcal{F}(u^2)$$

Now, using the inverse Fourier transform of the previous equation, we obtain

$$\frac{\partial u_{n+1}}{\partial t}=-\mathcal{F}^{-1}\big(w^2U_n(w,t)\big)+\mathcal{F}^{-1}\big(\mathcal{F}(A_n)\big)$$

The first few components of $u_n(x,t)$ are given by

$$u_0=\frac{1}{(1+e^x)^2},A_0=6u_0-6u_0^2$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t}=-\mathcal{F}^{-1}\big(w^2U_0(w,t)\big)+A_0=\frac{\partial^2u_0}{\partial x^2}+6u_0-6u_0^2=\frac{4e^{2x}-2e^x}{(1+e^x)^4}+\frac{6}{(1+e^x)^2}-\frac{6}{(1+e^x)^4}=\frac{10e^x}{(1+e^x)^3}$$

$$u_1(x,t)=\frac{10e^xt}{(1+e^x)^3}$$

$$A_1=6u_1-12u_0u_1$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t}=-\mathcal{F}^{-1}\big(w^2U_1(w,t)\big)+A_1=\frac{\partial^2u_1}{\partial x^2}+A_1=\frac{50e^x(e^{2x}-1)}{(1+e^x)^4}t$$

$$u_2(x,t)=\frac{25e^x(e^{2x}-1)}{(1+e^x)^4}t^2$$

$$A_2=6u_2-12u_0u_2-6u_1^2$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t}=-\mathcal{F}^{-1}\big(w^2U_2(w,t)\big)+A_2=\frac{\partial^2u_2}{\partial x^2}+A_2=-125\frac{e^x(-1+7e^x-4e^{2x})}{(1+e^x)^5}t^2$$

$$u_3(x,t)=-\frac{125}{3}\frac{e^x(-1+7e^x-4e^{2x})}{(1+e^x)^5}t^3$$

$$\vdots$$

and so on. Therefore, on taking the sum of the above iterations, we get

$$u(x,t)=\frac{1}{(1+e^x)^2}+\frac{10e^xt}{(1+e^x)^3}+\frac{25e^x(e^{2x}-1)}{(1+e^x)^4}t^2-\frac{125}{3}\frac{e^x(-1+7e^x-4e^{2x})}{(1+e^x)^5}t^3+\cdots$$

Which matches highly accurately with the literature

IV. CONCLUSION

In this study, employing the Fourier Adomian Decomposition Method (FADM) to solve Fisher-type equations has proven to be a good choice. Through its versatile approach, FADM effectively handles the inherent nonlinearity of Fisher equations, providing a systematic framework for obtaining accurate approximations. The theoretical underpinnings of FADM, utilizing Fourier transform and Adomian polynomials, contribute to the method's reliability and efficiency. The ability to decompose complex problems into more manageable

components facilitates a clearer understanding of the solution process. Furthermore, FADM showcases its prowess, demonstrating efficiency in tackling challenges that may pose difficulties for other numerical methods. This computational advantage translates to saved time and resources in the research endeavour. Finally, the application of FADM in solving Fisher-type equations emerges as a robust and efficient methodology, offering a promising avenue for researchers seeking accurate solutions to complex mathematical problems in various scientific domains.

REFERENCES

[1] Fisher, R. (1937). *The wave of advance of advantageous genes, Annals of eugenics*, 7, 355-369.
[2] Kolmogorov, A., Petrovsky, L. & Piskunov, N. (1937). *An investigation of the diffusion equation combined with an increase in mass and its application to a biological problem, Bull Uni Moscow Ser Int A*, 1, 1-26.
[3] Ali, A., Humaira, L. & Shah, K. (2018). *Analytical solution of general Fisher's equation by using Laplace Adomian decomposition method, J. Pure Appl. Math*, 2, 1-4.
[4] Yıldırım, K., Ibis, B. & Bayram, M. (2012) *New solutions of the nonlinear Fisher type equations by the reduced differential transform, Nonlinear Sci Lett A*, 3, 29-36.
[5] Ağırseven, D. & Öziş, T. (2010) *An analytical study for Fisher type equations by using homotopy perturbation method, Computers & Mathematics with Applications*, 60, 602-609.
[6] Bhalekar, S. & Patade, J. (2016) *An analytical solution of fishers equation using decomposition method, Am. J. Comput. Appl. Math*, 6, 123-127.
[7] Zhou, X. (2008) *Exp-function method for solving Fisher's equation. InJournal of Physics: Conference Series*, 96, 012063.
[8] Kudryashov, N. & Zakharchenko, A. (2014). *A note on solutions of the generalized Fisher equation, Applied Mathematics Letters*, 32, 53-56.
[9] Wazwaz, A. & Gorguis, A. (2004) *An analytic study of Fisher's equation by using Adomian decomposition method, Applied Mathematics and Computation*, 154, 609-620.
[10] Aminikhah, H., Mehrdoust, F. & Jamalian, A. (2012) *A new efficient method for nonlinear Fisher-type equations, Journal of Applied Mathematics*, 1.
[11] Boggess, A. & Narcowich, F. (2015) *A first course in wavelets with Fourier analysis, John Wiley & Sons*.
[12] Bracewell, R. (1986) *The Fourier transform and its applications, New York: McGraw-Hill, 31999*, 267-272.
[13] Düz, M., Issa, A. & Avezov, S. (2022) *A new computational technique for Fourier transforms by using the Differential transformation method, Bulletin of International Mathematical Virtual Institute*, 12 (2), 287-295.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 276-284, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1361618
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Gene Expression Profiling with Transcriptomic Data Analysis In Small Cell Lung Cancer

Küçük Hücreli Akciğer Kanserinde Transkriptomik Veri Analizi İle Gen Ekspresyon Profili

Gözde Öztan[1*]

Geliş / Received: 16/09/2023 ***Revize / Revised: 03/12/2023*** ***Kabul / Accepted: 17/12/2023***

ABSTRACT

Small-cell lung cancer (SCLC) is aggressive due to fast tumor development, early metastatic dissemination, and genetic instability. In this study, the RNA sequencing method was applied to the selected experimental data set for gene expression analysis in lung tissue samples of SCLC using Array Express functional genomic data. Array Express is a public repository for transcriptomic and related data that aims to store MIAME-compliant data in accordance with MGED recommendations. We wanted to look into the genomic sequence data (GSE60052) of 7 healthy controls and 75 SCLC patients through the GEO2R platform and the NCBI Gene Expression Omnibus (GEO) using the accession number E-GEOD-60052. The GSE60052 dataset of the genomic expression study was found on the GEO2R platform using the Illumina HiSeq 2000 RNA sequencing method in lung tissue samples from 75 SCLC patients and 7 controls. This was done to find out how the gene profile in SCLC were being expressed. In patients both in the SCLC and the control group, it was identified through the Volcano plot graph that HOXD10, FAM83A, HOXB1, ECEL1, GATA4, DMRT3, TGM3, CHP2, and PPP1R1A genes were down-regulated (log2(fold change) < -5), while PGC, SFTPC, SLC6A4, and CSF3 genes were up-regulated (log2 (fold change > +5). We share the view that SCLC is a type of neuroendocrine tumor with high malignancy and a poor prognosis, and identifying significant genes through expression profiling in lung tissue samples may be effective in elucidating the complex mechanisms underlying SCLC and determining their effect on the prognosis of the disease. The use of related genes as possible prognostic biomarkers in targeted therapy in SCLC could be enables the determination of the effects of the tumor microenvironment on immune cells and stromal cells.

Keywords- Biomarker, Gene Expression, RNA Sequencing, Small Cell Lung Cancer, Transcription Profile Array

ÖZ

Küçük hücreli akciğer kanseri (SCLC), hızlı tümör gelişimi, erken metastatik yayılım ve genetik dengesizlik nedeniyle agresiftir. Array Express, MIAME uyumlu verileri MGED önerilerine uygun olarak depolamayı amaçlayan, transkriptomik ve ilgili veriler için halka açık bir depodur. Bu çalışmada, Array Express fonksiyonel genomik datası kullanarak, SCLC'nin akciğer dokusu örneklerinde gen ekspresyon analizine yönelik seçilen deneysel veri setinde RNA dizileme yöntemi uygulanmıştır. E-GEOD-60052 erişim numarası üzerinden NCBI Gene Ekspresyon Omnibus (GEO) kullanarak 7 sağlıklı kontrol ve 75 SCLC'li hastaların genomik dizi verilerini (GSE60052) GEO2R platformu aracılığıyla araştırmayı amaçladık. SCLC'de genlerin ekspresyon düzeylerinin

[1]*Corresponding Author Contact: gozdeoztan@istanbul.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-2970-1834)
Department of Medical Biology, Istanbul Faculty of Medicine, Istanbul University, Istanbul, Turkey

belirlenmesi için 75 SCLC hastasından ve 7 kontrolden alınan akciğer dokusu örneklerinde Illumina HiSeq 2000 RNA dizileme yöntemi kullanılarak genomik ekspresyon çalışmasının GSE60052 veri seti GEO2R platformu üzerinden tespit edildi. SCLC'li hastalar ve kontrol grubunda, HOXD10, FAM83A, HOXB1, ECEL1, GATA4, DMRT3, TGM3, CHP2, PPP1R1A genlerinin aşağı regüle olduğu (log2(fold change) < -5), PGC, SFTPC, SLC6A4, CSF3 genlerinin (log2 (fold change > +5) ise yukarı regüle olduğu Volcano plot grafiği aracılığıyla tanımlandı. Yüksek maligniteye ve kötü prognoza sahip bir tür nöroendokrin tümör olan SCLC'nin, akciğer dokusu örneklerinde ekspresyon profillemesiyle anlamlı bulunan genlerin tanımlanmasının SCLC'nin altında yatan karmaşık mekanizmalarının aydınlatılmasında ve hastalığın prognozuna olan etkisinin belirlenmesinde etkili olabileceği görüşünü paylaşmaktayız. İlgili genlerin SCLC'de hedefe yönelik tedavide olası prognostik biyobelirteçler olarak kullanılması, tümör mikro ortamının bağışıklık hücreleri ve stromal hücreler üzerindeki etkilerinin belirlenmesini sağlar.

Anahtar Kelimeler- Küçük Hücreli Akciğer Kanseri, Transkripsiyon Profil Array, Gen Ekspresyonu

I. INTRODUCTION

Lung cancer is the leading cause of cancer-related mortality worldwide [1]. Estimates from GLOBOCAN 2020 indicate that 2.2 million new cases of lung cancer (11.4%) and about 1.8 million deaths from lung cancer (18.0%) took place in 2020 [2]. Lung neoplasms rank second among cancer diagnoses in both men and women, behind only breast and prostate cancers, respectively [3]. Lung cancer kills 350 people daily, about 2.5 times more than colorectal cancer, the second-greatest cause of cancer deaths [4]. Small-cell lung cancer (SCLC) and non-small-cell lung cancer (NSCLC) are the two main subtypes of lung cancer that may be distinguished by histopathology. The most lethal form of lung cancer, SCLC, is responsible for 13–15% of all cases and has a 5-year survival rate of fewer than 7%. The course of SCLC is defined as being very aggressive due to an unstable tumor genome, a quick growth rate, enhanced angiogenesis, and a high propensity for metastatic spread [1]. Only about a third of individuals get their cancer detected at an early enough stage to benefit from multimodal treatment, while the majority have advanced metastatic disease. Genomic analysis of SCLC shows widespread chromosomal rearrangements and a significant mutation load, which almost always includes functional inactivation of TP53 and RB1. Subtypes of human SCLC have been established by analyzing the expression of prominent transcriptional regulators, and analyses of murine models have demonstrated significant intratumoral variability [5].

The embryonic development of several organs is controlled by the hedgehog signaling pathway. Adult stem cell renewal and organ homeostasis are both regulated by the hedgehog signaling pathway. Within the classical hedgehog signaling pathway, three ligands have been identified: Sonic Hedgehog, Indian Hedgehog, and Desert Hedgehog [6]. SCLC cells stimulate the hedgehog signaling pathway, which regulates airway epithelial shape and stem-cell destiny throughout embryonic development. It is essential to activate the pathway in order to maintain the viability of SCLC cells both in vitro and in vivo [7]. One important route for physiological cell death in vertebrates is the mitochondrial pathway to apoptosis.The mitochondrial outer membrane permeabilization (MOMP) process starts the cell death pathway by letting apoptogenic chemicals into the cytosol from the inner and outer mitochondrial membranes that are intertwined. The BCL-2 proteins that help cells die (BCL-2 associated x protein and BCL-2 antagonist killer 1) start MOMP. The BCL-2 proteins that stop cells from dying (BCL-2, BCL-xl, and myeloid cell leukemia 1) stop it. Caspases are activated when mitochondria produce pro-apoptotic substances, including cytochrome c, which causes the creation of the apoptosome, a multimeric complex. While these pathways are critical for healthy cellular homeostasis, they are also involved in the development of many illnesses [8]. The mitochondrial apoptosis pathway is now being investigated as a potential therapy option for SCLC. There are proapoptotic and antiapoptotic functions for proteins in the Bcl-2 family, which are essential regulators of apoptosis. SCLC cell lines and primary tissues overexpress Bcl-2, which inhibits BAX and BAK [7].

Single-cell RNA sequencing, or scRNA-seq, has been used to study and describe the molecular features of lung cancer cells and the tumor microenvironment in great detail. Recent advances in high-throughput sequencing methods, particularly single-cell sequencing, have made it feasible to characterize lung cancer molecularly in great detail [9]. New generation single-cell sequencing method have made it possible to create a detailed profile of individual cells in the tumor microenvironment (TME) and their potential involvement in tumorigenic processes. Tumor cells in SCLCs showed a wide range of characteristics, most of which were associated with the cell cycle, the immune system, and hypoxia. The results obtained from the previous study showed that major transcription factors in SCLC exhibit intratumor variability in gene expression patterns and associated activities. A higher response to immune control inhibitors has been shown in SCLC, a non-neuroendocrine tumor, where there is a link between elevated inflammatory gene markers and immune cell infiltrates [10]. SCLC contains several chromosomal rearrangements and mutations, according to omics profiling [11]. The discovery of immune checkpoint inhibitors, either alone or in combination with chemotherapy, has

shown long-term benefits for only a tiny proportion of patients [9]. Recent advances in single-cell harvesting, liquid biopsies, and genomics-bioinformatics analysis hold promise as potent new methods for studying drug resistance. Still, there may be scientific grounds and a better clinical result for SCLC if we learn more about its features, such as tumor immunity, immunological microenvironment, intratumoral heterogeneity, and genetic profiles and development [12].

The scRNA-seq approach used in SCLC offers a thorough cellular diversity setting in lung tumor tissues, according to our study. The ability to compare and contrast tumor cell heterogeneity and cellular variations is therefore realized. Additionally, the scRNA-seq approach may reveal genetic processes that may lead to drug resistance after tumor therapy. Is there a relationship between important SCLC-related genes and the prognosis of the disease when creating an expression profile from SCLC lung tissue samples? The goal is to learn all the genes that are involved in SCLC cancer cell biology and phenotype by studying functional genomic data sets. Also, we discovered genes that could be used as biomarkers for SCLC that can help guide targeted treatment. The study's hypothesis can help us learn more about the molecular processes that lead to lung cancer. The aim of this study was to examine the underlying pathogenesis of SCLC and potential molecular markers and gene expression levels between patients with SCLC and healthy control groups.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Selection of an experimental dataset via the Array Express platform

The primary objective of the first step of our investigation was to show gene expression patterns. To do this, we searched the Array Express database, which openly publishes high-throughput functional genomic data, utilizing gene names and characteristics such as Gene Ontology keywords. The Array Express database allows for the querying of all experiments that have disease expression, and it also allows for the accessing of data based on the accession numbers and sequence design names of the experiments, respectively. Array Express, which provides data analysis, mining, and visualization by providing easy access to large volumes of data, such as the transcriptomic data analysis we included in our study, via the web, has many filtering options such as study type, experimental design, organism, technology, assay by molecule, access to raw data, access to processed data, released, link type, and file type in order to provide deeper integration. Identification of differentially expressed genes by transcriptome sequencing (RNA array) will provide guidance in the pathogenesis of SCLC. Array Express is an open database for transcriptomic data that follows the MGED-recommended format for storing MIAME-compliant information (https://www.ebi.ac.uk/biostudies/arrayexpress). In this study, the experimental data set with the accession number E-GEOD-60052 was chosen. Samples of lung tissue from SCLC patients were sequenced using the Illumina HiSeq 2000 RNA sequencing technology and analyzed on the Array Express platform to determine gene expression.

B. Identification of non-coding RNAs via the NCBI Gene Expression Omnibus (GEO) database

Gene chip data were searched using the GEO database, a publicly available genomic database containing all gene expression data, chips, and microarrays. (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/geo). The coding RNA sequence dataset (GSE60052) was downloaded from the GEO database. After that, we used the GEO database, which stores both raw and processed data related to high-throughput gene expression and genomic studies, including sample designs, methods, and experimental designs. As the GEO database continues to evolve, it will include an increasing amount of gene expression data. This opens up new possibilities for solving data complexity and conducting data queries, visualizations, and analyses straight from the GEO website. Filling up the "GEO access" query box with the GEO accession number chosen in the Array Express database does this. The next step is to run the data via the GEO2R program for analysis.

RNA sequencing data from 75 individuals diagnosed with SCLC and 7 healthy individuals was detected using the GEO2R program through GEO, a functional genomic data repository for the dataset with accession number E-GEOD-60052. GEO2R is a web-based, user-interactive application for analyzing expression profile array datasets for differentially expressed genes (DEGs). GEO2R's define group command makes it easy to categorize subjects into different categories. Simple analysis customization is made possible using GEO2R's panel choices. Selecting the statistical trimmer, data normalization technique, and cutoff value from the option panel enables users to exclude genes that do not meet the set cutoff value [13].

The "GEO2R," "Options," "Profile Plot," and "R Script" tabs are part of the GEO2R suite of tools. This GEO2R program is based on the R packages Limma and GEOQuery, both developed by Bioconductor. The Benjamini-Hochberg false discovery rate approach is used by default for multiple testing corrections. Limma and DESeq2 offer a variety of options for adjusting P-values. In an effort to account for the possibility of false positive findings, these modifications are known as multiple-testing corrections. By default, the Benjamini & Hochberg false discovery rate approach is used because it effectively limits false positives while also discovering statistically important genes.

C. Evaluation of gene data through the Human Protein Atlas database

We used the Human Protein Atlas database to sort the proteins made by the genes we found to be statistically significant using the RNA-Seq method into groups based on the type of cell they were in and to find out where in the body they were found. It can be a guide in determining cell-based treatment options specific to disease-related genes through the Human Protein Atlas database.

The Human Protein Atlas database's section on tissue cell type offers cell type expression specificity estimates for all human protein-coding genes. These estimates were developed by an integrated network analysis of publicly accessible bulk RNAseq data (https://www.proteinatlas.org). Estimating which genes were enriched in which cell types within a particular tissue was done using a specificity classification. Tissue slices stained with immunohistochemistry were used for the analysis. The cell-type specificity of genes in lung tissue was investigated. The cell types of the down-regulated and up-regulated genes in the lung tissue were determined, as were the enrichment scores of the genes.

III. RESULTS

The raw data of GSE60052 was efficiently processed using the limma package in R using smoothing, normalization, and log2 transformation. Using the Illumina HiSeq 2000 RNA sequencing technology in the GEO2R software, lung tissue samples from 75 SCLC patients and 7 controls were sequenced to find genes and pathways that are unique to SCLC. The GSE60052 dataset was from a genome-wide expression study.

The findings of RNA-seq or other omics investigations are often presented using volcano plot graphics. The genes that are most significantly up-regulated are shown to the right of a volcano plot, whereas the genes that are most significantly down-regulated are displayed to the left of the plot, and the most statistically significant genes are displayed at the top of the plot. Non-coding RNAs expressed at different levels are shown according to the log2 fold change in the volcano plot. Genes with a p-value of 0.05 are considered to be substantially differentially expressed.

According to the Volcano plot, homeobox D10 (HOXD10), family with sequence similarity 83 member A (FAM83A), homeobox B1 (HOXB1), endothelin converting enzyme like 1 (ECEL1), GATA binding protein 4 (GATA4), doublesex and mab-3 related transcription factor 3 (DMRT3), transglutaminase 3 (TGM3), calcineurin like EF-hand protein 2 (CHP2), and protein phosphatase 1 regulatory inhibitor subunit 1A (PPP1R1A) genes were downregulated (log2(fold change) <-5) (Table 1), while progastricsin (PGC), surfactant protein C (SFTPC), solute carrier family 6 member 4 (SLC6A4), and colony stimulating factor 3 (CSF3) genes (log2 (fold change > +5) were identified as upregulated (Figure 1) (Table 2).

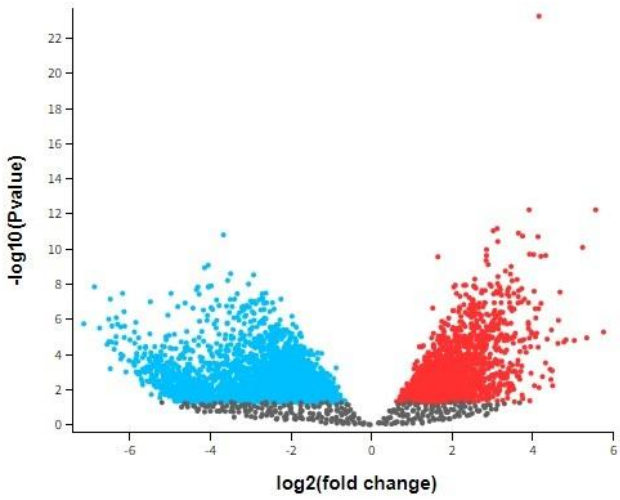


Figure 1. Volcano plot (comparison of patients with SCLC and a healthy control group)

Table 1. Down-regulated genes obtained in comparison of patients with SCLC and individuals in the healthy control group (log2(fold change) < -5)

Gene ID	Genes	log2 (fold change)	-log10 (p value)
3236	HOXD10	-6.177	7.488
84985	FAM83A	-6.333	6.099
3211	HOXB1	-6.386	4.305
9427	ECEL1	-5.124	3.392
2626	GATA4	-5.304	2.518
58524	DMRT3	-5.627	3.206
7053	TGM3	-5.091	2.392
63928	CHP2	-5.083	2.423
5502	PPP1R1A	-5.435	2.49

Table 2. Up-regulated genes were obtained in comparison between patients with SCLC and individuals in the healthy control group (log2 (fold change > +5)

Gene ID	Genes	log2 (fold change)	-log10 (p value)
5225	PGC	5.235	10.101
6440	SFTPC	5.337	4.956
6532	SLC6A4	5.559	12.235
1440	CSF3	5.029	4.809

By looking at the boxplot distribution, it was decided that some samples from people with SCLC and some samples from people in the healthy control group could be used for differential expression analysis. Expression values were determined using the limma package in R software (Figure 2). Black bars give the median value. The resulting median-centered values indicate that the data are normalized and cross-comparable.

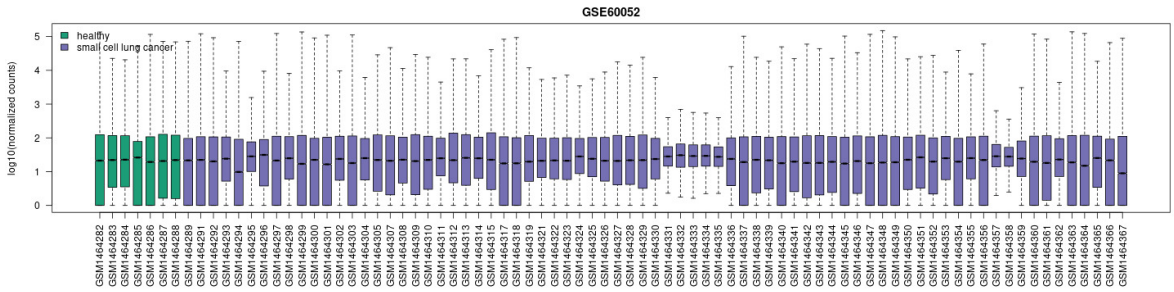


Figure 2. R boxplot displaying the distribution of sampled values

In the next part of the study, the Human Protein Atlas database (https://www.proteinatlas.org) was used to look at the genome-wide analysis of genes found to be important in SCLC that make proteins. Accordingly, among the down-regulated genes, the expression specificities of the HOXD10 gene in fibroblasts and mast cells, the FAM83A, HOXB1, TGM3, and CHP2 genes in respiratory ciliary cells, the ECEL1, GATA4, and DMRT3 genes in fibroblasts, and the PPP1R1A gene in smooth muscle cells were determined (Table 3).

Table 3. Cell types and enrichment scores in lung tissue of downregulated genes according to the Human Protein Atlas database

Genes	Cell type	Enrichment score
HOXD10	Fibroblast (mesenchymal cells)	0.346
HOXD10	Mast cells (blood and immune cells)	0.302
FAM83A	Respiratory ciliary cells (Glandular epithelial cells)	0.564
HOXB1	Respiratory ciliary cells (Glandular epithelial cells)	0.376
ECEL1	Fibroblast (mesenchymal cells)	0.442
GATA4	Fibroblast (mesenchymal cells)	0.318
DMRT3	Fibroblast (mesenchymal cells)	0.303
TGM3	Respiratory ciliary cells (Glandular epithelial cells)	0.596
CHP2	Respiratory ciliary cells (Glandular epithelial cells)	0.412
PPP1R1A	Smooth muscle cells (muscle cells)	0.443

Based on the Human Protein Atlas database, the expression specificities of the PGC gene in type II alveolar cells and macrophages, the SFTPC gene in type II alveolar cells and macrophages, the SLC6A4 gene in type I alveolar cells, and the CSF3 gene in neutrophils were found (Table 4).

Table 4. Cell types and enrichment scores in lung tissue of upregulated genes according to the Human Protein Atlas database

Genes	Cell type	Enrichment score
PGC	Type II alveolar cells (specialized epithelial cells)	0.748
PGC	Macrophages (blood and immune cells)	0.585
SFTPC	Type II alveolar cells (specialized epithelial cells)	0.830
SFTPC	Macrophages (blood and immune cells)	0.581
SLC6A4	Type I alveolar cells (specialized epithelial cells)	0.343
CSF3	Neutrophils (blood and immune cells)	0.302

IV. DISCUSSION

A complete genomic or proteomic study is essential to identifying cancer biology. The vast genetic study of many solid tumors, including SCLC, has only recently been possible because of advances in molecular biology. Next-generation sequencing aided in the genomic and epigenetic analyses; RNA microarrays helped identify the transcriptome; and mass spectrometry provided the proteomics [14]. Using omics data, researchers found that SCLC had a high mutation load and widespread chromosomal rearrangements.

Immune checkpoint inhibitors were developed as standalone medicines or in conjunction with chemotherapy, but only a tiny proportion of patients had a persistent benefit [11]. Despite an encouraging early response to systemic therapy, SCLC continues to be a malignancy with a dismal prognosis. The majority of patients eventually acquire severe disease, quickly develop resistance to therapy, and ultimately pass away as a result of

their illness. Patients with NSCLC have greatly benefited from targeted therapy, while those with SCLC have not seen the same progress. The progress made in our molecular and genetic knowledge of tumor biology in recent years, however, bodes well for big advances for patients with SCLC in the near future. PARP1, BCL-2, WEE1, EZH2, and DLL3 are only a few of the new targets in SCLC that have been uncovered by thorough genomic, proteomic, and transcriptome investigations [15].

HOXD10 belongs to the homeobox gene family and is a master regulator that can directly affect organogenesis and play a role in maintaining differentiated tissue functions [16]. They found the HOXD10 gene, which we found to be down-regulated in our study, to be up-regulated in a study conducted for the determination of biomarkers and pathways in SCLC [17]. High expression of FAM83A in lung adenocarcinoma (LUAD), the most common subtype of non-small cell lung cancer, predicted a poor prognosis in LUAD patients. Regardless of gender, low-expression individuals have a better prognosis than high-expression patients [18]. Through analysis of RNA-Seq data from the encyclopedia lung cancer cell line, the level of FAM83A antisense RNA 1 (FAM83A-AS1) was found to be higher in LUAD, squamous cell lung cancer (LUSC), and large cell lung cancer (LLC), but not in SCLC. It has been confirmed that it is not higher [19].

Specific hsa-let-7g effects on HOXB1 were reversed when HOXB1 expression was reduced in lung cancer cells. Hsa-let-7g overexpression has been linked to lung cancer progression by inhibiting HOXB1 expression [20]. Reduced GATA4 levels were strongly linked with a poor prognosis, and these levels were associated adversely with WNT7B or TGF-2. Recent research demonstrates the tumor-suppressing role of GATA4 in lung cancer and suggests that therapeutic targeting of TGF-β signaling may be an effective strategy for treating GATA4-deficient lung cancer [21]. In our study, a parallel decrease in GATA4 expression level was observed, and we can say that the course of the disease is associated with a poor prognosis in the SCLC patients we selected in the study.

DMRT3 was found to be significantly upregulated in LUAD cell lines. High DMRT3 expression has been observed to be significantly associated with poor overall survival in LUAD [22]. The copy number of DMRT3 is different in different LUSC tumors. Tumors that don't have DMRT3 deletions express DMRT3 much more than tumors that do [23]. We determined that the DMRT3 gene was downregulated in the SCLC patient group. Compared with healthy control groups, TGM3 expression was found to be higher in cancer groups, including LUAD and LUSC [24]. We identified the TGM3 gene as downregulated in the patient group with SCLC.

New evidence suggests that the protein CHP2 promotes NSCLC tumor growth, suggesting that it might be used as a prognostic indicator or therapeutic target for the illness. Upregulation of CHP2 was seen in NSCLC tissues and cells, and data showed that high CHP2 levels were inversely related to patients' 5-year survival rates [25]. In our study, we found that the expression level of the CHP2 gene was downregulated in patients with SCLC. The expression of the PPP1R1A gene has been detected in normal tissues and has also been determined to be reduced in various lung cancer cell lines [26]. Based on these results, it can be said that similar results were obtained with our study. When we compared patients with SCLC to healthy controls, we determined that four genes: PGC, SFTPC, SLC6A4, and CSF3 were upregulated. One study reported that circular progastricsin (circ-PGC) was upregulated in NSCLC tissues and cells. Circ-PGC knockdown has been determined to inhibit NSCLC cell viability, colony formation, cell migration, invasion, and glycolysis metabolism [27].

The SFTPC gene encodes a protein known as pulmonary-associated surfactant protein C, which is necessary for lung function and homeostasis. Low levels of SFTPC expression were linked to poor overall survival in lung adenocarcinoma patients, and both human lung cancer tissues and cell lines showed downregulation of SFTPC expression. SFTPC overexpression inhibits lung cancer cell growth in vitro and in vivo [2]. SLC6A4 is a serotonin reuptake transporter that recycles serotonin from the synaptic cleft. According to the results, SLC6A4 overexpression in non-small cell lung cancer is linked to a dismal prognosis because it turns on the cMyc oncogene [29]. High expression in the binding subgroup of CSF3 and granulocyte-colony stimulating factor 3 receptor (CSF3R) has been associated with a good prognosis in LUAD and a poor prognosis in LUSC. The highly expressed binding subset of CSF3 and CSF3R indicates an unfavorable prognosis, which is co-regulated by all common upregulated genes associated with inflammatory and signal transduction [30].

In our study, the role of genes that may be associated with SCLC was investigated using bioinformatic analyses taken from public databases. In SCLC, the expression and functions of genes related to immunity in immune cells that had moved into the tumor and to inflammation in fibroblasts were studied. Additional studies will be conducted using SCLC cohorts with larger patient groups, which should support the results obtained from this study. In order to confirm our findings, the expression levels of genes identified as significant by RNA sequencing should be investigated using real-time quantitative PCR as an alternative tool.

So that we can figure out whether the SLCL prognostic process is good or bad, we look at the pathways where the differentially expressed genes are enriched for both up-regulated and down-regulated genes separately. These genes are increased in SCLC, and their products are involved in cellular processes such as mitosis, the cell

cycle, DNA repair, transcriptional control, and the p53 signaling pathway. These pathways are the primary targets of anti-cancer medications and are well-known to have a significant role in cancer etiology. It has been discovered that the products of genes that are downregulated in SCLC are linked to the control of the immune response. Only 75 SCLC patients and 7 control samples were used in this study's experimental data set for gene expression analysis in SCLC lung tissue samples through Array Express data. This shows that the sample size for the control group is small. The Human Protein Atlas database was used to find out which cell types express these protein-coding genes. The Array Express platform and the GEO2R program through the GEO database were used to profile and analyze gene expression. These databases included in the study are web-accessible and offer easy accessibility and rapid evaluation of data for bioinformatics analyses.

In the future, we expect that by analyzing RNA sequencing and proteogenomic data for this fatal illness, more effective treatment regimens based on the molecular processes of SCLC will be developed. Also, genomic and transcriptomic data from gene expression profiling show that they can be used as molecular biomarkers for targeted therapies in SCLC.

V. CONCLUSION

It is well established that the tumor microenvironment is a crucial factor in tumor development and progression. We determined that the tumor microenvironment consists of stromal cells (fibroblasts and mesenchymal cells), macrophages, neutrophils, and Type I and Type II alveolar cells, in addition to cancer cells. Based on the data we collected, new therapeutic approaches can be made using potential prognostic and predictive biomarkers that target all of these cells in the tumor microenvironment to find out how SCLC grows.

Ethics Committee Approval: Since this study was obtained from bioinformatics analysis data, ethics committee approval is not required.

REFERENCES

[1] Liang, J., Guan, X., Bao, G., Yao, Y., & Zhong, X. (2022). Molecular subtyping of small cell lung cancer. *Semin Cancer Biol*, 86(Pt 2), 450-462.

[2] Li, C., Lei, S., Ding, L., Xu, Y., Wu, X., Wang, H., Zhang, Z., Gao, T., Zhang, Y., Li, L. (2023). Global burden and trends of lung cancer incidence and mortality. *Chin Med J*, 136(13), 1583-1590.

[3] Thandra, K.C., Barsouk, A., Saginala, K., Aluru, J.S., Barsouk, A. (2021). Epidemiology of lung cancer. *Contemp Oncol*, 25(1), 45-52.

[4] Siegel, R.L., Miller, K.D., Wagle, N.S., Jemal, A. (2023). Cancer statistics, 2023. *CA Cancer J Clin*, 73(1), 17-48.

[5] Rudin, C. M., Brambilla, E., Faivre-Finn, C., & Sage, J. (2021). Small-cell lung cancer. *Nat Rev Dis Primers*, 7(1), 3.

[6] Abe, Y., Tanaka, N. (2016). The Hedgehog Signaling Networks in Lung Cancer: The Mechanisms and Roles in Tumor Progression and Implications for Cancer Therapy. *Biomed Res Int*, 2016(7969286), 1-11.

[7] van Meerbeeck, J. P., Fennell, D. A., & De Ruysscher, D. K. (2011). Small-cell lung cancer. *Lancet*, 378(9804), 1741-1755.

[8] Gupta, S., Kass, G.E.N., Szegezdi, E., Joseph, B. (2009). The mitochondrial death pathway: a promising therapeutic target in diseases. *J Cell Mol Med*, 13(6), 1004-33.

[9] Li, Q., Wang, R., Yang, Z., et al. (2022). Molecular profiling of human non-small cell lung cancer by single-cell RNA-seq. *Genome Med*, 14(1), 87.

[10] Tian, Y., Li, Q., Yang, Z., et al. (2022). Single-cell transcriptomic profiling reveals the tumor heterogeneity of small-cell lung cancer. *Signal Transduct Target Ther*, 7(1), 346.

[11] Meijer, J. J., Leonetti, A., Airo, G., et al. (2022). Small cell lung cancer: Novel treatments beyond immunotherapy. *Semin Cancer Biol*, 86(Pt 2), 376-385.

[12] Wang, Y., Zou, S., Zhao, Z., Liu, P., Ke, C., & Xu, S. (2020). New insights into small-cell lung cancer development and therapy. *Cell Biol Int*, 44(8), 1564-1576.

[13] Agapito, G., Milano, M., Cannataro, M. (2022). A statistical network pre-processing method to improve relevance and significance of gene lists in microarray gene expression studies. *BMC Bioinformatics*, 23(6):393.

[14] Hayashi, R., & Inomata, M. (2022). Small cell lung cancer; recent advances of its biology and therapeutic perspective. *Respir Investig*, 60(2), 197-204.

[15] Yuan, M., Zhao, Y., Arkenau, H. T., Lao, T., Chu, L., & Xu, Q. (2022). Signal pathways and precision therapy of small-cell lung cancer. *Signal Transduct Target Ther*, 7(1), 187.

[16] Li, S., Zhang, J., Zhao, Y., Wang, F., Chen, Y., & Fei, X. (2018). miR-224 enhances invasion and metastasis by targeting HOXD10 in non-small cell lung cancer cells. *Oncol Lett*, 15(5), 7069-7075.

[17] Liu, H., Li, T., Ye, X., & Lyu, J. (2021). Identification of Key Biomarkers and Pathways in Small-Cell Lung Cancer Using Biological Analysis. *Biomed Res Int*, 2021, 5953386.

[18] Yu, J., Hou, M., & Pei, T. (2020). FAM83A Is a Prognosis Signature and Potential Oncogene of Lung Adenocarcinoma. *DNA Cell Biol*, 39(5), 890-899.
[19] Bai, S., Zhao, H., Zeng, X., et al. (2021). FAM83A-AS1 Promotes Tumor Progression Through MET Signaling in Lung Adenocarcinoma. *Research Square*. 1-19
[20] Cui, F., Zhou, Q., Xiao, K., & Ma, S. (2020). The MicroRNA hsa-let-7g Promotes Proliferation and Inhibits Apoptosis in Lung Cancer by Targeting HOXB1. *Yonsei Med J*, 61(3), 210-217.
[21] Gao, L., Hu, Y., Tian, Y., et al. (2019). Lung cancer deficient in the tumor suppressor GATA4 is sensitive to TGFBR1 inhibition. *Nat Commun*, 10(1), 1665.
[22] Yang, D., Liu, M., Jiang, J., et al. (2022). Comprehensive Analysis of DMRT3 as a Potential Biomarker Associated with the Immune Infiltration in a Pan-Cancer Analysis and Validation in Lung Adenocarcinoma. *Cancers (Basel)*, 14(24).
[23] Zhang, S., Li, M., Ji, H., & Fang, Z. (2018). Landscape of transcriptional deregulation in lung cancer. *BMC Genomics*, 19(1), 435.
[24] Zhang, W., Wu, C., Zhou, K., et al. (2022). Clinical and immunological characteristics of TGM3 in pan-cancer: A potential prognostic biomarker. *Front Genet*, 13, 993438.
[25] Xu, L., Qin, Y., Sun, B., et al. (2020). Involvement of CHP2 in the Development of Non-Small Cell Lung Cancer and Patients' Poor Prognosis. *Appl Immunohistochem Mol Morphol*, 28(9), 678-686.
[26] Takakura, S., Kohno, T., Manda, R., Okamoto, A., Tanaka, T., & Yokota, J. (2001). Genetic alterations and expression of the protein phosphatase 1 genes in human cancers. *Int J Oncol*, 18(4), 817-824.
[27] Xia, D., Chen, Z., & Liu, Q. (2021). Circ-PGC increases the expression of FOXR2 by targeting miR-532-3p to promote the development of non-small cell lung cancer. *Cell Cycle*, 20(21), 2195-2209.
[28] Li, B., Meng, Y. Q., Li, Z., et al. (2019). MiR-629-3p-induced downregulation of SFTPC promotes cell proliferation and predicts poor survival in lung adenocarcinoma. *Artif Cells Nanomed Biotechnol*, 47(1), 3286-3296.
[29] Pappula, A. L., Gibson, L. N., Bouley, R. A., & Petreaca, R. C. (2022). In silico analysis of a SLC6A4 G100V mutation in lung cancers. *MicroPubl Biol*, 2022.
[30] Huang, X., Hu, P., & Zhang, J. (2020). Genomic analysis of the prognostic value of colony-stimulating factors (CSFs) and colony-stimulating factor receptors (CSFRs) across 24 solid cancer types. *Ann Transl Med*, 8(16), 994.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 285-293, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1293924
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Karbon Elyaf Takviyeli PoliEterEterKeton Kompozitin Farklı Malzemelere Karşı Sürtünme ve Aşınma Performanslarının Karşılaştırılması

Comparison of Friction and Wear Performance of Carbon Fiber Reinforced Poly-Ether-Ether-Ketone Composite against Different Materials

Hüseyin ÜNAL[1*], Salih Hakan YETGİN[2]

Geliş / Received: 08/05/2023 ***Revize / Revised: 13/07/2023*** ***Kabul / Accepted: 18/12/2023***

ÖZ

Elektrik/elektronik ve makine gibi farklı sektörlerde çalışan makine elemanları belli amaca uygun ve gerekli şartları sağlayacak şekilde seçilir. Makinaların bazı aksamlarında plastik ve/veya plastik esaslı kompozit malzemelerden üretilen dişliler, makara, burç ve rulman gibi yataklama elemanları kullanılmaktadır. Bu makine elemanlarına kullanılan şartlara bağlı olarak farklı yükler etki etmektedir. Bazen de farklı malzemelerden imal edilmiş makine elemanları ile temaslı olarak çalışmaktadır. Temaslı çalışma neticesinde malzeme çiftlerinde aşınma meydana gelmektedir. Bu ise makine elemanlarının ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, yüksek performanslı mühendislik plastiği sınıfında yer alan ağırlık olarak %30 oranında karbon elyaf (KE) takviyeli polietereterketon (PEEK/30KET) kompozitinin tribolojik performansları araştırılmıştır. Tribolojik deneyler disk üzerinde pim cihazı kullanılarak oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler üç farklı yük (20 N, 40 N ve 60 N) altında ve 1,0 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Karşı disk malzeme olarak paslanmaz çelik ile %20 kısa cam elyaf (CE) takviyeli polieterimid, %40 cam elyaf takviyeli polifenilen sülfit ve %20 uzun cam elyaf (UCE) takviyeli polyester kompozit malzemeleri kullanılmıştır. Deneyler sonucunda %30 oranında KE takviyeli PEEK kompozitinin spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Ayrıca aşınmış yüzeylerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda uygulanan yüke bağlı olarak karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitin farklı karşı disk malzemelerde genellikle sürtünme katsayısı değerleri azalmıştır. Ancak aşınma hızı farklılık göstermiştir. En düşük aşınma oranı PEEK/30KET kompozit/paslanmaz çelik disk çiftinin çalışmasında elde edilmiştir

Anahtar Kelimeler- Kompozit, PEEK, Karbon Elyaf, Aşınma Hızı, Sürtünme Katsayısı

ABSTRACT

Machine elements working in different sectors such as electricity/electronics and machinery are selected in a way that is suitable for a certain purpose and meets the necessary conditions. In some parts of the machines, bearing elements such as gears, rollers, bushings and bearings made of plastic and/or plastic-based composite materials

[1]*Sorumlu yazar iletişim: unal@sakarya.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-0521-6647)
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya
[2]İletişim: shyetgin@gmail.com (https://orcid.org/0000-0002-6068-9204)
Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin

are used. Different loads act on these machine elements depending on the conditions used. Sometimes they work in contact with machine elements made of different materials. As a result of contact operation, wear occurs in material pairs. This causes the life of the machine elements to decrease. In this study, tribological performances of polyetheretherketone (PEEK-30CF) composite reinforced with 30% carbon fiber (CF) by weight, which is classified as high-performance engineering plastic, were investigated. Tribological tests were carried out at room temperature and dry sliding conditions using a pin-on-disk device. The experiments were carried out under three different loads (20 N, 40 N and 60 N) and at a sliding speed of 1,0 m/s. Stainless steel and 20% short glass fiber (GF) reinforced polyetherimide, 40% glass fiber reinforced polyphenylene sulfide and 20% long glass fiber reinforced polyester composite materials were used as counter disc materials. As a result of the experiments, the coefficient of friction and specific wear rate of 30% GF reinforced PEEK composite were determined. In addition, wear surface microstructure examinations of the experimental materials were carried out using an optical microscope. As a result of the experiments, the coefficient of friction values of carbon fiber reinforced PEEK composite generally decreased in different counter disk materials depending on the applied load. However, the wear rate varied. The lowest wear rate of carbon fiber reinforced PEEK composite was obtained with stainless steel disc.

Keywords- Composite, PEEK, Carbon Fiber, Wear Rate, Friction Coefficient

I. GİRİŞ

Polietereterketon (PEEK) polimeri, aromatik yapıya ve yarı-kristal özelliklere sahip, yüksek performanslı polimerlerden birisidir. Yüksek sıcaklıklarda bile mekanik ve kimyasal direnç özelliklerini koruyan, hem organik hem de sulu ortam şartlarında termal bozunmaya ve korozyona karşı dirençli olan bir polimerdir [1-3]. PEEK polimeri, 143 ºC gibi yüksek camsı geçiş sıcaklığına (Tg) [4] ve 250 ºC gibi yüksek kullanım sıcaklığına [5-6] sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle rondelalar, rulmanlar, piston parçaları, pompalar, kompresör plaka valfleri, uçak parçaları, çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen (ÇYMA-PE) polimeri yerine ortopedik uygulamalarda implant malzemesi olarak kullanılması gibi farklı endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir [2-3, 7-8]. Ancak, zorlu koşullar altındaki endüstriyel uygulamalarda katkısız PEEK polimerinin mekanik özellikleri ve termal özellikleri karşılaması zordur [8]. Özellikle, kuru sürtünme şartları altında PEEK polimerinin sürtünme katsayısı yüksek değerlere ulaşabilir ve daha yüksek aşınma ve dolayısıyla daha erken malzeme deformasyonuna sebep olabilir [9]. Plastiklerde uygun katkı ve dolgu malzemeleri kullanılarak mekanik ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi en çok tercih edilen yöntemlerden birisidir. Tribolojik uygulamalarda poli-tetra-flor-etilen (PTFE), molilbden disülfit (MoS_2) veya grafit gibi katı yağlayıcılar, karşı disk yüzeyinde ince bir transfer filmi oluşturabilir. Metal-metal, polimer-metal ve polimer-polimer arasında kayma sırasında malzeme transferi olgusu hem bilimsel hem de pratik hususlar açısından önemlidir. Transfer film tabakasının (TFT) yumuşak polimer yüzeyini sert metal pürüzlülüklerinden koruduğu bilinmektedir. Bu transfer filmi yağlayıcı görevi görerek metal-metal teması yerine polimer-metal teması sağladığı için karşı disk yüzeyi arasında doğrudan teması önleyerek sürtünme katsayısının azalmasına neden olmaktadır [10-11]. Zalaznik ve arkadaşları [9] farklı bileşik, şekil ve mikro/nano boyuttaki molibden disülfit (MoS_2) ve tungsten disülfit (WS_2) katkılı PEEK kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, katkıların bileşim ve boyutları ne olursa olsun, sürtünmeyi %30'a kadar aşınma miktarını ise %51'e kadar azalttığı, nano ölçekli katkıların tribo-film oluşturmak için daha yüksek oranlarda katılması gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, karbon ve cam lifleri gibi takviye malzemeleri de kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini etkili bir şekilde geliştirebilir. Sürtünme direncinin ve basınç dayanımının artması, numunenin temas alanındaki deformasyonunu azaltarak özgül aşınmada da bir azalma sağlayabilmektedir [8, 12]. Garzon-Hernandez ve arkadaşları [13] kısa karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin darbe özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, karbon fiber takviyeli kompozitlerin gevrek bir kırılma gösterdiklerini belirtmişlerdir. Sümer ve arkadaşları [14] ayrıca ağırlıkça %30 cam elyaf (GF) içeren PEEK kompozitlerinin sürekli servis sıcaklığının 250 °C'den 300 °C'ye çıkabileceğini belirtmişlerdir. Karbon ve cam lifleri ile kompozitin çekme, darbe ve eğilme mukavemetleri artırılarak yüksek sürekli çalışma sıcaklığına sahip üstün performanslı PEEK kompozit ürünler, daha geniş bir pazarda daha kullanışlı hale gelecektir [2,7].

Havacılık, otomobil, inşaat vb. endüstriyel alanlarda yüksek performanslı kompozitlerin kullanılması gün geçtikçe giderek yaygınlaşmaktadır. Yüksek mekanik özelliklere, iyi aşınma direncine, düşük maliyete ve çevre dostu özelliklere sahip olan fiber takviyeli termoplastik kompozitler, mühendislik alanında giderek daha fazla ilgi görmektedir [15]. Son zamanlarda, cam fiber ve karbon fiber takviyeli PEEK kompozitlerinin çelik disklere karşı aşınma direnci alanındaki uygulamaları, PEEK polimerinin mükemmel kendi kendini yağlama özelliklerinden dolayı artan bir ilgi görmektedir. Davim ve Cardoso [16] kuru sürtünme koşulları altında katkısız PEEK, ağırlıkça %30 karbon elyaf (KE) ve ağırlıkça %30 cam elyaf (CE) takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayısını ve aşınma direncini incelemiştir. Deneysel sonuçlarda, elyaf takviyeli kompozitlerin mükemmel aşınma direnci

gösterdiği ve %30KE/PEEK kompozitin daha iyi tribolojik davranış gösterdiği belirtilmiştir. Kosmachev ve arkadaşları [17] PEEK polimerine ilave edilen kısa karbon fiber katkının sürtünme katsayısını 1.3 kat, aşınma oranını ise 3 kat azalttığını belirtmişlerdir. Sümer ve arkadaşları [14], katkısız PEEK ve ağırlıkça %30 CE takviyeli PEEK kompozitlerin çeşitli koşullar altında sürtünme davranışlarını karşılaştırmıştır. Kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı azalırken özgül aşınma oranı artmıştır. Aynı test koşulları altında, ağırlıkça %30 CE takviyeli PEEK kompozitlerinde daha küçük sürtünme katsayısı ve özgül aşınma oranı elde edildiği belirtilmiştir. Fangfang ve arkadaşları [2] farklı viskozite değerlerine sahip PEEK polimerine ilave ettikleri kısa karbon elyaf (KKE) takviyesinin kompozitin termal, mekanik ve tribolojik özelliklere etkisini araştırmışlardır. %10 ve %20 oranındaki KKE, PEEK kompozitin sürtünme katsayısını ve aşınma oranını azaltmıştır. Deneysel sonuçlarda, düşük viskoziteye sahip PEEK polimerinin aşınma direncinin ve mekanik özelliklerin daha iyi olduğu, %10 KKE takviyeli PEEK kompozitlerin tribolojik davranışlar ve mekanik özellikler açısından optimum katkı miktarı olduğu belirtilmiştir. Ganesh ve Dhamejani [18] ise farklı kullanım sıcaklıkları altında katkısız PEEK ve PEEK/30CE kompozitlerin farklı ortam şartlarındaki (kuru/sulu) aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %30 CE içeren PEEK kompozitin 150 ^{o}C gibi yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direncine sahip olduğu bulunmuştur. Ayrıca kuru kayma koşullarında, 80 N yükte ağırlıkça %30CE içeren PEEK'in aşınma performansının geliştiği belirtilmiştir. Theiler ve Gradt [19] ve Wang [20] ise PEEK gibi kimyasal inert polimer malzemelerin, artan sertlik ve elastiklik modülünden kaynaklanan azalan gerçek temas alanı nedeniyle düşük sıcaklıklarda düşük sürtünme katsayısı gösterdiğini belirtmişlerdir. Lin ve Schlarb [21] geri dönüştürülmüş karbon fiber (r-CF) ve orijinal karbon fiber (CF) katkılı PEEK kompozitlerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Orta ve şiddetli pv-şartlarında r-CF/PEEK kompoziti mükemmel sürtünme ve aşınma özellikleri göstermiştir. Çelik karşı disk üzerinde şekillenen tribo-film yapısının karbon fiber katkının türünden bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Genel olarak, polimer esaslı tribo-malzemelerin optimizasyonu ve kalifikasyonu, laboratuvar şartları altında, testten önce belirlenen belirli test süresi veya test mesafesi için sabit yük ve kayma hızlarında gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, polimer esaslı tribo-malzemelerin modern endüstriyel uygulamasında, tribolojik bileşenler, genellikle dinamik yük ve kayma hızı koşulları altında zarar görmektedir [22]. Değişen çalışma şartları altında sürtünme katsayısının azaltılıp aşınma direncinin artırılması uygun polimer-metal veya polimer-polimer malzeme kombinasyonu ile elde edilebilir. Aşınma ve sürtünme çalışmalarında, uygulanan yük, kayma hızı, temas sıcaklığı, ortam şartları gibi parametrelerin yanında disk malzemesinin de polimer ile uygun olması istenmektedir. Jain ve Bahadur [23] polietilen (PE) polimeri ile PTFE, PVC, PP ve PMMA disklerini ve ayrıç PET film ile PE ve PVC disklerinin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Malzeme kaybının, düşük enerji yoğunluğundaki polimerden yüksek enerji yoğunluğundaki polimere doğru olduğunu belirtmişlerdir. Disk yüzeyindeki film tabakası kalınlığının önemli olmadığı belirtilmiştir. Hüseyin ve arkadaşları [24] PEEK/30CE kompozitlerin aşınma özelliklerini kuru ortamda incelemişlerdir. Disk malzemeleri %10 PTFE katkılı PEEK ve %40 cam elyaf katkılı PPS olarak belirlenmiştir. Yük arttığında, PEEK/30CE polimerinin sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı artmıştır. Optimum tribolojik özellikler PEI/10%PTFE disk-PEEK/30CE pim numuneleri ile çalışıldığında elde edilmiştir. Demir [25] PA6/20Mika ve PSU/20CE kompozitlerin tribolojik özelliklerinin araştırmışlardır. Disk olarak AISI 316L paslanmaz çelik ve poli-fenilen-sülfit (PSU)/30CE polimer kompozit kullanılmıştır. PA6/20Mika ve PSU/20CE polimerleri çelik disk ile çalıştığında tribolojik özellikler gelişirken PSU/30CE disk kullanıldığında sürtünme katsayısı değişmemiş ancak aşınma oranı artmıştır. Jia ve arkadaşları [26] poliamit 66 (PA66), Polifenilensülfit (PPS) ve PTFE polimerlerinin kuru ve yağlı ortamda kendi polimer disklerine karşı (PA66 pim/PA66 disk gibi) pim-disk sistemi ile tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada aynı zamanda kayma hızı ve uygulanan yükün etkileri de incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, yağlı ortamda tüm malzemeler için sürtünme özelliklerinin geliştiği, PTFE ve PPS polimerlerinin aşınma dirençlerinin arttığı, ancak PA66 polimerinin aşınma direncinin azaldığı belirtilmiştir. Kuru ortam şartları altında fiziksel özellikleri değiştiren sürtünme ısısı polimer-polimer temasında tribolojik özellikleri etkilemiştir. Kuru ortam şartları altında adhesif aşınma mekanizmasının baskın olduğu belirtilmiştir. Literatürde birbiri ile temas eden malzemelerin polimer-çelik kombinasyonlu olması oldukça yaygındır. Ancak polimer-polimer kombinasyonlu olması üzerine oldukça az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Literatürde görüldüğü gibi farklı polimer çiftlerinin birbirleri ile temasında tribolojik performanslar değişmektedir. Literatürde bu nedenle aşınma ve sürtünmenin ön plana çıktığı uygulamalarda doğru malzeme çiftinin seçilmesi malzeme ömrünün uzun olması açısından önem arzetmektedir. Bu çalışma, elektrik sektöründe endüstriyel olarak kullanılan bazı parçaların aşınma davranışlarını belirlemek ve uygun malzeme çiftini seçmek için gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, %30 oranında KE takviyeli polietereterketon (PEEK/30KET) kompozitin dört farklı disk malzemesine karşı kuru ortam şartları altında aşınma ve sürtünme davranışları incelenmiştir. Karşı disk olarak, AISI 304 paslanmaz çelik, %20 CE takviyeli Polieterimit (20CET-PEI), %40 CE takviyeli Poli-fenilen-sülfit (40CET-PPS) ve %20 uzun CE takviyeli doymamış polyester (20UCET-BMC) kompozit kullanılmıştır. Deneyler pim-disk aşınma sistemi ile 1.0 m/s kayma hızında 20, 40 ve 60 N yükte yapılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Karbon elyaf takviyeli PEEK kompozit, 8 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda Ketron PEEK-CA30 ticari koduyla temin edilmiştir. Tablo 1'de PEEK/30KET kompozitin üretici firmadan temin edilen özellikleri verilmiştir. Kuru şartlar altında, ortam sıcaklığında, pim-disk cihazı ile gerçekleştirilen aşınma deneylerinde birisi metal esaslı diğer üçü ise polimer kompozit esaslı dört farklı disk malzemesi kullanılmıştır. AISI 316 L SS paslanmaz çelik disk, 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında ve yüzey pürüzlülüğü 0,30-0,40 µm Ra aralığında olacak şekilde hazırlanmıştır. %20 CE takviyeli polieterimid PEEK (20CET-PEI) kompozit granül formunda Ultem 2200 ticari koduyla General Electric Firmasından temin edilmiştir. %40 CE takviyeli Polifenilen-sülfit (40CET-PPS) kompozit granül formunda Ryton GF40 ticari koduyla Solvay Specialty Polymers Firmasından temin edilmiştir. Her iki kompozit granüller özel olarak imal edilmiş bir kalıp yardımıyla 90 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde ERAT marka bir enjeksiyon makinasında basılarak disk malzemesi haline getirilmiştir. Termoset disk (20UCET-BMC) ise kalsit ve cam elyaf katkılı doymamış polyester kompozit malzeme kullanılarak döküm kalıplama bileşimi (BMC) yöntemiyle üretilmiştir. Polyester Poliya firmasından temin edilmiştir. 4:1 oranında sıvı polyester stirenle 50 lt kapasiteli bir haznede karıştırılmış ve akışkanlık/ya da viskozite ayarlanmıştır. Daha sonra metil etil keton peroksit çapraz bağlayıcı katalizör ile renklendirici, kıvamlaştırıcı, ısı stabilizatörü vb. diğer katkılar karışıma ilave edilmiştir. Karışım yaklaşık 10 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karışım Z miksere alınmıştır. Bu mikserde önce kalsiyum karbonat ilave edilmiş ve 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından Cam elyaf Sanayi/Gebze den temin edilen 13 µm çapında ve 12 mm uzunluğundaki uzun elyaflar %20 oranında ilave edilmiş ve 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan hamur daha sonra bir hafta boyunca dinlendirilmiş ve ardından hamur belirli ölçülerde dilimler halinde kesilmiştir. Dilimler, 160 ºC sıcaklığındaki alt ve üst kalıp arasına yerleştirilerek 1500 MPa basınç altında ve 60 saniye süre ile preste basılmış ve vulkanize edilmiştir. 120 mm çapında ve 5 mm kalınlığında olacak şekilde termoset disk numuneleri üretilmiştir. Deneylerde kullanılan tüm disk malzemelerin yüzey pürüzlülüğü 0,30-0,40 µm Ra aralığında olacak şekilde hazırlanmıştır. Aşınma deneyleri, pim-disk aşınma test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Her aşınma testi öncesi numune pim ağırlığı (m_1) ve aşınma testi sonrası pim ağırlığı (m_2) ölçülmüş ve ağırlık kaybı Δm yani (m_1-m_2) tespit edilmiştir. Spesifik aşınma oranı (K_o) ise Eşitlik (1)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Formülde, L; kayma mesafesi (m), ρ; malzemenin yoğunluğu (g/cm^3) ve Fn; uygulanan yük (N)' tür.

$$K_o = \frac{\Delta m}{L * \rho * Fn} \tag{1}$$

Aşınma test numunelerinin sürtünme katsayısı ölçümleri pim-disk aşınma deney cihazında ölçülmüştür. Pim-disk aşınma test makinası dört ana kısımdan oluşmuştur. Makinanın ana gövdesi üzerine monte edilmiş bir elektrik motoru, bir yük kolu, bir elektronik yük hücresi ve verilerin gönderildiği bir bilgisayardan meydana gelmiştir. Aşınma cihazının ana gövdesinde dönen bir disk vardır. Bu disk, 2kW gücünde bir elektrik motoru sayesinde dönmektedir. Diskin üzerine deneyde kullanılan karşı disk malzemeler bir vida yardımıyla bağlanır. Deneylerde kullanılacak pim numunesi aşınma düzeneğinde olan kola bağlanır. Aşınma cihazı çalıştırıldıktan sonra kola bağlanan polimer kompozit pim numunesi diskin üzerine yavaşça bırakılır. Pim numunesinin dönen diske temas etmesi ile birlikte numune bağlı olan kol aparatı dönüş yönüne göre hareket eder. Bu hareket yanal kuvvet (Fs) olarak adlandırılır. Bu yanal kuvvet aşınma cihazına bağlı olan bir yük hücresi ile ölçülüp bilgisayara aktarılarak excell programında kaydedilir. Aşınma cihazı, aşınma yapılacak olan deneyler için dakikada 1000 veri alınabilecek şekilde ayarlanmıştır. Deney süresi boyunca yanal yükü ölçen yaklaşık 65.000 veri elde edilmiştir. Bu yanal yük verileri Excell programında bir sütuna kaydedilmiş olup sonrasında uygulanan yüke bölünerek sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan polimer kompozit pim malzemesi ile farklı diskler arasındaki sürtünme katsayısı (µ), yanal kuvvetin normal kuvvete oranıdır ve Eşitlik (2)'de verilen formül ile hesaplanmaktadır. Formülde µ: sürtünme katsayısını, Fs: sürtünme kuvvetini (N) ve Fn ise normal kuvveti (N) göstermektedir. Deneylerde kullanılan aşınma testi parametreleri ve karşı disk malzemeleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \tag{2}$$

Tablo 1. PEEK/30KET kompozitin üretici firmadan temin edilen özellikleri [27].

Özellik	PEEK/30KET	Birimi	Test standardı
Yoğunluk	1,40	g/cm^3	ASTM D792
Su emme, (24 saat)	0,05	%	ASTM D570(2)
Çekme mukavemeti	144	MPa	ASTM D638
Elastiklik modülü (çekmede)	9200	MPa	ASTM D638
Kopmadaki % uzama	3,5	%	ASTM D638
Termal iletkenlik	0,92	W/ m.ºK	-
Sertlik	102	Rockwell M	ASTM D785
Ergime sıcaklığı	340	ºC	ASTM D3418
Maksimum/Minimum sürekli çalışma sıcaklığı	250/-20	ºC	

Tablo 2. Aşınma test parametreleri ve kullanılan karşı disk malzemeler

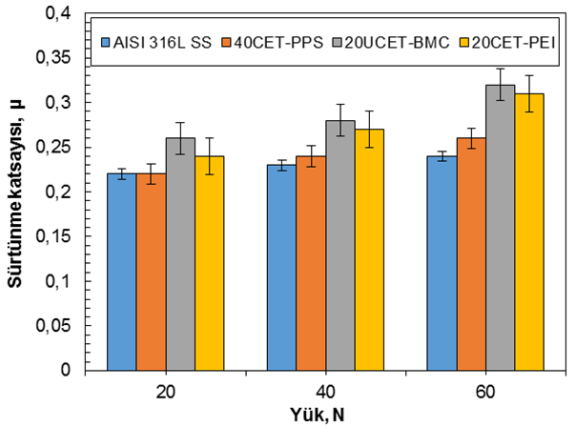
Pim	Karşı disk	Yük, N	Kayma hızı, m/s	Kayma mesafesi, m
PEEK/30KET	AISI 316 SS 20CET-PEI 40CET-PPS 20UCET-BMC	20 40 60	1,0	1000

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tribolojik sistemlerde, kompozit malzemenin aşınma direnci esas olarak sürtünme katsayıları ve aşınma oranları ile ölçülür. Aşınmaya dayanıklı malzemenin temel özelliği, daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranına sahip olmasıdır [2, 28]. Şekil 1'de %30 karbon fiber takviyeli PEEK kompozitin uygulanan yüke bağlı olarak farklı karşı disklere karşı çalışması durumunda elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde uygulanan yükün artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. PEEK/30KET kompozitin AISI 316 SS paslanmaz çelik ile çalışması durumunda sürtünme katsayısı 0,22-0,24 aralığında olduğu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı yük artırıldığında %9,25 oranında artmıştır. PEEK/30KET kompozitin 40CET-PPS kompozit diske karşı çalışması durumunda ise sürtünme katsayısı yüke bağlı olarak %18,45 oranında artmıştır. 20UCET-BMC kompozit diski kullanıldığında en yüksek sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiş ve sürtünme katsayısı 60 N yük altında 0.32 değerine kadar ulaşmıştır. Yüke bağlı olarak sürtünme katsayısı %22,8 oranında artmıştır. PEEK/30KET kompozitin 20CET-PEI kompozit diske karşı çalışması durumunda sürtünme katsayısı 0,24-0,31 aralığında elde edilmiştir. Sürtünme katsayısındaki değişim ise %29,1 oranında elde edilmiştir. Viskoelastik özelliğe sahip olan PEEK polimerinin yük-sürtünme katsayısı arasındaki ilişki Eşitlik (3)'de gösterilmiştir. Bu eşitliğe göre sürtünme katsayısı yük artışı ile birlikte azalmaktadır. Ancak hem sürtünme katsayısı hem de aşınma oranı, uygulanan yük PEEK/30KET kompozitin limit değerlerine ulaştığında artmaktadır. Bunun nedeni ise temas noktasındaki sürtünme kaynaklı oluşan ısı sıcaklığı artırmış ve polimerin yumuşamasına neden olmuştur [29]. μ: sürtünme katsayısı, N: uygulanan yük, K ve n ise malzeme ile ilgili sabitlerdir ve "n" değeri 2/3<n<1 arasındadır.

$$\mu = K * N^{(n-1)} \tag{3}$$

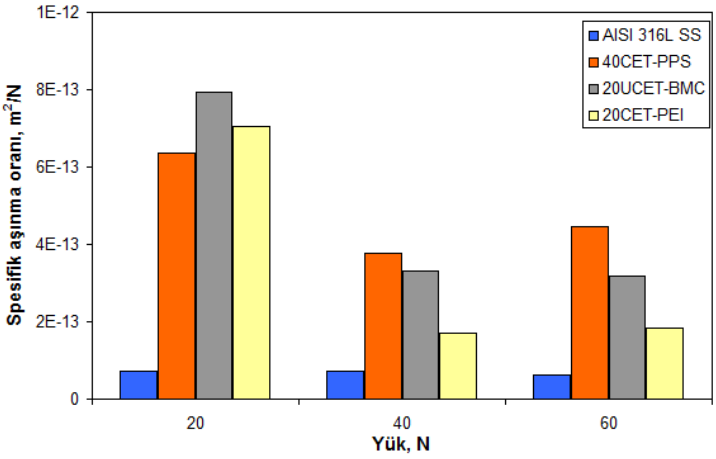
Kullanılan karşı disklerin sürtünme katsayısı üzerine etkisi incelendiğinde ise en düşük sürtünme katsayısı AISI 316 SS paslanmaz çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir. Polimer/çelik disk sisteminde çelik disk yüzeyinde tribofilm oluşum süreci sürtünme katsayısını etkilemiştir. Düşük yük şartları altında sürtünmenin adhezyon bileşeni sürtünme sürecinde baskın iken tribo-filmlerin oluşumu, artan gerçek temas alanı ile birlikte sürtünme katsayısının artışına sebep olan polimer/polimer temasının oluşmasına sebep olmuştur [21]. Cam elyaf takviyeli disklerin sürtünme katsayısı üzerine etkisi değerlendirildiğinde ise en düşük sürtünme katsayısı 40CET-PPS kompozit diskinde elde edilmiştir. 40 N yük altında, 40CET-PPS kompozit diski, 20UCET-BMC ve 20CET-PEI kompozit diskleri ile karşılaştırıldığında, sürtünme katsayısını %16.6 ve %12.5 oranlarında azalttığı belirlenmiştir. Bilindiği gibi karbon elyaflar, kompozit malzemelerin tribolojik performansını iyileştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaflar, polimer kompozite uygulanan yükü desteklemekte ve polimer ana matrisin sürünme direncini artırmaktadır [2, 30]. Yingshuang ve arkadaşları [28] kuru kayma prosesi süresince kırılan parçaların disk yüzeyinde ince ve daha rijit bir transfer film tabakası oluşumuna katkı sağlayacağını ve bu durumun numune ve disk yüzeyi ile arasındaki direkt teması azaltacağı ve sürtünme katsayısının azalacağını belirtmişlerdir.



Şekil 1. Karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitin değişik karşı disk malzemelere karşı sürtünme katsayısının yüke göre değişimi

Şekil 2'de ise PEEK/30KET kompozitin, AISI 316L SS, 40CET-PPS kompozit, 20UCET-BMC kompozit ve 20CET-PEI kompozit disklere karşı 20 N, 40 N ve 60 N yük altındaki spesifik aşınma oranı sonuçları

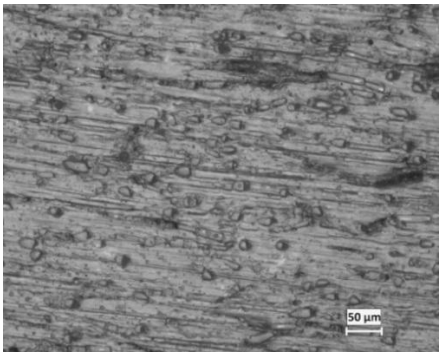
verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük yükte (20 N) ve yüksek yükte (60 N) AISI 316L SS paslanmaz çelik disk kullanıldığında spesifik aşınma oranının değişmediği belirlenmiştir. Spesifik aşınma oranı yüke bağlı olarak 6,24-7,33x10^{-14} m^2/N aralığında olduğu belirlenmiştir. Cam elyaf takviyeli polimer kompozit diskler kullanıldığında ise düşük yükte (20 N) yüksek spesifik aşınma oranı elde edilirken yükün artması ile birlikte aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. Bu azalma 40CET-PPS kompoziti için %42,6, 20UCET-BMC kompoziti için %148,9 ve 20CET-PEI kompoziti için ise %283,9 oranlarında elde edilmiştir. Yüke bağlı olarak, polimer disk kullanıldığında en düşük spesifik aşınma oranı 20CET-PEI polimer kompozit diskinde elde edilmiştir. Uygulanan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranının değişmesi disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakası ve kompozitlerin yapısında bulunan cam elyaf ve miktarı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Şekil 3'te gösterildiği gibi gerek AISI 316L SS paslanmaz çelik disk kullanıldığında gerekse polimer kompozit diskler kullanıldığında disk yüzeylerinde transfer film tabakalarının olduğu görülmektedir. Transfer film tabakasının yoğunluğu sürtünme katsayısının ve spesifik aşınma oranının değişmesine sebep olmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda da disk yüzeyinde oluşan transfer film tabakasının tribolojik özellikleri önemli oranda etkilediği belirtilmiştir [31]. Zhang ve arkadaşları [32] tarafından yapılan çalışmada ise PEEK polimerine ilave edilen kısa karbon elyaf kompozitin sertliğini ve sürünme direncini artırarak aşınma direncini artırdığı belirtilmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda ise karbon elyaf ilavesi ile kompozitin yük taşıma kapasitesinin arttığı ve polimer matrisin aşınma direncinin önemli oranda geliştiği belirtilmiştir [33-35]. Wang ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada da basalt fiber ilavesi ile yüzey sertlğinin arttığı, bunun sonucunda ise numune yüzeyine etki eden normal yükün daha homojen bir şekilde dağıtılabildiği ve kompozitlerin aşınma dirençlerinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, sürtünme prosesi süresince, PEEK polimerinin plastik akışı yapı içerisindeki elyaflar tarafından kısıtlanarak aşınma oranında azalmaya sebep olmuş ve aşınma direncini artırmıştır [36].



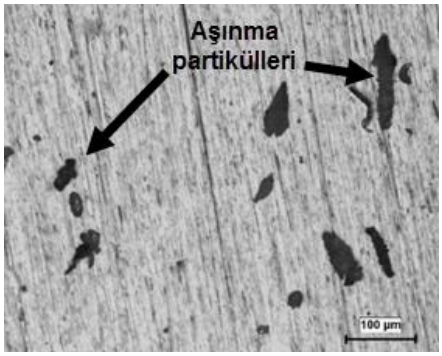
Şekil 2. %30 karbon elyaf takviyeli PEEK polimer kompozitinin değişik karşı disk malzemelere karşı farklı yükler altındaki aşınma hızı-kayma oranı ilişkisi

Bilindiği gibi, tribolojik olaylarda, aşınma ve sürtünme davranışlarının şekillenmesinde, temas noktalarında (metal/metal, polimer/metal, polimer/polimer) meydana gelen malzeme transferi önemli bir rol almaktadır. Malzemeler arasındaki uyumsuzluk ve malzemeye bağlı olarak ısı transfer özellikleri gibi nedenlerden dolayı birçok uygulamada polimer/metal teması tercih edilmektedir. Polimer/metal temasında malzeme transferi yumuşak olan polimerden sert olan metale doğru olurken polimer/polimer temasında bu durum çok net değildir. Daha önce belirtildiği gibi hız, yük, sıcaklık, polimer türü, mekanik ve termal özellikler gibi birçok parametre disk yüzeyindeki film tabakasının şekillenmesini etkilemektedir [37]. Şekil 3'te PEEK/30KET kompozitin AISI 316L SS, 40CET-PPS kompozit, 20UCET-BMC kompozit ve 20CET-PEI kompozit disklere karşı 1,0 m/s kayma hızı ve 40 N yük altında çalışması durumunda elde edilen aşınmış pim yüzey optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi polimer kompozit disklere karşı çalışan PEEK/30KET kompozitin pim yüzeylerinde polimer ana matrise göre daha gevrek yapıdaki karbon elyaflardan dolayı kayma yönünde aşınma izlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Bu durum abrazif aşınma mekanizmasının gerçekleştiğini göstermektedir. Şekil 4'te ise PEEK/30KET kompozitin farklı karşı disklere karşı çalışması durumundaki aşınmış disk yüzey optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi 40CET-PPS kompozit disk yüzeyinde homojen olmayan bir transfer film tabakası dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca pim yüzeylerinde küçük topaklanmış aşınmış polimer partiküllerin belirtileri de görülmektedir. Bu durum, PEEK/30KET pim-40CET-PPS kompozit disk aşınma sisteminde spesifik aşınma oranının neden yüksek olduğunu açıklamaktadır. 20CET-PEI kompozit disk yüzeylerinde ise 40CET-PPS kompozit disk yüzeyine göre transfer film tabakasının daha homojen bir dağılım ile şekillendiği görülmektedir. AISI 316L SS çelik disk yüzeyi ise kısmen transfer film tabakası ile kaplanmış ve bu tabaka PEEK polimerinin daha sert olan disk yüzeyi ile temasını azaltarak sürtünme katsayısının azalmasına ve aşınma direncinin artmasına sebep olmuştur. PEEK polimerinin yüzeyinde adhezif aşınma mekanizmasının

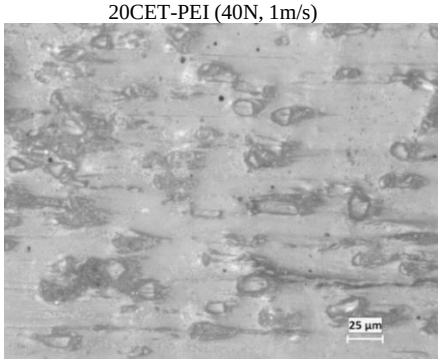
meydana gelerek ince ve üniform olmayan bir transfer film tabakasının disk yüzeylerinde şekillendiği daha önce yapılan çalışmalarda da belirtilmiştir [28]. Bilindiği gibi polimer malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışları sıcaklık değişiminden önemli oranda etkilenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda polimerlerin aşınması abraziften adhesife doğru değişmektedir. Polimer/metal temasında temas yüzeyinde oluşan ısının nasıl paylaşıldığı yönünde araştırmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda temas yüzeyinde biriken ısının iki parçaya bölündüğü ve bu süreçten sonra iki malzemenin ısı transfer süreçlerinin etkili olduğu belirtilmiştir. Polimer ile metal temasındaki sürtünme sırasında, oluşan ısının sadece küçük bir bölümü polimer malzemeye aktarılmaktadır. Dolayısıyla polimer malzeme son derece düşük bir ısı bölmesine maruz kalarak rijitliğini korumaktadır [38].



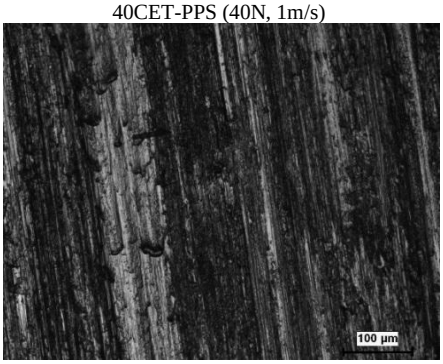
20CET-PEI (40N, 1m/s)



40CET-PPS (40N, 1m/s)

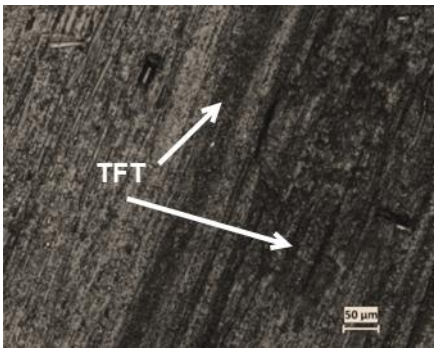


20UCET-BMC (40N, 1m/s)

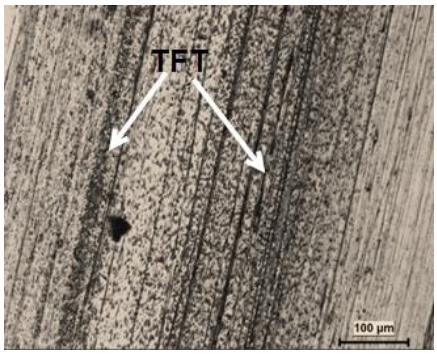


AISI 316L SS çelik disk (40N, 1m/s)

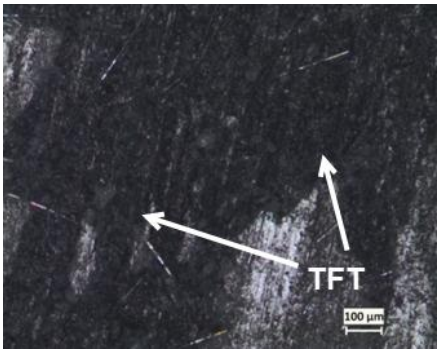
Şekil 3. PEEK/30CET kompozitin farklı karşı disklere karşı çalışması durumundaki aşınmış pim yüzey optik görüntüleri



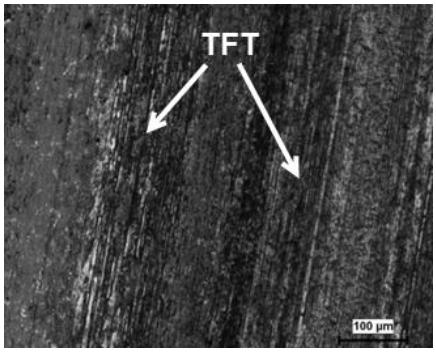
20CET-PEI disk (40N, 1m/s)



40CET-PPS disk (40N, 1m/s)



20UCET-BMC disk (40N, 1m/s)



AISI 316 L SS çelik disk (40N, 1m/s)

Şekil 4. PEEK/30CET kompozitin farklı karşı disklere karşı çalışması durumundaki aşınmış disk yüzey optik mikroskop görüntüleri

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PEEK/30KET kompozitin AISI 316L çelik disk, 40CET-PPS kompozit, 20UCET-BMC kompozit ve 20CET-PEI kompozit disklere karşı tribolojik özelliklerin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

Yükün artması ile sürtünme katsayısı artmıştır. En düşük sürtünme katsayısı AISI 316L SS çelik disk kullanıldığında elde edilmiştir. 20 N ve 60 N yük aralığında AISI 316L paslanmaz çelik disk kullanıldığında spesifik aşınma oranının değişmediği belirlenmiş olup spesifik aşınma oranı yüke bağlı olarak 6,24-7,33x10^{-14} m^2/N aralığında elde edilmiştir. Transfer film tabakası, sürtünme katsayısının azalmasına ve aşınma direncinin artmasına sebep olmuştur. PEEK-30KET/AISI 316 L paslanmaz çelik disk çiftinde en düşük sürtünme katsayısı ve en düşük aşınma oranı değeri elde edilmiştir.

Aşınma deneylerinde birbiri ile temas eden malzeme çiftlerinin iyi seçilmiş olması gerekmektedir. Polimer pim malzeme, karşı disk malzeme, malzemeye ilave edilen katkı çeşidi ile aşınmada uygulanan yük ve kayma hızı gibi proses faktörleri bu çalışmanın sınırlayıcılarıdır. Birbirleriyle temas etmesi planlanan malzemelerin seçimi ve malzeme çiftine göre optimum çalışma şartlarının çalışma koşullarına göre seçilmesi oldukça önem arzetmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Kharat, A., Talekar, S., Jadhav, S., More, S., & Shelke, R. (2019). Investigation of tribological behavior of peek composite with glass fiber. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 6(2), 214-216.

[2] Fangfang, L., Ying, H., Xiaochen, H., Xiyu, H., & Dong, J. (2018). Thermal, mechanical, and tribological properties of short carbon fibers/PEEK composites. *High Performance Polymers*, 30(6), 657–666

[3] Shuai, Y., Shichao, M., Hongbo, Z., Haoji, W., Zhongjiang, Z., Chunshen, W., Tianyi, S., & Bin, L. (2023). Carbon fiber cannot always reduce the wear of PEEK for orthopedic implants under DPPC lubrication. *Friction*, 11(3), 395–409.

[4] Nunez, E. E., Gheisari, R., & Polycarpou, A. A. (2019). Tribology review of blended bulk polymers and their coatings for high-load bearing applications. *Tribology International*, 129, 92–111.

[5] Tharajak, J., Palathai, T., & Sombatsompop, N. (2017). Recommendations for h-BN loading and service temperature to achieve low friction coefficient and wear rate for thermal-sprayed PEEK coatings. *Surface and Coatings Technology*, 321, 477-483.

[6] Zhang, G., Wetzel, B., & Wang, Q. (2015). Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions. *Tribology International*, 88, 153–161.

[7] Kanad, V., Abhijeet, D., & Atul, K. (2020). A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2311, 070030.

[8] Wang, B., Shundong, Y., Jian, M., Yaohui, W., Mengjia, L., & Xiping, Li. (2021). Effect of basalt fiber on tribological and mechanical properties of polyether-ether-ketone (PEEK) composites. *Composite Structures*, 266, 113847.

[9] Zalaznik, M., Kalin, M., Novak, S., & Jakša, G. (2016). Effect of the type, size and concentration of solid lubricants on the tribological properties of the polymer PEEK. *Wear*, 364-365, 31-39.

[10] Dong, W. T., Nie, S. L., & Zhang, A. Q. (2013). Tribological behavior of PEEK filled with CF/PTFE/graphite sliding against stainless steel surface under water lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*, 227(10), 1129–1137.

[11] Alois, K. S., Nicholas, E., Sebastian, K., Yuxiao, Z., & Leyu, L. (2023). Performance and mechanisms of different tribological thermoplasticcomposites in sliding contact with steel. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(2), 642–656.

[12] Zhang, G. & Schlarb, A. K. (2009). Correlation of the tribological behaviors with the mechanical properties of poly-etherether-ketones (PEEKs) with different molecular weights and their fiber filled composites. *Wear*, 266, 337–344.

[13] Garzon-Hernandez, S., Garcia-Gonzalez, D., & Arias, A. (2018). Multi-impact mechanical behaviour of short fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 202, 241–52.

[14] Sumer, M., Unal, H., & Mimaroglu, A. (2008). Evaluation of tribological behaviour of PEEK and glass fibre reinforced PEEK composite under dry sliding and water lubricated conditions. *Wear*, 265(7-8), 1061–1065.

[15] Dong, K., Liu, L., Huang, X., & Xiao, X. (2020). 3D printing of continuous fiber reinforced diamond cellular structural composites and tensile properties. *Composite Structure*, 250, 112610.

[16] Davim, J. P., & Cardoso, R. (2009). Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding. *Wear*, 266(7-8), 795–799.

[17] Kosmachev, P. V., Alexenko, V. O., & Panin, S. V. (2020). The Effect of component combining method on mechanical and tribological properties of carbon-fiber reinforced PEEK-based composites. *AIP Conference Proceedings*, 2310, 020160.

[18] Ganesh, K. G., & Dhamejani, Dr. C.L. (2016). Investigation of tribological behaviour of PEEK composite with glass fiber filled under harsh operating condition. *IJARIIE*, 2(1), 271-279.
[19] Theiler, G., & Gradt, T. (2018). Friction and wear behaviour of polymers in liquid hydrogen. *Cryogenics*, 93, 1-6.
[20] Wang, Q., Zheng, F., & Wang, T. (2016). Tribological properties of polymers pı, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum. *Cryogenics*, 75, 19-25.
[21] Lin, L., & Schlarb, A. K. (2019). Recycled carbon fibers as reinforcements for hybrid PEEK composites with excellent friction and wear performance. *Wear*, 432-433, 202928.
[22] Leyu, L., & Alois, K. S. (2016). Effect of the varied load conditions on the tribological performance and the thermal characteristics of PEEK-based hybrid composites. *Tribology International*, 101, 218–225.
[23] Jain, V. K., & Bahadur, S. (1978). Material transfer in polymer-polymer sliding. *Wear*, 46 (1), 177-188.
[24] Unal H., Mimaroglu A., Özel A., (2017). Friction and wear performance of glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composite against different polymer counterparts. *MOJ Polymer Science*, 1(5), 188–190.
[25] Demir, Z. (2013). Tribological performance of polymer composites used in electrical engineering applications. *Bulletin of Materials Science*, 36(2), 341-344.
[26] Jia, B. B., Tong-Sheng, L., Xu-Jun, L., & Pei-Hong, C. (2007). Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions. *Wear*, 262, 1353–1359.
[27] Nylaplas Engineering (2024). Mitsubishi Chemical Group Datasheets. https://www.nylaplas.com/plastics/pds/Ketron_CA30_PEEK_PDS_E_17102013.pdf
[28] Yingshuang, S., Xian, W., Yifan, L., Zilong, J., Zhaoyang, W., Zhenhua, J., & Haibo, Z. (2019). Preparation of PEEK/MWCNTs composites with excellent mechanical and tribological properties. *High Performance Polymers*, 31(1), 43–50
[29] En-Zhong, L., Bin-Shi, X., Hai-Dou, W., & Wei-Ling, G. (2013). The tribological behavior of glass fiber-reinforced polyetheretherketone composite under dry sliding and water lubrication. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(5), 318–329.
[30] Zhang, G., Rasheva, Z., & Schlarb, A. K. (2010). Friction and wear variations of short carbon fiber (SCF)/PTFE/graphite (10 vol%) filled PEEK: effects of fiber orientation and nominal contact pressure. *Wear*, 268, 893–899.
[31] Laux, K., & Schwartz, C. (2013). Effects of contact pressure, molecular weight, and supplier on the wear behavior and transfer film of polyetheretherketone (PEEK). *Wear*, 297, 919-925.
[32] Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., & Friedrich, K. (2004). Wear of PEEK composites related to their mechanical performances. *Tribology International*, 37(3), 271–277.
[33] Lihe, G., Huimin, Q., Ga, Z., Tingmei, W., & Qihua, W. (2017). Distinct tribological mechanisms of various oxide nanoparticles added in PEEK composite reinforced with carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 97, 19-30
[34] Rasheva, Z., Zhang, G., & Burkhart, T. (2010). A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fibers reinforced PEEK materials with different fiber orientations. *Tribology International*, 43, 1430-1437.
[35] Molazemhosseini, A., Tourani, H., Khavandi, A., & Eftekhari Yekta, B. (2013). Tribological performance of PEEK based hybrid composites reinforced with short carbon fibers and nano-silica. *Wear*, 303, 397-404.
[36] Chairman, C. A., & Kumaresh Babu, S. P. (2013). Mechanical and abrasive wear behavior of glass and basalt fabric-reinforced epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*,130(1), 120–130.
[37] Bahadur, S., (2000). The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*, 245, 92-99.
[38] Yichun, X., Akihiko, Y., Noriyuki, H., Norihisa, H., Guoxin, X., & Dan, (2022). G. Analysis of temperature and heat partitioning coefficient during friction between polymer and steel. *Tribology International*, 171, 107561.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 294-307, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1336572
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi- Research Article

Fdm Yöntemiyle Üretilen Pla Malzemelerde Dolgu Deseninin Mekanik Özelliklere Etkisi

Effect Of The Infill Pattern On Mechanical Properties Of Pla Materials Manufactured By Fdm Method

Ömer Adanur[1], Oğuz Koçar[2], Ahmet Serdar Güldibi[3*]

Geliş / Received: 02/08/2023 ***Revize / Revised: 16/01/2024*** ***Kabul / Accepted: 16/01/2024***

ÖZ

Bu çalışmada PLA (poly lactic acid) malzemeler ile %15 doluluk oranlarında üretilen numunelerde farklı baskı desen ve açıların malzemelerin üretim sürelerine, ağırlıklarına ve mekanik özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla tam dolu numune ile toplam 14 adet çekme numunesi ve 12 adet basma numuneleri üretilmiş ve çekme ve basma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, geometrik desenin karmaşıklığının baskı süresini uzattığı, %15 dolu numunenin tam dolu numuneye oranla çok daha kısa baskı süresi ve malzeme sarfiyatı verdiği tespit edilmiştir. Baskı açısının malzemenin mukavemetine etkisi olduğu görülmüştür. Çekmeye dayanıklı numunelerin basma testlerinde daha zayıf performans sergilediği, basmaya dayanıklı numunelerin ise çekme testlerinde daha zayıf dayanım sergilediği görülmüştür. Her iki testte de benzer dayanımı gösteren numuneler ise bal peteği, jiroid ve grid desenleri olmuştur. Dolgu desen ve açısının uzama ve şekil değiştirme davranışlarında da etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Dolgu Deseni, PLA, FDM, 3B Yazıcı

ABSTRACT

In this study, the effects of different printing patterns and angles on the production times, weights, and mechanical properties of samples produced with PLA (poly lactic acid) materials at a 15% fill density were investigated. For this purpose, a total of 14 tensile specimens and 12 compression specimens were produced, along with a fully filled specimen, and subjected to tensile and compression tests. According to the obtained results, it was determined that the complexity of the geometric pattern extended the printing time, and the 15% filled specimen had much shorter printing time and material consumption compared to the fully filled specimen. The printing angle was found to affect the material's strength. Tensile-resistant specimens showed weaker performance in compression tests, while compression-resistant specimens exhibited weaker resistance in tensile tests. Samples with similar strength in both tests were honeycomb, gyroid, and grid patterns. It was also observed that the fill pattern and angle affected elongation and deformation behaviors.

Keywords- Infill Rate, PLA, FDM, 3B Printer

[1]İletişim: oadanur@subu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-5591-9661)
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Karasu MYO, Karasu/Sakarya
[2]İletişim: oguz.kocar@beun.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-1928-4301)
Makine Mühendisliği Bölümü, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak
[3]*Sorumlu yazar iletişim: aserdarguldibi@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-7021-060X)
İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük

I. GİRİŞ

3B (üç boyutlu) yazıcılar eşsiz üretim kabiliyetleri, tasarımı kısa sürede ürüne dönüştürebilme özellikleri ve geleneksel üretim tekniklerine göre sağladıkları eşsiz avantajlar nedeniyle birçok sektör tarafından kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına ve kullanılan üretim malzemelerine göre birçok farklı 3B yazıcı türü vardır. ASTM 3B yazıcı teknolojisini, bağlayıcı püskürtmeli (binding jetting), direk enerji biriktirme (direct energy deposition), malzeme ekstrüzyon (material extrusion), malzeme püskürtmeli (material jetting), toz yatağı ergitme (powder bed fusion), sac lamine (sheet lamination) ve foto polimerizasyon (photopolymerization) olarak 7 farklı guruba ayırmaktadır [1]. Bu guruplarda da ergiterek yığma modeli (FDM-Fused Deposition Modeling), sterolitografi (SLA-), Lazer Sinterleme (SLS-Service Level Agreement), elektron ışınlı ergitme (EBM-Electro Beam Melting) gibi kendi içinde farklı yöntem ve teknolojilerde makineler sayılabilir [2].

3B yazıcılar içerisinde en çok kullanılanı, maliyet ve tedarik açısından sağladığı kolaylıklar nedeniyle FDM 3B yazıcılardır. Bu yazıcılar malzeme olarak ergitilebilir ve filament formdaki herhangi bir malzemeyi yazdırabilir. FDM tipi yazıcılarda kullanılan ve ticari olarak sunulan filament malzemeleri PLA, PETG, ABS, ASA, PC/ABS, TPU tipi malzemelerdir. Bu malzemeler haricinde, akademik çalışmalarda üretilen ve filament özelliklerini geliştiren katkılı filamentler de mevcuttur [3,4]. Kullanılan filamentlerin özelliklerine ve baskı kriterlerine göre, baskı kalitesi ve ürün kalitesi elde etmek mümkündür. Kullanılan filament özelliklerine göre baskı süresi, baskı sıcaklığı ve diğer parametreler farklılık göstermekte, çıkan ürün de bu parametrelere ve kullanılan filamente bağlı olarak farklı mekanik özellikler göstermektedir [5].

Dünyada artan nüfus ve beraberinde gelen enerji ve ürün tüketimi, daha tasarruflu ve ekonomik ürünlerin üretilebilmesi için çalışmaları teşvik etmektedir. 3B yazıcılar da gerek prototip üretimler için gerekse düşük sayıdaki imalatlar için kalıp ihtiyacını ortadan kaldırmasıyla bu gereksinimlere cevap verebilmektedir. 3B yazıcılar ile yapılan üretimlerde numunelerin tam dolu olarak üretilmesine de gerek yoktur ve numuneler arzu edilen doluluk oranlarında gerekli kalite ve dayanım göz önünde bulundurularak üretilebilir. Bu imkân sayesinde de hem malzeme hem de zaman ve enerjiden tasarruf edilmesi mümkündür. FDM tipi yazıcıların kullanımının yaygınlaşması ile bu yöntem ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için yapılan çalışmalar da yaygınlaşmıştır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar da filamentlere katkı ilavesi ile kompozit filament üretimi [6,7], dolgu deseni [8] ve sandviç yapılar [9], doluluk oranları [10,11] gibi farklı çalışmalar yer almaktadır.

3B yazıcılardan elde edilen ürünlerin baskı kalitesini arttırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden birisi de sandviç yöntemidir. Bu yöntemde, farklı polimer malzemeler, katmanlar halinde birbiri üzerinde yazdırılır ve elde edilen ürün birden fazla polimerin birleşimidir. ABS, PLA ve HIPS polimerleri ile yapılan çalışmanın sonuçlarına göre, çekme mukavemeti açısından en yüksek değer PLA katmanları arasında ABS dolgusu ile elde edilmiştir. En düşük çekme performansı ise dış katmanın HIPS, iç dolgunun ABS olduğu çalışmada elde edilmiştir [12].

Nikhil ve arkadaşları FDM yöntemiyle farklı dolgu desenlerinde üretilmiş 3B malzemelere darbe dayanımını incelemişlerdir. Çalışmada üç farklı dolgu yoğunluğu (40, 60 ve 80), üç farklı desen (düz, kübik ve grid) ve üç farklı yazdırma yönü (yatay, köşe ve dik) seçmişlerdir. Sonuçlara göre optimum değerin dolgu yoğunluğu 40 olarak seçilen numunede, düz baskı ve köşe yönünde olan baskıda elde edildiği bildirilmiştir [13].

Kain ve arkadaşları [14], dolgu deseninin ağaç katkılı PLA malzeme ile yapılan üretimlerde mekanik özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan filamentlerin gevrek geçiş sıcaklığı 55-60 ℃ aralığında ve 1.24 g/cm3 yoğunluğundadır. Katkı olarak kullanılan ağaç fiberlerinin tane boyutları 30-200 µm aralığındadır ve %15 ve %25 katkılı olarak iki tür filament üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, numunelerin çekme, basma, eğme ve darbe çentik özelliklerini incelemişlerdir. Numune üretiminde 7 farklı açı (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, en yüksek çekme dayanımı beklenenin aksine 0° açı ile yapılan üretimde değil, odun katkı oranına bağlı olarak 15° ila 30° açı ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. En yüksek basma dayanımı ise 0° ve 15° açılarda üretilen numunelerde elde edilmiştir. Darbe çentik testi sonuçlarına göre, baskı açısının darbe çentik değerlerine bir etkisi olmadığı ancak artan ağaç fiber katkısının darbe dayanımını arttırdığı bildirilmiştir.

Kumar ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışmada PLA malzemeye PEG (ethylene glycol) ilavesinin fiziksel, mekanik ve yazdırılabilirdik üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla %1, 3 ve 5 oranlarında PEG ilave ettikleri PLA filamentleri üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, PEG ilavesi eriyik akış oranı olan MFR değerini arttırmıştır. PEG ilavesi üretilen malzemelerin çekme dayanımlarında düşüşe neden olurken, uzama miktarlarını arttırmıştır. Darbe dayanımı test sonuçlarına göre ise PEG ilavesi plastiklik özelliğini arttırarak darbe dayanımında artış sağlamıştır.

Khan ve arkadaşları [16] PLA malzemelerin üretiminde dolgu deseninin çekme ve eğme mukavemetine olan etkilerini incelemiştir. Çalışmada elde edilen verilere göre, dolgu deseni numunelerin elastikiyet modülü üzerinde etkili olduğu görülmüştür. En yüksek elastikiyet modülü "doğrusal" numunede ölçülmüştür, en düşük ise

"hilbert eğirisi" deseninde elde edilmiştir. Dayanım değerlerine bakıldığında ise, en yüksek çekme ve eğme mukavemeti "Doğrusal" desende ölçülürken, en düşük değerler "Hilbert Eğrisi" deseninde ölçülmüştür.

Rismalia ve arkadaşları [17] baskı deseni ve baskı yoğunluğunun PLA malzemelerin çekme dayanıma olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada 6 farklı desen ve üç farklı doluluk oranları değerlendirilmiştir. Farklı baskı yoğunlukları ve desenlerinde yapılan çalışma sonuçlarına göre, en yüksek çekme dayanımı (UTS) eşmerkezli desenlerde elde edilirken, en düşük çekme dayanımı altıgen desende elde edilmiştir.

Vicente ve arkadaşları [18] farklı baskı desen ve oranlarında ABS malzemelerin mukavemet değişimlerini incelemiştir. Ürettikleri numunelerde açık kaynak yazılımı kullanmış ve altı farklı desen ve üç farklı doluluk oranlarını (%20, %50 ve %100) değerlendirilmiştir. Elde ettikleri veriler incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı "bal peteği" deseninde elde edilirken, en düşük dayanım "doğrusal" baskı şeklinde elde edilmiştir.

Yukarıdaki literatür araştırmalarından da görüleceği üzere, baskı desen ve doluluk oranları ile kullanılan yazıcı ve dilimleme yazılımı gibi farklı yöntemler farklı sonuçlar vermiştir. Bunun en temel nedeni, her bir yazılım ve yazıcının kendine özgü baskı kalitesinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada ise, Prusa marka 3B yazıcı ve "Prusa Slicer" dilimleme programı kullanılmıştır. Bu programın dilimleme özelliklerinde yer alan desen düzeni, yazıcı baskı kalite ve hassasiyeti ve tabla sıcaklığı uygulaması ile yazdırma kalitesini arttırmaktadır. Aynı zamanda "Prusa Slicer" yazılımının diğer yazılımlardan farklı olarak sunduğu "3B Petek" gibi çalışma da kullanılan baskı desenleri mevcuttur. Her ne kadar literatürde benzer çalışmalar yer alsa da kullanılan ekipman ve yazılımın etkileri nedeniyle sonuçlar değişebilmektedir. Nitekim Marşavina ve arkadaşları [19] Prusa ve WN400 3B Platform marka ve model bir yazıcı ile farklı baskı açılarında üretilen numuneleri kıyaslamıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, Young modülü 3B platform yazıcısında yüksek çıkarken, çekme dayanımı Prusa marka yazıcıda daha yüksek sonuçlar vermiştir. 3B yazıcı ile yapılan üretimler artarak devam etmekte ve bu konu üzerinde yapılan çalışmalar da giderek yaygınlaşmaktadır [20,21].

Bu çalışmada, Prusa Mini 3B yazıcı ile en sık kullanılan 6 farklı desen seçilmiştir ve %15 doluluk oranlarında üretilen bu desenlerin, malzemelerin mekanik özelliklerine olan etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada seçilen baskı deseni (3B Petek ve Jiroid) Prusa Slicer yazılımının sunduğu ve birçok markada yer almayan bir desen olması nedeniyle diğer çalışmalardan farklılaşmaktadır. Bu iki desen 3B formda olması nedeniyle hem çekme hem de basma deneylerinde daha stabil sonuçlar vereceği düşünülmüştür.

II. MATERYAL METOT

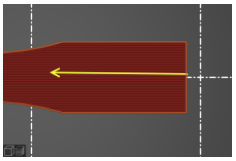
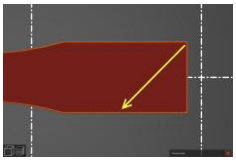
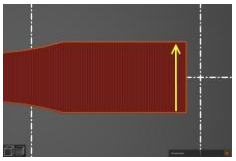
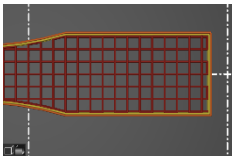
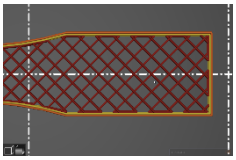
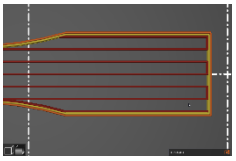
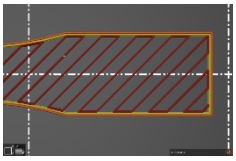
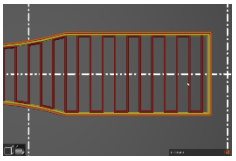
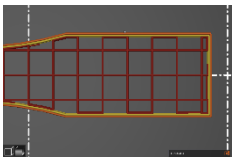
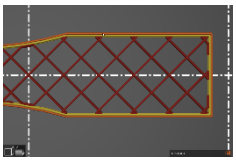
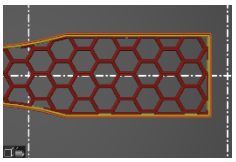
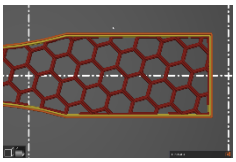
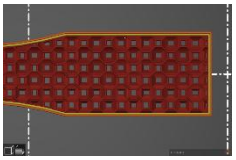
Farklı desen ve açıların ürünün mekanik özelliklerine olan etkilerini belirlemek için yapılan bu çalışmada, tam dolu numune ile toplamda 7 farklı desen ve 3 farklı açı ile ürünler üretilmiştir. ESUN marka PLA+ filament kullanılarak yapılan üretimlerde çekme numuneleri ve basma numuneleri ASTM standartlarına göre üretilmiştir.

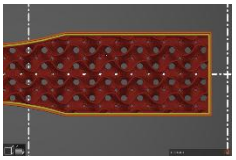
A. Dolgu Desen ve Açıları

Numuneler Prusa marka 3B yazıcı ile 7 farklı desende ve desenlere göre seçilen 3 farklı açıda (0°, 45°, 90°) basılmıştır. Desenlerin mekanik özelliklere olan etkilerini daha detaylı görebilmek adına, numunelerin yüzeyleri boş bırakılmış, üst ve alt tabakalara herhangi bir yüzey baskısı yapılmamıştır. Katman kalınlığı 0,15 mm olarak seçilmiş ve yan duvarlar tek katmanlı olacak şekilde üretilmiştir. Üretimi yapılan desen ve açılar Tablo 1'de verilmiştir.

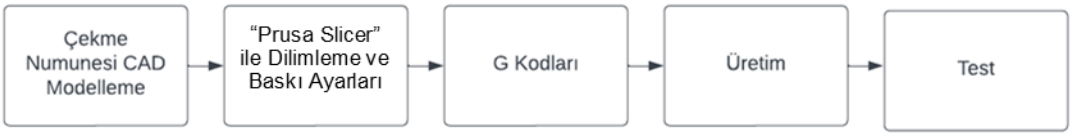
Kullanılan desenlerden 3B Petek ve Jiroid desenleri 3 boyutlu olmaları nedeniyle, basılan açıdan bağımsız olarak aynı deseni almaktadır. Bu numunelerde açının değiştirilmesi geometrik olarak herhangi bir değişikliğe neden olmadığı için, bu numuneler tek açı seçeneğinde basılmıştır. Benzer şekilde "Hizalanmış Doğrusal" şekil haricindeki numuneler 0° ile 90° dolgu açısı seçeneklerinde aynı geometrik yapıya sahip olması nedeniyle bu numunelerden sadece birisi üretilmiştir. 90° dolgu açısında geometrisi değişen iki farklı numune vardır. Bunlar "Hizalanmış Doğrusal" numunesi ve %100 doluluğa sahip "DOLU-90" numunesidir. "Doğrusal" desen ile "Kafes" desen geometrik olarak birbirine benzemesine rağmen, desen şeklindeki farklılık olarak birbirinden ayrışmaktadır. Numunelerde seçilen doluluk oranları, en sık kullanılan ve "Prusa Slicer" yazılımında da varsayılan olarak önerilen %15 doluluk oranı olarak tercih edilmiştir. Bu oran aynı zamanda, üretim zamanından ve malzemeden tasarruf edilmesi açısından önemli bir orandır. Numunelerin mukavemet değerlerini kıyaslayabilmek için %100 doluluk oranlarında da numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Açısal yönlendirilmeler Tablo-1'de verilmiştir ve açıların daha net görülebilmesi amacıyla oklarla yönler işaretlenmiştir.

Tablo 1. PLA filament özellikleri

Desen	Açı Değerleri		
	0°	45°	90°
Numune Kodu	X-0 ↑	X-45 ↖	X-90 ←
Farklı Açılarda Basılmış Tam Dolu Numuneler			
Numune Kodu	A0	A45	-
Rectilinear (Doğrusal)			A0 ile aynı (0° ve 90° aynı)
Numune Kodu	B0	B45	B90
Aligned Rectilinear (Hizalanmış Doğrusal)			
	C0	C45	-
Grid (Kafes)			C0 ile aynı (0° ve 90° aynı)
	D0	D45	-
Honeycomb (Petek)			D0 ile aynı (0° ve 90° aynı)
	E	-	-
3B Honeycomb (3B Petek)		3 Boyutlu Desen (0°, 45° ve 90° aynı)	
	F	-	-

Gyroid (Jiroid)		3 Boyutlu Desen (0°, 45° ve 90° aynı)

Numuneler çekme testi için ASTM D638-14 standardına göre ve Tip 1 ölçülerinde, basma testi için ise, ASTM D-695 standartlarına göre üretilmiştir. Bu standarda göre çekme deneyleri için numune kalınlıkları plastik numuneler için 1 mm ile 14 mm aralığında değişebilmektedir [22]. Bu çalışmada üretilen numune kalınlıkları ise, zaman ve maliyet kayıplarını azaltmak amacıyla 3 mm olarak seçilmiştir. 3B baskıda, seçilen doluluk oranları ile oluşturulan desenin boyutu değiştiğinden, Tip-1'den daha küçük standartlarda numune hazırlanması desenin yeterince oluşmasını engellediği için 165 mm boyunda tip-1 numuneler üretilmiştir.



Şekil 1. Üretim adımları.

Baskı için Esun marka PLA+ filament kullanılmıştır ve baskı sıcaklığı Prusa'nın varsayılan değeri olan 215 ℃ ve 60 ℃ tabla sıcaklığı değerleri kullanılmıştır bu değerler PLA üreticisi Esun firmasının tavsiye ettiği 210-230 ℃ değerleri arasındadır. Esun marka filamentin üretici firmadan temin edilen özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. PLA filament özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm^3	1,23
Çekme Dayanımı	MPa	63
Uzama	-	20
Eğme Mukavemeti	MPa	74
Eğme Modülü	MPa	1973
Izod Testi	kj/m2	9

Numunelerin üretimi için Prusa Slicer yazılımı kullanılmıştır. Yazılım gelişmiş moda ayarlanarak yazdırma seçeneklerinin tümüne müdahale edilebilir hale getirilmiştir ve böylece baskı özelliklerinden alt ve üst kaplama katmanları tek katman olarak ayarlanmış ve böylece desenlerin mukavemete olan etkilerinin net olarak belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Diğer baskı değerleri ise üretilen bütün numuneler için aynı değerlerde seçilerek değerler Tablo 3'te verilmiştir.

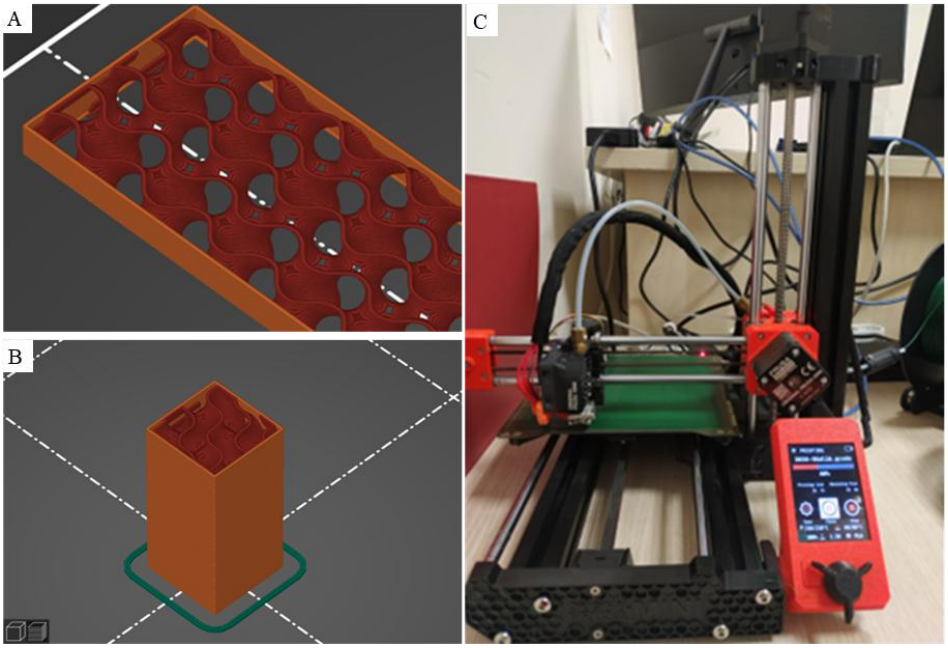
Tablo 3. Yazdırma parametreleri

Parametre	Birim	Değer
Katman Yüksekliği	mm	0.15
İlk Katman Değeri	mm	0.20
Yan Duvar Sayısı	mm	1
Alt Katman Kalınlığı	mm	0.5
Üst Katman Kalınlığı	mm	0.5
Yazma Hızı	mm/s	40
Dolgu Yazma Hızı	mm/s	80

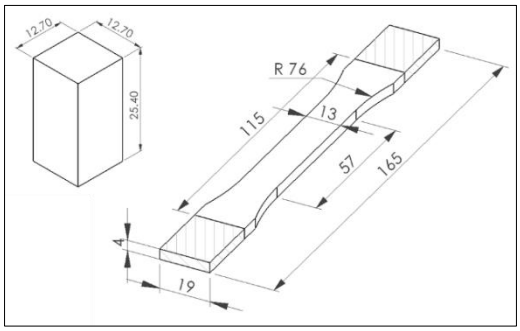
B. Çekme ve Basma Testleri

Tam dolu numune ile 7 farklı desen ve 3 farklı açı içerisinden yapılan kombinasyon ile toplamda çekme testi için 14 farklı ürün üretilmiştir. Testler için her bir numuneden en az 3 adet test gerçekleştirilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması çekme testinin sonucu olarak alınmıştır. Çekme testleri ASTM D638-14 plastik malzemeler

için çekme testi standartlarında verilen değerlere uygun olarak 5 mm/dk çekme hızında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Basma testi için ise, X-90 ve B-90 numuneleri aynı desenin 0° açı ile üretileni ile aynı geometride olması nedeniyle bu numuneler hariç diğer numuneler ile toplamda 12 numune üretilmiş ve ASTM D-695 standartlarında testler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Numune üretimi ve Prusa 3B yazıcı, A) Jiroid desende çekme numunesi B) Jiroid desende basma numunesi C) 3B yazıcı ve baskı süreci



Şekil 3. Çekme ve basma numuneleri.

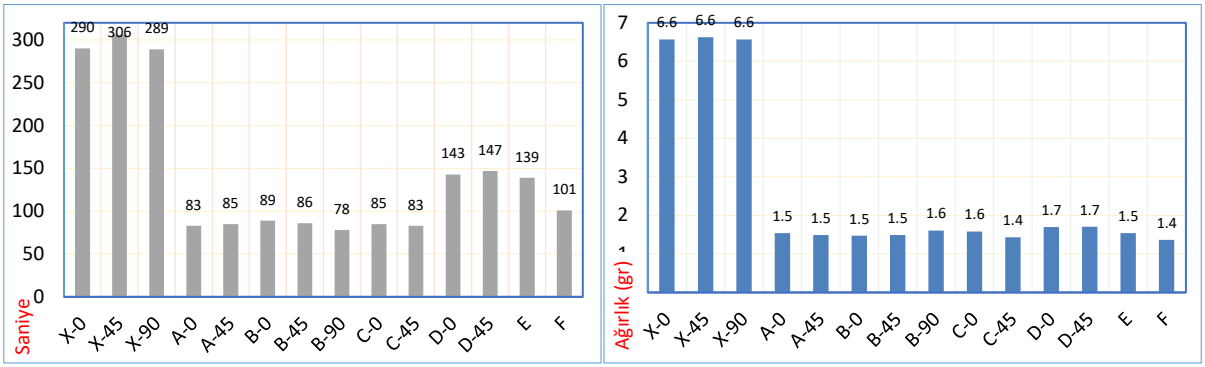
Numuneler çekme testlerine tâbi tutulduğunda, çekme çenelerinin baskısı ile numune kulaklarında meydana gelen ufak çaplı deformasyonlar nedeniyle kopmaların bu bölgelerden veya bu bölgelere yakın bölgelerden meydana geldiği tecrübe edilmiştir. Bu sorunu çözmek amacıyla numunelerin kulakları önce sıcak silikon ile kaplanmış, ancak daha sonra sıcak silikonun ısı etkisi ile sıcaklıktan etkilenen bölgeler oluşturarak kırılmaların bu bölgelerden oluşmasına neden olduğu fark edilmiştir. Bu nedenle, sıcak silikonlama yönteminden vazgeçilerek soğuk RTV-2 kalıp silikonu ile numunelerin kulakları korumaya alınmış ve kulakların deforme olması engellenerek çekme testlerinin verimliliğinin artması sağlanmıştır. Ancak yapılan bu uygulamanın da yeterli olmadığı görülmüş ve bunun üzerine, PLA malzemeden %100 doluluk oranlarında kulakları tutacak aparatlar üretilmiş ve çekme testlerini yaparken, bu aparatlar kulaklar üzerindeki baskıyı korumak amacıyla kullanılmıştır.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Üretimi ekonomik kılan en temel unsur verimliliktir ve bu genellikle birim zamanda üretilen kusursuz parça sayısı olarak hesaplanır. Bu bakımdan, üretim süresi önem arz etmektedir. Şekil 4'te baskı desenlerine göre 3B yazıcının harcadığı baskı süreleri saniye cinsinden verilmiştir. Desenler arası farklılıkların daha net görülebilmesi amacıyla bir tablada 7 farklı ürün (tablaya sığan maksimum ürün sayısı) üretilecek şekilde yerleştirilmesi ile simülasyon yapılarak zaman farklılıklarının daha net görülmesi amaçlanmıştır. Verilere bakıldığında, %100 dolulukta yapılan üretim, en uzun üretim süresi olarak görülmektedir. %100 doluluk oranlarında fakat farklı açılardaki üretimler kıyaslandığında ise, en uzun süreli üretim 45° açıya sahip üretimde

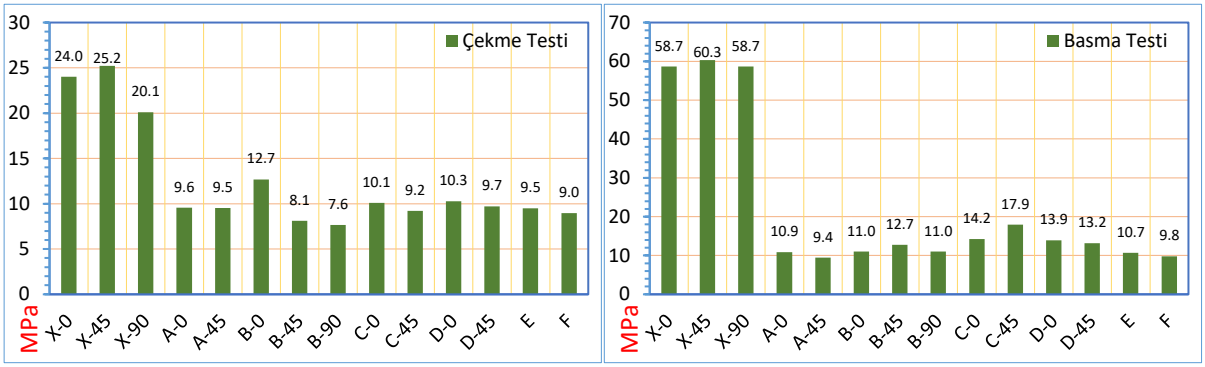
gerçekleşmektedir. Bunun nedeni 3B yazıcının hem X hem de Y eksenlerinde hareket etmek zorunda olmasından kaynaklanmaktadır.

3B yazıcıların birçoğunda varsayılan üretim oranı olarak %15 oranı ayarlı seçilmiştir. Bu oran, ürün mukavemeti, üretim zamanı ve malzeme tasarrufu açısından önerilmektedir. Ancak daha mukavemetli malzemeler üretilmek istenmesi durumunda bu oran değiştirilebilmektedir. %15 doluluk oranında yapılan üretimlerde üretim zamanının tam dolu orana kıyasla 1/4 oranında azaldığı görülmektedir. Kısaca, %100 dolulukta 1 tam parça üretmek yerine, %15 doluluk oranlarında yaklaşık 4 parça üretilebilmektedir.



Şekil 4. Farklı dolgu desen ve açılarına göre imalat süreleri ve ağırlıkları.

Üretilen numunelerin ayrıca ağırlık değerleri de "Prusa Slicer" uygulaması ile hesaplanmış ve Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek ağırlık Dolu-45° numunesinde ölçülürken en düşük ağırlık değeri ise jiroid desenle üretilmiş olan F numunesinde ölçülmüştür. %15 doluluk oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek ağırlık değerleri ise "bal peteği" formunda üretilen D numunelerinde ölçülmüştür.



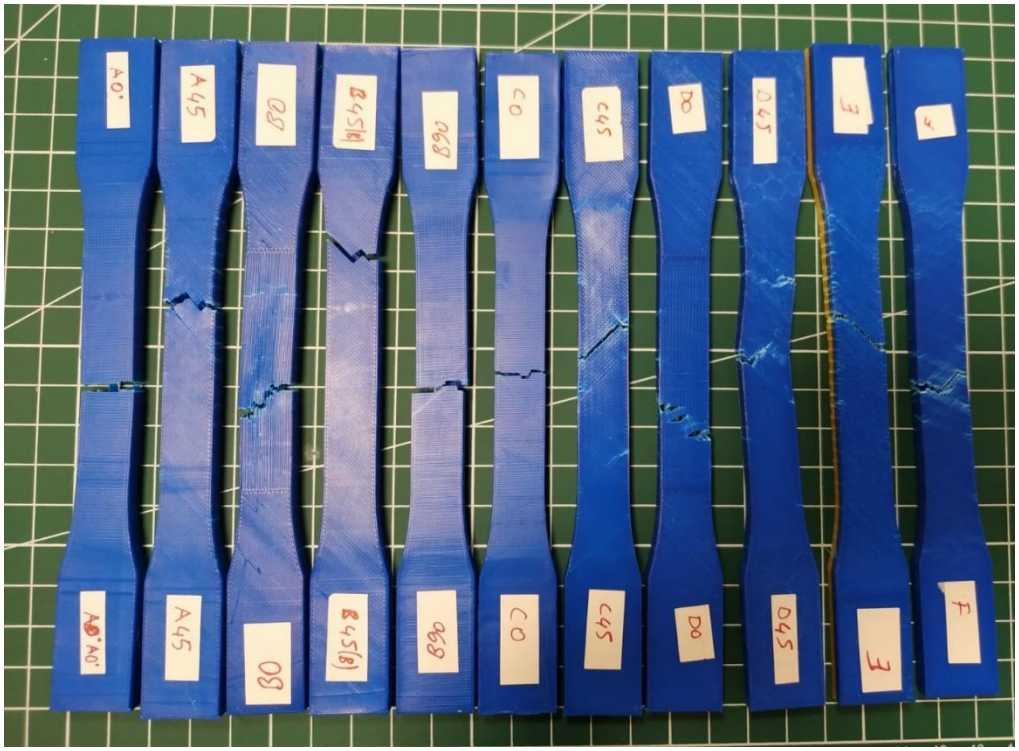
Şekil 5. Çekme ve basma testi sonuçlarına göre ölçülen mukavemet (UTS) değerleri.

Numunelerin çekme testi sonucu mukavemet değerlerine bakıldığında, en yüksek mukavemet değerinin tam dolu numunelerde elde edildiği görülmektedir. Tam dolu numuneler kendi içerisinde değerlendirildiğinde ise, en yüksek mukavemet değeri 45° baskı açısı ile üretilen numuneden elde edilmiştir. 45° baskı açısında en yüksek mukavemet değerinin elde edilmiş olmasının nedeni şöyle açıklanabilir: 45° açıda üretilen numunelerde PLA lifleri daha uzundur ve açılı olması nedeniyle yük altında numune lifleri esneyerek, üzerine gelen yükü diğer liflere dağıtarak stresin tek bir noktada yoğunlaşmasını engellemektedir. Bu geometrik baskı farklılığı nedeniyle, PLA lifler hem yay gibi davranarak üzerindeki yükü bütün malzemeye dağıtabilmekte, hem de daha uzun olan PLA liflerinin birbiri ile olan temas yüzey alanları artmaktadır. Bu her iki faktör beraber yük altında mukavemet artışının nedenleri olarak düşünülmektedir. Bu nedenlerle en yüksek mukavemet değeri bu numunede elde edilmiştir. Şekil 6'da görülen kopma şekillerinden de 45° açı ile üretilmiş numunenin hem çekme hem de kayma gerilmelerine maruz kaldığı görülmektedir. Baskı yönü, boyuna olan X-0 numunesi ise, en yüksek ikinci mukavemet değerini vermiştir; bunun nedeni de çekme testinde uygulanan kuvvet yönü ile baskı yönünün aynı olması sonucu, PLA liflerinin doğrudan çekmeye karşı direnç göstermiş olmasıdır. 90° açı ile basılan X-90 numunesi ise dolu numuneler içerisinde en düşük çekme değerlerini vermiştir. 90° açı ile üretilen tam dolu numunede dolu numuneler içerisinde en düşük çekme mukavemetinin ölçülmüş olmasının nedeni, numunenin baskı yönü nedeniyle PLA liflerinin çekme testi esnasında kayma gerilmesine maruz kalması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Malzeme bu durumda kesmeye maruz kalmış olur ve daha düşük mukavemet sergiler.

Şekil 6. Tam dolu numunelerde kırılma şekilleri.

Benzer bir sonuç, %15 doluluk oranına sahip numunelerde de görülmektedir. B-0 numunesi numune yönüne doğru 0° açı ile üretilmiş numunedir ve %15 doluluk oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek mukavemet değerini göstermiştir. A-0 numunesi de benzer şekilde %15 doluluk oranına sahip ikinci en yüksek mukavemet değerinin ölçüldüğü numunedir. A-0 numunesinin B-0 numunesinden daha düşük mukavemet değeri göstermesinin nedeni yatay yönde de baskı yapılmış olması nedeniyle dikey yönde yer alan yapının zayıflamasıdır. Yatay yöndeki baskı kayma gerilmesine mukavemet göstermek üzere tepki verirken, dikey yöndeki baskı çekme yönündeki kuvvetlere mukavemet göstermektedir. Sonuç olarak, çekme testinde baskı yönünün büyük etkisi olduğu görülmektedir [11].

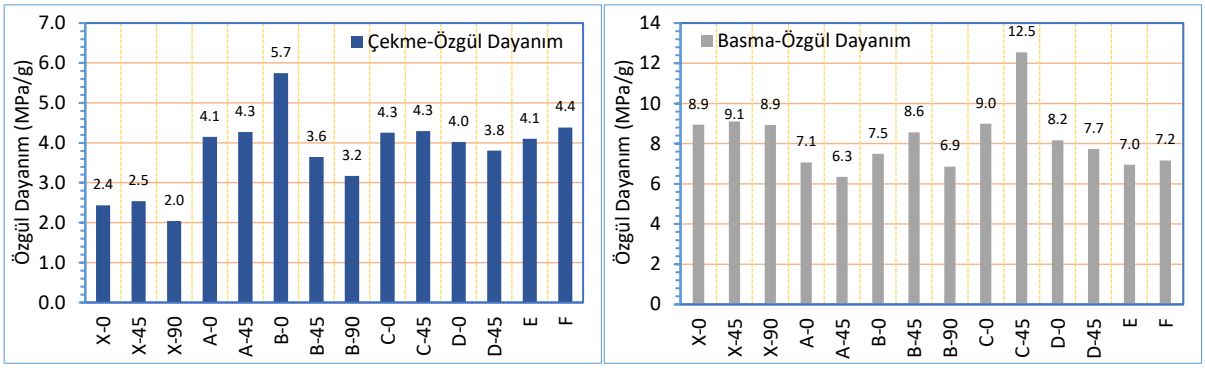
Doluluk oranı %15 olan numunelerden en yüksek çekme dayanımı gösteren üç numune ise, A-0, B-0 ve D-0 numuneleri çıkmıştır. Bunun nedeni, çekme işleminde uygulanan kuvvetin doğrusal yönde olması ve bu numunelerin de üretim açılarının 0° olması ve boyuna yönde çekme kuvvetlerine karşı daha mukavemetli olması nedeniyle bir miktar daha fazla mukavemet gösterdikleri düşünülmektedir. Nitekim, B-0 numunesi sadece boyuna yönde doluluk ile üretilmiş olması sonucu en yüksek mukavemet değerini göstermiştir.



Şekil 7. Numunelerin kopma davranışları.

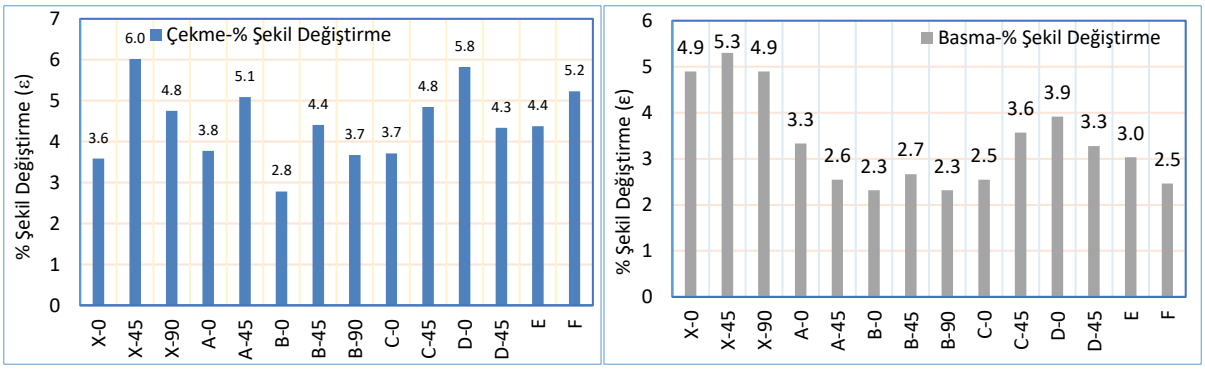
Üretilen numunelerin özgül dayanımı olarak isimlendirilen kütle-mukavemet oranlarına bakıldığında ise, en yüksek değer B-0 numunesinde elde edilmiştir. Bunun nedeni, B-0 numunesinin tamamen dikey (boyuna) yönde imal edilmiş olması nedeniyle çekme yönünden gelen kuvvetlere gösterdiği yüksek mukavemetten kaynaklanmaktadır. İkinci en yüksek dayanım ise, A-0 numunesinde ölçülmüştür. Dolu malzemelerden olan X-45

ise en yüksek üçüncü özgül dayanım değerini vermiştir. Basma test sonuçlarına göre hesaplanan özgül dayanım değerlerine bakıldığında, en yüksek değer C-45 numunesinde ölçülmüştür. En yüksek ikinci özgül dayanım değeri ise X-45 numunesinde ve en yüksek üçüncü değer ise C-0 numunesinde ölçülmüştür.



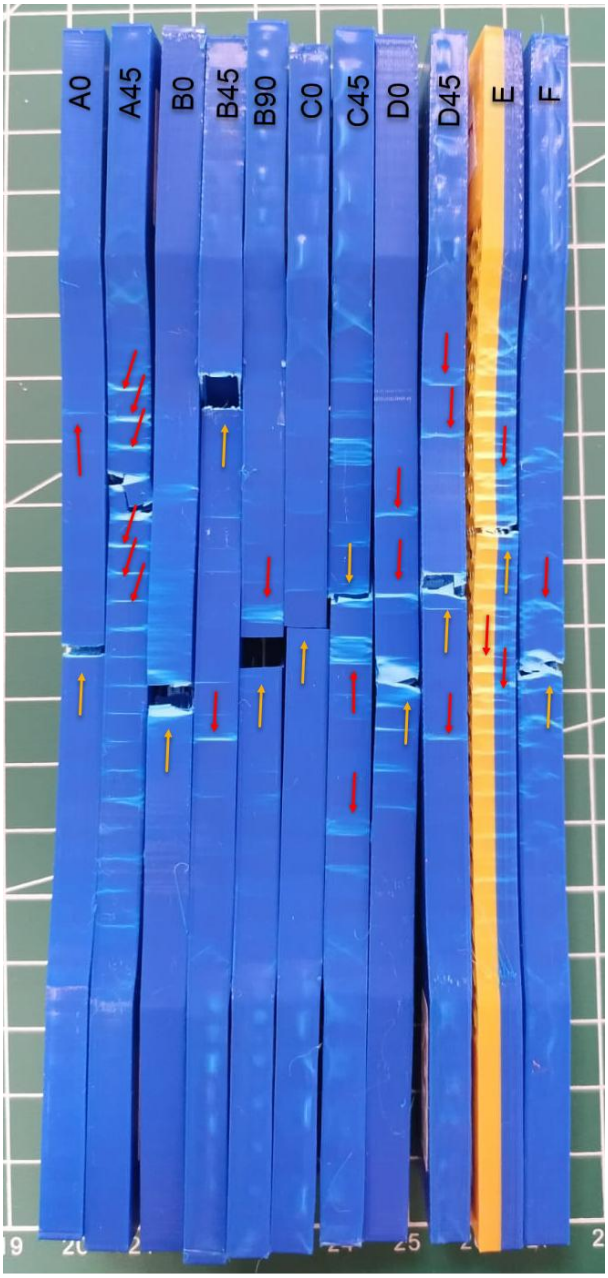
Şekil 8. Çekme ve basma test sonuçlarına göre özgül dayanım değerleri.

Genel olarak bakıldığında, çekme değerleri yüksek çıkan numunelerin basma değeri düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, çekme yönünde üretilen numuneler basma yönünde zayıf mukavemet göstermeleri nedeniyledir. Örneğin B-0 numunesi boyuna PLA malzemelerden üretilmiştir ve eksenel herhangi bir destek yoktur. Bu numune basmaya maruz kaldığında, eksenel yönde herhangi bir destek olmaması nedeniyle flambaj oluşması sonucu daha düşük kuvvetler altında deforme olmaktadır. Bu nedenle, eksenel destekleri olan numunelerin hem çekme hem de basma değerlerinde daha kararlı davranışlar sergilediği görülmektedir.



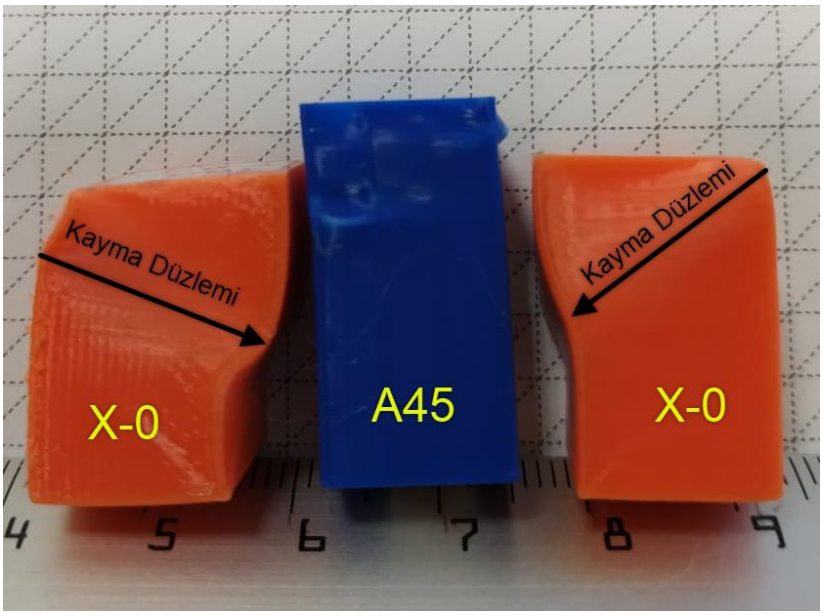
Şekil 9. Basma testi sonuçlarına göre % şekil değiştirme oranları.

Çekme testi sonuçlarında görülen uzama değerlerine bakıldığında en çok uzama tam dolu ve 45° baskı açısı ile üretilmiş olan X-45 numunesinde görülmüştür. İkinci en büyük uzama değeri ise D0 numunesinde görülmüştür. Şekil 10'da yer alan numune dış çeperinde oluşan kayma bantlarına bakıldığında, numunelerin dolgu desenlerine göre deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler hakkında bilgi vermektedir. Uzama oranlarının yüksek olduğu numunelerde bu plastik deformasyon bölgeleri daha fazla ve sık görülmektedir. Bu durum aynı zamanda deformasyonun numune boyunca dağıldığını da göstermektedir. Hiç kayma bandı oluşmayan C0 ve A0 numuneleri en düşük uzama değerlerini vermiştir. D0 numunesi bal peteği formu sayesinde, yüksek esneme özelliği göstererek %15 doluluk oranına sahip numuneler içerisinde en yüksek uzama değerini gösteren numune olmuştur. Kayma bantlarına bakıldığında en yüksek gerilim dağılımı 3B bal peteği formu olan E numunesinde, doğrusal desene sahip A45 numunesinde ve F numunelerinde görülmüştür.



Şekil 10. %15 dolulukta üretilen numunelerde kayma bantları

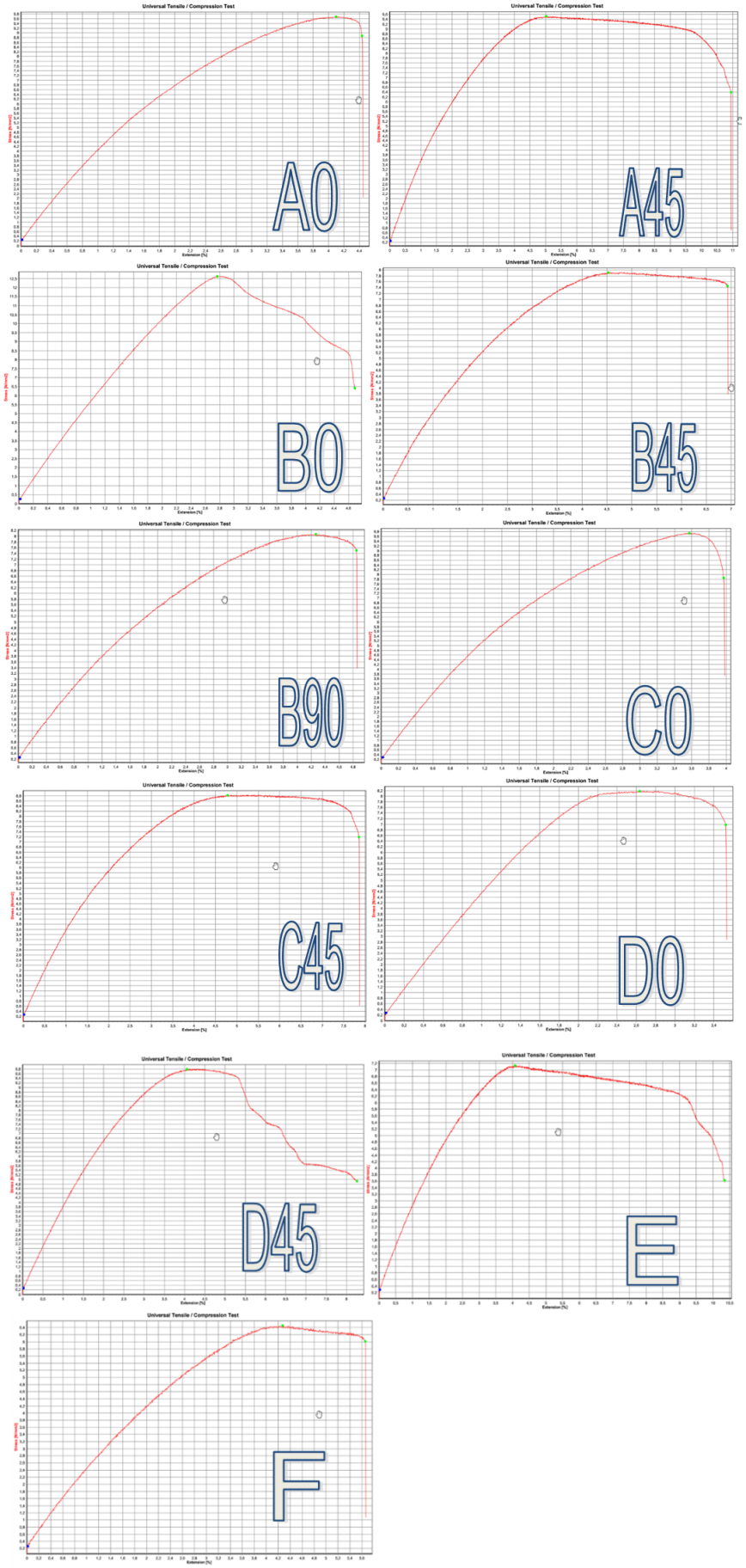
Basma testi sonuçlarından ölçülen % şekil değiştirme oranlarına bakıldığında, dolgu desenlerinin şekil değiştirme oranlarına önemli oranda etki ettiği görülmektedir. En yüksek şekil değiştirme oranları tam dolu numunelerden 45° açı ile üretilen numunede elde edilmiştir. Bunun nedeni, 45°açı ile üretilen numunede çekme ve kayma mekanizmalarının beraber gerçekleşmesi ve böylece malzeme iç yapısında bir miktar daha fazla esnemeye olanak tanıması olduğu düşünülmektedir. Tam dolu numunelerin daha yüksek şekil değiştirme göstermesinin nedeni ise, tam dolu olarak üretilmiş olmaları nedeniyle birbiri üzerinde kayma yaparak şekil değişikliği oranını artıran daha fazla lif olması ve bu liflerin birbiri üzerinde esneyerek daha fazla uzamaya olanak sağlaması olduğu düşünülmektedir. Şekil 8'de gösterildiği gibi, dolu malzemede, akma noktasına kadar meydana gelen şekil değiştirme daha fazladır.



Şekil 11. Basma testinde meydana gelen şekil değiştirmeler.

Şekil değiştirme oranının en düşük çıktığı numunelerde, iç dolgu deseni uygulanan basınca en az mukavemet gösterebilmiş dolgu desenine sahip numunelerdir. Bu nedenle, akma noktasına kadar sadece yan duvar çeperleri mukavemet göstermiş ve akma noktasına hızla ulaşılmıştır. Basma testinde en yüksek mukavemet gösteren dolgu desenleri ise, petek desenine sahip D-0 numunesi ve grid desenli C-45 numuneleridir. D-45 numunesinde şekil değiştirmenin D-0'a göre bir miktar daha az olmasının nedeni, 45° üretim açısı nedeniyle, basma numunesi içerisinde sadece 2 tane tam bir altıgen petek formu oluşurken, D-0 numunesinde 3 adet tam altıgen petek formu elde edilmiştir. Bu durum D-0 numunesini yapısal olarak bir miktar daha mukavemetli hale getirmiştir. Jiroid deseni de basma testinde en düşük şekil değişimi gösteren numuneler arasında yer almaktadır. Bunun nedeni, jiroidin 3 boyutlu bir desen olması nedeniyle, her bir katmanın kendisinden bir önceki katmanın tam olarak üzerine oturmaması, bir miktar dönme hareketi ile kayarak 3B desen oluşturmasıdır. Bunun sonucu olarak, PLA lifleri arası temas daha azdır ve yükün katmanlar arası aktarımı zayıflamıştır.

Numunelerin testlerden elde edilen çekme grafikleri şekil 12'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, geometrik farklılığın numunelerin kopma davranışı üzerinde ciddi etkisi olduğu görülmektedir. Özellikle karmaşık geometriye sahip D, E ve F geometrileri ile, yatayda dolgu açısına sahip numuneler maksimum çekme dayanımı sonrası kopma noktasına kadar bir miktar daha uzama davranışı sergilemiştir.



Şekil 12. Numunelerin testlerden elde edilen çekme grafikleri.

Birçok alanda sıklıkla PLA filament ile kullanılan 3B yazıcıların, dolgu desenlerinin malzemenin mekanik özelliklerine olan etkilerinin incelendiği bu çalışmada, tam dolu ile %15 doluluk oranına sahip 6 farklı desen ile 3 farklı baskı açısında toplam 14 farklı numune üretilmiştir. Seçilen desenlerden 5 tanesinde kullanılan baskı açılarından 0° ile 90° açılarında üretilen numunelerin aynı geometriye sahip olmaları nedeniyle, sadece birisi üretilmiştir. %15 doluluk oranına sahip numunelerin yanı sıra, tam dolulukta üretim yapılarak ürünler arası kıyas sağlanmıştır. Üretilen numuneler çekme ve basma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre,

• Dolgu deseninin imalat sürelerini etkilediği ve en yüksek imalat süresi tam dolu numunelerde görülmüştür. %15 doluluk oranına sahip numunelerde desen karmaşıklaştıkça üretim süresi artmıştır. En yüksek üretim süresi D-45 numunesi olan bal peteği formunda ve 45° baskı açısında elde edilmiştir.

• Seçilen baskı desen ve açısının ürünün ağırlığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. %15 doluluk oranına sahip numunelerde en yüksek ağırlık bal peteği deseninde ve en düşük ağırlık ise jiroid deseninde ölçülmüştür. Tam dolu numunelerde ise ağırlık değerleri benzerdir.

• Çekme testi sonuçlarına göre, en yüksek mukavemet tam dolu numunede ölçülmüştür. Tam dolu numunelerde en yüksek çekme mukavemeti sırasıyla 45°, 0° ve 90° baskı açılarında elde edilmiştir. %15 doluluk oranlarına sahip numunelerden en yüksek mukavemet değeri ise, B-0 numunesinde ölçülmüştür ve sırasıyla en yüksek üç mukavemet B-0, A-0 ve D-0 numunelerinde elde edilmiştir.

• Basma testlerinde ölçülen en yüksek mukavemet değerleri tam dolu numunelerden 45° baskı açısında üretilen numunede elde edilmiştir. İkinci en yüksek değer ise, 0° ve 90° baskı açısında üretilen numunelerden elde edilmiştir. Bu her iki açı baskı testi numunesinde geometrik olarak aynı ürünü vermesi nedeniyle aynı sonuç elde edilmiştir. %15 doluluk oranına sahip numunelere bakıldığında ise, en yüksek basma mukavemeti değerleri sırasıyla C-45, C-0 ve D-0 numunelerinde ölçülmüştür.

• Hem basma hem çekme testlerinde yüksek mukavemet gösteren numuneler ise, D-0, D-45, E ve F numuneleri olmuştur.

• Baskı geometrisi ve açısı malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği görülmüştür. Çekmeye mukavemetli numuneler, basmaya karşı zayıf, basmaya karşı mukavemetli numunelerin ise çekmeye karşı daha mukavemetsiz olduğu görülmüştür. Ancak karmaşık geometrili baskı desenlerinde ise (bal peteği, 3B bal peteği, jiroid) hem çekme de hem de basmaya karşı olan mukavemetleri beraber değerlendirildiğinde daha stabil sonuçlar verdiği görülmüştür.

• Dolgu deseninin malzemenin uzama miktarını doğrudan etkilediği belirlenmiştir.

• Malzemelerin ağırlık-mukavemet ilişkilerine bakıldığında, çekme testlerinde en yüksek özgül dayanımı sırasıyla B-0, A-0, X-45, X-0 ve D-0 numunelerinde görülmüştür. Çekme testinde en yüksek değerlerin 0° açısında gerçekleşmesi, baskı yönü ile çekme doğrultusunun aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Basma testlerinde en yüksek özgül dayanım değerleri ise sırasıyla C-45, X-45, C-0, X-0=X-90 ve B-45 numunelerinde ölçülmüştür. Özgül dayanım değerlerine bakıldığında, tam dolu numunelerin performansının ciddi şekilde düştüğü görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia manufacturing*, *35*, 1286-1296.

[2] Özmen, Ö., Sürmen, H. K., & Sezgin, A. (2023). 3 Boyutlu Baskida Dolgu Biçiminin Çekme Dayanimina Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, *11*(1), 336-348.

[3] Yemişçi, F. (2016). *Plastikleştirilmiş poli (laktik asit)'in alev dayanımının fosfor bazlı katkı maddeleri ile geliştirilmesi* Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].

[4] Kangallı, E. (2022). *Poli (laktik asit)(PLA)/bor oksit (B2O3) nanokompozit sentezi ve karakterizasyonu* Ankara Universitesi (Turkey)

[5] Parmaksız, F., Anaç, N., Koçar, O., & Erdogan, B. (2023). Investigation of mechanical properties and thermal conductivity coefficients of 3D printer materials. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, *7*(3), 146-156.

[6] Dey, A., Roan Eagle, I. N., & Yodo, N. (2021). A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of manufacturing and materials processing*, *5*(3), 69.

[7] Çevik, Ü., & Kam, M. (2020). A review study on mechanical properties of obtained products by FDM method and metal/polymer composite filament production. *Journal of nanomaterials*, *2020*(1), 6187149.

[8] Li, T., & Wang, L. (2017). Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*, *175*, 46-57.

[9] Sugiyama, K., Matsuzaki, R., Ueda, M., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2018). 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *113*, 114-121.

[10] Evlen, H. (2019). Doluluk oranının 3B yazıcıda üretilen TPU ve TPE numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, *21*(63), 793-804.

[11] Evlen, H., Özdemir, M. A., & Çalişkan, A.(2019). Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22 (4): 1031–1037.[12] Baca Lopez, D. M., & Ahmad, R. (2020). Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling. *Polymers*, *12*(3), 651.

[12] Raut, N. P., Bhosale, S., & Kolekar, A. B. (2022). Application of Taguchi methodology in evaluating the IZOD impact strength of FDM 3D printed component. *Materials Today: Proceedings*.

[13] Kain, S., Ecker, J., Haider, A., Musso, M., & Petutschnigg, A. (2020). Effects of the infill pattern on mechanical properties of fused layer modeling (FLM) 3D printed wood/polylactic acid (PLA) composites. *European journal of wood and wood products*, *78*, 65-74

[14] Kumar, R., Alex, Y., Nayak, B., & Mohanty, S. (2023). Effect of poly (ethylene glycol) on 3D printed PLA/PEG blend: A study of physical, mechanical characterization and printability assessment. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *141*, 105813.

[15] Khan, S., Zakaria, H., Chong, Y., Saad, M., & Basaruddin, K. (2018). Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts. IOP conference series: materials science and engineering and engineering, 429: 012101 (2018).

[16] Rismalia, M., Hidajat, S. C., Permana, I. G. R., Hadisujoto, B., Muslimin, M., & Triawan, F. (2019). Infill pattern and density effects on the tensile properties of 3D printed PLA material. *Journal Of Physics: Conference Series*, 1402 (4): 044041.

[17] Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, *3*(3), 183-192.

[18] Marșavina, L., Vălean, C., Mărghitaș, M., Linul, E., Razavi, N., Berto, F., & Brighenti, R. (2022). Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, *274*, 108766.

[19] Bergonzi, L., Vettori, M., Stefanini, L., & D'Alcamo, L. (2021). Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA. IOP Conference Series: Materials Science And Engineering, 1038 (1): 012071.

[20] Cuan-Urquizo, E., Álvarez-Trejo, A., Robles Gil, A., Tejada-Ortigoza, V., Camposeco-Negrete, C., Uribe-Lam, E., & Treviño-Quintanilla, C. D. (2022). Effective stiffness of fused deposition modeling infill lattice patterns made of PLA-wood material. *Polymers*, *14*(2), 337.

[21] Committee, D. (2010). Test method for tensile properties of plastics. *ASTM International*.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 308-315, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1430251
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Fibonacci Numbers Sequence Derived From Suborbital Graphs for the Modular Group Γ

Γ Modüler Grubunun Alt Yörüngesel Graflarından Üretilmiş Fibonacci Sayı Dizisi

Seda Öztürk[1*]

Geliş / Received: 01/02/2024 ***Revize / Revised: 04/03/2024*** ***Kabul / Accepted: 05/03/2024***

ABSTRACT

The Fibonacci sequence, a special number sequence studied a lot recently and plays an important role with its applications in many fields of science, can be obtained in different areas of mathematics and with different methods. In this study, Fibonacci numbers are obtained with using suborbital graphs of the Modular group **Γ** and some special matrices.

Keywords- Fibonacci Numbers, Suborbital Graphs, Modular Group, Imprimitive Action, Congruence Subgroup

ÖZ

Son zamanlarda üzerinde çokça çalışılan ve bilimin birçok alanındaki uygulamalarıyla önemli bir rol oynayan özel bir sayı dizisi olan Fibonacci dizisi, matematiğin farklı alanlarında ve farklı yöntemlerle elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, Fibonacci sayıları Modüler grubun alt yörüngesel grafları ve bazı özel matrisler kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Fibonacci Sayıları, Alt Yörüngesel Graflar, Modüler Grup, İmpirimitif Hareket, Kongrüans Altgrup

[1]*Corresponding Author Contact: seda.ozturk@ktu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-7569-361X)
Department of Mathematics, Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye.

I. INTRODUCTION

In the 13th century, the Fibonacci sequence $\{0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, \dots\}$ is constructed inductively so that each member is the sum of the preceding two members, was introduced by Leonardo Fibonacci. These numbers play a significant role not only in all areas of Mathematics but also in statistics, finance, architecture ext. Additionally, the golden ratio is a mathematical principle that originates from the Fibonacci sequence, calculated by dividing each Fibonacci number by one that directly precedes it. Further, [1] has more thorough details regarding this sequence.

The modular group is a fundamental group in number theory. The group acts on the upper half plane

$\mathcal{U} := \{z \in \mathbb{C}: Im(z) > 0\}$ and its elements correspond to fractional linear transformations of this plane as follows. It plays a crucial role in the study of modular forms, automorphic forms, and their connections to elliptic curves, quadratic forms, and many other areas of mathematics. For more information, see [2].

Suborbital graphs are an interesting topic within graph theory that has received significant attention in the literature. Suborbital graphs are classes of graphs that arise in the study of group actions on sets, particularly when considering the orbits of vertices or edges under the action of a group. These graphs have applications in various fields, including algebraic graph theory and combinatorics.

The concept of suborbital graphs for a permutation group acting on a set was first introduced in [3]. Based on this idea in [4], suborbital graphs for the Modular group were given as follows:

The modular group Γ consists of the pairs of matrices

$$\pm\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, where\ \ a, b, c, d\ \epsilon\mathbb{Z}\ \ ve\ ad - bc = 1.$$

In the paper, we omit the symbol $\pm$, and identify each matrix with its negative. Γ acts on the extended rational

$\hat{\mathbb{Q}} = \mathbb{Q} \cup \{\infty\}$ by

$$z \to \frac{az + b}{cz + d},\ \ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}\epsilon\Gamma.$$

More precisely, by

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}.\frac{x}{y} = \frac{ax + by}{cx + dy}.$$

We summarize imprimitive action of a group G on a set X and suborbital graphs concerning the pair (G, X). For each member g of G, if $g: X \to X$ one to one onto, then g is called a permutation of X. If all members of G are permutations of X, then pair (G, X), or only G for short, is said to be a permutation group.

Now suppose (G, X) is a permutation group and the relation " $\approx$ " on X is an equivalence relation. Whenever $x \approx y$ implies that $g(x) \approx g(y)$, for all $g \in G$, the relation $\approx$ is called G −invariant. In this case, each equivalence class is said to be a block. Some of G −invariant equivalence relations are below:

$$(i)\ \text{Identity relation:}\quad x \approx y\ \Leftrightarrow x = y,$$

$$(ii)\ \text{Universal relation:}\ x \approx y\ \ for\ all\ x, y\epsilon X.$$

These two relations are called trivial. If there is a relation other than the above two, on X then (G, X) is called an imprimitive permutation group. If G is transitive on X, that is, if $x, y \in X$ then $y = g(x)$ for some $g \in G$, then (G, X) is an imprimitive transitive permutation group.

In the paper, we take $G = \Gamma$ and $X = \hat{\mathbb{Q}}$. Of course, in this case, $(\Gamma, \hat{\mathbb{Q}})$ is a transitive permutation group, the imprimitive relation is defined in [3] as follows:

The stabilizer Γ_∞ of the Modular group Γ is the group

$$\Gamma_0(n) = \left\{\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma \middle| \ c \equiv 0\ modn\right\}.$$

If $n > 1$, then $\Gamma_\infty < \Gamma_0(n) < \Gamma$. So the relation, defined by

$$\frac{r}{s} \approx \frac{x}{y}\ \ \Leftrightarrow\ \ ry - sx \equiv 0\ (modn),$$

is imprimitive. So $(\Gamma, \hat{\mathbb{Q}})$ is an imprimitive transitive permutation group.

Now we give suborbitals, and suborbital graphs from [4]. Γ acts, as well, on the set $\hat{\mathbb{Q}} \times \hat{\mathbb{Q}}$, by $g: (\alpha, \beta) \to (g(\alpha), g(\beta))$. The orbits of the action are called suborbitals.

From the suborbital $O(\alpha, \beta)$ containing (α, β), we construct the suborbital graph $\mathcal{G}(\alpha, \beta)$: the vertices α are in $\hat{\mathbb{Q}}$, while there is a directed edge from u to v, shown

$$u \to v \text{ if } (u, v) \in O(\alpha, \beta).$$

If we chose, as a vertex set, the block

$$[\infty] = [1/0] = \left\{\frac{x}{y} \in \mathbb{Q} \middle| \, y \equiv 0 \ (mod n)\right\},$$

we get a subgraph $\mathcal{G}\left(\alpha, \frac{u}{n}\right)$, $F_{u,n}$ for short.

Let $v_0, v_1, v_2, \dots, v_k$ be in $[\infty]$. The configurations $v_0 \to v_1 \to v_2 \to \cdots \to v_k$ and $v_0 \to v_1 \to v_2 \to \cdots$ are called a path and infinite path, respectively.

Theorem 1.1 [4] There is an edge $\frac{r}{s} \to \frac{x}{y} \in F_{u,n}$ if and only if either

$a)$ $x \equiv ur \ mod n, \quad ry - sx = n$ or

$b)$ $x \equiv -ur \ mod n, \quad ry - sx = -n$

One of the studies about suborbital graphs can be reviewed in [5]. After that several authors' work on these subjects facilitated some branches of Mathematics such as number theory, group theory ext. Obtaining the Fibonacci sequence is one of the most attractive outcomes within them. This sequence has been obtained in many ways. For example, in [6-9], some modular subgroups of Γ and related suborbital graphs are used to construct the sequence using infinite paths, and furthermore, in [10-12], some continued fractions are taken to produce the sequence, and in [13] some special matrices are used.

In this work, we believe in outlining the suborbital graph for a congruence subgroup $\Gamma_0(n)$ to find a relation of these graphs and the Fibonacci sequence.

II. MAIN CALCULATIONS

Let u be a natural number. Then,

$$T = \begin{pmatrix} -u & 1 \\ -(u^2 + 3u + 1) & u + 3 \end{pmatrix}$$

is in Γ.

If $k_0 = 3$, is the minimal positive integer for which $u^2 + k_0 u + 1 \equiv 0 (mod n)$ in [5], and $n = u^2 + 3u + 1$, then $T \in \Gamma_0(n)$.

Further, from

$$T(z) = \frac{-uz + 1}{-(u^2 + 3u + 1)z + (u + 3)} = z \tag{1}$$

we get that

$$\frac{-(2u + 3) + \sqrt{5}}{-2(u^2 + 3u + 1)} = z_1 \ , \quad \frac{-(2u + 3) - \sqrt{5}}{-2(u^2 + 3u + 1)} = z_2$$

are fixed points of T.

Theorem 2.1 Let k be a natural number. Then,

$i)$ $T^k\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow T^k\left(\frac{u}{n}\right)$ in $F_{u,n}$

$ii)$ $T^k\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow T^{k+1}\left(\frac{1}{0}\right)$ in $F_{u,n}$

$iii)$ $\left\{T^k\left(\frac{1}{0}\right)\right\}_{k \in \mathbb{N}}$ is an increasing sequence and the path

$$T\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow T^2\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow T^3\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow \cdots$$

is an infinite.

Proof. i) We will prove this by using the principle of mathematical induction and Theorem 1.1.

We observe that

$$T\left(\frac{1}{0}\right) = \frac{u}{n} \longrightarrow \frac{3u+1}{3n} = T\left(\frac{u}{n}\right)$$

holds for $k = 1$.

Assume that

$$T^k\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow T^k\left(\frac{u}{n}\right) \tag{2}$$

Since the expression (2) is true for k, we have

$$T\left(T^k\left(\frac{1}{0}\right)\right) \longrightarrow T\left(T^k\left(\frac{u}{n}\right)\right)$$

So the proof is completed.

ii) Using the above condition (i), we get

$$T^k\left(\frac{1}{0}\right) \longrightarrow T^k\left(\frac{u}{n}\right) = T^k\left(T\left(\frac{1}{0}\right)\right).$$

iii) Since T with $T(z) = \dfrac{-uz+1}{(u^2+3u+1)z+(u+3)}$ is strictly increasing, we have the results.

Theorem 2.2 Let $a, b \epsilon \mathbb{N}$ and $\dfrac{1}{n} \leq \dfrac{a}{nb} < \dfrac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}$. Then,

$i)$ $\dfrac{a}{nb} < T\left(\dfrac{a}{nb}\right) < \dfrac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}$,

$ii)$ $\dfrac{a}{nb} \longrightarrow T\left(\dfrac{a}{nb}\right)$ in $F_{u,n}$ if and only if $a = \dfrac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}$ and

there exists some $t \epsilon \mathbb{N}$ such that $5b^2 + 4 = t^2$.

Proof. i) Given $\dfrac{a}{nb} < \dfrac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}$ we have $(2u+3)b - 2a > \sqrt{5}b \Rightarrow \left((2u+3)b-2a\right)^2 > 5b^2$.

Then, $a^2 - (2u+3)ab + (u^2+3u+1)b^2 > 0$ and let us take $n = u^2+3u+1$, so

$$na^2 - (2u+3)abn + n^2b^2 > 0$$

Then, we obtain that

$$\frac{a}{nb} < T\left(\frac{a}{nb}\right) = \frac{-au+nb}{(-a+(u+3)b)n} \tag{3}$$

Furthermore, since

$$\frac{a}{nb} < \frac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}$$

and T is increasing on

$$\left[\frac{1}{n}, \frac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}\right) \cap \mathbb{Q}$$

and by (1), then we get that

$$T\left(\frac{a}{nb}\right) < \frac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n} \tag{4}$$

From (3) and (4), we see that

$$\frac{a}{nb} < T\left(\frac{a}{nb}\right) < \frac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}.$$

ii) Let $\frac{a}{nb} \longrightarrow T\left(\frac{a}{nb}\right)$ be an edge in $F_{u,n}$. Then,

it follows that

$$a^2-(2u+3)ab+nb^2>0 \quad \text{and} \quad a^2-(2u+3)ab+nb^2=1.$$

Since

$$4a^2-4(2u+3)ab+4nb^2=4, \quad 4a^2-4(2u+3)ab+4nb^2+5b^2=4+5b^2,$$

so

$$|(2u+3)b-2a|=\sqrt{5b^2+4} \text{ holds.}$$

Since $\frac{a}{nb} < \frac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}$ this shows that $(2u+3)b-2>0$ and

$$a=\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}$$

which means for $a, b\epsilon\mathbb{N}$ there exists some $t\epsilon\mathbb{N}$ such that $5b^2+4=t^2$.

Conversely, if $a=\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}$, $t\epsilon\mathbb{N}$ and $5b^2+4=t^2$, then

$$\frac{a}{nb}=\frac{\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}}{nb}$$

and

$$\frac{-\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)u+nb}{\left(-\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)+(u+3)b\right)n}=T\left(\frac{a}{nb}\right).$$

This implies that

$$\left(-\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)+(u+3)b\right)\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)$$
$$-b\left(-\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)u+nb\right)=1$$

and

$$\left(-\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)u+nb\right)\equiv-\left(\left(-\left(\frac{(2u+3)b-\sqrt{5b^2+4}}{2}\right)u+nb\right)\right)u \ (mod\ n).$$

According to Theorem 1.1, we have that $\frac{a}{nb} \longrightarrow T\left(\frac{a}{nb}\right)$ in $F_{u,n}$.

Here are two major corollaries without proof.

Corollary 2.3

i) $\frac{1}{0} \longrightarrow \frac{u}{n}+\frac{0}{1.n} \longrightarrow \frac{u}{n}+\frac{1}{3.n} \longrightarrow \frac{u}{n}+\frac{3}{8.n} \longrightarrow \cdots \longrightarrow \frac{u}{n}+\frac{a_k}{b_k.n} \longrightarrow \frac{u}{n}+\frac{b_k}{(3b_k-a_k).n} \longrightarrow \cdots$

is an infinite path in $F_{u,n}$,

ii) Every vertex in (i) is less than $\dfrac{(2u+3)-\sqrt{5}}{2n}$,

iii) The numbers $5a_k^2+4,\ 5b_k^2+4$ are perfect squares for the natural numbers $a_k, b_k \in \mathbb{N}$ in (i) .

Proof. Theorem 2.1 and Theorem 2.2 conclude the proof.

Corollary 2.4 The numbers $k \in \mathbb{Z}^+$ making $5k^2+4$ perfect squares are

$$0, 1, 3, 8, \dots, x, y, 3y-x \tag{5}$$

Proof. Corollary 2.3 concludes the proof.

Now, we will investigate the numbers obtained from the inverse matrix of T .

The inverse matrix of T is $\begin{pmatrix} u+3 & -1 \\ (u^2+3u+1) & -u \end{pmatrix}$, and for $u=1$ we have $S := \begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 5 & -1 \end{pmatrix}$.

So we get the following.

Theorem 2.5

i) For all $k \in \mathbb{N}, S^k\left(\frac{3}{5}\right) \longrightarrow S^{k+1}\left(\frac{3}{5}\right)$,

ii) $\left\{S^k\left(\frac{3}{5}\right)\right\}_{k\epsilon\mathbb{N}}$ is an increasing sequence and the path $\frac{3}{5} \longrightarrow S\left(\frac{3}{5}\right) \longrightarrow S^2\left(\frac{3}{5}\right) \longrightarrow S^3\left(\frac{3}{5}\right) \longrightarrow \cdots$

is an infinite.

Proof. We conclude the proof as in Theorem 2.1.

Theorem 2.6 Let $S := \begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 5 & -1 \end{pmatrix} \epsilon \Gamma_0(5)$ and $a, b \epsilon \mathbb{N}$ such that $\frac{3}{5} \le \frac{a}{5b} < \frac{5+\sqrt{5}}{10}$. Then,

$i)$ $\dfrac{a}{5b} < S\left(\dfrac{a}{5b}\right) < \dfrac{5+\sqrt{5}}{10}$,

$ii)$ $\dfrac{a}{5b} \longrightarrow S\left(\dfrac{a}{5b}\right)$ is an edge in $F_{1,5}$ if and only if $a = \dfrac{5b+\sqrt{5b^2-4}}{2}$ and

there exists some $r \epsilon \mathbb{N}$ such that $5b^2-4=r^2$.

Proof. Given $\dfrac{a}{5b} < \dfrac{5+\sqrt{5}}{10}$, we have $2a-5b < \sqrt{5}b \Rightarrow (2a-5b)^2 < 5b^2$.

From this, we get $4a^2-20ab+20b^2<0$, $a^2-5ab+5b^2<0$ and $5a^2-25ab+25b^2<0$. Then,

$$\frac{a}{5b} < \frac{4a-5b}{5a-5b} = S\left(\frac{a}{5b}\right) \tag{6}$$

Since S is increasing on $\left[\frac{3}{5}, \frac{5+\sqrt{5}}{10}\right) \cap \mathbb{Q}$, and $S\left(\frac{5+\sqrt{5}}{10}\right) = \frac{5+\sqrt{5}}{10}$ from (1), we have

$$S\left(\frac{a}{5b}\right) < \frac{5+\sqrt{5}}{10} \tag{7}$$

From (6) and (7), we get $\dfrac{a}{5b} < S\left(\dfrac{a}{5b}\right) < \dfrac{5+\sqrt{5}}{10}$.

ii) Given $\dfrac{a}{5b} \longrightarrow S\left(\dfrac{a}{5b}\right)$ we have that $a^2-5ab+5b^2<0$ and by Theorem 1.1, we have

$$a^2-5ab+5b^2=-1 .$$

Then, $-4a^2+20ab-20b^2=4$, $-4a^2+20ab-20b^2-5b^2=4-5b^2$ and $(2a-5b)^2=-4+5b^2$

so $|2a-5b| = \sqrt{5b^2-4}$. Since $\frac{3}{5} \le \frac{a}{5b} < \frac{5+\sqrt{5}}{10}$ we have $2a-5b>0$ and

$2a - 5b = \sqrt{5b^2 - 4}$, and

$$a = \frac{5b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2}$$

Furthermore, since $\sqrt{5b^2 - 4} \in \mathbb{N}$, there exists some $r \in \mathbb{N}$ such that $5b^2 - 4 = r^2$.

Conversely, let $a = \dfrac{5b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2}$ and $5b^2 - 4 = r^2$ for some $r \in \mathbb{N}$.

Then,

$$\frac{a}{5b} = \frac{\frac{5b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2}}{5b}, \qquad S\left(\frac{a}{5b}\right) = \frac{\frac{10b + 4\sqrt{5b^2 - 4}}{2}}{5\left(\frac{3b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2}\right)} \qquad \text{and}$$

$$\frac{5b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2} \cdot \frac{3b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2} - b \cdot \frac{10b + 4\sqrt{5b^2 - 4}}{2}$$
$$= \frac{15b^2 + 5b\sqrt{5b^2 - 4} + 3b\sqrt{5b^2 - 4} + 5b^2 - 4 - 20b^2 - 8b\sqrt{5b^2 - 4}}{4}$$
$$= -1$$

Since

$$\frac{10b + 4\sqrt{5b^2 - 4}}{2} + \frac{5b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2} = 5\left(\frac{3b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2}\right) \equiv 0 \ (mod 5),$$

we get that

$$\frac{10b + 4\sqrt{5b^2 - 4}}{2} \equiv -\left(\frac{5b + \sqrt{5b^2 - 4}}{2}\right) \ (mod 5),$$

and

$$\frac{a}{5b} \longrightarrow S\left(\frac{a}{5b}\right) \text{ is an edge in } F_{1,5}.$$

We get the following corollaries.

Corollary 2.7

i) $$\frac{4}{5} - \frac{1}{5.1} \longrightarrow \frac{4}{5} - \frac{1}{5.2} \longrightarrow \frac{4}{5} - \frac{2}{5.5} \longrightarrow \cdots \longrightarrow \frac{4}{5} - \frac{a_k}{5b_k} \longrightarrow \frac{4}{5} - \frac{b_k}{5.(3b_k - a_k).} \longrightarrow \cdots$$

is an infinite path in $F_{1,5}$,

ii) Every vertex in (i) is less than $\dfrac{5 - \sqrt{5}}{10}$,

iii) The numbers $5a_k^2 - 4$, $5b_k^2 - 4$ are perfect squares for the natural numbers $a_k, b_k \in \mathbb{N}$ in (i).

Proof. Theorem 2.5 and Theorem 2.6 conclude the proof.

Corollary 2.8 The numbers $k \in \mathbb{Z}^+$ making $5k^2 - 4$ perfect squares are

$$1,2,5,13, \ldots, x, y, 3y - x \tag{8}$$

Proof. Corollary 2.7 concludes the proof.

In view of Corollary 2.4 and Corollary 2.8, we have the main result as follows:

Corollary 2.9 Let the sequences $\{k_n\}_{n\in\mathbb{N}}$, $\{m_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ be satisfying the conditions (5) and (8), respectively. Then, the sequence $\{F_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ defined by

$$F_n = \begin{cases} k_{\frac{n+1}{2}}, & if\ n\ is\ an\ odd \\ m_{\frac{n}{2}}, & if\ n\ is\ an\ even \end{cases}$$

for all $n \in \mathbb{N}$, that is $(k_1, m_1, \dots, k_n, m_n, k_{n+1}, m_{n+1}, \dots)$, is the Fibonacci sequence.

III. CONCLUSIONS

In this work, we have found a connection between the suborbital graph of the Modular group and the Fibonacci sequence. Fibonacci sequence and suborbital graphs are widely studied by several authors [6-13]. These studies using suborbital graphs are not so old. So we believe that our contributions open avenues to some more advanced studies. It might be that the Fibonacci sequence may be generalized by the theory of graphs, namely suborbital graphs by taking some groups other than the Modular group, using the method in the study or different methods.

ACKNOWLEDGEMENT

I would like to thank the editors and referees for their valuable help in evaluating the manuscript.

REFERENCES

[1] Koshy, T. (2001). *Fibonacci and Lucas numbers with Applications*. New York, Wiley, Canada.
[2] Rankin, R.A. (1978). *Modular forms and functions*. Cambridge University Press.
[3] Sims, C. C. (1967). Graphs and finite permutation groups. *Mathematische Zeitschrift*, 95, 76-86.
[4] Jones, G. A., Singerman, D., & Wicks, K. (1991). The Modular group and generalized Farey graphs. *London Math. Society Lecture Note Series*. 160, 316-338.
[5] Akbas, M. (2001). On suborbital graphs for the Modular group. *Bull. London Math. Society*, 33(6), 647-652.
[6] Akbas, M., Kör, T., & Kesicioğlu, Y. (2013). Disconnectedness of the subgraph F^3 for the group Γ^3. *Journal of Inequalities and Applications*, 283.
[7] Öztürk, S. (2017). *Kongrüans altgruplarının grafları*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
[8] Öztürk, S. (2017). More Fibonacci numbers arising from the suborbital graphs for the congruence subgroup $\Gamma_0\left(\frac{n}{h}\right)$. *AIP Conference Proceedings*, 1863, 3000161-3000166.
[9] Öztürk, S. (2020). A Generalization of the suborbital graphs generating Fibonacci numbers for the subgroup Γ^3. *Filomat*, 34(2), 631-638.
[10] Değer, A. H. (2017). Vertices of paths of minimal lengths on suborbital graphs. *Filomat*, 31(4), 913-923.
[11] Değer, A. H. (2017). Fibonacci sayıları ile alt yörüngesel grafların özel köşeleri arasındaki ilişkiler. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 168-180.
[12] 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.
[13] Akbaba, Ü. (2023). Some matrix applications on the special integer number sequences. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 10(1), 209-216.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 316-324, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1387390
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

(1+1)-Boyutlu Benjamin-Bona-Mahony (BBM) Denkleminin Modifiye Edilmiş Kudryashov Metodu ile Soliton Çözümleri

The Soliton Solutions of the (1+1)-Dimensional Benjamin-Bona-Mahony (BBM) Equation Via the Modified New Kudryashov Method

Sait San[1*], Zeynep Aydın[2]

Geliş / Received: 07/11/2023 ***Revize / Revised: 08/03/2024*** ***Kabul / Accepted: 12/03/2024***

ÖZ

Bu çalışma, (1+1)-boyutlu Benjamin-Bona-Mahony (BBM) denkleminin analitik soliton çözümlerinin modifiye edilmiş modifiye Kudryashov metodu ile elde edilmesine yöneliktir. Birinci aşamada, doğrusal olmayan kısmi türevli diferansiyel denklem formuna sahip olan model, uygun dalga dönüşümü ile doğrusal olmayan adi diferansiyel denkleme indirgenmektedir. İkinci aşamada ise, homojen denge prensibi ve Riccati yardımcı diferansiyel denklemi kullanılarak doğrusal cebirsel denklem sistemi elde edilerek bu sistemin çözümünden incelenen modelin bilinmeyen parametreleri belirlenmektedir. Elde edilen farklı çözüm setlerine bağlı olarak analitik soliton çözümleri elde edilerek ana denklemi sağlama kontrolü yapılmaktadır. Son aşamada ise çözümlerin fiziksel olarak yorumlanmasını kolaylaştırmak amacıyla kontur ve üç boyutlu grafik sunumları yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Dalga dönüşümü, Analitik Çözüm, Kısmi Diferansiyel Denklemler, Soliton Çözümü

ABSTRACT

This study is aimed at obtaining analytical soliton solutions of the (1+1)-dimensional Benjamin-Bona-Mahony (BBM) equation with the new modified Kudryashov method. In the first stage, the model, which has the form of a nonlinear partial differential equation, is reduced to a nonlinear ordinary differential equation with the appropriate wave transformation. In the second stage, a system of linear algebraic equations is obtained by using the homogeneous equilibrium principle and the Riccati auxiliary differential equation, and the unknown parameters of the model examined are determined from the solution of this system. Depending on the different solution sets obtained, analytical soliton solutions are obtained and the main equation is checked. In the final stage, contour and three-dimensional graphic presentations are made to facilitate the physical interpretation of the solutions.

Keywords- Wave Transformation, Analytic Solution, Partial Differential Equations, Soliton Solution

[1]*Sorumlu yazar iletişim: ssan@ogu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8891-9358)
Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Büyükdere Mah. Prof. Dr. Nabi Avcı Bulvarı No:4 Meşelik Kampüsü, Eskişehir
[2]İletişim: zeynepaydinn10@gmail.com (https://orcid.org/0009-0002-0003-9370)
Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Büyükdere Mah. Prof. Dr. Nabi Avcı Bulvarı No:4 Meşelik Kampüsü, Eskişehir

I. GİRİŞ

Kısmi diferansiyel denklemler (PDEs), matematiğin alt dalı olan uygulamalı matematiğin çok önemli bir parçasıdır. Doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin analitik, yarı analitik, sayısal ve kesin çözümlerinin bulunması, akışkanlar mekaniği, kimyasal fizik, kimyasal kinematik, plazma gibi çok çeşitli alanlarda çalışan bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. Doğrusal olmayan oluşum denklemlerinin yürüyen dalga çözümleri, birçok fizik ve mühendislik problemlerinin çözümünde etkili bir araçtır.

Son yıllarda, Maple, Mathematica, Matlab gibi sembolik hesaplama programlarının geliştirilerek yaygın olarak kullanılmaya başlaması, karmaşık denklem sistemlerinin çözülmesini sağlamıştır. Doğrusal olmayan oluşum denklemlerine analitik çözümler bulmak için literatürde henüz evrensel bir metot keşfedilemediği için farklı yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları; Jacobi eliptik fonksiyon metodu [11], üstel fonksiyon metodu [13], homojen denge metodu [25,7], varyasyonel iterasyon metodu [12], Sine- Gordon metodu [27], tanh-coth metodu [26], ilk integral metodu [8], (G'/G) açılım metodu [24], ve modifiye Kudryashov metodu [16].

Kudryashov metodu ilk olarak N. A. Kudryashov tarafından, Bernoulli diferansiyel denklemini yardımcı denklem olarak almasıyla üstel formda çözümler bulunabileceğini göstermiştir [14]. Daha sonra farklı formlarda yardımcı denklem alınmasıyla yeni metodlar geliştirilmiştir [20,21]. Bunlardan biri olan ve bu makalede kullanılan modifiye edilmiş yeni Kudryashov metodu, yeni Kudryashov metoduna [16] dayalı olarak son yıllarda literatürde kullanılan metodlardan biridir [20]. Modifiye Kudryashov metodu son yıllarda Mustafa Bayram ve arkadaşları tarafından Kadomtsev-Petviashvili [5] denklemine, Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff [4] denklemine, Biswas-Milovic [2] denklemine, Biswas-Arshed [19] denklemlerine; Önder ve arkadaşları tarafından kompleks yapıda olan Maccari sistemine uygulanmıştır [21].

Bu çalışmada ele alınan Benjamin – Bona – Mahoney (BBM) denklemi [28],

$$u_t + \alpha u_x - \beta u_{xxt} + \lambda (u^2)_x = 0 \tag{1}$$

ilk olarak uzun dalga davranışının gelişimini açıklayan Peregrine tarafından ortaya atılmıştır. İlk kez Benjamin ve arkadaşları tarafından KdV denklemlerinin düzenlileştirilmiş bir versiyonu olarak araştırılmıştır.

Klasik bir model olarak karşımıza çıkan bu denklemin, sıvılarda uzun dalga boyu, soğuk plazmada hidromanyetik dalga, sıkılaştırılabilir sıvılarda akustik- yerçekimi dalgaları ve harmonik olmayan kristallerde akustik dalgalar dahil olmak üzere çeşitli fiziksel uygulamalarda ortaya çıkan dalgaların analizinde kullanılır [1].

Bu denklemin periyodik, soliton ve analitik yürüyen dalga çözümleri [18]; Abdel Rady ve arkadaşları tarafından homojen denge yöntemi ile [22]; Tang ve arkadaşları tarafından cebirsel metodu ile [23]; Estevez ve arkadaşları tarafından faktorizasyon tekniği ile [6] ve Jacobi eliptik fonksiyon genişletme yöntemi kullanılarak An ve Zhang tarafından [3] incelenmiştir. Gomez ve arkadaşları tanh-coth metodunu genelleştirilmiş BBM ve Burgers-BBM denklemlerine uygulayarak bazı yeni periyodik ve soliton çözümler elde etmişlerdir [9]. Gomez ve Salas Benjamin – Bona – Mahoney (BBM) denklemi için varyasyonel iterasyon metodu ve üstel fonksiyon metodu kullanarak yürüyen dalga çözümleri bulmuşlardır [10].

Bu çalışmanın akışı şu şekilde verilebilir: Bölüm 2 de modifiye Kudryashov metodunun herhangi bir kısmi diferansiyel denkleme uygulama algoritması verilecektir. Bölüm 3 de (1+1) boyutlu BBM denklemine dalga dönüşümü altında modifiye Kudryashov metodunu uygulanarak yürüyen dalga çözümler elde edilecektir. Ayrıca bazı çözümlerin seçilen özel değerlere göre Maple ile çizdirilmiş 2-boyutlu, 3-boyutlu, kontur ve kutupsal grafikleri verilecektir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır.

II. MATERYAL VE METOT

A. Modifiye Kudryashov Metodu

Bu bölümde, modifiye Kudryashov metodunun polinom formunda verilen bir doğrusal olmayan denkleme uygulanışı adım adım verilecektir [16]. Öncelikle doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemi aşağıdaki formda verilsin;

$$\Omega(u, u_t, u_x, u_{tt}, u_{xx}, \dots) = 0 \tag{2}$$

buradaki Ω bir polinomu ifade eder.

Adım 1: $u(x,t) = U(\vartheta)$ ve $\vartheta = x - \sigma t$ dalga dönüşümü yardımıyla (2) denklemi aşağıdaki adi diferansiyel denkleme indirgenir:

$$G(U, U_\vartheta, U_{\vartheta\vartheta}, U_{\vartheta\vartheta\vartheta}, \dots) = 0. \tag{3}$$

Adım 2: (3) denkleminin aşağıdaki şekilde bir toplam formunda bir çözüme sahip olduğunu varsayalım;

$$U(\vartheta) = \sum_{i=0}^{N} c_i Q^i(\vartheta) \tag{4}$$

buradaki c_i'ler *(i=0, 1,...,N)*, $Q^i(\vartheta)$ nin katsayılarıdır, $c_N \neq 0$ ve yardımcı denklem

$$\left(Q'(\vartheta)\right)^2 = \left(\Theta(lnA)Q(\vartheta)\right)^2\left(1 - 4abQ^2(\vartheta)\right) \tag{5}$$

dir. Bu denklemin çözümü ise kolayca

$$Q(\vartheta) = \frac{1}{aA^{\Theta\vartheta} + bA^{-\Theta\vartheta}}, \qquad (A > 0, A \neq 1). \tag{6}$$

olduğu görülebilir.

Buradaki a, b, Θ ve A (A>0) sabitleri daha sonra belirlenecek sıfır olmayan keyfi gerçek parametrelerdir. Ayrıca pozitif tam sayı olan N, (3) denklemindeki en yüksek mertebeden doğrusal terim ile doğrusal olmayan en yüksek dereceden terimler arasındaki homojen denge ile bulunur.

Adım 3: (4) denkleminin (3) denkleminde yerine yazılmasıyla ve (5) yardımcı denkleminin kullanılmasıyla $Q(\vartheta)$ nin kuvvetleri cinsinden bir polinom elde edilir. $Q(\vartheta)$'nin aynı kuvvetten terimleri toplanarak katsayıları sıfıra eşitlendiğinde c_0, c_1, c_2, A, a, b ve Θ parametrelerini içeren bir cebirsel sistem elde edilir.

Adım 4: Adım 3'deki doğrusal cebirsel denklem sistemi uygun bir sembolik hesaplama programı yardımıyla çözüldüğünde c_0, c_1, c_2, A, a, b ve Θ değerleri bulunur. "Bu değerler, $\vartheta = kx - wt$ dalga dönüşümü ve (6) denklemini göz önünde bulundurarak (4) denkleminde yerine yazıldığında (2)'deki doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemin soliton çözümleri elde edilir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Modifiye Kudryashov Metodunun (1+1) boyutlu BBM denklemine uygulanması

Bu bölümde (1+1) boyutlu BBM denkleminin çözümleri modifiye Kudryashov metodu ile yürüyen dalga çözümleri elde edilecektir. BBM denklemi aşağıdaki formda verilir;

$$u_t + \alpha u_x - \beta u_{xxt} + \lambda(u^2)_x = 0 \tag{7}$$

Burada α, β ve λ reel sabitlerdir. (7) denklemine $U(x,t) = U(\vartheta)$, $\vartheta = kx - wt$ dalga dönüşümü uygulandığında, indirgenen denklemin bir kez integralinin alınmasıyla ve integral sabitinin gözardı edilmesiyle aşağıdaki adi diferansiyel denkleme indirgenir.

$$-wU(\vartheta) + \alpha kU(\vartheta) + wk^2\beta U_{\vartheta\vartheta} + \lambda k\left(U(\vartheta)\right)^2 = 0 \tag{8}$$

En yüksek mertebeden doğrusal terim olan $U_{\vartheta\vartheta}$ ve doğrusal olmayan en yüksek dereceden terim olan $\left(U(\vartheta)\right)^2$ arasında dengeleme yapıldığında, dengeleme sabiti N = 2 bulunur.

Böylece (4) denklemine göre $U(\vartheta)$ çözümü aşağıdaki formda aranır;

$$U(\vartheta) = c_0 + c_1 Q(\vartheta) + c_2 Q^2(\vartheta). \tag{9}$$

Buradaki c_0, c_1 ve c_2 sonradan belirlenecek sabitlerdir.

(9) denklemindeki $U(\vartheta)$ ifadesi (8) denkleminde yerine yazıldığında ayrıca yardımcı denklem de gözönünde bulundurularak $Q(\vartheta)$'nin kuvvetleri cinsinden polinom elde edilir. $Q(\vartheta)$'nin aynı kuvvetten terimleri düzenlenerek katsayıları sıfıra eşitlendiğinde elde edilen cebirsel denklem sistemi aşağıda verilmiştir :

$Q^4: -24\ln(A)^2\,\Theta^2 ab\beta k^2 wc_2 + k\lambda c_2^2.$

$Q^3: -8\ln(A)^2\,\Theta^2 ab\beta k^2 wc_1 + 2k\lambda c_1 c_2.$

$Q^2: 4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 wc_2 + 2kc_0c_2 + k\lambda c_1^2 + \alpha kc_2 - wc_2.$

$Q^1: \ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 wc_1 + 2k\lambda c_0 c_1 + \alpha kc_1 - wc_1.$

$Q^0: k\lambda c_0^2 + \alpha kc_0 - wc_0.$

Verilen cebirsel sistem sembolik hesaplama programı kullanılarak çözüldüğünde bulunan parametreler, (9) denkleminde yerine yazılmasıyla, (üstel(hiperbolik)) fonksiyon olarak yedi çözüm ailesi elde edilmiştir.

Durum 1:

k, c_0, c_1ve c_2 için bulunan çözüm kümesi şu şekildedir;

$$k = \frac{\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{8\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w},$$

$$c_0 = \frac{-8\left(\alpha\frac{\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{8\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w} - w\right)\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w}{\left(\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}\right)\lambda},$$

$$c_1 = 0,$$

$$c_2 = 3ab\frac{\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{\lambda}.$$

Bulunan c_0, c_1 ve c_2 değerleri (6) denklemindeki yardımcı denklem kullanılarak (9) çözümünde yerine yazıldığında (10) denkleminde verilen $U_1(\vartheta)$ çözümü elde edilir.

$$U_1(\vartheta) = \frac{-8\left(\alpha\frac{\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}}{8\ln(A)^2\Theta^2\beta w} - w\right)\ln(A)^2\Theta^2\beta w}{\left(\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}\right)\lambda} + \frac{3ab\left(\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}\right)}{\lambda\left(aA^{\Theta\vartheta} + bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{10}$$

burada $\vartheta = \frac{\alpha + \sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{8\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w}x - wt$ şeklindedir.

Durum 2:

k, λ, c_0, c_1ve c_2 için bulunan çözüm kümesi şu şekildedir;

$$k := \frac{\frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{2}}{4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w},$$

$$\lambda = \lambda,$$

$$c_0 = -\frac{-4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{2}\alpha}{\lambda\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{2}\right)},$$

$$c_1 = 0,$$

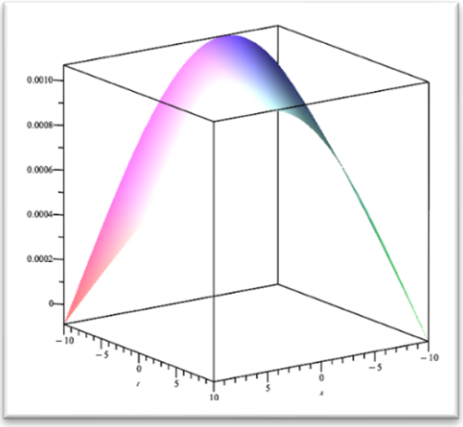
$$c_2 = \frac{6\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{2}\right)ba}{\lambda}.$$

Bulunan değerleri gerekli denklemlerde yerine yazdığımızda aşağıdaki $U_2(\vartheta)$ çözümü elde edilir;

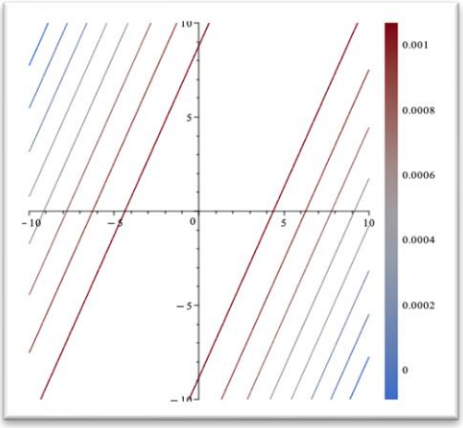
$$U_2(\vartheta) = -\frac{-4\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}}{2}\alpha}{\lambda\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}}{2}\right)} + 6\frac{6\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}}{2}\right)ba}{\lambda\left(aA^{\Theta\vartheta} + bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{11}$$

burada $\vartheta = \frac{\frac{\alpha}{2} - \frac{\sqrt{(\alpha^2 - 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{2}}{4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w}x - wt$ şeklindedir.

$U_2(x,t)$ çözümünün -10<x<10 ve -10<t<10 aralığında ve özel olarak $A = 0.1, a = 10, b = 10,\ \beta = 1,\ \alpha = 0.5,\ w = 0.1,\ \lambda = 2,\ \Theta = 0.1$ değerleri alındığında Maple yardımıyla çizilen 3 boyutlu ve kontur grafikleri Şekil 1 ve Şekil 2 de verilmiştir.

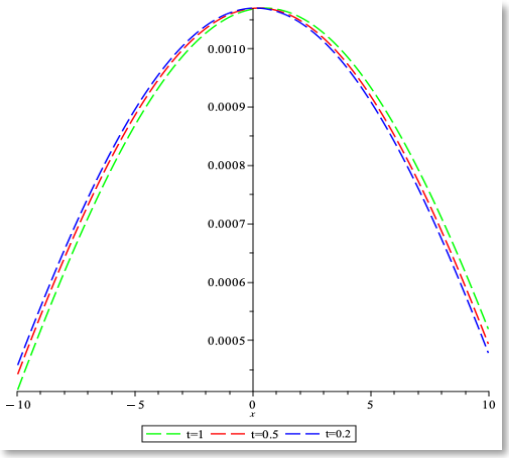


Şekil 1

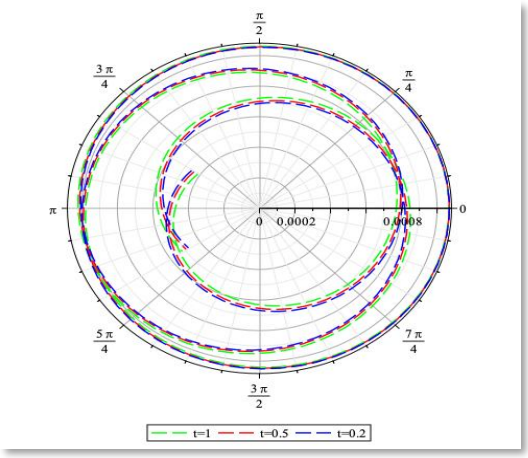


Şekil 2

Şekil 3 ve Şekil 4 de ise aynı değerler için $U_2(x,t)$ soliton dalga çözümünün t = 0.2, t = 0.5, t = 1 zaman değerlerindeki 2 boyutlu ve kutupsal koordinat grafikleri verilmiştir.



Şekil 3



Şekil 4

Durum 3:

k, λ, c_0, c_1ve c_2 için bulunan çözüm kümesi şu şekildedir;

$$k = \frac{-\alpha + \sqrt{(\alpha^2 + 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{8\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w},$$

$$\lambda = \lambda,$$

$$c_0 = 0,$$

$$c_1 = 0,$$

$$c_2 = 3ab\,\frac{-\alpha + \sqrt{(\alpha^2 + 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{\lambda}.$$

$c_0 = 0, c_1 = 0$ olduğundan (9) çözümünde c_2 değeri yerine koyulduğunda aşağıdaki $U_3(\vartheta)$ çözümü elde edilir.

$$U_3(\vartheta) = 3ab\,\frac{-\alpha + \sqrt{(\alpha^2 + 16\ln(A)^2\Theta^2\beta w^2)}}{\lambda\left(aA^{\Theta\vartheta} + bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{12}$$

burada $\vartheta = \dfrac{-\alpha + \sqrt{(\alpha^2 + 16\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w^2)}}{8\ln(A)^2\,\Theta^2\beta w}x - wt$ şeklindedir.

Durum 4:

k, w, c_0, c_1 ve c_2 için bulunan çözüm kümesi aşağıda verilmiştir;

$$k = k,$$
$$w = \frac{\alpha k}{4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1},$$
$$c_0 = \frac{4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2}{\lambda(4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1)},$$
$$c_1 = 0,$$
$$c_2 = \frac{24\ln(A)^2\,\Theta^2 a\alpha b\beta k^2}{\lambda(4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1)}.$$

Değerler gerekli denklemlerde yerine yazıldığında aşağıdaki $U_4(\vartheta)$ çözümü elde edilir.

$$U_4(\vartheta) = \frac{4\ln(A)^2\Theta^2\beta k^2}{\lambda(4\ln(A)^2\Theta^2\beta k^2+1)} + \frac{24\ln(A)^2\Theta^2 a\alpha b\beta k^2}{\lambda(4\ln(A)^2\Theta^2\beta k^2+1)\left(aA^{\Theta\vartheta}+bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{13}$$

burada $\vartheta = kx - \dfrac{\alpha k}{4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1}t$ şeklindedir.

Durum 5:

β, k, w, c_0, c_1 ve c_2 için elde edilen çözüm kümesi şu şekildedir;

$$\beta = -\frac{\lambda c_0}{4\ln(A)^2\,\Theta^2 k^2(\lambda c_0 + \alpha)},$$
$$k = k,$$
$$w = k\lambda c_0 + \alpha k,$$
$$c_0 = c_0,$$
$$c_1 = 0,$$
$$c_2 = -6abc_0.$$

(9) çözümünde, bulunan c_2 değeri yerine yazıldığında (14) denkleminde verilen $U_5(\vartheta)$ çözümü elde edilir.

$$U_5(\vartheta) = c_0 - \frac{6abc_0}{\left(aA^{\Theta\vartheta}+bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{14}$$

burada $\vartheta = kx - (k\lambda c_0 + \alpha k)t$ şeklindedir.

Durum 6:

Aşağıdaki çözüm kümesi ise α, k, w, c_0, c_1 ve c_2 için bulunmuştur;

$$\alpha = -\frac{\lambda c_0(4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1)}{4\ln(A)^2\,\Theta^2 k^2\beta},$$
$$k = k,$$
$$w = -\frac{\lambda c_0}{4\ln(A)^2\,\Theta^2 k\beta},$$
$$c_0 = c_0,$$
$$c_1 = 0,$$
$$c_2 = -6abc_0.$$

c_2 değeri (9) çözümünde yerine yazıldığında $U_6(\vartheta)$ çözümü aşağıdaki şekilde bulunmuştur;

$$U_6(\vartheta) = c_0 - \frac{6abc_0}{\left(aA^{\Theta\vartheta} + bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{15}$$

burada $\vartheta = kx + \dfrac{\lambda c_0}{4\ln(A)^2\,\Theta^2 k\beta}t$ şeklindedir.

Durum 7:

Son olarak k, λ, w, c_0, c_1 ve c_2 için bulunan değerler şu şekildedir;

$$k = k,$$

$$\lambda = -\frac{4\ln(A)^2\,\Theta^2 k^2\beta\alpha}{c_0(4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1)},$$

$$w = \frac{\alpha k}{(4\ln(A)^2\,\Theta^2\beta k^2 + 1)},$$

$$c_0 = c_0,$$

$$c_1 = 0,$$

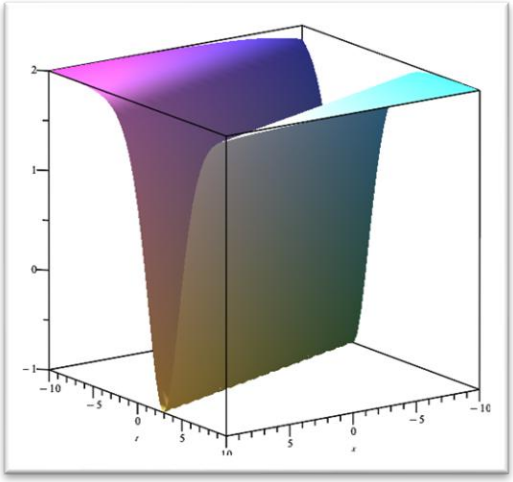
$$c_2 = -6abc_0.$$

Bu durumda da $U_5(\vartheta)$ ve $U_6(\vartheta)$ çözümüne benzer olarak aşağıdaki $U_7(\vartheta)$ çözümü bulunmuştur. Ancak ϑ dalga denkleminde kullanılan w değeri diğer iki çözümdeki w değerinden farklı olması sebebiyle $U_7(\vartheta)$ çözümü tektir.

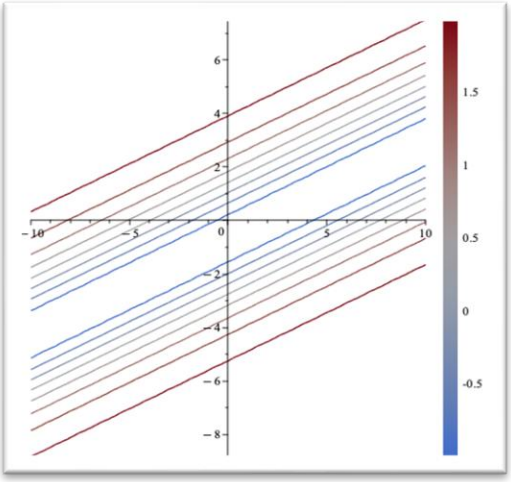
$$U_7(\vartheta) = c_0 - \frac{6abc_0}{\left(aA^{\Theta\vartheta} + bA^{-\Theta\vartheta}\right)^2}, \tag{16}$$

burada $\vartheta = kx + \dfrac{\alpha k}{(4\ln(A)^2\Theta^2\beta k^2 + 1)}t$ şeklindedir.

$U_7(x,t)$ çözümünün -10<x<10 ve -10<t<10 aralığında, $A = 0.1, a = 3, b = 1, \beta = 1{,}5, \alpha = 1, k = 0.1, \Theta = 0.1, c_0 = 2$ değerleri alındığında 3 boyutlu ve kontur grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6 da verilmiştir.

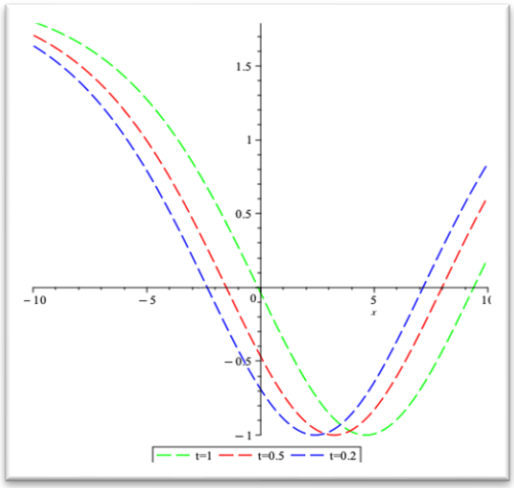


Şekil 5

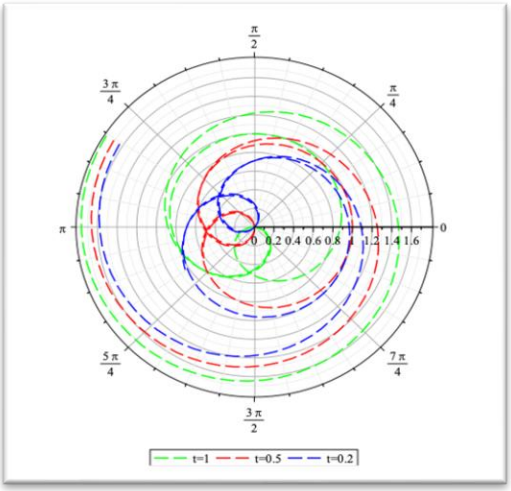


Şekil 6

Aynı değerler kullanıldığında $U_7(x,t)$ soliton dalga çözümünün, t = 0.2, t = 0.5, t = 1 zaman değerlerindeki 2 boyutlu ve kutupsal koordinat grafikleri ise Şekil 7 ve Şekil 8 de verilmiştir.



Şekil 7



Şekil 8

IV. SONUÇLAR

Bu makalede, modifiye Kudryashov metodu kullanılarak (1+1)-boyutlu Benjamin-Bona-Mahony denkleminin yürüyen dalga çözümleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçların tamamı Maple programı yardımıyla sağlaması yapılmıştır. Bulunan çözüm kümeleri için yedi adet durum verilmiştir. Parametrelere özel değerler verilerek $U_2(\vartheta)$ ve $U_7(\vartheta)$ çözümleri -10<x<10 ve -10<t<10 zaman aralıklarında 3 boyutlu ve kontur grafikleri; t=0.2, t=0.5, t=1 zaman değerlerinde ise 2 boyutlu ve kutupsal koordinat grafikleri olmak üzere toplamda sekiz adet grafik verilmiştir. Ayrıca kullanılan bu yaklaşımın diğer doğrusal olmayan diferansiyel denklemlere analitik çözümler bulmak için kullanılabilecek olması, kullanışlı ve güçlü bir matematiksel araç olduğunun açık bir göstergesidir.

KAYNAKLAR

[1] Alsayyed, O., Jaradat, H. M., Jaradat, M. M. M., & Mustafa, Z. (2016). Multi-soliton solutions of the BBM equation arisen in shallow water. http://dx.doi.org/10.22436/jnsa.009.04.35

[2] Altun, S., Ozisik, M., Secer, A., & Bayram, M. (2022). Optical solitons for Biswas–Milovic equation using the new Kudryashov's scheme. *Optik*, *270*, 170045. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170045.

[3] An, J.Y., & Zhang, W. G. (2006). Exact periodic solutions to generalized BBM equation and relevant conclusions. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, *22*(3), 509-516. http://dx.doi.org/10.1007/s10255-006-0326-3

[4] Cinar, M., Secer, A., & Bayram, M. (2022). Analytical solutions of (2+ 1)-dimensional Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation in fluid mechanics/plasma physics using the New Kudryashov method. *Physica Scripta*, *97*(9), 094002. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac883f.

[5] Esen, H., Secer, A., Ozisik, M., & Bayram, M. (2022). Soliton solutions to the nonlinear higher dimensional Kadomtsev-Petviashvili equation through the new Kudryashov's technique. *Physica Scripta*, *97*(11), 115104. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac98e4.

[6] Estévez, P. G., Kuru, Ş., Negro, J., & Nieto, L. M. (2009). Travelling wave solutions of the generalized Benjamin–Bona–Mahony equation. *Chaos, Solitons & Fractals*, *40*(4), 2031-2040. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2007.09.080

[7] Fan, E., Zhang, H., (1998). A note on the homogeneous balance method, Phys. Lett. A 246 403–406. https://doi.org/10.1016/S0375-9601(98)00547-7.

[8] Feng, Z. (2002). The first-integral method to study the Burgers–Korteweg–de Vries equation. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, *35*(2), 343. https://doi.org/10.1088/0305-4470/35/2/312.

[9] Frias, B. A., Salas, A. H., & (2010). New periodic and soliton solutions for the Generalized BBM and Burgers–BBM equations. *Applied Mathematics and Computation*, *217*(4), 1430-1434. https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.05.068.

[10] Gomez, C. A., & Salas, A. H. (2010). Exact solutions for the generalized BBM equation with variable coefficients. *Mathematical Problems in Engineering*, *2010*. http://dx.doi.org/10.1155/2010/498249.

[11] Guan-Ting, L., Tian-You F., (2005). New applications of developed Jacobi elliptic function expansion methods, *Physics Letters A*, 345.1-3: 161-166. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2005.07.034.

[12] He, J. H. (1998). Approximate solution of nonlinear differential equations with convolution product nonlinearities. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, *167*(1-2), 69-73. https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00109-1.

[13] He, J.H., Wu, X.H., (2006). Exp-function method for nonlinear wave equations, Chaos, Solitons & Fractals, vol. 30, no. 3, pp. 700-708, Nov. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.03.020.

[14] Kudryashov, N. A. (2011). One method for finding exact solutions of nonlinear differential equations. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *17*(6), 2248-2253. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2011.10.016.

[15] Kudryashov, N. A. (2015). On nonlinear differential equation with exact solutions having various pole orders. *Chaos, Solitons & Fractals*, *75*, 173-177. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.02.016.

[16] Kudryashov, N. A. (2020). Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations. *Optik*, *206*, 163550. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163550.

[17] Kudryashov, N. A. (2020). Method for finding highly dispersive optical solitons of nonlinear differential equations. *Optik*, *206*, 163550. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163550.

[18] Noor, M. A., Noor, K. I., Waheed, A., & Al-Said, E. A. (2011). Some new solitonary solutions of the modified Benjamin–Bona–Mahony equation. *Computers & Mathematics with Applications*, *62*(4), 2126-2131. http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2011.06.060.

[19] Ozisik, M., Secer, A., & Bayram, M. (2022). The bell-shaped perturbed dispersive optical solitons of Biswas–Arshed equation using the new Kudryashov's approach. *Optik*, *267*, 169650. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169650.

[20] Ozisik, M., Secer, A., Bayram, M., & Aydin, H. (2022). An encyclopedia of Kudryashov's integrability approaches applicable to optoelectronic devices. *Optik*, *265*, 169499. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169499.

[21] Önder, İ., Özışık, M., & Seçer, A. (2022). The soliton solutions of (2+ 1)-dimensional nonlinear two-coupled Maccari equation with complex structure via new Kudryashov scheme. *New Trends in Mathematical Sciences*, *10*(1). http://dx.doi.org/10.20852/ntmsci.2022.468.

[22] Rady, A. A., Osman, E. S., & Khalfallah, M. (2010). The homogeneous balance method and its application to the Benjamin–Bona–Mahoney (BBM) equation. *Applied Mathematics and Computation*, *217*(4), 1385-1390. https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.05.027

[23] Tang, Y., Xu, W., Gao, L., & Shen, J. (2007). An algebraic method with computerized symbolic computation for the one-dimensional generalized BBM equation of any order. *Chaos, Solitons & Fractals*, *32*(5), 1846-1852. http://dx.doi.org/10.1007/s11071-007-9282-6

[24] Wang, M., Li, X., & Zhang, J. (2008). The (G′ G)-expansion method and travelling wave solutions of nonlinear evolution equations in mathematical physics. *Physics Letters A*, *372*(4), 417-423. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2007.07.051.

[25] Wang, M.L., (1995). Solitary wave solutions for variant Boussinesq equations, Phys. Lett. A 199 169–172. https://doi.org/10.1016/0375-9601(95)00092-H.

[26] Wazwaz, A. M. (2007). The tanh–coth method for solitons and kink solutions for nonlinear parabolic equations. *Applied Mathematics and Computation*, *188*(2), 1467-1475. https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.11.013

[27] Yan, C. (1996). A simple transformation for nonlinear waves. *Physics Letters A*, *224*(1-2), 77-84. https://doi.org/10.1016/S0375-9601(96)00770-0

[28] Benjamin Thomas Brooke , Bona J. L. and Mahony J. J. (1972) Model equations for long waves in nonlinear dispersive systems, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 27247–78. https://doi.org/10.1098/rsta.1972.0032

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 325-334, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1313160
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Groupoid and Semigroup Construction on Isosceles Triangular Numbers

İkizkenar Üçgensel Sayılar Üzerindeki Grupoid ve Yarıgrup Yapıları

Ahmet Emin[1*], Ümit Sarp[2]

Geliş / Received: 12/06/2023 ***Revize / Revised: 20/10/2023*** ***Kabul / Accepted: 26/10/2023***

ABSTRACT

Basic information about figurative numbers is provided. Then, information about isosceles triangular numbers, one of the two-dimensional figurative numbers, is given. It also includes information about algebraic structures and their definitions. Additionally, a binary operation that includes k -isosceles triangular numbers is presented, and the study investigates whether the algebraic structures defined with this operation form a groupoid or semigroup. Also, two examples are given that satisfy the results at the end of the paper.

Keywords- **Isosceles *Triangular Number, Binary Operation, Groupoid, Semigroup, Monoid***

ÖZ

Figüratif sayılar hakkında temel bilgiler verilmektedir. Daha sonra iki boyutlu figüratif sayılardan biri olan ikizkenar üçgen sayıları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca cebirsel yapılar ve tanımları hakkında bilgi içerir. Ek olarak k -ikizkenar üçgensel sayıları içeren bir ikili işlem sunulmuş ve bu ikili işlem ile tanımlanan yapıların bir grupoid veya yarı grup oluşturup oluşturmadığı araştırılmıştır. Ayrıca, makalenin sonunda sonuçları sağlayan iki adet örnek verilmiştir.

Anahtar Kelimeler- İkizkenar Üçgensel Sayı, İkili İşlem, Grupoid, Yarıgrup, Monoid

[1]*Corresponding Author Contact: ahmetemin@karabuk.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-7791-7181)
Department of Mathematics, Faculty of Science, Karabuk University, Karabük, Türkiye
[2]Contact: umitsarp@ymail.com (https://orcid.org/0000-0002-1260-785X)
Continuing Education Application and Research Center, İzmir Katip Çelebi University, Izmir, Türkiye

I. INTRODUCTION AND PURPOSE

Figurate numbers are numbers that represent geometric shapes such as triangles and squares, formed by arranging specific points in a plane or space according to a certain rule. There are many types of figurate numbers, such as polygonal numbers, centered polygonal numbers, L-shape numbers, and solid numbers. Among these, polygonal numbers are the most well-known and widely studied. In particular, the beauty and elegance of triangular numbers have captured the attention of scientists for thousands of years.

Points positioned in the plane as a regular triangle with equal intervals represent triangular numbers. They are formed by starting with a single point and adding the same common difference, which is always one, to each successive point.

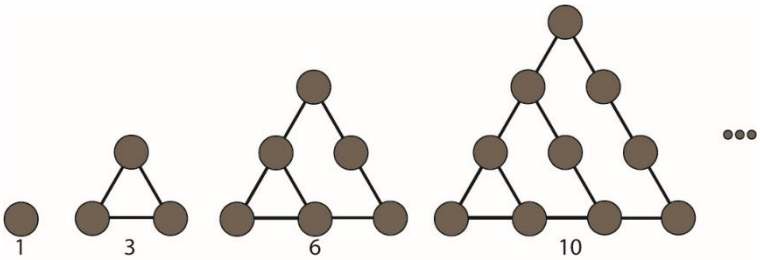


Figure 1 . Triangular numbers

The triangular numbers can be represented by $S_3(n) = 1+2+3+\ldots+n = \frac{n(n+1)}{2}$. For further knowledge on figurate numbers and triangular numbers, one can refer to book by Deza et al. [1].

Isosceles triangular numbers are a novel type of figurate numbers that were first defined and introduced by Jitman et al. in [2,3]. Isosceles triangular numbers are a new type of figurate numbers that can be represented by a pattern of points arranged in the shape of an isosceles triangle. The nth $k-$isosceles triangular number is represented by $\Delta(n,k)$. It's worth noting that regular triangular numbers are a specific case of isosceles triangular numbers. If $k=1$, then the isosceles triangular number becomes a triangular number, i.e., $\Delta(n,1) = S_3(n)$.

Additionally, for convenience, if $n=0$, then $\Delta(0,k)$ is used in some contexts and it is defined to be 0. Some summation formulas for isosceles triangular numbers are derived [2,3].

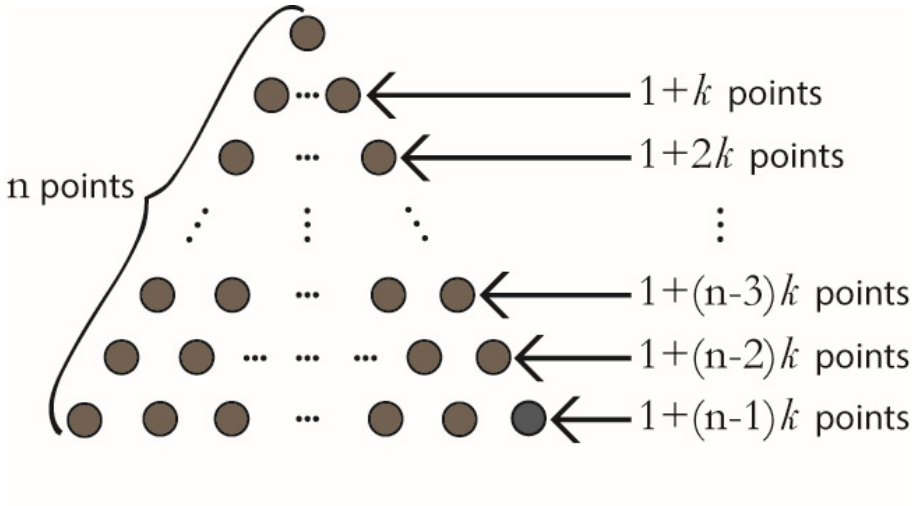


Figure 2. Isosceles triangular numbers

The concept of a binary operation is crucial in many algebraic structures. It takes on different names depending on the binary operation defined on the algebraic structures. Groupoids, semigroups, and monoids are a few examples. Specifically, Sparavigna has established that it is a groupoid with binary operators defined on some polygonal numbers in [4,5]. Additionally, Emin has defined some algebraic structure on some polygonal and figurate numbers in [6,7]. By utilizing similar methods as in these papers, we will present a general binary operation that includes k-isosceles triangular numbers. Additionally, it will be examined whether the structures a

semigroup or not. Other algebraic properties may be studied with the binary operation defined on this new algebraic structure.

Algebraic structures allow the study of different properties of mathematical objects. It helps to better understand mathematical systems by revealing the relationships of mathematical structures with each other. For this reason, algebraic structures have an important place in mathematics.

It is possible to see algebraic structures in mathematics as well as in other branches of science. Algebraic structures can be used in disciplines such as Physics, Engineering and computers. This can be help to contribute to the modeling and solving of problems.

Various algebraic structures are defined in order to make the transition between geometry and algebra. It is also possible to express figurate numbers geometrically. For this reason, if an algebraic structure can be defined on figurate numbers, its relationship with other mathematical systems can be examined algebraically.

The real motivation behind this paper is to explore the properties of algebraic structures defined with isosceles triangular numbers and determine whether they form a groupoid or semigroup, supported by illustrative examples.

II. PRELIMINARIES

Definition 2.1. A groupoid $(A,\bullet)$ is an algebraic structure on a set with a binary operator. The only restriction on the operator is closure $\bullet: A\times A\to A$ (i.e., applying the binary operator to two elements of a given set returns a value which is itself a member of A). Associativity, commutativity, etc., are not required [8].

$(A,\bullet)$ is called a *semigroup* if the operation $\bullet$ is satisfies properties of associative, that is, if for all $x,y,z\in A$;

$$(x\bullet y)\bullet z = x\bullet(y\bullet z). \tag{1}$$

If $x\bullet y = y\bullet x$ equality is provided for all $x,y\in A$, A is called a *commutative semigroup*.

$(A,\bullet)$ is called a *monoid* if the operation $\bullet$ is satisfies the properties of identity, that is, there is an $e\in A$, for all $x\in A$;

$$x\bullet e = e\bullet x = x. \tag{2}$$

A semigroup is an algebraic structure that is associative and closed, and a semigroup with an identity element is called a monoid.

If A does not have an identity element, then adding the identity element to A allows for the conversion of this algebraic structure into a monoid. As defined in Eq. (2), $(A\cup\{e\},\bullet)$ became a monoid.

Example 2.1. The sets N, Z, Q, R and Z_n are all semigroups with the respect to the addition and multiplications operations.

It is clear that a monoid is a semigroup. Semigroups, then, provide some monoid concepts exactly. For example, the order of a semigroup is equal to the number of members of the semigroup, as in monoids. The N, Z, Q, R and Z_n semigroups satisfy certain properties of these structures' monoid counterparts. Also, they have the property of commutative. However, not all semigroups have to be commutative.

A semigroup $(A=\{e\},\bullet)$ consisting of only one element that satisfies the property of $e\bullet e=e$ is called a *trivial semigroup*. Let T be a subset of $A\,(T\neq\varnothing)$. If the set T provides the closure property according to the operation defined in Eq. (1), then T is called a *sub-semigroup* of the semigroup $(A,\bullet)$.

Definition 2.2. For $n,k\in N$, the nth k-isosceles triangular number formula is as follows [2];

$$\Delta(n,k) := n+\frac{n(n-1)}{2}k. \tag{3}$$

For $n,k\in N$, $k-$isosceles triangular number $\Delta(n,k)$ is obtained as the sum of the first n elements of the sequence [3]. So, it holds;

$$\begin{aligned}\Delta(n,k) &= 1+(1+k)+(1+2k)+\ldots+(1+(n-1)k)\\ &= \left[\frac{1+(1+(n-1)k)}{2}\right]\left[\frac{(n-1)k}{k}+1\right]\\ &= n+\frac{n(n-1)}{2}k.\end{aligned} \tag{4}$$

For the remainder of the paper, set A will be employed as a set constituted by the elements of the $\Delta(n,k)$ sequences.

Example 2.1. For $k=1,2,3,4$ and $n\in N$, $k-$isosceles triangular numbers formulas are as follows;

$$\Delta(n,1)=n+\frac{n(n-1)}{2}\times 1=\frac{n(n+1)}{2},$$
$$\Delta(n,2)=n+\frac{n(n-1)}{2}\times 2=n^2,$$
$$\Delta(n,3)=n+\frac{n(n-1)}{2}\times 3=\frac{n(3n-1)}{2},$$
$$\Delta(n,4)=n+\frac{n(n-1)}{2}\times 4=n(2n-1).$$

The above expression implies the following recurrence formula for $k-$isosceles triangular numbers;

$$\Delta(n+1,k)=\Delta(n,k)+1+nk \quad and \quad \Delta(1,k)=1.$$

In particular, we get

$$\Delta(n+1,1)=\Delta(n,1)+1+n,$$
$$\Delta(n+1,2)=\Delta(n,2)+1+2n,$$
$$\Delta(n+1,3)=\Delta(n,3)+1+3n,$$
$$\Delta(n+1,4)=\Delta(n,4)+1+4n.$$

Example 2.2. Some figures of $k-$isosceles triangular number for $k=1,2,3$ are as follows [3];

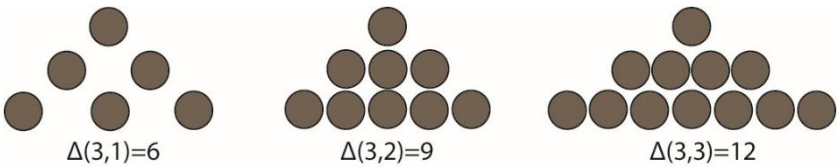


Figure 3. Some figures isosceles triangular numbers

III. SEMIGROUP CONSTRUCTION ON POLYGONAL NUMBERS

A set consisting of elements of all $k-$isosceles triangular numbers sequence $\Delta(n,k)$ is created in this section. An algebraic structure is obtained by defining binary operation on the defined set. Theorems that show necessary conditions for this algebraic structure to be groupoid and semigroup are given.

Before we can construct the theorem that yields the main result of this study, we need to define a set and a binary operation on that set. So, let A denote the sequence of numbers $\Delta(n,k)$.

$$A=\left\{1,k+2,3k+3,6k+4,10k+5,15k+6,\ldots,\frac{n(n-1)}{2}k+n,\ldots\right\} \tag{5}$$

A binary operation can be found on the given set of A as,

$$\left(\Delta(n,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(n+\frac{n(n-1)}{2}k+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$=\left(\frac{1}{2k}\left(\frac{4n^2k^2-4nk^2+8nk+k^2-4k+4}{4}\right)\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$=\left(\frac{1}{2k}\left(\frac{2nk-k+2}{2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(nk-\frac{k-2}{2}\right). \tag{6}$$

We define as follows,

$$\Delta_n=\left(\Delta(n,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(nk-\frac{k-2}{2}\right),$$
$$\Delta_m=\left(\Delta(m,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(mk-\frac{k-2}{2}\right), \tag{7}$$
$$\Delta_{n+m}=\left(\Delta(n+m,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left((n+m)k-\frac{k-2}{2}\right).$$

We use Δ_n for definition of binary operation as follows;

$$\Delta_{n+m}=\Delta_n\bullet\Delta_m=\Delta_n+\Delta_m+\frac{k-2}{2\sqrt{2k}}$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(nk-\frac{k-2}{2}\right)+\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(mk-\frac{k-2}{2}\right)+\frac{k-2}{2\sqrt{2k}}$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(nk-\frac{k-2}{2}+mk-\frac{k-2}{2}+\frac{k-2}{2}\right) \tag{8}$$
$$=\frac{1}{\sqrt{2k}}\left((n+m)k-\frac{k-2}{2}\right).$$

Therefore, we have the binary operation as follows;

$$\left(\Delta(n+m,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\Delta(n,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}+\left(\Delta(m,k)+\frac{1}{8}\frac{(k-2)^2}{k}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{k-2}{2\sqrt{2k}}. \tag{9}$$

As a result, from Eq. (9), we can rewrite the defined binary operation as follows;

$$\Delta(n,k)\bullet\Delta(m,k)=\Delta(n+m,k)$$
$$=\Delta(n,k)+\Delta(m,k)+\frac{(k-2)^2}{4k}$$
$$+2\left(\Delta(n,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\Delta(m,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$
$$+\frac{k-2}{\sqrt{2k}}\left(\Delta(n,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{k-2}{\sqrt{2k}}\left(\Delta(m,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Theorem 3.1. Let $n, k \in N$ and A be the set of sequences of numbers $\Delta(n,k)$, and let $\bullet$ be a binary operation defined on the set A. Then the algebraic structure $(A,\bullet)$ is a groupoid.

Proof. From the binary operation $\bullet$, we can derive a recursive relation for $m=1$;

$$\begin{aligned}\Delta(n,k)\bullet\Delta(1,k) &= \Delta(n+1,k)\\ &= \Delta(n,k)+\Delta(1,k)+\frac{(k-2)^2}{4k}\\ &+2\left(\Delta(n,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\Delta(1,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &+\frac{k-2}{\sqrt{2k}}\left(\Delta(n,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{k-2}{\sqrt{2k}}\left(\Delta(1,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}.\end{aligned} \tag{11}$$

And finally, we have,

$$\Delta(n+1,k)=\Delta(n,k)+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(\Delta(n,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{12}$$

We prove this part of the theorem by using mathematical induction on n. For $n=1,2,3$ and starting from number $\Delta(1,k)=1$, we have $k+2$, $3k+3$, $6k+4$ which are the elements of the set of A in Eq. (5). In fact, for $k\geq 1$;

$$\begin{aligned}\Delta(2,k) &= \Delta(1,k)+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(\Delta(1,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &=1+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(1+\frac{k^2-4k+4}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &=1+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\,\frac{k+2}{2\sqrt{2k}}=k+2,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta(3,k) &= \Delta(2,k)+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(\Delta(2,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &=k+2+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(k+2+\frac{k^2-4k+4}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &=k+2+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\,\frac{3k+2}{2\sqrt{2k}}=3k+3,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta(4,k) &= \Delta(3,k)+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(\Delta(3,k)+\frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &=3k+3+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\left(3k+3+\frac{k^2-4k+4}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}\\ &=3k+3+\frac{k}{2}+\sqrt{2k}\,\frac{7k+2}{2\sqrt{2k}}=6k+4.\end{aligned}$$

We assume that Eq. (12) holds recursively for $n+1$.

For $k \geq 1$, $\Delta(n+1,k) = \Delta(n,k) + \frac{k}{2} + \sqrt{2k}\left(\Delta(n,k) - \frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}}$ is the element of the set of A. Also, from Eqs. (7) and (12), we have

$$\begin{aligned}
\Delta(n+1,k) + \frac{k}{2} + \sqrt{2k}\left(\Delta(n+1,k) - \frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}} &= \Delta(n,k) + \frac{k}{2} + \sqrt{2k}\left(\Delta(n,k) - \frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{k}{2} + \sqrt{2k}\left(\Delta(n+1,k) - \frac{(k-2)^2}{8k}\right)^{\frac{1}{2}} \\
&= \Delta(n,k) + \frac{k}{2} + \sqrt{2k}\,\frac{1}{\sqrt{2k}}\left(nk - \frac{k-2}{2}\right) + \frac{k}{2} + \sqrt{2k}\,\frac{1}{\sqrt{2k}}\left((n+1)k - \frac{k-2}{2}\right) \\
&= \Delta(n,k) + k + nk + (n+1)k - k + 2 \\
&= \Delta(n,k) + (2n+1)k + 2 \\
&= n + \frac{n(n-1)}{2}k + (2n+1)k + 2 \\
&= n + 2 + \frac{(n+2)(n+1)}{2}k \\
&= \Delta(n+2,k)
\end{aligned}$$

Therefore $\Delta(n+2,k)$ is element of the set of A. Thus, the algebraic structure $(A,\bullet)$ satisfies the properties of closure which gives us the theorem that $(A,\bullet)$ is a groupoid.

□

The following theorem presents a necessary condition for the algebraic structure $(A,\bullet)$ to be a semigroup, which is the central result of this paper.

Theorem 3.2. Let $n, k \in N$ and A be the set of sequences of numbers $\Delta(n,k)$, and let $\bullet$ be a binary operation defined on the set A. Then the algebraic structure $(A,\bullet)$ is a semigroup.

Proof. From Theorem 3.1., it follows that the algebraic structure is a groupoid. Now, we need to demonstrate that it satisfies the properties of associativity, as established by the construction of the binary operation.

For $n, m \in N$ and $k \geq 1$ using Δ_n, Δ_m and Δ_{n+m} the following is obtained.

$$\begin{aligned}
(\Delta_n \bullet \Delta_m) \bullet \Delta_p &= \Delta_{n+m} + \Delta_p + \frac{k-2}{2\sqrt{2k}} \\
&= \frac{1}{\sqrt{2k}}\left((n+m)k - \frac{k-2}{2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2k}}\left(pk - \frac{k-2}{2}\right) + \frac{k-2}{2\sqrt{2k}} \\
&= \frac{1}{\sqrt{2k}}\left((n+m+p)k - \frac{k-2}{2}\right) + \frac{k-2}{2\sqrt{2k}} \\
&= \frac{1}{\sqrt{2k}}\left(nk - \frac{k-2}{2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2k}}\left((m+p)k - \frac{k-2}{2}\right) + \frac{k-2}{2\sqrt{2k}} \\
&= \Delta_n + \Delta_{m+p} + \frac{k-2}{2\sqrt{2k}} \\
&= \Delta_n \bullet (\Delta_m \bullet \Delta_p).
\end{aligned} \tag{13}$$

So, we obtain $(\Delta_n \bullet \Delta_m) \bullet \Delta_p = \Delta_n \bullet (\Delta_m \bullet \Delta_p)$ which gives us that $(A,\bullet)$ satisfies the properties of associativity.

□

Considering the starting point as $\Delta(0,k) = 0$ and using Theorem 3.2., we can deduce the following corollary that provides the conditions for $(A,\bullet)$ to be a monoid.

Corollary 3.1. Let A be the set of sequences of numbers $\Delta(n,k)$, and let $\bullet$ be a binary operation defined on the set A. If $\Delta(0,k)=0\in A$, then the algebraic structure $(A,\bullet)$ is a monoid.

Proof. From the Theorem 3.2., we have demonstrated that $(A,\bullet)$ is a semigroup. Demonstrating that the algebraic structure $(A,\bullet)$ is a monoid requires showing that it has an identity element. Let $\Delta(0,k)=0\in A$ and from Eq. (10);

$$\Delta(n,k)\bullet\Delta(0,k)=\Delta(n+0,k)=\Delta(n,k) \quad \text{and} \quad \Delta(0,k)\bullet\Delta(n,k)=\Delta(0+n,k)=\Delta(n,k).$$

Thus, we have,

$$\Delta(n,k)\bullet\Delta(0,k)=\Delta(0,k)\bullet\Delta(n,k)=\Delta(n,k).$$

The corollary 3.1. demonstrates that the pair $(A,\bullet)$ satisfies the identity properties.

□

Example 3.1. The $\Delta(n,3)$ is referred to as the $3-$isosceles triangular numbers, which are integers of the form:

$$\Delta(n,3)=1+(1+3)+(1+6)+\cdots(1+(n-1)3)=\frac{n(3n-1)}{2}.$$

Let $A=\{1,5,12,22,35,51,70,92,\ldots\}$ denote the sequence of numbers $\Delta(n,3)$. We can define a binary operation on the set A;

$$\left(\Delta(n,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3n-\frac{1}{2}\right)$$

and,

$$P_n=\left(\Delta(n,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3n-\frac{1}{2}\right),$$

$$P_m=\left(\Delta(m,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3m-\frac{1}{2}\right),$$

$$P_{n+m}=\left(\Delta(n+m,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3(n+m)-\frac{1}{2}\right).$$

We use P_n for definition of binary operation:

$$\begin{aligned}
P_{n+m}&=P_n\bullet P_m\\
&=P_n+P_m+\frac{1}{2\sqrt{6}}\\
&=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3n-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3m-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2\sqrt{6}}\\
&=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3n-\frac{1}{2}+3m-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\right)\\
&=\frac{1}{\sqrt{6}}\left(3(n+m)-\frac{1}{2}\right).
\end{aligned}$$

As a result, we can show the defined binary operation as follows;

$$\begin{aligned}\Delta(n,3)\bullet\Delta(m,3)&=\Delta(n+m,3)\\&=\Delta(n,3)+\Delta(m,3)+\frac{1}{12}\\&+2\left(\Delta(n,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\Delta(m,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}\\&+\frac{1}{\sqrt{6}}\left(\Delta(n,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{1}{\sqrt{6}}\left(\Delta(m,3)+\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}$$

For $m=1$, recursive relation is obtained;

$$\Delta(n+1,3)=\Delta(n,3)+\frac{3}{2}+\sqrt{6}\left(\Delta(n,3)-\frac{1}{24}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

For $\Delta(1,3)=1$, we get $5,12,22,35,51,70,92,\ldots$ which are the elements of the set of A. From the Theorem 3.2., the algebraic structure $(A,\bullet)$ is a semigroup. Also, from Corollary 3.1., if the $\Delta(0,3)=0\in A$, then the algebraic structure $(A,\bullet)$ is a monoid.

Example 3.2. The $\Delta(n,6)$ is known as the $6-$ isosceles triangular numbers, which are integers that can be expressed in the form:

$$\Delta(n,6)=1+(1+6)+(1+12)+\cdots(1+(n-1)6)=n(3n-2).$$

Let $B=\{1,8,21,40,65,96,133,176,\ldots\}$ represent the sequence of numbers $\Delta(n,6)$. We can define a binary operation on the set B;

$$\left(\Delta(n,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{3}}(3n-1)$$

and,

$$\begin{aligned}O_n&=\left(\Delta(n,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{3}}(3n-1),\\O_m&=\left(\Delta(m,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{3}}(3m-1),\\O_{n+m}&=\left(\Delta(n+m,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{\sqrt{3}}(3(n+m)-1).\end{aligned}$$

We use O_n for definition of binary operation:

$$\begin{aligned}O_{n+m}&=O_n\bullet O_m\\&=O_n+O_m+\frac{1}{\sqrt{3}}\\&=\frac{1}{\sqrt{3}}(3n-1)+\frac{1}{\sqrt{3}}(3m-1)+\frac{1}{\sqrt{3}}\\&=\frac{1}{\sqrt{3}}(3n-1+3m-1+1)\\&=\frac{1}{\sqrt{3}}(3(n+m)-1).\end{aligned}$$

As a result of this situation, we can demonstrate the defined binary operation as follows;

$$\begin{aligned}\Delta(n,6)\bullet\Delta(m,6)&=\Delta(n+m,6)\\&=\Delta(n,6)+\Delta(m,6)+\frac{2}{3}\\&+2\left(\Delta(n,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\Delta(m,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}\\&+\frac{2}{\sqrt{3}}\left(\Delta(n,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{2}{\sqrt{2}}\left(\Delta(m,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}$$

If one take $m=1$, recursive relation is obtained as follows;

$$\Delta(n+1,6)=\Delta(n,6)+3+2\sqrt{3}\left(\Delta(n,6)+\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Because of $\Delta(1,6)=1$, we get $8,21,40,65,96,133,176,\ldots$ which are the elements of the set of B. From the Theorem 3.2., the algebraic structure $(B,\bullet)$ is a semigroup and from Corollary 3.1., if the $\Delta(0,3)=0\in B$, then the algebraic structure $(B,\bullet)$ becomes a monoid.

As a result, Theorems 3.1., 3.2., and Corollary 3.1. demonstrate that this structure forms a monoid. The important question that needs to be addressed now is whether the structure of isosceles triangular numbers constitutes a group or not.

Remark 3.1. The algebraic structure $(A,\bullet)$ does not exhibit group properties, primarily due to the operation $\bullet$ failing to satisfy the requirements for inverses. This can be exemplified as follows:

Let $\Delta(x,1)$ be the inverse of $\Delta(3,1)$, where $\Delta(3,1)=6\in A$. So, $\Delta(3,1)\bullet\Delta(x,1)=\Delta(0,1)$ and $\Delta(3+x,1)=\Delta(0,1)\Rightarrow x=-3$. Because of that $x=-3\notin N$, $\Delta(3,1)$ doesn't have an inverse.

IV. CONCLUSION

When we interpret the results, only basic algebraic structures such as semigroups and monoids can be constructed. But being able to construct algebraic structures such as groups and rings with figurative numbers will mean many new fields of study.

As a result, in this study, polygonal numbers, which have an important place in Number Theory and have been studied for centuries, are combined with semigroup and monoid structures, which is one of the basic and important subjects of Algebra. The results show us that new examples of algebraic structures can be given by using figurative numbers. Since these structures are studied in the set of integers, they can be used in fields such as artificial intelligence, algebraic machine learning, and encryption. So, they are important. They can also lead to the discovery of new interdisciplinary research areas.

REFERENCES

[1] Deza, E., & Deza, M. M., (2012). *Figurate Numbers*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
[2] Jitman, S., Awachai, K., & Tanla, P., (2017). Isosceles Triangular Numbers, *Mathematical Journal-Math*, 62(692), 39-49.
[3] Jitman, S. & Punpim, J., (2021). Characterizations And Identities For Isosceles Triangular Numbers, *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 14(2), 380-395.
[4] Sparavigna, A. C., (2019). Groupoids of OEIS A003154 Numbers (Star Numbers or Centered Dodecagonal Numbers), *Zenodo*.
[5] Sparavigna, A. C., (2019). Groupoids of OEIS A093112 and A093069 Numbers (oblong and odd square numbers), *Zenodo*.
[6] Emin, A., (2021). Semigroup Construction on Polygonal Numbers, *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences*, 6(3), 143-153.
[7] Emin, A., (2022). Some Algebraic Structure on Figurate Numbers, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 604-612.
[8] Rosenfeld, A., (1968). *An Introduction to Algebraic Structures*. New York: Holden-Day.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 335-342, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1364294
B. *e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)*
A.

Araştırma Makalesi – Research Article

Mikrodalga Uygulamaları İçin Al_2O_3/Cam/ZrO_2 Seramiklerinin Yoğunlaştırılması ve Karakterizasyonu

Densification and Characterization of Al_2O_3/Glass/ZrO_2 Ceramics for Microwave Applications

Oguzhan Bilaç[1*]

Geliş / Received: 21/09/2023 ***Revize / Revised: 24/10/2023*** ***Kabul / Accepted: 31/10/2023***

ÖZ

Bu çalışmada Al_2O_3/cam/ZrO_2 kompozitlerin yoğunlaşma davranışı, faz oluşumu, sertliği ve dielektrik özellikleri karakterize edilmiştir. Alümina, CaO-Al_2O_3-SiO_2 bazlı ticari cam ve nano zirkonyum oksit başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. ZrO_2, C55 tozuna (ağırlıkça %45 Al_2O_3+ ağırlıkça %55 cam) farklı miktarlarda (örneğin, ağırlıkça %47 ZrO_2, ağırlıkça %57 ZrO_2 ve ağırlıkça %68 ZrO_2 içeren C55) ilave edilmiştir. Al_2O_3/Cam ve Al_2O_3/Cam/ZrO_2 numuneleri tek eksenli kuru presleme yöntemiyle üretilmiştir. Optimum yoğunlaştırma sıcaklığı C55 için 800 ˚C, C55-47Z için 1100 ˚C, C55-57Z için 1150 ˚C ve C55-68Z için 1150 ˚C olduğu tespit edilmiştir. ZrO_2 diğer fazlarla kimyasal olarak reaksiyona girmemiştir ve sıcaklıkla bozunmamıştır. ZrO_2 miktarının artmasıyla sertlik kademeli olarak artmıştır. C55-47Z için 824 HV, C55-57Z için 881 HV ve C55-68Z için 907 HV olduğu saptanmıştır. C55-47Z ve C55-68Z'nin 5 MHz'deki dielektrik sabiti sırasıyla 11.7 ve 16.3 olduğu bulunmuştur. Mikrodalga uygulamaları için, yüksek dielektrik sabiti (5MHz'de 16.3, 1GHz'de 14.79 ve 10GHz'de 14.43) ve düşük dielektrik kaybı (5MHz'de 0.0032, 1GHz'de 0.0045 ve 10 GHz'de 0.0051) nedeniyle C55-68Z numunesi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam/seramik, ZrO_2, dielektrik özellikler, sinterleme, mikro dalga uygulamaları

ABSTRACT

A commercial SiO_2-Al_2O_3-CaO based commercial glass, Al_2O_3, and ZrO_2 were used as initial materials. ZrO_2 was added to the C55 powder (45 wt% Al_2O_3+ 55 wt% glass) at different amounts (e.g., C55 with 47 wt% ZrO_2, 57 wt% ZrO_2 and 68 wt% ZrO_2). Al_2O_3/Glass and Al_2O_3/Glass/ZrO_2 samples were fabricated by uniaxial dry pressing method. These compositions were determined for specific microwave applications due to their various dielectric constants. Densification behavior, phase formation, hardness, dielectric properties of the samples were characterized in this study. The optimum densification temperature was 800 ˚C for the C55, 1100 ˚C for the C55-47Z, 1150 ˚C for the C55-57Z and 1150 ˚C for the C55-68Z. X-ray diffraction proved that ZrO_2 neither chemically reacted with other phases nor decomposed with temperature. Hardness slightly increased with increasing amount of ZrO_2; 824 HV for the C55-47Z, 881 HV for the C55-57Z and 907 HV for C55-68Z. Dielectric constant for the C55-47Z and C55-68Z at 5 MHz were 11.7 and 16.3, respectively. For microwave applications, the C55-68Z sample as proposed due to high dielectric constant (16.3 at 5MHz, 14.79 at 1GHz, 14.43 GHz at 10GHz) and low dielectric loss (0.0032 at 5 MHz, 0.0045 at 1GHz and 0.0051 at 10 GHz).

[1]*Sorumlu yazar iletişim: obilac@aybu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-3642-4262)
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ayvalı Mah. 150.Sk Etlik-Keçiören/Keçiören

Keywords: Glass/ceramic, ZrO_2, dielectric properties, sintering, microwave application

I. GİRİŞ

Mikrodalga dielektrik malzemeler, yazılım radyosu, GPS ve DBS TV dahil olmak üzere karasal ve uydu iletişiminden uydular aracılığıyla çevresel izlemeye kadar geniş bir uygulama yelpazesiyle önemli bir rol üstlenmiştir [1]. Mevcut ve gelecekteki sistemlerin gereksinimlerini karşılamak için, yeni dielektrik malzemelere veya yeni tasarımlara dayalı geliştirilmiş yeni mikrodalga bileşenlerine ihtiyaç duyulmuştur. Mikrodalga devresinde kullanılacak dielektrik seramiklerin, tüm çevre koşullarında aynı performansta çalışabilmesi için sinyalde düşük gürültü ve düşük güç kaybını tolere etmesi gerekir ve sıcaklık kararlılığını devam ettirmesi için dielektrik kaybının düşük (veya yüksek kalite faktörü= 1/dielektrik kayıp) olması istenmektedir [2,3].

Malzemelerin dielektrik sabiti malzemenin uygulanacağı alanı belirler ve genel olarak dielektrik seramik malzemeler üç sınıfa ayrılır; dielektrik sabiti 25'ten küçük olan seramikler (anten devre elamanlarında kullanılır), dielektrik sabiti 25 ile 50 arasında olan seramikler (uydu iletişiminde ve cep telefonu baz istasyonlarında kullanılır) ve dielektrik sabiti 50'nin üzerinde olan seramikler (cep telefonu gibi minyatürleşme gerektiren cihazlarda kullanılır) [4]. Sistem performansı malzeme özellikleriyle yakından ilişkilidir, çünkü tane boyutu, tane sınırları, kristal yapı ve nokta kusurları seramiğin fiziksel özelliklerini etkilemektedir [5]. Bununla birlikte daha büyük dielektrik sabiti (örneğin 20'ye yakın veya büyük) mikrodalga bileşenlerinin daha küçük üretilmesi için önemli bir faktördür. Minimum dielektrik kaybıyla birlikte yüksek dielektrik sabiti ve kalite faktörü elde etmek için yüzde yüze yakın bir yoğunlaştırma şarttır [6].

Al_2O_3 düşük dielektrik sabitine (10-40 GHz'de 9.6[7]), yüksek kalite faktörü (Q, veya düşük dielektrik1 kayıp, Q=100000-380000 GHz [8]) ve -60 ppm/ºC [8] negatif rezonans frekansına sahip olduğundan mikrodalga uygulamalarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda mikrodalga uygulamalarında düşük dielektrik sabitine sahip (9.9 GHz'te 4.1) ve yüksek kalite faktörü (9.9 GHz'te 2600) $CaO–B_2O_3–SiO_2$ bazlı cam sistemleri [9] veya 7.4 dielektrik sabitine sahip, 12000 GHz kalite faktörüne ve -130 ppm/ºC negatif rezonans frekansına sahip $ZnO:B_2O_3:SiO_2$ bazlı cam sistemleride kullanılmaktadır [10]. Mikrodalga özelliklerini optimize etmek için ağırlıkça %40 Al_2O_3'e ağırlıkça %60 SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3 bazlı cam [11], ağırlıkça %50 Al_2O_3'e ağırlıkça %50 SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3 bazlı cam [11] veya ağırlıkça %50 La_2O_3-B_2O_3'e ağırlıkça %50 Al_2O_3 [12] gibi seramik/cam veya $0.89Al_2O_3$-$0.11TiO_2$'ye ağırlıkça % 0.5 ZnO eklenerek [13] çeşitli seramik sistemleri çalışılmıştır. Choi ve ark. [11] SiO_2-B_2O_3-Al_2O_3 bazlı cam/Al_2O_3 sistemlerini çalışmış, Al_2O_3'e ağırlıkça %40-50 arasında cam eklemiş ve dielektrik özellikleri belirlemiştir. Ağırlıkça %40 cam içeren numune 5.4 dielektrik sabitine, 8000 GHz kalite faktörüne ve -50 ppm/ºC rezonans frekansına sahip olduğu ifade edilmiştir. Ağırlıkça %50 cam içeren sistem 6.2 dielektrik sabitine, 11400 GHz kalite faktörüne ve -35 ppm/ºC rezonans frekansına sahip olmuştur. Seo ve ark. [12] ağırlıkça %50 La_2O_3-B_2O_3 sistemine ağırlıkça %50Al_2O_3 eklemiş ve 17.7 GHz'te 6.7 dielektrik sabitine, 2800 GHz kalite faktörüne sahip olduğunu bulmuşlardır. Mandai ve ark. [14] CaO-ZrO_2-cam sistemini araştırmışlar ve dielektrik sabitini 25, kalite faktörünü 3500 GHz olarak bulmuşlardır. Anortit ($CaAl_2Si_2O_8$) bazlı cam sistemi 7.4 dielektrik sabitine ve 12400 GHz kalite faktörüne sahiptir [15]. Gao ve ark. [16] mikroldalga uygulamaları için ZrO_2 miktarının ZnO-B_2O_3 cam/seramik sistemlerin üzerine etkisini incelemiştir. %0,25 mol ZrO_2 içeren ZnO-B_2O_3 cam seramiği, 6.18 dielektrik sabitine, 23670 GHz kalite faktörüne ve −65 ppm/°C rezonans frekansına sahip olduğu bulunmuştur. Mao ve ark [17]. $BaO–MgO–Al_2O_3–SiO_2$ (BMAS) bazlı cam/Al_2O_3 sistemlerini mikrodalga uygulamaları için incelemiştir. Ağırlıkça %50 BMAS camı içeren cam/seramik sistemi 5.40 dielektrik sabitine, 5235 GHz kalite faktörüne sahip olduğu bulunmuştur.

Genel olarak, mikrodalga dielektrik malzemeler için yüzde yüze yakın yoğunlaşma yüksek dielektrik sabit ve yüksek kalite faktörü (veya düşük dielektrik kayıp) çok kritiktir. Bu sebepten dolayı bu çalışmada özellikle viskoz sinterleme yoluyla Al_2O_3/Cam/ZrO_2 seramiklerinin yüksek sinterleme sıcaklığını düşürmek için düşük ergime sıcaklığına sahip anortit bazlı cam bileşimi kullanılması amaçlanmıştır ve aynı zamanda dielektrik sabitini ve kalite faktörünü arttırmak için ZrO_2 eklenmiştir. Yaş numuneler kuru presleme ile istenilen boyutlarda hazırlanarak yoğunlaşma, faz oluşumu, dielektrik ve mikrodalga özellikleri incelenmiştir. Literatür araştırmaları neticesinde Al_2O_3/CaO-SiO_2-Al_2O_3 bazlı cam/nano ZrO_2 kompozitleri ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır ve elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılarak tartışılmıştır.

II. DENEYSEL CALIŞMALAR

Alümina (Al_2O_3, saflık %99.78, d_{50}= 0.5 µm Almatis, CT 3000 SG), ticari cam (CaO-Al_2O_3-SiO_2 bazlı; Akkim, Türkiye) ve nano ZrO_2 (tane boyutu= 90nm, yüzey alanı=10 m^2/g, ZrO_2, Tosoh, Zpex 4) başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Al_2O_3 tozuna 600°C'de 30 dakika bağlayıcı giderme işlemi (ticari tozun kendisinde bulunan su bazlı mı etil alkol bazlı mı olduğu bilinmeyen bağlayıcıyı gidermek için) uygulanmıştır. Al_2O_3 ve cam tozları etanol kullanarak ayrı ayrı karıştırılmış, bilyalı değirmen yardımıyla öğütme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra ağırlıkça %45 Al_2O_3 ve ağırlıkça %55 cam karışımından oluşan bileşime, ağırlıkça %

47, %57 ve %68 nano- ZrO_2 eklenip etanol içinde bilyalı değirmende 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Numunelerin kodları ve oranları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Numune kodları ve numunelerin % ağırlıkça içerikleri ve oranları

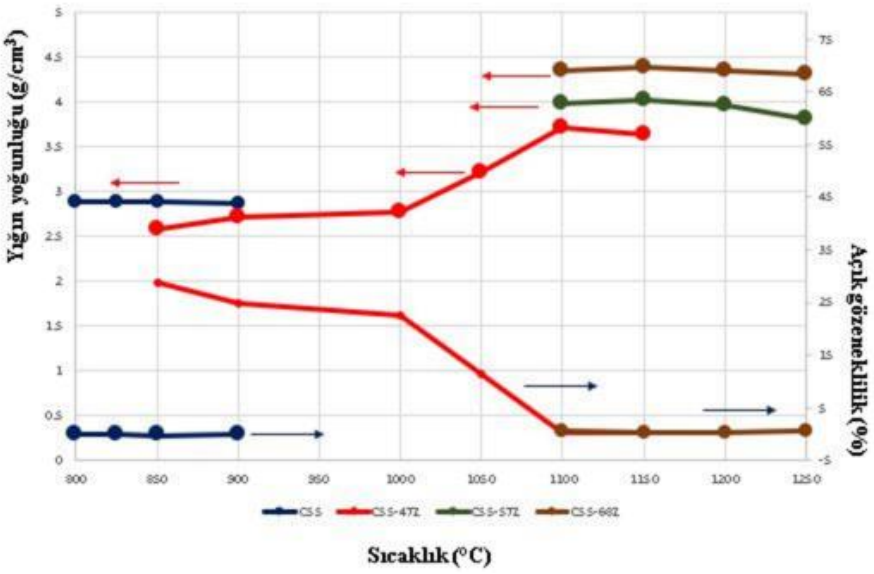
Numune kodu	Al_2O_3 (ağ %)	Cam (ağ %)	ZrO_2 (ağ%)	Al_2O_3/Cam oranı
C55	45	55	0	1.222
C55-47Z	23.85	29.15	47	1.222
C55-57Z	19.35	23.65	57	1.222
C55-68Z	14.4	17.6	68	1.222

Numuneler tek eksenli bir pres kullanılarak, 100 MPa basınç uygulanarak 10 mm çapa sahip bir kalıp ile preslenmiştir. Daha sonra numuneler, 800-1250 °C aralığındaki çeşitli sıcaklıklarda, hava ortamında 1 saat bekleme süresinde, 5°C/dakika ısıtma ve soğutma hızıyla sinterlenmiştir. Yığın yoğunlukları ölçmek için Arşimet yöntemi kullanılmıştır. Faz oluşumu bir X-ışını kırınımı (XRD, Rigaku, Miniflex 600) ile kontrol edilmiştir. Yığın yoğunluğu ve dielektrik özellikleri tahmin etmek için paralel ($E = \sum Ei \cdot Vi$), seri ($1/E = \sum Vi/Ei$) ve logaritmik ($\log E = \sum Vi \cdot \log Ei$) karışım modelleri kullanılmıştır [18]. Al_2O_3 ve cam tozlarının tane boyutu, lazer kırınımlı tane boyutu analiz cihazı (Malvern, Mastersizer 3000) ile ölçülmüştür. Tozların yüzey alanını belirlemek için Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi (Quantachrome ASiQwin) kullanılmıştır. Sinterlenmiş kompozitlerin Vickers sertliği, mikro sertlik test cihazı (Shimadzu HMV-G) ile 10 saniye boyunca 20 N yük uygulanarak belirlenmiştir. Dielektrik özellikler, bir endüktans-kapasitans-direnç ölçer (Hioki, IM3570) kullanılarak 5 MHz'de ölçülmüştür. Yansıyan bir sinyalin (yansıma katsayısı, S11) dalga kılavuzundan geçmesi prensibine dayanan tek portlu bir ölçüm kullanarak 1 ila 10 GHz arasındaki dielektrik özellikleri hesaplamak için bir ağ analizörü (Rohde&Schwarz ZNB40) kullanılmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

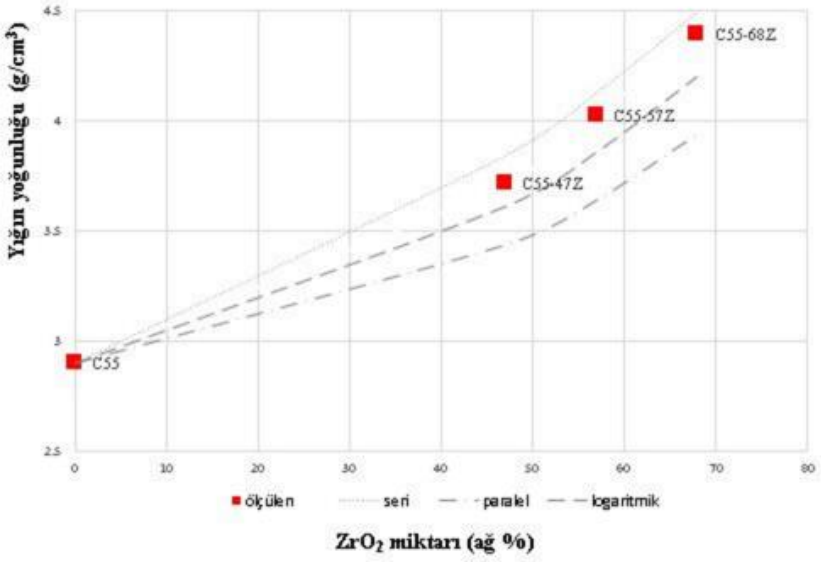
Başlangıç malzemeleri olarak ticari Al_2O_3, cam firit ve nano ZrO_2 kullanılmıştır. Al_2O_3 ve cam tozları, tane boyutunu azaltmak için ayrı ayrı bilyalı değirmen ile öğütülmüştür. Bilyalı öğütme sonrasında cam tozunun d_{50}= 2.13 µm ve yüzey alanı=1.89 m^2/g, Al_2O_3 tozunun d_{50}= 0.44 µm ve yüzey alanı =6.44 m^2/g olduğu tespit edilmiştir. Cam firitin sinterleme, yumuşama, küresel, yarı küresel ve erime sıcaklıkları ısıtma mikroskobu ile sırasıyla 726, 852, 958, 1088 ve 1180 °C olarak belirlenmiştir. Camın bileşimi SEM-EDS yöntemi ile ağırlıkça %65,8 SiO_2, ağırlıkça %15.1 Al_2O_3, ağırlıkça %11.7 CaO, ağırlıkça %4 Na_2O ve ağırlıkça %3.4 K_2O olarak belirlenmiştir [19].

Şekil 1'de, ZrO_2 miktarının ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kuru preslenmiş Al_2O_3/cam kompozitlerinin yoğunlaşma ve açık gözeneklilik (AG) değerleri gösterilmiştir. ZrO_2 miktarının artmasıyla daha yüksek sıcaklıklarda tam yoğunlaşma elde edildiğinden her bir kompozitin yoğunlaşma davranışları birbirlerinden farklıdır. Her bir kompozit için optimum sinterleme şartları, Arşimet yöntemiyle belirlenen yüksek yığın yoğunluğu, sıfıra yakın AG ve su emme (SE) sonuçları dikkate alınarak saptanmıştır. Her bir kompozit için optimum sinterleme sıcaklıkları C55 için 800 °C'de (2.89 g/cm^3, AG= %0.13, SE= %0), C55-47Z için 1100 °C'de (3.71 g/cm^3, AG= %0.23, SE= %0.06), C55-57Z için 1150 °C (4.02 g/cm^3, AG= %0.25, SE= %0.06), ve C55-68Z için 1150°C (4.39 g/cm^3, AG= %0.33 SE= %0.07) olarak belirlenmiştir. Genel olarak, optimum sinterleme sıcaklıklarında ZrO_2 miktarı arttıkça, daha yüksek ZrO_2 yoğunluğu (ZrO_2 yoğunluk= 6.07 g/cm^3) nedeniyle (Al_2O_3 teorik yoğunluğu = 3.96 g/cm^3 [20] ve cam = 2.43 g/cm^3 [19] kompozitlerin yığın yoğunlukları artmıştır. C55 için yoğunlaştırma (yoğunlaşma sıcaklığı 800 °C), viskoz sinterleme nedeniyle cam matris fazının yumuşama sıcaklığına (yani 852°C) yakın sıcaklıklarda tamamlanmıştır. Bununlar birlikte, yüksek ZrO_2 miktarlarında yığın yoğunluğu camın erime noktasında (örneğin, 1180 °C) keskin bir şekilde artmış ve C55-68Z için optimum sinterleme sıcaklığı, daha düşük sıvı miktarı (veya daha fazla ZrO_2 miktarı) nedeniyle 1150 °C'de elde edilmiştir. Literatürde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bilaç ve arkadaşları nano -AlN tozunu (ağ %1-10) müllit (ağ %45)/cam (ağ %55) [21,22] bileşimine ekleyip, AlN miktarının artmasıyla cam iceriğinin azaldığını , sinterleme sıcaklığının artığını bulmuşlardır..Liu ve arkadaşları [23] CaO-B_2O_3-SiO_2 bazlı cam sistemine ağırlıkça %1-10miktarında ZrO_2 ekleyip, CBS/ZrO_2 sisteminin yoğunlaşma ve dielektrik özelliklerini incelemiştir. ZrO_2 miktarı ağırlıkça %0'dan %7'ye arttırıldığında yığın yoğunluk yaklaşık 1.7 g/cm^3'den 2.71 g/cm^3'e artmıştır.



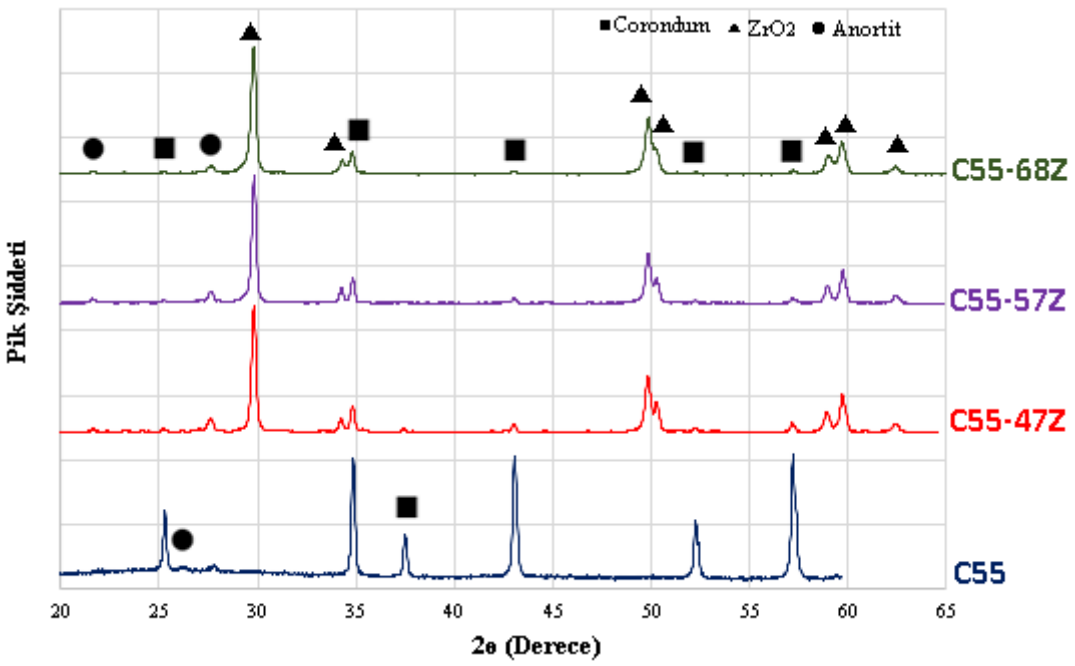
Şekil 1. ZrO_2 içeriği ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak kompozitlerin yoğunlaşma davranışları

Şekil 2'de, her bileşim için optimum sinterleme sıcaklığında Al_2O_3/cam/ZrO_2 kompozitlerinin yığın yoğunluklarını gösterilmiştir. Yığın yoğunluklarının değişimini değerlendirmek için, paralel, seri ve logaritmik karıştırma modelleri [18] dikkate alınmıştır. Paralel, seri ve logaritmik modellerden hesaplanan değerler kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Sistemde iki kompozit; C55 (yoğunluk=2,94 g/cm^3) ve ZrO_2 (yoğunluk=6,07 g/cm^3) değerlendirilmiştir. Dolayısıyla artan miktarda ZrO_2 içeriğinin daha yüksek yığın yoğunluklarına yol açtığı görülmektedir. Deneysel olarak belirlenen yığın yoğunlukları seri kurala daha yakın olduğu tespit edilmiştir.



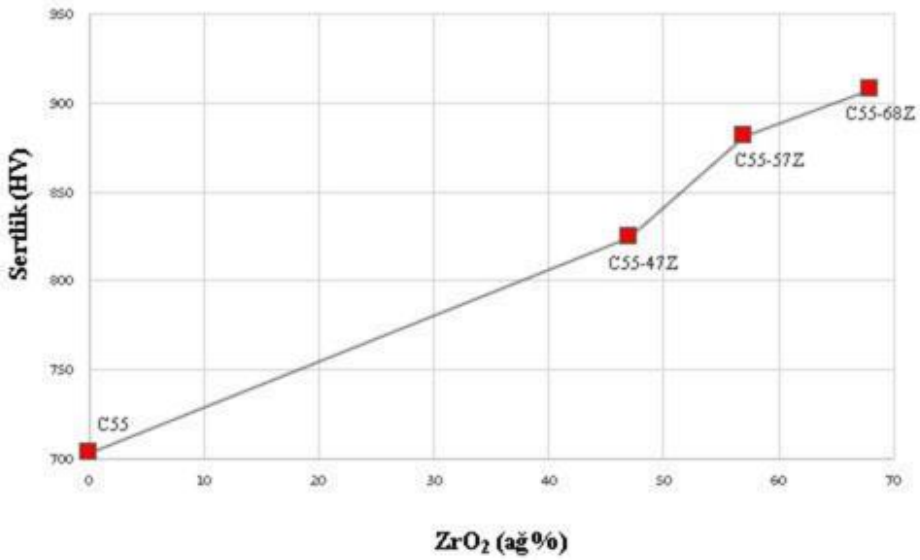
Şekil 2. Her bileşim için optimum sinterleme sıcaklığında sinterlenen Al_2O_3/cam/ZrO_2 kompozitlerinin yığın yoğunlukları ve modellemeler

Şekil 3'de, optimum sinterleme sıcaklıklarında (C55 için 800 °C, C55-47Z için 1100 °C, C55-57Z için 1150 °C ve C55-68Z için 1150 °C) sinterlenen kompozitlerin X-ışını kırınım (XRD) grafikleri gösterilmiştir. ZrO_2 (Kart numarası: 00-017-0923) bütün kompozisyonlar için (C55 hariç) ana kristalin faz olarak grafiklerde görülmektedir. Anortit $(Ca,Na)(Si,Al)_4O_8$ (Kart numarası: 00−041-1481) ve corondum (Kart numarası: 00-010-0173) fazları da sistemde yer alan diğer fazlardır. Anortit fazının kristalizasyonu sıcaklığa (anortit fazı 825°C'de oluşmaya başlar [21]) ve cam içeriğine bağlı olarak değişmektedir, ancak 2θ = 29.8°'deki ana ZrO_2 pik şiddeti C55-47'den C55-68'e yükselmiştir; bu, ZrO_2'nin diğer fazlarla kimyasal olarak reaksiyona girmediğini ve sıcaklıkla ayrışmadığını (bozunmadığını) göstermektedir. ZrO_2'nin kimyasal kararlılığı dielektrik ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde son derece önemli olmuştur.



Şekil 3. Her bir bileşim için optimum sinterleme sıcaklığında sinterlenen kompozitlerin XRD pikleri

Sinterlenmiş numunelerin mekanik özellikleri, yapıdaki kristal fazlara, sinterleme sıcaklığı ile yoğunlaşma (veya açık gözeneklilik) arasındaki ilişkiye ve malzemedeki kusurlara bağlıdır [24]. Şekil 4'te, ZrO_2 içeriğinin bir fonksiyonu olarak Al_2O_3/cam/ZrO_2'nin kompozitlerinin sertlik değerleri gösterilmiştir. Tüm numuneler kuru presleme yöntemi ile optimum sinterleme sıcaklığında (C55 için 800 °C, C55-47Z için 1100 °C, C55-57Z için 1150 °C ve C55-68Z için 1150 °C) üretilmiştir. C55 ve ZrO_2'nin sertlik değerleri sırasıyla 703 HV ve 1250 HV'dir. ZrO_2 miktarının artmasıyla sertlik değerleri de artmıştır. Başka bir ifadeyle, sertlik değerleri C55 için 703±51 HV, C55-47Z için 824±11 HV, C55-57Z için 881±7 HV ve C55-68Z için 907±33 HVolarak saptanmıştır. Bunun sebebi ZrO_2'nin yüksek sertlik değeri (bkz. Şekil 3 ZrO_2 faz olarak kalmış ve sıcaklık ile bozunmamıştır) ve tam yoğunlaşma olarak (bkz. Şekil 1 AG< %1'den küçüktür) açıklanabilir. Benzer bir davranış $MgAl_2O_4$ /ZrO_2 kompozit sisteminde de gözlemlenmiştir; sertlik 13,5 GPa'dan (ağırlıkça %0 ZrO_2) 15,1 GPa'ya (ağırlıkça %20 ZrO_2) yükselmiştir [25].

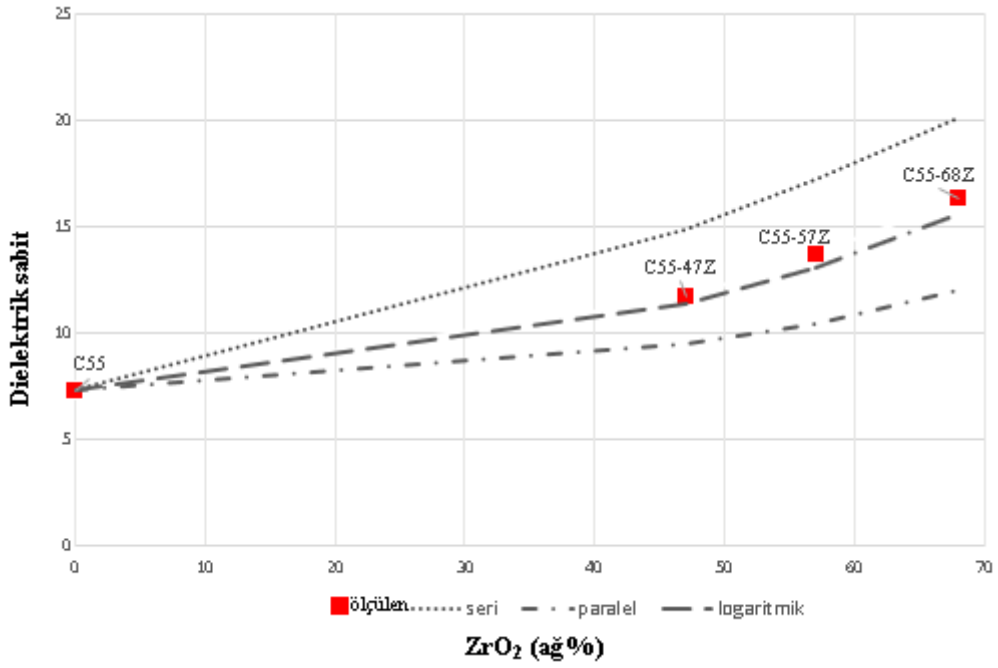


Şekil 4. Her bir bileşim için optimum sinterleme sıcaklığında sinterlenen kompozitlerin sertlik grafiği

Dielektrik özellikler, numunelerin yoğunlaşması (veya gözenekliliği), cam içeriği ve yapıda mevcut kristalin fazlar dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Şekil 5'te, seri, paralel ve logaritmik modellerle birlikte ZrO_2 içeriğinin bir fonksiyonu olarak optimum sinterleme sıcaklığında sinterlenen kompozitlerin dielektrik sabitleri gösterilmiştir. C55 ve ZrO_2 kompozitlerin kapasitans değerleri (C, Farad) 5 MHz'de ölçülmüştür ve ardından dielektrik sabiti (K) aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır.

$$K = \frac{C.d}{\varepsilon_0.A} \quad (1)$$

Bu denklemde d kalınlık (m), ε_0 vakumun geçirgenliği (Farad/m) ve A elektrot alanıdır (m^2)[1]. C55 ve ZrO_2 için dielektrik sabit 5 MHz'de sırasıyla K=7.3 ve K=32.75 olarak ölçülmüştür. Dielektrik sabiti (kayıp) değerleri 5 MHz'de C55-47Z için 11.69 (0.0091) , C55-57Z için 13.71 (0.0060) ve C55-68Z için 16.29 (0.0032) olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak belirlenen dielektrik sabitleri (K) logaritmik modelle iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. ZrO_2 kimyasal kararlılığı (bkz. Şekil 3) ve ZrO_2'nin yüksek dielektrik sabiti (5MHz'de 32.75) nedeniyle ZrO_2 miktarı artıkça kompozitlerin dielektrik sabiti yükselmiştir. Bir başka deyişle, tüm numuneler neredeyse sıfıra yakın AG'ye (yani %0,33'den az) ve SE'ye (yani %0,07'den az) sahip olduğundan, K'deki artış temel olarak ZrO_2'nin yüksek K'sına atfedilmiştir. Malzemenin radyo frekansına veya mikrodalga radyasyonuna tepkisini gözlemleyerek dielektrik malzemelerin kendine özgü elektromanyetik özelliklerini belirlemek amacıyla, C55-68Z'nin dielektrik sabiti (olası bir mikrodalga uygulaması için) ayrıca bir ağ analizörü kullanılarak 1 GHz ve 10 GHz'de ölçülmüştür. Bu sonuçlar, dielektrik sabitinin artan frekansla birlikte sürekli olarak azaldığını göstermektedir; 5 MHz'de dielektrik sabit(kayıp) 16.29 (0.0032)'dan 1 GHz'de 14.79(0.0045)'a ve 10 GHz'de 14.43(0.0051)'e düşmüştür. Bu düşüşün sebebi esas olarak uzay yükünden ve dipolar katkılardan kaynaklanan polarizasyon eksikliğinden kaynaklanmaktadır [20]. Literatürde benzer bir eğilim $CaO-B_2O_3-SiO_2$ bazlı cam/ ZrO_2 sistemlerde gözlemlenmiştir. ZrO_2 miktarının artmasıyla dielektrik sabit ağırlıkça 0'dan (K=4.27) ağırlıkça %20'ye (K=4.89) artmıştır [23]. Daha yüksek dielektrik sabiti (örneğin 20'ye yakın veya daha yüksek) mikrodalga bileşenlerin minyatürleşmesi için kritiktir [6]. Tüm kompozitlerin dielektrik kayıpları 5MHz'de 0,0091'in altındadır. Genel olarak, dielektrik kayıplar frekans ve sıcaklığa göre değişir ve katkı maddesi, safsızlık atomlarından, mikroyapısal kusurlardan (örneğin tane sınırları, gözeneklilik, mikro çatlaklar, dislokasyonlar, boşluklar), düzen-düzensizlik, kristal yapı ve yönelimden kaynaklabilir [26]. Maksimum sinyal ısı kaybını önlemek için dielektrik kayıp (kalite faktörü (Q)= (1/dielektrik kayıp) yüksek) mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır [27].



Şekil 5. Her bileşim için optimum sinterleme sıcaklığında sinterlenen Al_2O_3/cam/ZrO_2 kompozitlerinin dielektrik sabiti ve modellemeler

ZrO_2 diğer fazlar ile rekasiyona girmediği ve sıcaklıkla bozunmadığı için (bkz. Şekil 3), Al_2O_3/cam /ZrO_2 kompozitleri cam seramiklerin yığın yoğunluğunu (daha yüksek ZrO_2 yoğunluğu (ZrO_2 yoğunluk= 6.07 g/cm^3) nedeniyle), sertliğini (daha yüksek ZrO_2 sertlik değeri (ZrO_2 sertlik= 1250 HV) nedeniyleve dielektrik sabitini (daha yüksek ZrO_2 dielektrik sabiti değeri (ZrO_2 K=32.75) arttırmıştır. C55-68Z en yüksek yoğunluğa (4,39 g/cm^3), en yüksek sertliğe (907 HV) ve en yüksek dielektrik sabiti değerine (5 MHz'de 16.29, 1 GHz'de 14.79 ve

10 GHz'de 14.43) sahip olmuştur. C55-68Z mikrodalga uygulamaları için en umut verici kompozisyon olarak belirlenmiştir.

IV. GENEL SONUÇLAR

Al_2O_3/Cam/ZrO_2 kompozitleri mikrodalga uygulamaları için kuru presleme yöntemiyle başarıyla üretilmiştir. Maksimum yoğunluğa C55 için 800 ˚C'de, C55-47Z için 1100 ˚C'de, C55-57Z için 1150 ˚C'de ve C55-68Z için 1150 ˚C'de (tüm kompozisyonlar için; AG≤%0,33 ve SE≤%0,07) ulaşılmıştır. XRD sonuçları, ZrO_2 diğer fazlarla kimyasal olarak reaksiyona girmediğini ve sıcaklıkla bozunmadığını göstermiştir. Yoğun kompozitlerin dielektrik sabiti, ZrO_2 miktarının artmasıyla 5 MHz'de C55 için 7.3, C55-57Z için 13.71 ve C55-68Z için 16.29 olacak şekilde artmıştır. Sertlik değerleri artan ZrO_2 içeriğiyle (yani C55 için 703 HV'den C55-68Z için 907 HV'ye) artmıştır. Özetle, cam eklenmesi kompozitlerin sinterleme sıcaklığını düşürmüş, ZrO_2 eklenmesi ise kompozitlerin yığın yoğunluğunu, dielektrik sabitini ve sertliğini arttırmıştır. Bu nedenle, C55-68Z numunesi mikrodalga uygulamaları için umut verici bir adaydır.

KAYNAKLAR

[1] Sebastian, M. T. (2008). Dielectric Materials for Wireless Communications, 1st ed. Amsterdam: Elsevier.
[2] Ohsato, H. (2005). Research and development of microwave dielectric ceramics for wireless communications. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, *113*(1323), 703–711.
[3] Plourde, J. K., & Ren, C.-L. (1981). Application of Dielectric Resonators in Microwave Components. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *29*, 754–770.
[4] Ohsato, H., et al. (2004). Microwave-millimeterwave dielectric materials. *Key Engineering Materials*, *269*, 195–198.
[5] Freer, R., & Azough, F. (2008). Microstructural engineering of microwave dielectric ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, *28*(7), 1433–1441.
[6] Takata, M., & Kageyama, K. (1989). Microwave Characteristics of A(B1/2 B1/2)O3 Ceramics (A = Ba, Ca, Sr; B3+ = La, Nd, Sm, Yb; B5+ = Nb, Ta). Journal of Materials Science, 59, 1955–1959.
[7] Cary, R. H. (1974). Avionic Radome Materials. Paris.
[8] Alford, N. M. N., & Penn, S. J. (1996). Sintered alumina with low dielectric loss. *Journal of Applied Physics*, *80*(10), 5895–5898.
[9] Chiang, C. C., Wang, S. F., Wang, Y. R., & Wei, W. C. J. (2008). Densification and microwave dielectric properties of CaO-B2O3-SiO2 system glass-ceramics. *Ceramics International*, *34*(3), 599–604.
[10] Wu, J. M., & Huang, H. L. (1999). Microwave properties of zinc, barium and lead borosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *260*(1–2), 116–124.
[11] Choi, Y. J., et al. (2006). Co-firing and shrinkage matching in low- and middle-permittivity dielectric compositions for a low-temperature co-fired ceramics system. *Journal of the American Ceramic Society*, *89*(2), 562–567.
[12] Seo, Y. J., Shin, D. J., & Cho, Y. S. (2006). Phase evolution and microwave dielectric properties of lanthanum borate-based low-temperature co-fired ceramics materials. *Journal of the American Ceramic Society*, *89*(7), 2352–2355.
[13] Ohishi, Y., Miyauchi, Y., Ohsato, H., & Kakimoto, K. I. (2004). Controlled temperature coefficient of resonant frequency of Al2O3-TiO2 ceramics by annealing treatment. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2 Letters*, *43*(6A), 6–9.
[14] Mandai, H., & Okube, S. (1992). Ceramics Transactions, 32, 91.
[15] Krzmanc, M. M., Valant, M., & Suvorov, D. (2005). A structural and dielectric characterization of NaxCa1-xAl2-xSi2+xO8 (x = 0 and 1) ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, *25*(12), 2835–2838.
[16] Gao, W., Cao, S., Li, L., Wang, J., Liu, C., & Han, J. (2023). Network structure, crystallization behavior, and microwave dielectric properties of ZnO-B2O3 glass-ceramics with ZrO2 additions. *Journal of Alloys and Compounds*, *953*, 170145.
[17] Mao, H., Wang, F., Chen, X., Liu, Z., Li, W., & Zhang, W. (2023). Preparation of BaO–MgO–Al2O3–SiO2/Al2O3 glass-ceramic/ceramic LTCC substrate material for microwave application. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *34*(4), 1–12.
[18] Chung-Lun, W.-H. L., Lo, J.-G., & Duh, B.-S. C. (2002). Low-Temperature Sintering and Microwave Dielectric Properties of Anorthite-Based Glass-Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, *85*(9), 2230–2235.

[19] Dursun, G. M., & Duran, C. (2019). Glass alumina composites for functional and structural applications. *Ceramics International, 45*(9), 12550–12557.
[20] Kingery, W. D. (1997). Introduction to Ceramics. *Journal of the Electrochemical Society, 124*, 152C.
[21] Bilaç, O., & Duran, C. (2023). Mechanical, thermal, and dielectric properties of glass mullite composites for low-temperature co-fired ceramic and radome applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 3287–329.
[22] Bilaç, O., & Duran, C. (2023). Effect of nano aluminum nitride filler on mechanical, thermal, and dielectric properties of the glass/mullite composites for low-temperature co-fired ceramic applications. *Journal of the American Ceramic Society, 106*(8), 4902–4910.
[23] Liu, J. Z., Yao, Z. H., Xu, N. X., Zhang, Q. L., & Yang, H. (2016). Densification behavior and dielectric properties of CaO-B2O3-SiO2 system glass-ceramics containing ZrO2. *Key Engineering Materials, 697*, 253–256.
[24] Zhang, L., Olhero, S., & Ferreira, J. M. F. (2016). Thermo-mechanical and high-temperature dielectric properties of cordierite-mullite-alumina ceramics. *Ceramics International, 42*(15), 16897–16905.
[25] Marais, F., Sigalas, I., & Whitefield, D. (2022). The effects of the addition of tetragonal-ZrO2 on the mechanical properties of MgAl2O4 – ZrO2 composites. *Ceramics International, 48*(1), 563–568.
[26] Gurevich, V. L., & Tagantsev, A. K. (1991). Intrinsic dielectric loss in crystals. *Advances in Physics, 40*(6), 719–767.
[27] Sebastian, M. T., Silva, M. A. S., & Sombra, A. S. B. (2017.). Measurement of Microwave Dielectric Properties and Factors Affecting Them. In M. T. Sebastian, H. Jantunen, & R. Ubic (Eds.), *Microwave Materials and Applications 2V Set, I & II*, First Edition.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 343-358, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1349378
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Evsel Katı Atıkta Sıfır Atık Uygulanabilirliği: Bursa Örneği

Zero Waste Applicability in Domestic Solid Waste: Bursa Case

Samet Öztürk [1]*, Nour Aljbili [2]

Geliş / Received: 25/08/2023 ***Revize / Revised: 20/12/2023*** ***Kabul / Accepted: 25/12/2023***

ÖZ

Bu çalışmanın amacı Bursa ilinde ikamet eden bireylere yönelik belediyeler ve ilgili kurumlar tarafından verilen bilinç ve farkındalık oluşturma çalışmalarının ve eğitimlerinin ne kadar etkili olduğunun ve bireylerin bilgi düzeylerinin ve sıfır atık projesinin Bursa ilinde uygulanabilirliğinin analiz edilmesidir. Bu çalışmada tamamen gönüllülük esasına dayanan çevrimiçi anket 529 kişi tarafından yanıtlandırılmıştır. Toplanan veriler SPSS 26 uygulaması vasıtasıyla ANOVA ve t-testi ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmayla Bursa ilinde medeni durum parametresine göre evli katılımcıların bekar katılımcılara göre sıfır atık bilincinin daha yüksek olduğu, kadınların çevre bilinci ve kirliliğin önlenmesine erkek katılımcılardan daha çok dikkat ettikleri tespit edilmiştir. 26-35 yaş aralığındaki katılımcıların sıfır atık ve çevresel atık bilincinin diğer yaş aralıklarına göre daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler- Evsel katı atık, Atık yönetimi, Sıfır atık, Bursa.

ABSTRACT

The aim of this study is to analyze how effective the awareness and awareness-raising studies and trainings given by municipalities and related institutions for individuals residing in Bursa province, and the applicability of individuals' knowledge levels and zero waste project in Bursa province. In this study, the answers of 529 people who were completely voluntarily selected based on the online questionnaire prepared in the electronic environment were accepted and analyzed. The collected data were statistically analyzed with ANOVA and t-Test by means of SPSS 26 application. With this study, it can be stated that married participants have higher zero waste awareness compared to single participants in Bursa, and women participants pay more attention to environmental awareness and pollution prevention than male participants. It was determined that the participants between the ages of 26-35 have higher awareness of zero waste and environmental waste compared to other age groups.

Keywords- Municipal solid waste, Waste management, Zero waste, Bursa.

[1]*Sorumlu yazar iletişim: samet.ozturk@btu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-5969-1534)
Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Mimar Sinan Mahallesi, Mimar Sinan Bulvarı, Eflak Cd. No:177, 16310 Yıldırım-Bursa
[2]İletişim: nourjb1990@gmail.com (https://orcid.org/0000-0001-5017-9414)
Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Mimar Sinan Mahallesi, Mimar Sinan Bulvarı, Eflak Cd. No:177, 16310 Yıldırım-Bursa

I. GİRİŞ

Dünya genelinde insanlık küresel ısınma, asit yağmuru, ozon tabakasının tahribatı, çevre kirliliği, doğal hasar ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi mevcut ve özellikle de özellikle gelecek nesillerin hayatını ciddi şekilde tehdit edebilecek ciddi çevre sorunlarıyla karşı karşıyadır [1, 2]. Çevre sorunları yaşam kalitelerini iyileştirmek için doğal alanlardaki dikkatsiz ve yoğun insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır [3, 4]. Daha dikkat çekici bir husus ise insan etkilerinin çevrelerindeki bilinçsizliğidir [5]. Çevreye verilen zarar doğal kaynaklar, iklim, kirlilik, gıda ve ekonomi ile ilgili bir dizi soruna neden olacak ekolojik bir krize yol açmaktadır [2, 6]. Dünya çapında çevre sorunlarını çözmek için hükümet politikaları, toplumsal uygulamalar, doğaseverlerin hareketleri ve hükümet düzenlemelerinin güçlendirilmesi gibi çevre sorunlarını çözmek için birçok yöntem uygulanmıştır [1, 7]. Sürdürülebilir bir çevre oluşturulması ve yaşam kalitesinin daha iyi olması için bu sorunlarla başa çıkabilmek adına bilinçli ve çevreye duyarlı bireyler yetiştirmek gerekmektedir [5, 8, 9].

Katı atık yönetimi konusu gelişmekte olan ülkelerdeki hem küçük hem de büyük şehirlerin yetkilileri için en büyük zorluktur. Bu durum, esas olarak bu tür katı atıkların artan üretimi ve belediye bütçesine getirilen yükten kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda katı atık yönetimi çok farklı faktörlerin de birarada olduğu yönetimi kolay olmayan bir süreçtir. [10]. Mevcut atık yönetim sistemlerini izlemek ve kontrol etmek, düzenleyici, finansal ve kurumsal kararlar almak için bu alanlarda doğru bilgi gereklidir. Her yıl dünya çapında yaklaşık 10 milyar kg katı atık üretilmektedir [11]. Katı atıkların bertarafı için en yaygın kullanılan depolama olarak gösterilmiştir [12]. Bazı çalışmalar, katı atıkların neredeyse %95'inin dünya çapında depolama sahaları ile bertaraf edildiğini göstermektedir [13]. Avrupa Birliği'nde (AB), üye devletlerin çoğu atıklarının %50'sinden fazlasını düzenli depolama alanlarına yönlendirmektedir [14]. Ancak kentleşmenin ilerlemesi ve sakinlerin daha yüksek yaşam ortamı kalitesi talepleriyle birlikte çöplük alanlarının kirlenmesi dünyada giderek daha fazla dikkat çekmiştir, çünkü depolama sahası, bazıları çevrenin güvenliğini tehdit edebilecek çok sayıda potansiyel toksik bileşik içermektedir. Katı atık depolama alanlarının etkisinin tüm çevresel bileşenlerin kirlenmesine neden olabileceği bilinmektedir [15].

2050 Yılında dünya nüfusunun 9 milyarın üzerinde olacağı tahmin edilmektedir [16]. Nüfus patlaması genellikle çevre üzerindeki etkilerle birlikte gelir ve bunlardan biri hızlı atık üretimidir. [17]. İnsan faaliyetleri ya depolama sahasına dikkatsizce atılan ya da düzenli depolama alanlarına atılan atıklar üretmektedir. Son araştırmalar, katı atık yönetimi sorununun bu neslin karşılaştığı sorunlar arasında olduğunu göstermiştir [17-19]. Bu sorunun çözümü için atıkların yeniden kullanılması veya geri dönüşümünü çözüm olarak ileri süren sıfır atık yaklaşımı kullanılabilir [17-19].

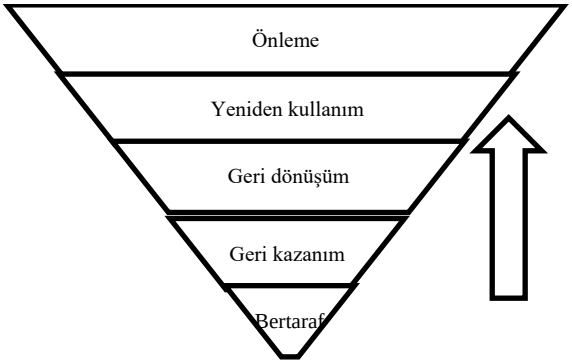
Sıfır atık, evsel katı atıkların depo alanlarına veya atık yakma tesislerine gitmeden uzaklaştırılmasıyla beraber sınırlı doğal kaynakların yenilenmesine ve korunmasına yönelik bir hedeftir. Atık üretiminin en aza indirilmesini, atıkların kompostlaştırılmasını, geri dönüşümünü, yeniden kullanımını ve insanların sınırlı doğal kaynakları tüketme biçimlerinin ayarlanmasını ve endüstrilerin üretim süreçlerinde atıkların yok edilebilmesi için ürünlerini yeniden tasarlama ihtiyacını içerir [20]. On yıllar boyunca, endüstriyel ekonomi doğrusal bir model malzeme tüketimi sistemi üzerine kurulmuştur. Böylece kaynaklar doğal ortamdan çıkarılır; ürünler çıkarılan kaynaklardan üretilir, bu ürünler nihai tüketicilere dağıtılır ve tüketiciler raf ömründen sonra malzemeleri atarlar. Bu tür bir malzeme yönetimi sistemi sürdürülemez [21].

Öte yandan, döngüsel ekonomi canlandırıcı, faydalı ve sürdürülebilir bir süreçtir. Döngüsel ekonominin hedefleri, ürünlerin değerinin korunmasını, ekonominin iyileştirilmesini, aşağı akış işlerinin yaratılmasını ve çevreye karbon emisyonu gibi etkilerin azaltılmasını sağlamaktır [22]. Bu nedenle, kaynakların geri kazanabileceği depolama alanlarına sıfır atık uygulanması için katı atık karakterizasyonu çalışmasına ilişkin güvenilir veriler gerekmektedir. Bu kayıtların çok azı veya hiçbiri gelişmekte olan ülkelerde mevcut değildir [23, 24].

Sıfır atık kavramı zaman içerisinde evrilmiş olup günümüzde uygulama alanı sadece atık yönetimi ile değil davranışsal değişiklik içermesi yönüyle de sosyal bir kavram haline gelmiştir [25-27]. Zaman ve Lehmann (2011) sıfır atık kavramını, atık malzemelerden elde edilen tüm kaynakların %100 oranında geri dönüşümü ve geri kazanımı olarak kavramsallaştırmıştır [26]. Palmer (2004) ilk olarak 1973 yılında kimyasallardan elde edilen kaynakların geri kazanılmasını ifade etmek için "sıfır atık" terimini kullanmıştır [28]. Sıfır atık kavramı Kaliforniya, Kanada, Güney Avustralya, Victoria gibi birçok il ve ülkede uygulanmıştır [29].

Türkiye’de de Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından atıkların kontrolü ve sonraki nesillere daha yaşanabilir ve temiz bir hayat bırakılmasına odaklanan sürdürülebilir kalkınma ilkeleri kapsamında 2017 yılında Türkiye'nin Sıfır Atık Projesi başlatılmıştır. Projenin uygulanması Cumhurbaşkanlığında başlamış, yayımlanan genelgelerle devletin tüm kurum ve kuruluşlarında uygulanarak projenin gelişimi için planlamalar yapılmıştır [30]. Sıfır Atık Projesi’yle birlikte ülkede verimlilik ve sürdürülebilirlik bilinci artarken çevresel riskler azalmış, ülkenin prestiji de artırmıştır [31].

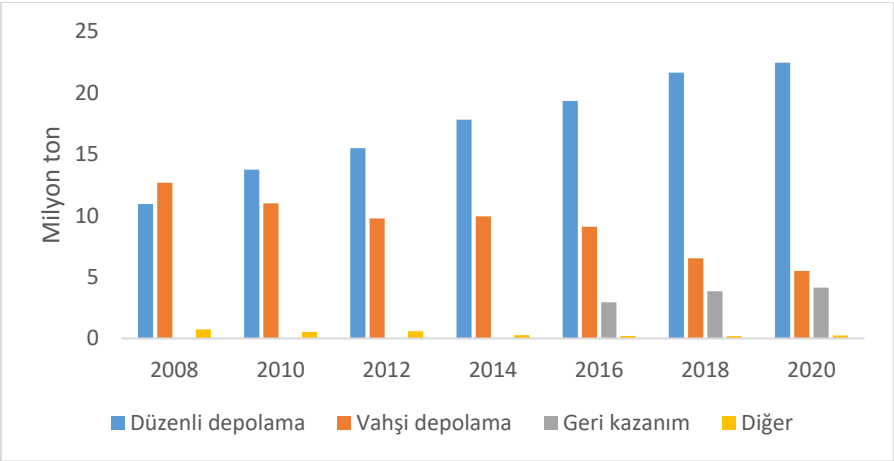
Atık yönetiminin temellerinden birisi olan ve Şekil 1'de şematize edilen "atık yönetimi hiyerarşisi" ilkesinin birinci ve en önemli önceliği atıkların daha üretim aşamasındayken önlenmesi ve miktarının azaltılması ve çevreye karşı oluşturabileceği zararlar ve tehlikelerinin düzeyinin azaltılmasıdır. Ikinci sırada ise söz konusu atıkların yeniden kullanıma uygun hale getirilmesi, geri dönüşümünün arttırılması ve enerji elde etmek için geri kazanıma teşvik edilmesi yer alır. Üçüncül ve son amacı olan atıkların zararsız ve atık bertaraf yönetmeliğine uygun bir şekilde yakılması, o da mümkün değilse güvenli depolanmasıdır [32].



Şekil 1. Atık Yönetimi Hiyerarşisi [32].

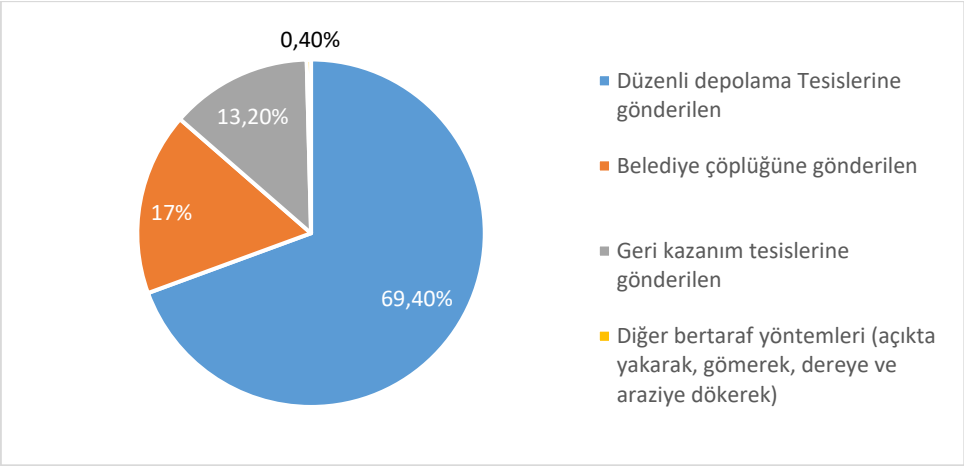
Bu hiyerarşi düzenine göre bertaraf aşamasından üretim aşamasındaki atık önleme basamağına çıkıldıkça sürdürülebilirlik ve Sıfır Atık uygulanabilirliği artmakta ve bu atıklardan oluşan yarar düzeyinde ciddi bir fayda sağlanmaktadır [32]. Sıfır Atık Projesi, daha az atık üretilmesi, etkin toplama sistemlerinin kurulması ve atıkların geri dönüştürülmesi için atık önleme ve yönetiminin hedefleridir. Proje, çevreyi koruyarak ekonomik fayda sağlamayı ve şehri gelecek nesiller için daha yaşanabilir hale getirmeyi amaçlamaktadır [33].

Şekil 2'de yıllara göre Türkiye'de evsel katı atık miktarının zamanla değişimi gösterilmektedir. Evsel katı atık miktarı 2008 yılında yaklaşık 24 milyon ton iken, 2020 yılında 32 milyon tona ulaşmıştır [34].



Şekil 2. Türkiye'de evsel katı atık miktarının zamanla değişimi [34].

Şekil 3'te Türkiye'de evsel katı atık bertaraf oranları gösterilmiştir. Buna göre Türkiye'de 2020 yılı itibarıyla %13,2 oranında evsel katı atıklar geri dönüştürülmektedir [34]. Geri kazanılabilir atıklar için kötü organize edilmiş toplama sistemleri, finansman eksikliği ve sakinlerin atıkları ayırma eğiliminin düşük olması, geri kazanımın verimliliğini etkileyen faktörlerdir.



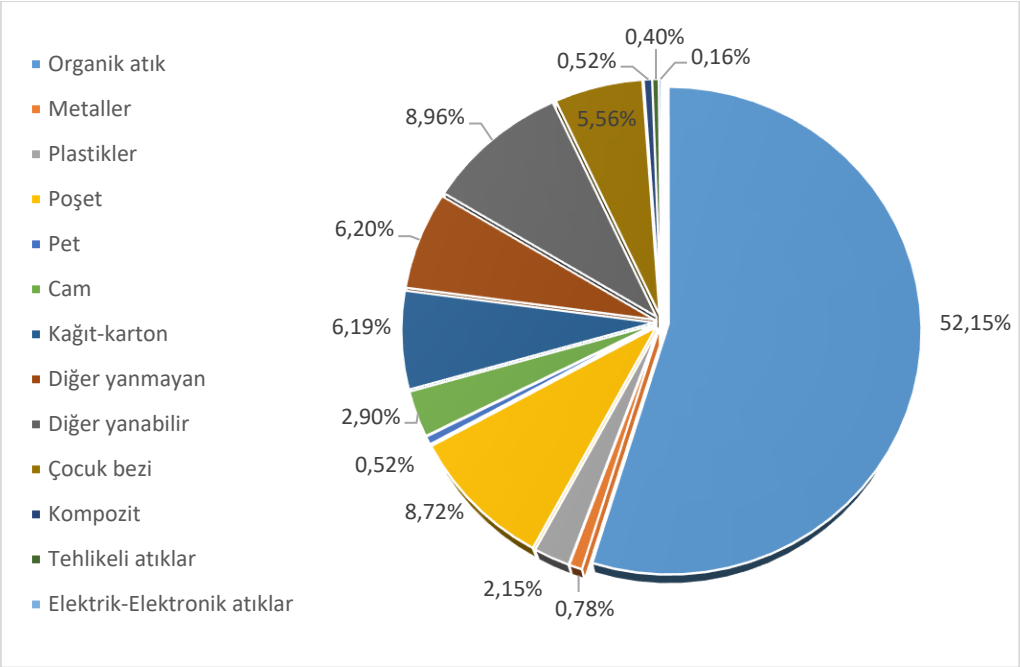
Şekil 3. Türkiye'de evsel katı atık bertaraf oranları [34].

Türkiye'de Sıfır Atık Projesi'nin uygulanabilirliğine dair yapılan araştırmalara örnek olmak üzere Antalya'da bulunan bir otel işletmesi [35], Tekirdağ'daki Süleymanpaşa Belediyesi'nin idari binaları [36], Adana'daki Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü [37], Niğde Belediye Binası [38], ve Kayseri'de bulunan Şehir Hastanesi [39] kapsamında yapılan araştırmalar gösterilebilir.

Ankara ili Sıfır Atık yönetim sistemi 2019 yılında planlanmıştır. Plana göre 3155 alanda Sıfır Atık sistemi kurulmuştur. 2019 yılından itibarıyla 6273 kişi proje hakkında bilgilendirilmiştir. Ankara ilinde sadece geri kazanımdan 29 kg hammadde tasarrufu, 94 m3 depolama alanı ve 170 ağaç elde edilecektir [40].

Bursa ili atık toplama işlemini fazla nüfusa sahip ve merkeze yakın olan bölgelerde yüklenici firma üstlenirken diğer bölgelerde belediye personeli gerçekleştirmektedir [41]. Bursa'da atıklar, geri kazanımlarının sağlanması ve daha sonra bertaraf edilmek üzere 17 ilçede kapasiteleri 7 metreküple 20 metreküp arasında değişiklik gösteren 300 tane sıkıştırmalı çöp toplama aracıyla toplanmaktadır. Aynı zamanda bazı uzak ilçelerde açık kasa damperli traktörlerle mahallelerden bulunan konteynerlerden toplanmaktadır [41].

Bursa ilinde katı atık toplama konteynerlerinin kapasiteleri 120 L ile 1000 L arasında değişkenlik göstermesine rağmen en sık kullanılan konteynerler genellikle 400 ile 800 litrelik kapasiteye sahiptir [41]. Bursa ilinde en fazla atık üreten ilçeler 900 ton/gün ile Osmangazi ilçesi, 680 ton/gün ile Yıldırım ilçesidir [41]. En az atık üreten ilçeler ise 53 ton/gün ile Kestel ilçesi ve 47 ton /gün ile İznik ilçeleridir [42]. Şekil 4'te Bursa ili mevcut katı atık karakterizasyonu gösterilmektedir [41]. Organik atıklar %52 oranı ile en yüksek evsel katı atıklar olup onu diğer yanabilir katı atıklar, Poşet atıklar, diğer yanmayan ve kağıt-karton atıklar takip etmektedir [41].



Şekil 4. Bursa ili mevcut evsel katı atık karakterizasyonu [41].

Tablo 1'de 2015 yılında oluşmuş katı atıklar göz önünde bulundurarak 2018, 2023, 2035 ve 2050 yıllarına kadarki nüfusa bağlı olarak hesaplanmış tahmini atık miktarları gösterilmiş olup bu yıllarda beklenen atık miktarları sırasıyla, 3.267, 3.873, 5.711 ve 8.963 ton/gün olarak hesaplanmıştır [41].

Tablo 1. Bursa ilinde oluşabilecek tahmini atık miktarı [41].

Yıllar	Nüfus	Atık Miktarı (ton/yıl)	Atık Miktarı (ton/gün)
2015	2.819.423	1.075.822	2.947
2018	2.923.359	1.192.522	3.267
2023	3.100.754	1.413.811	3.873
2035	3.499.772	2.084.393	5.711
2050	3.933.533	3.271.467	8.963

Bursa ilinde evsel katı atıkta sıfır atık uygulaması ile ilgili literatürde yeterli sayıda yayın saptanamamıştır. Bursa Uludağ Üniversitesinde Görükle kampüsünde yapılan araştırmaya göre günlük 20,84 kg geri dönüştürebilir atık atılmaktadır. Bu atıklarından geri kazanım sağlanırsa 4,71 kg ham madde, 48 ağaç, 24,76 veril petrol kurtaracaktır [43]. Bu çalışmayla, Bursa ilinde evsel katı atıkta sıfır atık uygulamasına yönelik yeni bir bakış açısının sunulacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada Bursa ili genelinde Sıfır Atık Projesi'nin uygulanabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın motivasyonu, Sıfır Atık Projesinin Bursa ili için uygulanması önündeki engellerin tespit edilip hedef kitlelere uygun çalışmalar yapılmasına bir altlık oluşturulmasıdır. Buna göre dört farklı parametre olan medeni durum, cinsiyet, yaş ve eğitim durumu üzerinden Bursa ilinde yaşayan insanların Sıfır Atık bilinç durumları ölçülmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda Bursa ilinde evsel katı atıkta Sıfır Atık Projesi'nin uygulanabilirlik düzeyini belirlemek için gönüllülük esasına dayanarak çalışmaya dahil olmayı kabul eden vatandaşlar tarafından bir anket doldurulmuştur. Bu anketten elde edilen verilerin istatistiki olarak analiz edilmesiyle çeşitli parametreler bazında Bursa ilinde yaşayan insanların sıfır atık projesine yaklaşımları incelenmiştir. Bu çalışmanın alt amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- İnsanların sıfır atık konusunda ne kadar bilinçli olduğunun saptanması.
- Çeşitli parametrelerle farklı özellikteki toplumun katmanlarının sıfır atığa olan yönelimlerinin incelenmesi.
- Sıfır atığın Bursa ili özelinde nasıl değerlendirilebileceğinin incelenmesi.

Böylelikle bu çalışmanın sıfır atık uygulanabilirliği ile ilgili daha sonra yapılacak araştırmalar için bir ön çalışma niteliği taşıması amaçlanmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Çalışma Deseni

Bu çalışmada Bursa ilinde yaşayan vatandaşlara sosyal medya mecralarından ve çevrimiçi anket duyurarak gönüllülük esasına dayalı olarak bireylerden belirtilen anketin doldurulması istenmiştir. Bu ankette Sıfır Atık Projesi'ne katkı sunmanın hangi seviyede olduğunu ölçen sorular bulunmaktadır. Bu araştırmanın temel amacı ise Bursa'da Sıfır Atık Projesi'nin uygulanabilirliğini değerlendirmektir.

Bu amaçla toplumun bir grubunun görüşleri ve tutumları ile ilgili veri elde etmek istediğimiz için kesitsel çalışma deseni kullanılmıştır. Kesitsel çalışma tasarımı, en yaygın ve en iyi bilinen çalışma tasarımlarından biridir. Bu tür bir araştırma çalışmasında, tüm popülasyon veya bunların bir alt kümesi seçilir ve bu bireylerden, ilgilenilen araştırma sorularını yanıtlamaya yardımcı olmak için veriler toplanır [44]. Araştırmaya katılacak kişiler için örneklem metodu olarak kolayda örnekleme metodu kullanılmıştır. Kolayda örnekleme araştırmacının yargılarına göre seçilen ve rastgele olmayan bir örnekleme yöntemidir. Bu çalışmada kolayda örnekleme seçilmesinin sebebi veri toplamanın en hızlı ve ekonomik şekilde sağlanmasıdır [45].

B. Veri Toplama Araçları

Bu çalışmada Bursa Teknik Üniversitesi Araştırma Etik Kurulunun yazılı onayı ile yapılandırılmış, önceden test edilmiş ve doğrulanmış 24 sorudan oluşan bir anket kullanılmıştır [40]. Geliştirilen yapılandırılmış öz değerlendirme anket formu Google forms olarak hazırlanan anket iletişim araçlarıyla çevrimiçi ortamda dağıtılmıştır. Anket formu Bursa ilinde yaşayan vatandaşlar arasında duyurulmuştur. Çalışmaya katılmayı kabul

eden gönüllülere, araştırmanın amacı ile uyumlu olarak 7 başlık altında 24 sorudan oluşan anket uygulanmıştır (Ekler).

Yedi bölümden oluşan anketin ilk bölümünde katılımcıların demografik özelliklerine yönelik 5 soru bulunmaktadır. İkinci bölümde kişisel atık yönetimi ile ilgili davranış ve tutumlarını tespit eden, üçüncü bölümde katılımcıların Sıfır Atık Projesi algılarını değerlendiren, dördüncü bölümde atık yönetimine dönük çevresel gözlemlerini tespit eden sorular sorulmuştur. Beşinci bölümde çevre kirliliği ile ilgili katılımcıların görüşlerini tespit eden sorular, altıncı ve yedinci bölümlerde ise sırasıyla katılımcıların farkındalık ve duyuru çalışmalarının yeterli olup olmadığına yönelik algıları ve kamusal hizmetlerin yeterliliği noktasındaki beklentilerini değerlendiren sorular yer almıştır. Katılımcıların anket sorularını "Katılıyorum" ve "Katılmıyorum" arasında değişen beş puan aralığında cevaplamaları istenmiştir.

C. Kriterler ve Sınırlılıklar

Çalışmaya; bilgilendirilmiş yazılı onam veren ve Bursa ilinde yaşayan vatandaşlar katılmıştır. Katılımcıların cinsiyeti, uyruğu, mesleği veya sosyoekonomik düzeyi ile ilgili herhangi bir kısıtlama olmamıştır. Bursa ilinde ikamet etmeyenler, yaş, eğitim durumunu veya medeni durumunu yanlış giren ve/veya hiç girmeyenler, çelişkili cevaplar veren veya birden fazla kez anketi dolduran vatandaşların anketi iptal edilmiştir.

Bu çalışmanın hedef kitlesi Bursa ilinde yaşayan toplumun tüm kesitleri olmasından dolayı, verilerin tüm toplum gruplarından eşit bir şekilde toplanmaması olasılığı çalışmanın iç geçerliliğine tehdit olarak değerlendirilebilir. Bu araştırmada azami ölçüde anket formunun toplumun tüm kesimlerine ulaşmış olmasına ve tüm bu kesimlerden eşit şekilde dağılmış veri toplanmasına dikkat edilmiştir.

D. Veri Analizi

Araştırmaya katılan gönüllülerin yanıtlarının dağılımı SPSS 26.0 (Sosyal Bilimler için istatistik Paketi) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre p değeri 0,05'ten az olanların istatistiksel açıdan anlamlı olduğu kabul edilmiştir. Alt problem analizi için kullanılan yöntemler, frekans, yüzde, t-testi ve tek yönlü varyans analizi (ANOVA) gibi istatistiksel yöntemlerdir [46]. T-Testi yalnızca iki istatiksel ortalama arasındaki farkın istatiksel olarak anlamlı olup olmadığını test etmek için kullanılır. Bu çalışmada veriler normal dağılıma uygunluk göstermesinden dolayı t-testi kullanılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada bireylerin cinsiyet (kadın, erkek) ve medeni durum (bekar, evli) parametrelerinin kendi içlerinde anlamlı olup olmaması analiz edilirken t-testi kullanılmıştır. ANOVA testi ise bağımsız değişkende ikiden fazla grup bulunuyorsa, örneğin yaş ve eğitim durumu özelliklerinde olduğu gibi durumlarda, tercih edilir. Testin temel amacı ise bu bağımsız değişkenlerin kendi aralarında nasıl etkileşime girdiklerinin ve aralarında anlamlı bir fark olup olmamasının istatiksel olarak analiz edilmesidir. T-Testi ve ANOVA testinin bu çalışmada tercih edilmesinin sebebi ise verilerin normal dağılıma yaklaşık olarak uygunluk göstermesinden kaynaklıdır.

İki gruptan daha fazla değişken bulunduran durumlarda T-testinin tercih edilmemesinin sebebi ise kısaca hata yapma olasılığının normal kabul edilen 0.05 değerinden yükselmesi ve hata yapmama (0,95) değerinin düşmesidir, bu durum istatiksel olarak kabul edilemezdir. Yani 3 grup bulunan bir veri setinde hata yapmama olasılığı çarpılırsa 0,95*0,95*0,95 = 0,857 değeri ortaya çıkar, hata yapmama değeri 0,857 ise hata yapma olasılığı 0,143 olacaktır ve bu durum $p<0,05$ kuralına uymaz. Grup sayısı ne kadar artarsa hata yapma olasılığı da doğru orantılı olarak artacaktır. Yapılan bütün testlerde $p<0,05$ durumunda farkın anlamlı olduğu belirtilecek, aksi durumda test edilen iki veya daha fazla parametre arasında anlamlı bir fark olmadığı kabul edilecektir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bursa ilinde ikamet eden ve bu araştırmaya katılan katılımcıların; yaş, eğitim durumu medeni durum ve cinsiyet olmak üzere olan veriler incelenmiş, ayrıntılı olarak demografik dağılımlarına Tablo 2'de yer verilmiştir.

Tablo 2. Tanımlayıcı özelliklere yönelik bulgular.

Parametreler	Alt kategori	n	%
Cinsiyet	Kadın	364	68,8
	Erkek	165	31,2
Yaş	12-25 yaş	305	57,7
	26-35 Yaş	118	22,3
	36-45 Yaş	75	14,2
	46-55 Yaş	22	4,2
	56 ve Üzeri Yaş	9	1,7
Medeni Durum	Evli	176	33,3
	Bekar	353	66,7
Eğitim Durumu	İlköğretim	14	2,6
	Ortaöğretim	16	3,0
	Lise	73	13,8
	Üniversite	367	69,4
	Lisansüstü	59	11,2

A. Güvenirlilik Geçerlilik Testi (Cronbach's Alpha)

Bu çalışmada kullanılan ölçeğin güvenilirliği ve geçerliliğinin belirlenmesi amacıyla "Cronbach's alpha" testi yapılmıştır. Cronbach's alpha değeri anketteki soru içeriklerinin birbiri ile tutarlılığının ölçüldüğü değerdir. Aynı zamanda, açımlayıcı faktör analizi testi de uygulanmış olup neticeleri Tablo 3'te belirtilmiştir. Genel Güvenirlik (Cronbach's Alpha) 0,814 olarak bulunmuştur. 0,8 ile 1 arasındaki Cronbach's alpha değerleri ölçeğin Buna göre soru kategorilerinin değerlerinin birbirine yakın olduğu ve belirlenen soru kategori faktörlerinin uygun olduğu söylenebilir. Açımlayıcı faktör değerleri de 0,494 ile 0,870 arasında değişmekte olup maddeler arası ilişkilerin yüksek olduğunu göstermektedir.

Sorular S1'den S24'e kadar Tablo 3'te temsil edilmiştir. S1-S9 arası kişisel atık yönetimi, S10-S13 arası sıfır atık projesi algısı, S14-S17 arası çevresel gözlemler, S18-S19 arası çevre kirliliği, S20-S22 arası duyuru ve farkındalık, son olarak S22-S24 arası da kamusal hizmet yeterliliği ile ilgili soruları temsil etmektedir.

Tablo 3. Ölçeğin güvenilirlik ve geçerliliğine yönelik analiz bulguları.

Sorular	Kişisel atık yönetimi	Sıfır atık projesi algısı	Çevresel gözlemler	Çevre kirliliği algısı	Duyuru ve farkındalık	Kamusal hizmet yeterliliği
S1	0,790					
S2	0,804					
S3	0,638					
S4	0,693					
S5	0,559					
S6	0,755					
S7	0,703					
S8	0,494					
S9	0,517					
S10		0,793				
S11		0,870				
S12		0,766				
S13		0,688				
S14			0,774			
S15			0,794			
S16			0,780			
S17			0,605			
S18				0,840		
S19				0,819		
S20					0,586	
S21					0,786	
S22					0,663	
S23						0,821
S24						0,798

Bursa ilinde yaşayan ve bu araştırmaya katılan kişilerden edinilen veriler, varimax rotasyonlu açımlayıcı faktör analizi yapılarak ve temel bileşenler analizi yöntemi (principal components) kullanılarak ölçülmüştür.

Bu çalışmada ayrıca soru gruplarının korelasyonunu incelemek adına Barlett testi uygulanmış ve Kaiser-Meyer-Olkin değeri bulunmuştur. Kişisel atık yönetimi, çevresel gözlemler, Sıfır Atık Projesi algısı, duyuru ve farkındalık çalışmaları, çevre kirliliği algısı ve kamusal hizmet yeterliliği şeklinde altı faktörü olan ölçeğin Barlett testi değeri $p<0,000$ iken Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) değeri 0,914 değerlendirilmiştir. Bulunan değerlerde Barlett

testi için p değeri 0,05'den küçük ise anket soruları arasında korelasyonun olduğunu, KMO ise 0,9'dan büyük ise soru gruplamanın (faktörlemenin) uygunluğunun yüksek olduğu anlamına gelmektedir. göz önünde bulundurulduğunda açımlayıcı faktör analizi bu ölçeğin uygulanabilirliğini göstermekte olup anket soru ve faktörleri arasında tutarlılık olduğunu belirtmektedir. Ölçülen güvenirlik katsayısının Cronbach's Alpha α=0,814 şeklinde olması, ölçeğin güvenilir olduğuna işaret etmektedir [47].

B. Cinsiyete Göre Dağılım

Faktörlerin cinsiyetler bazında anlamlı bir farklılık gösterip göstermediğini belirleyebilme amacıyla yapılan t-testinin neticeleri Tablo 4'te belirtilmiştir. Buna göre, Bursa ilinde ikamet eden ve ankete katılan katılımcıların cinsiyetlerine göre 6 temel faktör grubu ile yapılan veri karşılaştırmasında ilk faktör olan kişisel atık yönetimi davranışları faktörünün p değeri 0,009 ve sıfır atık projesi algısı faktörünün p değeri 0,093 olarak bulunmuştur. Atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri faktörünün p değeri 0,000, çevre kirliliği algısı faktörünün p değeri 0,000, duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterliliğine yönelik algısı faktörünün p değeri 0,013 ve son olarak kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentileri faktörünün p değeri 0,754 olarak bulunmuştur.

Tablo 4. Bireylerin cinsiyetini esas alarak yapılan t testi sonuçları.

Soru kategorileri	Cinsiyet	N	Ortalama	P değeri
Kişisel atık yönetimi davranışları	Erkek	165	2,84	0,009
	Kadın	364	3,15	
Sıfır atık projesi algısı	Erkek	165	2,41	0,093
	Kadın	364	2,62	
Atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri	Erkek	165	2,71	0,000
	Kadın	364	3,15	
Çevre kirliliği algısı	Erkek	165	3,24	0,000
	Kadın	364	3,77	
Duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterliliğine yönelik algısı	Erkek	165	2,61	0,013
	Kadın	364	2,87	
Kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentileri	Erkek	165	2,46	0,754
	Kadın	364	2,50	

Ankete katılan erkek ve kadınların kişisel atık yönetimine dair tutumlarında, atık yönetimine ilişkin çevresel gözlemlerinde, duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterli olup olmadığıyla ilgili görüşlerinde ve çevre kirliliği algılarında anlamlı bir farklılık bulunmaktadır. Sıfır Atık Projesi algısı ve kamusal hizmetin yeterli olup olmadığına dair görüşlerinde ise anlamlı bir farklılık gözlemlenmemektedir. Bu noktada kadınların, atıkların ayrı toplanmasını mümkün kılan fiziksel şartların daha yeterli olduğunu düşündükleri, atık yönetimi konusunda kişisel davranışlara daha çok önem verdikleri, çevre kirliliğini ciddi bir çevresel problem olarak gördükleri ve söz konusu kirliliğe karşı tedbir almada üzerlerine düşen mesuliyeti daha fazla hissettikleri söylenilmektedir.

C. Medeni Duruma Göre Dağılım

Faktörlerin ankete katılan bireylerin medeni durumlarına göre analizinde anlamlı bir farklılık bulunup bulunmadığını tespit edebilmek için uygulanan t-testi sonuçlarına Tablo 5'te de yer verilmektedir. Tabloya göre istatistiksel açıdan anlamlı bulunan soru kategorilerinde evli insanların ortalaması hep daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni ise evli insanların daha uzun süreli planlar yapma eğiliminde olmalarından veya evde yaşayan diğer insanların sağlığına da dikkat etmelerinden ve onların sağlıklı bir çevrede yaşamasını istemelerinden kaynaklanabilir. Evli insanlar genelde sorumluluk alma eğilimindedir ve evdeki atıkları düzgün bir şekilde yönetmek sorumluluğunu üstlenirler.

Tablo 5. Bireylerin medeni durumunu esas alarak yapılan t testi sonuçları.

Soru Kategorileri	Medeni durum	N	Ortalama	P değeri
Kişisel atık yönetimi davranışları	Bekar	353	2,91	0,000
	Evli	176	3,33	
Sıfır atık projesi algısı	Bekar	353	2,43	0,002
	Evli	176	2,81	
Atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri	Bekar	353	2,91	0,010
	Evli	176	3,23	
Çevre kirliliği algısı	Bekar	353	3,48	0,004
	Evli	176	3,85	
Duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterliliğine yönelik algısı	Bekar	353	2,75	0,292
	Evli	176	2,87	
Kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentileri	Bekar	353	2,51	0,482
	Evli	176	2,43	

Ankete katılan bireylerin medeni durumlarına göre yeterli oranda kamusal hizmetin olup olmadığına ve duyuru ve farkındalık çalışmalarına yönelik görüşlerinde anlamlı bir farklılık bulunmazken kişisel atık yönetimine dair eylemlerinde, Sıfır Atık Projesi hakkındaki algılarında, çevresel gözlemlerinde ve çevre kirliliği algılarında evlilerin bekarlara göre çok daha fazla ilgi gösterdikleri ve bu çalışmalara katıldıkları belirlenmiştir.

D. Yaş Düzeylerine Göre Dağılım

Bu bölümde Bursa ilinde ikamet eden ve yaş parametresine göre sınıflandırılan katılımcılar, 5 farklı grup altında toplandığından bu analizde 6 faktörün yaş dağılımına göre anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığı ANOVA testi uygulanarak belirlenmiştir.

Tablo 6'da 12-25 arası yaş grubu, 26-35 arası yaş grubu, 36-45 arası yaş grubu, 46-55 arası yaş grubu, 56+ yaş grubu olarak 5 grup halinde ele alınan yaş düzeylerine göre yapılan test ve analizlerin sonucu ayrıntılı bir şekilde listelenmiş ve tablosu verilmiştir.

Tablo 6'da belirtilen verilere göre 26-35 yaş aralığında Bursa ilinde ikamet eden katılımcıların kişisel atık yönetimi davranışları ile ilgili bölümün cevap ortalaması 3,08, sıfır atık projesi algısı ile ilgili bölümün cevap ortalaması 2,77 iken atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri ile ilgili bölümün cevap ortalaması 3,06 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, çevre kirliliği algısı ile ilgili bölümün cevap ortalaması 3,55, duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterliliğine yönelik algısı ile ilgili bölümün cevap ortalaması 2,79, kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentileri ile ilgili bölümün cevap ortalaması 2,61 olarak bulunmuştur.

Tablo 6. Yaş düzeyine göre dağılımı esas alan ANOVA testi sonuçları.

Soru kategorileri	Yaş	N	Ortalama	P değeri
Kişisel atık yönetimi davranışları	12-25	305	2,89	0,000
	26-35	118	3,08	
	36-45	75	3,39	
	46-55	22	3,25	
	56 +	9	3,80	
	toplam	529	3,03	
Sıfır atık projesi algısı	12-25	305	2,47	0,002
	26-35	118	2,77	
	36-45	75	2,88	
	46-55	22	2,81	
	56 +	9	3,55	
	toplam	529	2,63	
Atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri	12-25	305	2,89	0,013
	26-35	118	3,06	
	36-45	75	3,37	
	46-55	22	3,26	
	56 +	9	3,33	
	toplam	529	3,03	

Tablo 6. Devamı

Çevre kirliliği algısı	12-25	305	3,42	0,000
	26-35	118	3,55	
	36-45	75	3,93	
	46-55	22	4,11	
	56 +	9	4,66	
	toplam	529	3,57	
Duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterliliğine yönelik algısı	12-25	305	2,77	0,659
	26-35	118	2,79	
	36-45	75	2,84	
	46-55	22	3,09	
	56 +	9	3,00	
	toplam	529	2,80	
Kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentileri	12-25	305	2,55	0,844
	26-35	118	2,61	
	36-45	75	2,44	
	46-55	22	2,43	
	56 +	9	2,44	
	toplam	529	2,54	

Kişisel atık yönetimi konusunda ise 26-35 yaş aralığı ile 36-45 ve 56+ yaş aralıkları arasında anlamlı fark bulunmaktadır. Buna göre 36-45 yaş aralığı katılımcılar 26-35 yaş aralığı katılımcılardan daha fazla dikkat ederken 26-35 yaş aralığı katılımcılar 56+ yaş aralığı katılımcılardan daha fazla önem vermektedir. 36-45 yaş aralığı katılımcılar ise 12-25 yaş aralığındaki katılımcılardan daha fazla önem göstermezken 26-35 yaş aralığı katılımcılardan daha fazla önem göstermektedirler. 46-55 yaş aralığında bulunanlarla diğer yaş aralığında bulunanlar arasında fark gözlemlenmemektedir. 56+ yaş aralığındaki katılımcılar ile diğer yaş aralığındaki katılımcılar karşılaştırıldığında +56 yaş aralığındaki katılımcılar 12-25 yaş aralığındaki katılımcılardan ve 26-35 yaş aralığındaki katılımcılardan daha çok önem göstermektedirler.

Sıfır Atık Projesi algısı konusunda ise 12-25 yaş aralığındaki katılımcıların 26-35, 36-45 ve 56+ yaş aralığındaki katılımcılardan daha az bilgiye sahip oldukları görülmektedir. Öte yandan 12-25 yaş aralığında bulunan katılımcılarla 46-55 yaş aralığında bulunan katılımcılar arasında Sıfır Atık Projesi algısı konusunda belirgin ve anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 26-35 yaş aralığındaki katılımcılar 12-25 yaş aralığındaki katılımcılardan daha fazla önem gösterirken diğer yaş aralığı ile aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 36-45 yaş aralığındaki katılımcılar, 12-25 yaş aralığındaki katılımcılardan daha fazla önem gösterirken diğer yaş aralıkları ile anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 46-55 yaş aralığı ile diğer yaş aralıkları arasında bir fark bulunmamaktadır. 56+ yaş aralığındaki katılımcılar 12-25 yaş aralığındaki katılımcılardan daha fazla önem gösterirken diğer yaş grupları ile aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Atık yönetimine yönelik çevresel gözlemleri konusunda 12-25 yaş aralığındaki katılımcılar 36-45 yaş aralığından daha az önem verirken diğer yaş grupları ile aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Atık yönetimine yönelik çevresel faktörler konusunda 26-35 yaş aralığındaki katılımcılar ile diğer aralıklardaki katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Atık yönetimine yönelik çevresel faktörler konusunda 36-45 yaş aralığındaki katılımcılar 12-25 yaş aralığındaki katılımcılardan daha fazla önem gösterirken diğer yaş aralıkları ile aralarında anlamlı bir fark yoktur. 46-55 yaş aralığındaki katılımcılar ile diğer aralıklardaki katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 56+ yaş aralığındaki katılımcılar ile diğer aralıklardaki katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Çevre kirliliği algısı konusunda ise 12-25 yaş aralığındaki katılımcılar, 36-45, 46-55 ve 56+ yaş aralığındaki katılımcılardan daha az önem gösterirken 26-35 yaş aralığındaki katılımcılar ile aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 26-35 yaş aralığındaki katılımcılar 36-45 yaş aralığındaki katılımcılardan daha az önem gösterirken diğer yaş grupları ile aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 36-45 arasında bulunanlarla 46-55 ve 56+ bulunan katılımcılar arasında anlamlı bir fark bulunmazken 12-25 ve 26-35 yaş aralıklarından daha fazla önem göstermektedirler. 46-55 yaş aralığındaki katılımcılar 12-25 yaş aralığındakilere göre daha fazla önem gösterirken diğer yaş grupları ile aralarında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 56+ olan katılımcılar ile yaşları, 36-45 ve 46-55 aralığında bulunan katılımcılar arasında belirgin bir fark bulunmazken 12-25 ve 26-35 yaş aralığındaki katılımcılardan daha fazla önem göstermektedirler.

Katılımcıların yeterli oranda duyuru ve farkındalık çalışmaları yapılıp yapılmadığına yönelik algıları ve kamusal hizmetlerin yeterli olup olmadığına dair beklentileri ile yaş aralıklarının dağılımı arasında anlamlı istatiksel fark bulunmamıştır.

E. Eğitim Düzeyine Göre Dağılım

Bu bölümde katılan katılımcıların eğitim düzeylerine göre dağılımı ve aralarındaki farklılıklar 6 temel soru kategorisine göre analiz edilmiştir. İlkokul, ortaokul, lise, lisans ve lisansüstü şeklinde 5 farklı gruba ayrıştırılmış ve incelenmiştir. Beş farklı grup olduğu için analiz ederken ANOVA testi uygulanmıştır. Ankete ilköğretim grubundan 14 kişi, ortaöğretim grubundan 16 kişi, lise grubundan 73 kişi, üniversite grubundan 367 kişi, lisansüstü grubundan ise 59 kişi katılmış olup, toplamda 529 kişinin verileri Tablo 7'de belirtilmiştir.

Tabloya göre sıfır atık projesi algısı kısmının p değeri 0,022 bulunmuş olup sadece bu kısım istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur, diğer kısımların tümü p değeri 0,05'ten küçük bulunduğundan anlamlı bulunmamıştır. Temel 6 faktör grubunun ilkokul, ortaokul, lise, lisans ve lisansüstü eğitim durumlarına göre incelendiğinde sadece Sıfır Atık Projesi algısı faktörünün üzerinde eğitim durumunun etkisi ile oluşan fark saptanırken katılımcıların kişisel atık yönetimi davranışları, çevre kirliliği algıları, atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri, duyuru ve farkındalık çalışmalarının ve kamusal hizmetlerin yeterli olup olmadığına dair düşünceleri üzerinde Bursa ilinde bulunan ve ankete katılan katılımcıların eğitim durumları ile anlamlı herhangi bir fark bulunmadığı belirlenmiştir.

Tablo 7'de Bursa ilinde bulunan katılımcıların İlkokul, ortaokul, lise, lisans ve lisansüstü eğitim düzeylerinin esas alarak yapılan ANOVA testi sonuçları ayrıntılı şekilde verilmiştir. Sıfır Atık Projesi algısı konusunda ilkokul, lise öğrencileri arasında anlamlı fark gözlenmiştir, buna göre ilköğretim eğitim düzeyindeki katılımcılar lise eğitim düzeyindeki katılımcılardan sıfır atık projesi hakkında daha az bilgi sahibi oldukları gözlenmiştir. Ortaöğretim eğitim düzeyindeki katılımcılar ile ilköğretim, üniversite ve lisansüstü eğitim düzeylerindeki katılımcılardan sıfır atık projesi hakkında daha fazla bilgi ve bu projeye olan bilinç düzeylerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Tablo 7. Eğitim düzeyi parametresi esas alarak yapılan ANOVA testi sonuçları.

Soru Kategorileri	Eğitim durumu	N	Ortalama	P değeri
Kişisel atık yönetimi davranışları	İlköğretim	14	2,60	0,301
	Ortaöğretim	16	3,22	
	Lise	73	3,12	
	Üniversite	367	3,00	
	Lisansüstü	59	3,16	
	Toplam	529	3,03	
Sıfır atık projesi algısı	İlköğretim	14	2,01	0,022
	Ortaöğretim	16	3,31	
	Lise	73	2,80	
	Üniversite	367	2,58	
	Lisansüstü	59	2,66	
	Toplam	529	2,63	
Atık yönetimine dönük çevresel gözlemleri	İlköğretim	14	2,60	0,168
	Ortaöğretim	16	3,59	
	Lise	73	3,02	
	Üniversite	367	3,03	
	Lisansüstü	59	2,91	
	Toplam	529	3,02	
Çevre kirliliği algısı	İlköğretim	14	2,67	0,056
	Ortaöğretim	16	3,78	
	Lise	73	3,73	
	Üniversite	367	3,55	
	Lisansüstü	59	3,67	
	Toplam	529	3,57	
Duyuru ve farkındalık çalışmalarının yeterliliğine yönelik algısı	İlköğretim	14	2,45	0,310
	Ortaöğretim	16	2,60	
	Lise	73	2,73	
	Üniversite	367	2,86	
	Lisansüstü	59	2,68	
	Toplam	529	2,80	

Tablo 7. Devamı

Kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentileri	İlköğretim	14	2,03	0,412
	Ortaöğretim	16	2,37	
	Lise	73	2,52	
	Üniversite	367	2,58	
	Lisansüstü	59	2,49	
	Toplam	529	2.54	

F. Tartışma

Bursa ilinde uygulanan Sıfır atık yaklaşımının atık önleme hiyerarşisine uygunluğu ile alakalı olarak:

• Bursa ilinin çeşitli bölgelerinde geri dönüşebilen tüm atıklar için ayrı biriktirme ekipman ve kumbaraların alınmasına ve ayrıştırılmasına gösterilen özen,

• Gerek ambalaj atıkları gerekse de bitkisel atık yağlar, atık piller veya ömrünü tamamlamış lastiklerin ayrı olarak biriktirilmesi ve geri kazanımını sağlamak için anlaşmalı firmalara teslim edilmeleri konusunda gösterilen hassasiyet,

• Belediye çalışanlarına, ilkokul ve ortaokullardaki öğrencilere ve halka açık alanlarda verilen eğitim ve sıfır atık bilincinin yaygınlaştırılmasının sağlanması için düzenlenen projelerin uygulanması gibi konular göz önene alındığında uygun çalışmaların olduğu söylenebilir [47].

Bu çalışmanın alt amaçlarına göre elde edilen bulgular değerlendirildiğinde,

• İnsanların sıfır atık konusunda ortalama düzeyde bilinçli olduğu sonucuna varılabilir. Bazı faktörler (çevre kirliliği algısı) konusunda bilincin yüksek olduğu bazılarında ise düşük olduğu söylenebilir (kamusal hizmetlerin yeterliliğine yönelik beklentiler).

• Cinsiyet, medeni durum, yaş ve eğitim durumu gibi parametrelerde en öne çıkanları cinsiyet ve medeni durum parametrelerinin olduğu gözlenmiştir. Buna göre kadınlar v evliler sıfır atık bilinci konusunda erkekler ve bekarlara göre daha yüksek bilince sahip bulundukları saptanmıştır.

• Sıfır atık konusunda Bursa ili özelinde özellikle bekar ve erkek toplum katmanlarında bilinci arttırıcı faaliyetler düzenlenmesi önerilmektedir. Yaş parametresine bakıldığında da genç bireylerde Sıfır Atık farkındalığının arttırılmasının önemli olduğu görülmektedir.

Araştırma sonucunda elde edilen sonuçların sorulara herhangi bir parametreyi göz önünde bulunmaksızın verilen cevaplar kısaca özetlenecek olursa kişilerin, bitkisel atık yağları ayrı bir şekilde biriktirdikten sonra toplama noktalarına bırakmaya önem vermedikleri ortaya çıkmıştır. Öte yandan elektrikli ve elektronik eşyalardan oluşan atıkları toplama noktalarına götürmeye, kullanılmış olan pilleri, atık pil toplama noktalarına bırakmaya, tek kullanımlık pillerden ziyade şarjlı pilleri tercih etmeye, kimyasal veya tehlikeli maddeler ile ilaçların ambalajlarını ayrı toplamaya, evlerde biriken katı atıkları, Sıfır Atık Projesine uygun bir şekilde ayrıştırmaya ve esas kullanım gayesini kaybetmiş bir malzemeyi veya ürünü, imkanların elverdiği ölçüde geri dönüştürmeye kısmi oranda önem verdikleri anlaşılmıştır. Ayrıca elde edilen verilerde katılımcıların, çevre kirliliğinin önüne geçilmesine destek olabilmek için daha az atık üretmeye ve tekstil yahut giysi kaynaklı atıkları ilgili toplama noktalarına ulaştırmaya önem gösterdikleri görülmüştür.

Bu çalışmada atık elektrik ve elektronik eşyaları toplama noktalarına teslim etmek konusunda Bursa'daki katılımcıların %45,4 ünün yeteri kadar gereken önemi göstermediği saptanmıştır. Gül ve Yaman (2021) tarafından Ankara ilinde yapılan benzer bir çalışmada bu oranın %45,5 olduğunu ve bu oranlara bakılarak iki ilin arasında AEEE toplama noktalarına teslim etmede belirgin bir fark olmadığını anlayabiliriz [40]. Yine de elektronik atıkların toplanabilmesi için farkındalığın arttırılması gerekmektedir. Buna yönelik olarak da elektronik toplama faaliyetlerin arttırılması, buna yönelik belediyelerin kampanyalar düzenlemesi, çeşitli teşvikler ve mevzuat düzenlemeleri ile elektronik atık kazanımlarının arttırılması hedeflenmelidir.

Ayrıca, kullanılmış pilleri atık toplama noktalarına teslim etme konusunda ise Bursa'daki katılımcıların %46,3 oranında katılmadıkları görülürken tarafından Ankara ilinde yapılan çalışmada bu oran %29 olarak görülmüştür [40]. Bu oranlara göre ise atık piller konusunda Bursa'da yaşayan bireylerin yeteri kadar bilinçli olmadıkları Ankara'daki bireylerin Bursa'ya nazaran atık pilleri toplama noktalarına teslim etmek konusunda daha bilinçli oldukları söylenebilir.

Sıfır Atık Projesi hakkında halkın bilinçlendirilmesi de önem arz etmektedir. Halkın bilinçlendirilmesi yazılı ve görsel medyada yapılacak reklam faaliyetleri ve sosyal medyada belediyelerin ve ilgili bakanlıkların

yayınlayacağı bilgilendirici videolar aracılığıyla sağlanabilir. Ayrıca, eğitim kurumlarında Sıfır Atık kavramına yönelik dersler konulabilir veya seminer, konferans, çalıştay gibi organizasyonlar düzenlenebilir.

Sıfır Atık Projesi uygulandığında ekonomik faydalar da elde edilmiş olacaktır. Örnek olarak, geri dönüştürülebilen karton, plastik ve elektronik atıkların ekonomiye hammadde olarak geri kazanılması ekonomik bir katkı sağlanması şeklinde düşünülebilir. Aynı zamanda atıkların Sıfır Atık yaklaşımıyla bertaraf edilmemesi çevresel kirlilikleri oluşturacak, bu da zaman içerisinde ekonomik yük haline gelecektir. Bu nedenlerle Sıfır Atık Projesinin yaygınlaştırılması ekonomik yönden de fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Uluslararası birçok bilimsel yayın sıfır atık yaklaşımın gelişmiş veya gelişmekte ülkelerde eşitli faydalar sağladığını göstermiştir [48-50]. Song vd. (2015) sıfır atık yaklaşımının artan katı atık ile oluşacak çevresel kirliliğin azaltılmasındaki rolünün önemini vurgulamıştır [48]. Bilgili vd. (2023) Türkiye için döngüsel ekonomi ve Sıfır Atık Projesi yaklaşımının ilişkisini ortaya koymuştur [49]. Zaman (2022) çeşitli ölçeklerde ve bölgelerde sıfır atık uygulamalarından ve faydalarından bahsetmiştir [50].

IV. SONUÇLAR

Toplumun atıkları yönetim biçiminde geçmişe nazaran büyük değişiklikler olmuştur. Hem atık üretimi miktarları hem de geri dönüşüm oranları sürekli artmaktadır. Ancak 21. yüzyılın geri dönüşüm ekonomisini gerçeğe dönüştürmek için davranış değişikliği ve farkındalık yaratacak eğitim programlarına ihtiyaç vardır. Çünkü tüketicilerin atıkların değerli bir kaynak olduğu gerçeğinin farkında olmaları gerekir.

Bu nedenle, kaynakların verimli kullanımı ve atıklardan elde edilen kaynakların geri kazanımı küresel sürdürülebilirlik için hayati önem taşımaktadır. Atık yönetim sistemlerinin gelişiminin çeşitli sosyo-ekonomik ve çevresel etkili faktörlere bağlı olduğunu anlamak da önemlidir. Kendi yiyeceğini yetiştirebilen, kendi bölgelerinden su kullanabilen, kendi sistemlerinden enerji üretebilen, iş ve ekonomik faaliyetler yaratabilen, tüm sistemi verimli bir şekilde düzenleyebilen ve son olarak tüm kaynakları atık akışlarından geri kazanılabilen bir şehir gerçek bir sürdürülebilir ‘’Sıfır Atık Kenti” olabilir.

Bu çalışmada uygulanan anket sonucunda toplanan verilerin değerlendirilmesi ile medeni durum parametresine göre evlilerin bekar katılımcılara göre sıfır atık bilincinin daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Cinsiyet parametresine göre ise kadınların çevre bilinci ve kirliliğin önlenmesinde erkek katılımcılardan daha çok dikkat ettikleri gösterilmiştir. Katılımcıların eğitim durumu parametresine göre anket sonuçları ise sıfır atık ve kişisel atık yönetiminde ortaöğretim öğrencilerinin ilköğretim, üniversite ve lisansüstü eğitim düzeyindeki öğrencilere göre daha çok önemsedikleri lise eğitim düzeyindeki öğrencilerin ise ilköğretim düzeyindeki öğrencilerden daha çok önem verdikleri gösterilmiştir. Yaş parametresi baz alındığında ise 26-35 yaş aralığındaki katılımcıların sıfır atık ve çevresel atık bilincinin diğer yaş aralıklarına göre daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Bu çalışma ile Bursa ilinde yaşayan bireylerin Sıfır Atık Projesine yaklaşımı tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların değerlendirilerek karar vericilerin gerekli tedbirleri uygulayabilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, kentsel atık yönetimi bağlamında kent dinamiklerindeki karışıklıkların daha iyi anlaşılması için atılmış bir adımdır. İnsan davranış değişikliği, atıklardan korunma ve geri dönüşüm dahil olmak üzere farklı yönlerin karşılıklı ilişkilerinin daha iyi anlaşılması için kapsamlı araştırmalara hala ihtiyaç vardır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma bir Yüksek Lisans tez çalışmasından türetilmiştir. Tez çalışmasında katkısı olan tüm anket katılımcılarına teşekkür ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Imamura, M. (2017). Beyond the limitations of environmental education in Japan. *Educational Studies in Japan*, *11*, 3-14.Lai, C. S. (2018).

[2] A Study of Fifth Graders' Environmental Learning Outcomes in Taipei. *International Journal of Research in Education and Science*, *4*(1), 252-262.

[3] Chen-Yin, T., Huang, C. C., & Kawata, C. (2002). The effects of different environmental education programs on the environmental behavior of seventh-grade students and related factors. *Journal of Environmental Health*, *64*(7), 24.

[4] Wihardjo, S. D., Hartati, S., Nurani, Y., & Sujarwanta, A. (2017). The Effects of Green Schooling Knowledge Level and Intensity of Parental Guidance on the Environmental Awareness of the Early Age Student. *Educational Research and Reviews*, *12*(5), 251-257. M. Erdogan. The effect of summer

environmental education program (SEEP) on elementary school students' environmental literacy International J. Sci. Env. Ed. 10(2) 165-181, 2015.

[5] Erdogan, M. (2015). The Effect of Summer Environmental Education Program (SEEP) on Elementary School Students' Environmental Literacy. *International Journal of Environmental and Science Education*, *10*(2), 165-181.

[6] Uttara, S., Bhuvandas, N., & Aggarwal, V. (2012). Impacts of urbanization on environment. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, *2*(2), 1637-1645.

[7] Nieblas-Ortiz, E. C., Arcos-Vega, J. L., & Sevilla-García, J. J. (2017). The Construction of an Environmental Management Model Based on Sustainability Indicators on a Higher Education Institution in Mexico. *Higher Education Studies*, *7*(1), 15-22.

[8] Jinliang, W., Miaoyuan, Z., Xuejuan, T., Maoheng, H., Shen, X., Yinxia, G., & Jing, G. (2010). Opportunities and challenges for environmental education at Yunnan's institutions of higher learning. *Chinese Education & Society*, *43*(2), 82-93.

[9] Uyar, Y., & Ensar, F. (2016). Does Mother Tongue Education Support Development of Environmental Literacy in Turkey? An Analysis of Turkish Course Books. *International Journal of Environmental and Science Education*, *11*(1), 1-8.

[10] Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste management*, *33*(1), 220-232.

[11] Shu, S., Zhu, W., Wang, S., Ng, C. W. W., Chen, Y., & Chiu, A. C. F. (2018). Leachate breakthrough mechanism and key pollutant indicator of municipal solid waste landfill barrier systems: centrifuge and numerical modeling approach. *Science of the Total Environment*, *612*, 1123-1131.

[12] Koda, E., Osinski, P., Sieczka, A., & Wychowaniak, D. (2015). Areal distribution of ammonium contamination of soil-water environment in the vicinity of old municipal landfill site with vertical barrier. *Water*, *7*(6), 2656-2672.

[13] Ghosh, P., Gupta, A., & Thakur, I. S. (2015). Combined chemical and toxicological evaluation of leachate from municipal solid waste landfill sites of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*, 9148-9158.

[14] Cuartas, M., López, A., Pérez, F., & Lobo, A. (2018). Analysis of landfill design variables based on scientific computing. *Waste Management*, *71*, 287-300.

[15] Makarenko, N., & Budak, O. (2017). Waste management in Ukraine: Municipal solid waste landfills and their impact on rural areas. *Annals of Agrarian Science*, *15*(1), 80-87.

[16] Parker, J. (2011). *The 9 billion-people question: a special report on feeding the world*. Economist Newspaper.

[17] Jacobi, P. R., & Besen, G. R. (2011). Solid waste management in São Paulo: the challenges of sustainability. *estudos avançados*, *25*, 135-158.

[18] Chandrappa, R., & Das, D. B. (2012). *Solid waste management: Principles and practice*. Springer Science & Business Media.

[19] Works, C. K. (2007). How to develop a waste management and disposal strategy? *The Chartered Institute of Purchasing & Supply*, *44*, 1-27.

[20] Allen, C., Gokaldas, V., Larracas, A., Minot, L. A., Morin, M., Tangri, N., ... & Walker, B. (2012). On the road to Zero Waste: successes and lessons from around the world. *Global Anti-Incinerator Alliance (GAIA): Quezon City, Philippines*, 1-88.

[21] MacArthur, E. (2014, January). Towards the circular economy: Accelerating the scale-up across global supply chains. In *World Economic Forum*.

[22] Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Delivering the circular economy: A toolkit for policymakers*. Ellen MacArthur Foundation.

[23] Edjabou, M. E., Jensen, M. B., Götze, R., Pivnenko, K., Petersen, C., Scheutz, C., & Astrup, T. F. (2015). Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. *Waste Management*, *36*, 12-23.

[24] Murugaian, T. (2013). *Generation and composition of municipal solid waste in Muscat Sultanate of Oman from Al-Multaqaa landfill* (Doctoral dissertation, Sultan Qaboos University).

[25] Zaman, A. U. (2015). A comprehensive review of the development of zero waste management: lessons learned and guidelines. *Journal of Cleaner Production*, *91*, 12-25.

[26] Zaman, A. U., & Lehmann, S. (2011). Urban growth and waste management optimization towards 'zero waste city'. *City, Culture and Society*, *2*(4), 177-187.

[27] Pietzsch, N., Ribeiro, J. L. D., & de Medeiros, J. F. (2017). Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review. *Waste management*, *67*, 324-353.

[28] Palmer, P. (2004). *Getting to zero waste*. Purple Sky Press.

[29] Greyson, J. (2007). An economic instrument for zero waste, economic growth and sustainability. *Journal of Cleaner production*, *15*(13-14), 1382-1390.

[30] Sıfır Atık. (2022). *Sıfır atık.* https://www.sifiratik.gov.tr.

[31] Zero Waste. (2022). *Zero waste.* http://www.zerowaste.gov.tr.

[32] Atık Yönetimi Yönetmeliği. (2015). T.C. Resmi Gazete, 29314. http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm erişim tarihi 2 Nisan 2015.

[33] Evin, H., & Demiral, B. (2018). Malatya'da katı atık yönetimi: kentleşmenin yerel çevre politikaları üzerine etkisi. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, *7*(2), 277-295.

[34] TÜİK. (2022). *Atık İstatistikleri*. https://data.tuik.gov.tr.

[35] Büyükkol, M., & Bedük, F. (2020). Antalya'da faaliyet gösteren beş yıldızlı otel işletmelerinde "Sıfır Atık Projesi"nin uygulanabilirliği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *25*(1), 529-538.

[36] E. Erdur. (2019). *Türkiye'de Sıfır Atık Projesi ve projenin kamu kurumlarında uygulanması; Süleymanpaşa belediyesi örneği*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara

[37] K. Demir. (2019). *Adana ilinde Sıfır Atık Projesi'nin uygulanması*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir.

[38] R. Bilgin. (2020). *Niğde Belediyesi binasında sıfır atık uygulamaları*, Aksaray Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray,

[39] S. Karaman. (2019). *Kayseri şehir hastanesi örneği Sıfır Atık Projesi'nin geliştirilmesi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri,

[40] Gül, M., & Yaman, K. (2021). Türkiye'de atık yönetimi ve sıfır atık projesinin değerlendirilmesi: Ankara örneği. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, *35*(4), 1267-1296.

[41] BEKAYP. (2015) *Bursa Büyükşehir Belediyesi Bursa Entegre Katı Atık Yönetim Planı*. İSTAÇ İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret A.Ş.

[42] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2022). https://www.csb.gov.tr erişim tarihi 10.11.2022.

[43] E. Gözen. (2023). *Bursa Uludağ Üniversitesi'nde Katı Atık Karakterizasyonu ve Geri Dönüşüm Potansiyelinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.

[44] Olsen, C., & St George, D. M. M. (2004). Cross-sectional study design and data analysis. *College entrance examination board*, *26*(03), 2006.

[45] Haşıloğlu, S. B., Baran, T., & Aydın, O. (2015). Pazarlama araştırmalarındaki potansiyel problemlere yönelik bir araştırma: Kolayda örnekleme ve sıklık ifadeli ölçek maddeleri. *Pamukkale İşletme ve Bilişim Yönetimi Dergisi*, (1), 19-28. E. Mehdiyev. The University Student's Motivation Level on Learning English. European Journal of Social Science Education and Research, 3(3), 130-134, 2016.

[46] Mehdiyev, E., Uğurlu, C. T., & Usta, A. P. G. (2016). The university student's motivation level on learning English. *European Journal of Social Science Education and Research*, *3*(3), 130-134.

[47] Çelik, Y. (2016). SPSS ile İstatistik Biyoistatistik ve Modern Bilimsel Araştırma. İstanbul: Hünkar Ofset. Çevre ve şehircilik bakanliği, bursa çevre ve şehircilik il müdürlüğü, Bursa.

[48] Song, Q., Li, J., & Zeng, X. (2015). Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. Journal of Cleaner Production, 104, 199-210.

[49] Bilgili, M. S., Akkaya, E., Engin, G., & Demir, A. (2023). On the Way to Circular Economy: Türkiye's Waste Management and Zero Waste Project. In Circular Economy Adoption: Catalysing Decarbonisation Through Policy Instruments (pp. 161-195). Singapore: Springer Nature Singapore.

[50] Zaman, A. (2022). Zero-Waste: A New Sustainability Paradigm for Addressing the Global Waste Problem. In The Vision Zero Handbook: Theory, Technology and Management for a Zero Casualty Policy (pp. 1-24). Cham: Springer International Publishing.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 359-368, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1380719
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi – Research Article

Grey Relationship Analysis of Cutting Forces and Surface Roughness in Turning using Cryo-treated and Untreated Cutting Tools

Kriyojenik İşlem Uygulanmış ve Uygulanmamış Kesici Takımlar Kullanılarak Tornalamada Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğünün Gri İlişkiler Analizi

Şehmus Baday[1*], Hüseyin Gürbüz[2], Onur Ersöz[3]

Geliş / Received: 24/10/2023 ***Revize / Revised: 18/12/2023*** ***Kabul / Accepted: 26/12/2023***

ABSTRACT

The aim of this experimental study is to establish the optimum heat treatment procedure and machining parameters to obtain values of cutting force and surface roughness in machining AISI 1050 workpiece by utilizing grey relations analysis based on Taguchi method. In this regard, machining operations were carried out at three different cutting speeds and three different feed rates at a constant depth of cut. Taguchi mixed-level design L18 (2^2 3^2) was chosen for machining experiments. The optimum heat treatment and machining parameters for determination of cutting force and surface roughness values were identified according to the fact that higher the Signal/Noise ratio is better based on grey relations analysis of Taguchi method. The results showed that the optimum parameters for surface roughness and cutting forces were obtained as 0.1 mm/rev at feed rate and 180 m/min at cutting speed with cryo-treated cutting tool. According to ANOVA table and Signal/Noise ratios, it was specified that the most effective parameters on cutting forces and surface roughness were feed rate, cutting speed and heat treatment conditions, respectively.

Keywords: ***Surface Roughness, Cutting Forces, ANOVA, Grey Relations Analysis, Taguchi***

ÖZ

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmanın amacı, Taguchi Gri ilişkiler yöntemi kullanarak AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde etmek için optimum ısıl işlem şartlarını ve işleme parametrelerini belirlemektir. Bu doğrultuda tornalama işlemleri, sabit kesme derinliğinde üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneyleri için Taguchi L18 (2^2 3^2) karma seviyeli tasarım dizilimi seçilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değerleri için en ideal ısıl işlem ve işleme parametreleri Taguchi Gri ilişkiler yöntemine göre sinyal/gürültü oranı en büyük en iyidir yaklaşımı ile tespit edilmiştir. Sonuçlar yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri için optimum parametrelerin kriyojenik ısıl işlem uygulanmış kesici takım ile, ilerleme değerinin 0,1 mm/dev ve kesme hızının 180 m/dak olduğu durumda

[1]*Corresponding author contact: sehmus.baday@batman.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-4208-8779)
Mechanical Program, Beşiri Organized Industrial Zone Vocational School, Batman University, Batman, Türkiye
[2]Contact: huseyin.gurbuz@batman.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-1391-172X)
Mechanical Engineering, Batman University, Batman, Türkiye
[3]Contact: ersozonur@gmail.com (https://orcid.org/ 0000-0002-9792-2268)
Mechanical Engineering, Batman University, Batman, Türkiye

elde edildiğini göstermiştir. ANOVA tablosu ve sinyal/gürültü oranlarına göre, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla ilerleme, kesme hızı ve ısıl işlem şartı olduğu tespit edilmiştir.

***Anahtar Kelimeler**: Yüzey pürüzlülüğü, Kesme Kuvvetleri, ANOVA, Gri ilişkiler Analizi, Taguchi*

I. INTRODUCTION

In recent years, cryogenic heat treatment, which has an important place especially in the field of manufacturing, has been used more widely every passing day. In particular, the cryogenically heat treatment, applied to cutting tools, gives the cutting tools many features such as wear resistance, strength and toughness. Thanks to these features, workpieces can be machined more easily with these cutting tools. Cryogenic heat treatment makes significant contributions to the quality of surface properties, reduction in cutting forces (Fc) and tool wear. Fc and surface roughness (Ra) obtained during turning process of workpiece are important in terms of both cost and machining time. In machining process, values of the Fc and the Ra that occur depending on the machining conditions are desired to be low as much as possible. Therefore, in recent years, many statistical tools have been used to interpret experimental results obtained in the field of machining. One of these statistical tools is Grey Relations Analysis (GRA) based on Taguchi design, by which appropriate machining parameters can be established to acquire the desired low values of the Fc and the Ra, especially in metal cutting.

Mia et al. optimized the interaction parameters of the tool-chip by using GRA. According to the results of the GRA, authors obtained that cutting speed and then feed rate were the most effective parameters on the experimental results [1]. Debnath et al. investigated the effects of cutting parameters and cutting fluid conditions, which are control factors, on Ra and tool wear, which are the responses, in the machining, by using the Taguchi design. Authors revealed that the most suitable machining conditions for the desired Ra and tool wear are medium depth of cutting, high cutting speed, low feed and low cutting fluid flow during high-speed cutting [2]. Lin revealed the impact of cutting parameters on tool life, Fc and Ra via using GRA and Taguchi method. Using the GRA, the author identified feed rate, depth of cut, and cutting speed are the most effective parameters based on results of the experiments [3]. Rao et al. investigated the Ra values being derived from turning of AA7075 workpiece depending on the cutting parameters by utilizing Taguchi L9 orthogonal array and ANOVA (Analysis of Variance). According to Taguchi results, authors found that the most important cutting parameters effective on the Ra were cutting speed and feed rate; and they achieved low Ra when optimal combination of machining parameters was selected as 0.2 mm/rev feed, 0.5 mm depth of cut and 1000 m/min cutting speed [4]. Çetin et al. applied ANOVA, regression and S/N ratio to identify the impact of machining conditions on Ra and Fc during machining of AISI 304L workpiece. They revealed that the experimental values, obtained for Ra and Fc and the values of the regression mathematical models were very close to each other. Authors also found that feed rate and depth cutting were effective on reducing Fc and improving Ra [5]. Salvi et al. analyzed the Ra values obtained in hard turning process by using the Taguchi orthogonal design. The authors observed that feed rate was more effective than cutting speed to achieve low Ra [6].Zerti et al. researched an experimental and statistical study using GRA to determine the effect of turning parameters on the Ra and productivity results obtained as a result of machining AISI D3 steel with ceramic inserts. In conclusion, authors established that cutting speed and depth of cut were the most influential machining parameters on the results of experiment (surface quality and productivity) [7]. Uzun used GRA to define the relationships between Ra, tool wear and Fc values. He applied austempering process to workpiece subjected to three different holding times and two different temperatures. According to the GRA, he achieved the conditions that gave the highest cutting performance at 375°C with a holding time of 120 minutes [8]. Bhattacharya et al. predicted the impact of machining parameters on power consumption and Ra during high-speed turning of AISI 1045 steel by using Taguchi method and ANOVA. The authors found that the cutting speed has a more significant effect than the other cutting parameters on power consumption and Ra values [9]. Tzeng et al. optimized the cutting parameters utilized in turning by using Taguchi and GRA. Consequently, authors found that the depth of cutting was the most effective parameter on Ra. Additionally; they determined the effect of the parameters on the experimental results using ANOVA [10]. Nalbant et al. conducted a study revealing the effect of optimum cutting parameters on Ra using ANOVA and Taguchi method. The authors revealed that the control factors such as cutting tool nose radius, feed rate and depth of cut have the most meaningful effect on the response parameter Ra, respectively. The percentage contributions of insert radius, feed rate and depth of cut are 48.54, 46.95 and 3.39, respectively. [11]. Günay et al. utilized Taguchi L18 to define the optimum Ra in turning workpieces has two different hardness. They found that the feed rate has an effect on the Ra values obtained from the 50 HRc workpiece surface, while the cutting speed has an effect on the Ra values obtained from the 62 HRc workpiece surface [12]. Sarıkaya and Güllü investigated the cutting parameters by utilizing GRA based on Taguchi in machining Haynes 25 specimen. According to multiple optimization results, the optimum control parameters were specified as fluid flow rate 180 m/min, cutting speed 30 m/min and cutting fluid vegetable oil [13]. Ramesh et al. used the GRA to identify the impact of turning parameters on cutting insert temperature in turning. In the light of their analysis results, authors defined that the low tool insert temperature engenders low tool insert wear

[14]. Alaba et al. examined the effect of MQL and vegetable oil on turning AISI 1039 steel using Taguchi-grey relational analysis. In their study, authors found that they improved the surface roughness by 44% and the cutting temperature by 12%. According to the grey relations analysis results, they found that the most effective parameter in terms of cutting parameters was the feed rate [15].

As a result of reviewing the literature, various statistical and experimental studies based on experimental design methods and analyses have been conducted to reveal the impacts of machining and cutting parameters on experimental results emerging from the machining of workpieces [1-15]. However, unlike the literature, no study has been found that examines the effects of heat treatment conditions and machining parameters on the Fc and Ra values resulting from turning with cryo-treated and untreated cutting tools using Taguchi GRA. The cryogenic process applied to cutting tools helps the workpieces be processed more easily by giving them properties such as wear resistance and toughness. When we look at the literature, AISI 1050 steel is widely used in many areas. For this reason, machining such a material with a cryogenically treated cutting tool will be faster and more efficient in terms of both time and cost. With this statistical and experimental study, it is aimed to reveal the parameters affecting the Fc and Ra values when machining workpiece materials in CNC lathe operations.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Workpiece Material

AISI 1050 steel is a medium carbon steel that includes about 0.5% carbon and is often utilized in a wide range of applications due to its good machinability and combination of mechanical characteristics. Microstructure of this material, it consists of a fine lamellar perlitic structure that has 20 µm average column length in the primer ferritic matrix. Because of the lamellar cementite phases AISI 1050 contain, the formability and machinability of medium and high carbon steels are quite difficult, and they raise the cost. So, their fatigue, impact toughness, ductility and machining behavior can importantly be improved with spheroidizing heat treatment which is conducted with long-time annealing about at eutectoid transformation temperatures. In the experiments, AISI 1050 steel, which is widely used in general use and is often utilized in the production of machine components, was utilized as the workpiece material. The dimensions of the workpiece were prepared as 60 mm in diameter and 300 mm in length. The workpiece was longitudinally turned at a depth of cutting of 1.5 mm to eliminate surface defects arising from the manufacturing phase. At the end of this process, the workpieces were made ready for experiments.

B. Cutting Tools and Tool Holder

Turning experiments were performed by a CNC lathe by using a CVD coated WC-Co insert with the ISO-1832 code WNMG and a chip breaker form MP, which is recommended for the processing of medium carbon steels. This insert is a cutting tool suitable for medium cutting for stainless and carbon steels. PWLNR 2525M08 tool holder and WNMG inserts were used in machining experiments. The cutting insert was chosen as CVD coated carbide (TiCN + Al_2O_3 + TiN). The properties of cutting tool geometry are represented as follow: clearance angle: 0^0, corner radius: 0.8 mm, rake angle: 7^0, approach angle: 95^0, side cutting edge angle: 5^0. The picture of this cutting insert is given in Figure 1.

Figure 1. WNMG insert utilized in the experiments

C. Identifying Cutting Parameters and Machining Experiments

For machining experiments, the AISI 1050 workpieces supplied with a diameter of 60 mm were reduced to 57 mm in diameter to clean the outer surface. Then, after their faces were machined and tailstock holes were formed, the workpiece became ready for processing. The machining parameters utilized in the cutting experiments were determined by taking into account the recommendations of the cutting tool manufacturer and ISO 3685 requirements. Accordingly, machining parameters in turning experiments were determined as given in Table 1.

Table 1. Machining parameters used in cutting experiments

Feed rate (mm/rev)	0.1, 0.2, 0.3
Cutting Speed, V (m/min)	180, 200, 220
Depth of cutting, a (mm)	2

D. Measurement of Ra and Fc

According to the specified machining conditions, Ra value of the surfaces after machining tests was measured with the portable "Hommel T500 Tester" device. Ra values were estimated by taking the arithmetic mean of the values taken from three separate measurements performed 4.8 mm long from the workpiece surface. The cutting force (Fc) acting on the tool during machining experiments were measured using a KISTLER 5070 dynamometer.

E. Cryogenic Heat Treatment

In the light of the literature research, it has been understood that the cryogenic heat treatment applied to cutting inserts is generally subjected to a period of 24 hours [16, 17]. Therefore, deep cryogenic heat treatment was applied to the CVD-coated cutting insert used for turning experiments at -146 °C. The schematic stages of this cryogenic process are given in Figure 2. It is seen that the cutting tools were placed in the heat treatment furnace and the furnace temperature was gradually reduced to -146 °C under computer control. Then, the cutting tools were kept in the oven at -146 °C for twenty-four hours. Finally, the cutting tools in the oven were gradually brought back to room temperature. The final phase change of the cutting tools was completed by tempering heat treatment twice by increasing the room temperature furnace to 200 °C.

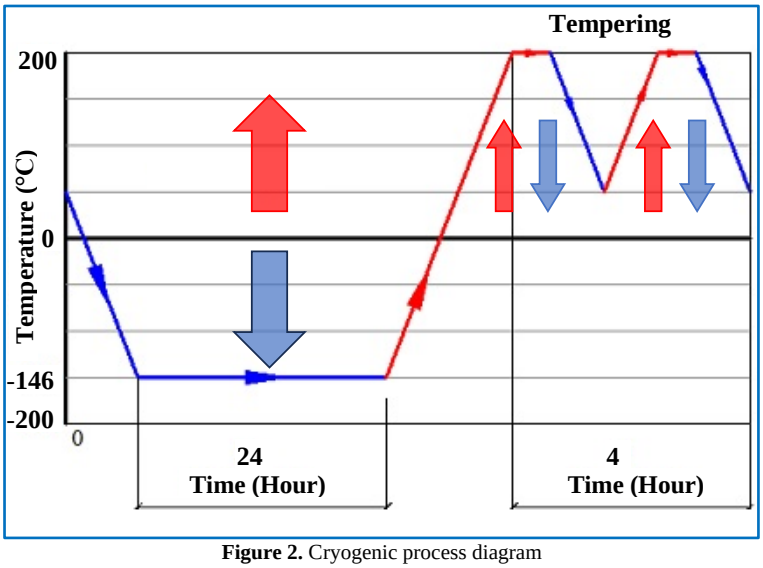


Figure 2. Cryogenic process diagram

F. Grey Relations Analysis

In this experimental study, GRA based on Taguchi was utilized to optimize the effects of heat treatment type and machining parameters on Ra and Fc values. In grey relationships, the first step to normalize the values is to convert the values to values in the range of zero and one. In this method, the most important thing in normalizing the factors affecting the results is the chosen approach. At this stage, if small impact factor values are a desired feature, the values close to "0" are chosen, while the values close to "1" are selected for large values in normalization [18,19].

The Ra and Fc values obtained in the turning process with cryo-treated and untreated cutting tools were normalized between zero-one (0-1). Three different approaches can be used to normalize the values attained as a result of the experiments:
If “Lowest is best”, the test results are normalized as follows:

$$y_i(k) = \frac{maxx_i^0(k) - x_i^0(k)}{maxx_i^0(k) - minx_i^0(k)} \tag{1}$$

Where, $y_i(k)$, $minx_i^0(k)$, $maxx_i^0(k)$ and $x_i^0(k)$ correspond to the GRA, minimum values, maximum values and normalization values, respectively. In the GRA, while defining GRA degree, the relation degree of 18 series (y0 (k) ve yi (k), i=1, 2, 3, ….28; k=1,2) is defined. The GRA coefficient ξi (k) is determined by using following equations:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} - \partial\Delta_{max}}{\Delta_{oi}(k) - \partial\Delta_{max}} \tag{2}$$

$$\Delta_{oi}(k) = \|y_o(k) - y_i(k)\| \tag{3}$$

$$\Delta_{max} = max_{\forall j \in i}\, max_{\forall k}\, \|y_o(k) - y_i(k)\| \tag{4}$$

$$\Delta_{min} = min_{\forall j \in i}\, min_{\forall k}\, \|y_o(k) - y_i(k)\| \tag{5}$$

In the equations 2-5, $\partial =$ discrimination coefficient (0-1), $\partial = 0.5$ is generally taken in the literature, $\Delta_{oi}(k)$ the absolute deviation value between $y_o(k)$ and $y_i(k)$ and [17, 18]. $\Delta_{\max}$, is the maximum value of Δ_{oi}values, and Δ_{min} is the minimum value. GRA degree (ϒi) is attained by averaging the GRA formation coefficients and this degree can be found by using following equation:

$$\Upsilon_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \xi_i(k) \tag{6}$$

In Equation 6, the symbol n represents the GRA coefficient attained from normalized response values. A high degree of GRA occurrence shows a strong connection between $y_i(k)$ and $y_o(k)$. When two series with the same values are compared, the GRA degree becomes 1.

G. Taguchi Signal/Noise (S/N) Ratio

Taguchi method S/N ratio has been utilized by many researchers in the analysis of data that obtained from experimental [1, 7, 14, 20]. In Taguchi design, the desired value for the output characteristic is called Signal (S), and the undesirable value for the output characteristic is called Noise (N). In this study, the S/N ratio equation was used according to the “larger is better” approach in the Taguchi L18 (2^2 3^2) mixed array. Because the higher the analysis degree of grey relationships (closer to 1) indicates that the relationship is better. Therefore, experimental results were evaluated according to the “larger is better” approach. In the analysis of experimental values, 3 types of S/N ratio formulas were used in Taguchi design: “nominal is better” (Equation 7), “smaller is better” (Equation 8) and “larger is better” (Equation 9). These formulas are given below:

$$S/N = 10\log\left(\frac{\overline{y}^2}{s^2}\right) \tag{7}$$

$$S/N = -10log\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \tag{8}$$

$$S/N = -10log\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \tag{9}$$

In Equation 9, $\overline{y}$; where yi represents the calculated values for Fc and Ra, while n and s represent the number of experiments performed and the standard deviation of the response values, respectively.

H. ANOVA

In ANOVA, which is a statistical method, there are two types of variables: control factors and response results. The aim of ANOVA is to find out which control factors are affective on the response values. The significant of control factors in an ANOVA table is defined by the P value of each control factor. If P value is less than 0.05, it is considered "statistically meaningful" in scientific parlance. Additionally, it reveals how affective each control factors indicated in the ANOVA table is on the response value of PCR value. An ANOVA table contains percentage contribution ratios (PCR), statistics (F), degrees of freedom (DF), sum of squares (SD), mean of squares (MS), and P values demonstrating the level of significance of each control factor on the response [21-23].

III. STATISTICAL ANALYSIS AND DISCUSSION

A. Grey Relation Analysis

Taguchi mixed array, representing the turning results attained based on values of the Ra and Fc obtained from the machined workpieces at a constant depth of cutting, with 3 different cutting speeds and feeds, was designed as L18 (2^2 3^2). The Taguchi mixed array corresponding to the experimental sequence performed according to L18 experimental setup and the responses are given in Table 2. When the control factor and response values in Table 2 are analyzed, it is seen that responses such as Ra and Fc values change according to the change in control factors such as heat treatment type and cutting parameter. The heat treatment type numbers in Table 2 indicate "cryo-treated cutting insert" with number 1 and "untreated cutting tool" with number 2. In determining GRA based on Taguchi for responses such as Ra and Fc, the average grey relational degree was calculated for that parameter after the same level values were collected and averaged. For the second levels, this process is repeated to create a response table for the Grey relational degrees. The calculated grey relations degree and ranking of measurement results of the Fc and the Ra, their normalized values and the absolute deviation values obtained are shown in Table 3.

Table 2. Taguchi L18 (2^2 3^2) mixed array, Ra and Fc values

Experiment No	Heat Treatment Type	Cutting Speed	Feed	Fc, Fc	Ra, Ra
1	1	180	0.1	599	0.517
2	1	180	0.2	948	0.967
3	1	180	0.3	1306	1.058
4	1	200	0.1	588	0.563
5	1	200	0.2	933	1.077
6	1	200	0.3	1280	1.123
7	1	220	0.1	577	0.653
8	1	220	0.2	926	1.16
9	1	220	0.3	1255	1.2
10	2	180	0.1	588	0.548
11	2	180	0.2	935	1.057
12	2	180	0.3	1289	1.15
13	2	200	0.1	576	0.62
14	2	200	0.2	925	1.11
15	2	200	0.3	1277	1.257
16	2	220	0.1	566	0.737
17	2	220	0.2	910	1.28
18	2	220	0.3	1247	1.333

For each experiment performed, GRA coefficients and GRA degrees were calculated with these coefficients. While estimating the coefficients, the discriminant coefficient was taken as ∂=0.5 [17, 18]. The GRA coefficient given in Table 3, with a value of 1, shows the highest relationship between Ra and Fc values. When Table 3 is examined, it is understood that experiment no one (1) is the highest value among the GRA degrees. It can be understood from Table 3 that this type of heat treatment has cryo-treated, feed rate 0.1 mm/rev and cutting speed 180 m/min values.

Table 3. Rankings for L18 mixed array, calculated Grey relational coefficient, normalized values and Grey relational degree

Experiment No	Normalized Values		Grey Relational Coefficient		Grey Relational Degree	Ranking
	Fc	Ra	Fc	Ra		
1	**0.9554**	**1.0000**	**0.9181**	**1.0000**	**0.959**	**1**
2	0.4838	0.4485	0.4920	0.4755	0.484	7
3	0.0000	0.3370	0.3333	0.4299	0.382	13
4	0.9703	0.9436	0.9439	0.8987	0.921	3
5	0.5041	0.3137	0.5020	0.4215	0.462	9
6	0.0351	0.2574	0.3413	0.4024	0.372	14
7	0.9851	0.8333	0.9711	0.7500	0.861	5

8	0.5135	0.2120	0.5068	0.3882	0.448	11
9	0.0689	0.1630	0.3494	0.3740	0.362	16
10	0.9703	0.9620	0.9439	0.9294	0.937	2
11	0.5014	0.3382	0.5007	0.4304	0.466	8
12	0.0230	0.2243	0.3385	0.3919	0.365	15
13	0.9865	0.8738	0.9737	0.7984	0.886	4
14	0.5149	0.2733	0.5075	0.4076	0.458	10
15	0.0392	0.0931	0.3423	0.3554	0.349	17
16	1.0000	0.7304	1.0000	0.6497	0.825	6
17	0.5351	0.0650	0.5182	0.3484	0.433	12
18	**0.0797**	**0.0000**	**0.3520**	**0.3333**	**0.343**	**18**

B. Results of S/N Ratio

In this experimental study, the effects of machining parameters such as cutting speeds and feed rate on responses such as Ra and Fc which obtained the cryo-treated and untreated cutting insert were optimized with the GRA based on Taguchi. The experiments were performed according to Taguchi L18 (2^2 3^2) mixed array and the control factors were taken as heat treatment type (cryo-treated and untreated) and cutting speeds (180, 200 and 220 m/min) and feed (0.1, 0.2 and 0.3 mm/rev). The heat treatment type was determined as two levels, the cutting speed and feed rate were determined as three levels, and the response values were determined as Ra and Fc values. Response values were optimized S/N ratio values GRA based on Taguchi. With the rankings attained as a result of grey relations, the effects of heat treatment type, cutting speed and feed rate on Ra and Fc values were investigated, depending on S/N ratio. The control factors such as heat treatment type, cutting speed and feed rate and their levels utilized in the turning experiments are indicated in Table 4.

Table 4. Control factors and their levels

Control Factors	Factors Levels		
	Level 1	Level 2	Level 3
Heat Treatment Type	1 (Cryo-treated)	2 (Untreated)	
Cutting Speed, m/min	180	200	220
Feed rate, mm/rev	0.1	0.2	0.3

The graph obtained according to responses values calculated by S/N ratios and GRA based on Taguchi and showing the effects of their interrelationships on values of the Ra and Fc according to heat treatment type and machining parameters are given in Figure 3.

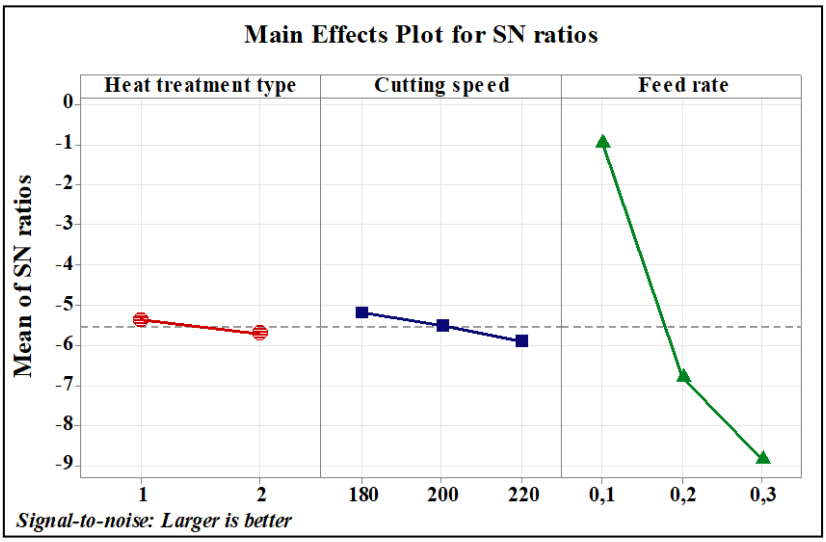


Figure 3. Signal noise (S/N) ratio main effect graph for responses

Looking at the average of S/N ratios graph in Figure 3, the optimum machining parameters for values of Ra and Fc were obtained as heat treatment type cryo-treated cutting insert, cutting speed 180 m/min and feed rate

0.1 mm/rev. S/N ratio values calculated according to GRA based on Taguchi L18 mixed array are presented in Table 5. When Table 5 is analyzed, according to S/N ratios, it has been defined that the heat treatment type, cutting speed and feed values are at the first level among all control factors, making responses such as Ra and Fc values optimum.

Table 5. S/N ratios calculated according to grey relations degree

Level	Heat Treatment Type	Ra	Fc
1	**-5.3528**	**-5.1660**	**-0.9453**
2	-5.6874	-5.5009	-6.7831
3		-5.8933	-8.8320
Delta	0.3345	0.7274	7.8867
Ranking	3	2	1

In other words, the delta value represents the effect of the control factors on the responses. In other words, the delta value shows heat treatment type, cutting speed and feed rate on responses such as Ra and Fc. Here, both the "Delta" value and the ranking in Table 5 show that feed rate is the most effective control factor on responses. When ranking values in Table 5 are looked into, it can be seen that feed rate, cutting speed and heat treatment type are effective on responses, respectively. From the results given for the control factor values in Figure 3 and Table 5, it is understood that the optimum responses (Ra and Fc) occur with a cryo-treated cutting tool, cutting speed of 180 m/min and feed rate of 0.1 mm/rev. As a result, according to S/N ratios calculated by GRA based on Taguchi design, the feed rate is determined to be the most significant and effective factor on Ra and Fc values.

C. Results of ANOVA

Statistically tool that indicates the effect of control factors such as heat treatment, cutting speed and feed rate on response values such as Ra and Fc is ANOVA results. In the assessment of ANOVA results, according to the GRA, the response values are the Ra and Fc results, while the control factors are heat treatment type, cutting speed and feed. ANOVA results based on GRA and S/N ratio values are given in Table 6.

Table 6. ANOVA values for S/N ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Importance
Heat treatment type	1	0.001972	0.001972	0.001972	5.20	0.042	**Significant**
Cutting speed	2	0.008628	0.008628	0.004314	11.38	0.002	**Significant**
Feed rate	2	0.980206	0.980206	0.490103	1292.30	0.000	**Significant**
Residual error	12	0.004551	0.004551	0.000379			
Total	17	1260.2					

In statistically analyses, whether the value of control parameter is statistically meaningful or not can be stated with "P" value. If "P" control factor value is less than 0.05, it is meaningful; if it is greater, it is not meaningful [21-23]. When "P" control factors in Table 6 are analyzed to display the effect of control factors on the response values, it is concluded that the heat treatment type, cutting speed and feed (0.042-0.002 and 0.000 <0.05) were statistically significant. Additionally, the effect of control factors such as heat treatment, cutting speed and feed rate on the response values such as Fc and Ra can be evaluated by looking at "F" value in Table 6. Here, a large "F" value means that the importance value on the response values of the control factors is high. In this direction, it has been comprehended that the most effective parameter on responses (Fc and Ra) are feed rate.

IV. CONCLUSION

In this study, response; the Fc and Ra values which attained in turning AISI 1050 steel with cryo-treated and untreated cutting tools at a constant depth of cutting, with three different feed rates and cutting speeds, were optimized with GRA based on Taguchi. The results obtained from the analysis of GRA based on Taguchi are given below:

- According to S/N ratio values calculated by GRA based on Taguchi, it was defined that feed rate, one of the cutting parameters, is the most effective factor on response values (Ra and Fc).
- Depending on Taguchi-based grey relations ranking and S/N ratios, it was seen that feed rate, cutting speed and heat treatment type were the factors affecting the Fc and Ra values, respectively.

- According to the grey relations ranking and S/N ratios, the heat treatment type cryo-treated, which optimizes response values (Ra and Fc), was obtained at a cutting speed of 180 m/min and a feed rate of 0.1 mm/rev.
- According to the grey relations ranking, the best conditions in the ranking of Ra and Fc values were realized in experiment number one, while the worst conditions were realized in experiment number eighteen. In other words, the best machining conditions are achieved with cryo-treated cutting tool, the cutting speed is 180 m/min and the feed rate is 0.1 mm/rev, while the worst machining conditions are achieved with untreated cutting tool, the cutting speed is 180 m/min and the feed rate is 0.3 mm/rev.
- The results of statistical obtained from experimental data and GRA based on Taguchi design have shown that it is an analysis and experimental design that can be successfully applied in machining operations such as turning.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Batman University Scientific Research Projects Unit (BTUBAP), project no BTÜBAP-2019-YL-07. Many thanks to BTUBAP for financial support.

REFERENCES

[1] Mia, M., Rifat, A., Tanvir, M. F., Gupta, M. K., Hossain, M. J., & Goswami, A. (2018). Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning. *Measurement*, 129, 156-166.

[2] Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2016). Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. *Measurement*, 78, 111-119.

[3] Lin, C. L. (2004). Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. Materials and manufacturing processes, 19(2), 209-220.

[4] Rao, C. M., Venkatasubbaiah, K., Babu, S. P., & Srinivas, C. (2016). Optimization of surface roughness in CNC turning using Taguchi method and ANOVA. *International Journal*, 93, 1-14.

[5] Cetin, M. H., Ozcelik, B., Kuram, E., & Demirbas, E. (2011). Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 2049-2056.

[6] Salvi, S. B., Deshmukh, R. R., & Deshmukh, S. D. (2013). Analysis of surface roughness in hard turning by using Taguchi method. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(02), 365-370.

[7] Zerti, O., Yallese, M., Zerti, A., Belhadi, S., & Girardin, F. (2018). Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/mixed ceramic tool (Al2O3+ TiC)). International Journal of Industrial Engineering Computations, 9(2), 173-194.

[8] Uzun, G. (2019). Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons. *Measurement*, 142, 122-130.

[9] Bhattacharya, A., Das, S., Majumder, P., Batish, A. (2009). Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA. *Production Engineering*, 3(1), 31-40.

[10] Tzeng, C. J., Lin, Y. H., Yang, Y. K., & Jeng, M. C. (2009). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of materials processing technology*, 209(6), 2753-2759.

[11] Nalbant, M., Gökkaya, H., & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Materials & design*, 28(4), 1379-1385.

[12] Günay, M., & Yücel, E. (2013). Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. *Measurement*, 46(2), 913-919.

[13] Sarıkaya, M., & Güllü, A. (2015). Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25. *Journal of Cleaner Production*, 91, 347-357.

[14] Ramesh, K., Baranitharan, P., & Sakthivel, R. (2019). Investigation of the stability on boring tool attached with double impact dampers using Taguchi based Grey analysis and cutting tool temperature investigation through FLUKE-Thermal imager. *Measurement*, 131, 143-155.

[15] Alaba, E.S., Kazeem, R.A., Adebayo, A.S., Petinrin, M.O., Ikumapayi, O.M., Jen, T.C., & Akinlabi, E.T. (2023). Evaluation of palm kernel oil as cutting lubricant in turning AISI 1039 steel using Taguchi-grey relational analysis optimization technique. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 6, 100115.

[16] A.D. Shirbhate, N.V. Deshpande, and Y.M. Puri, (2012). Effect of cryogenic treatment on cutting torque and surface finish in drilling operation with AISI M2 high speed steel. *Int. J. Mech. Eng. Rob. Res*, 1(2), 50-58.

[17] N.A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, and O Özbek, (2014). Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 86, 34-43.
[18] Acır, A., Canlı, M. E., Ata, İ., & Çakıroğlu, R. (2017). Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis. *Applied Thermal Engineering*, *122*, 330-338.
[19] Palanikumar, K. (2011). Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites. *Measurement*, *44*(10), 2138-2148.
[20] Bagaber, S. A.,Yusoff, A. R. (2017). Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316. *Journal of cleaner production*, 157, 30-46.
[21] Gürbüz, H., Gönülaçar, Y. E., & Baday, Ş. (2020). Effect of MQL flow rate on machinability of AISI 4140 steel. *Machining Science and Technology*, 24(5), 663-687.
[22] Kuntoğlu, M., Sağlam, H. (2019), "Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning," *Measurement*, 140, pp 427–436.
[23] Camposeco-Negrete, C. (2013), "Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA," *Journal of Cleaner Production*, 53, 195–203.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 369-384, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1381786
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Interactive Use of Deep Learning and Ethereum Blockchain for the Security of IIoT Sensor Data

IIoT Sensör Verilerinin Güvenliği için Derin Öğrenme ve Ethereum Blok Zinciri'nin İnteraktif Kullanımı

Emrullah Şahin[1*], Naciye Nur Arslan[2], Fırat Aydemir[3]

Geliş / Received: 27/10/2023 ***Revize / Revised: 30/12/2023*** ***Kabul / Accepted: 03/01/2024***

ABSTRACT

The Industrial Internet of Things (IIoT) refers to a structure where multiple devices and sensors communicate with each other over a network. As the number of internet-connected devices increases, so does the number of attacks on these devices. Therefore, it has become important to secure the data and prevent potential threats to the data in factories or workplaces. In this study, a deep learning-based architecture was used to determine whether the data collected from IIoT sensors was under attack by looking at network traffic. The data that was not exposed to attacks was stored on the Ethereum Blockchain network. The Ethereum blockchain network ensured that sensor data was stored securely without relying on any central authority and prevented data loss in case of any attack. Thanks to the communication process over the blockchain network, updating and sharing data was facilitated. The proposed deep learning-based intrusion detection system separated normal and anomaly data with 100% accuracy. The anomaly data were identified with an average of 95% accuracy for which attack type they belonged to. The data that was not exposed to attacks was processed on the blockchain network, and an alert system was implemented for the detected attack data. This study presents a method that companies can use to secure IIoT sensor data.

Keywords- Industrial Internet of Things, Blockchain, Cyber Security, Intrusion Detection System, Deep Learning

ÖZ

Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (IIoT), birden fazla cihazın ve sensörün bir ağ üzerinden birbirleriyle iletişim kurduğu bir yapıyı ifade eder. İnternetle bağlantılı cihazların sayısı arttıkça, bu cihazlara yönelik saldırıların sayısı da artar. Bu nedenle, fabrikalarda veya işyerlerinde verileri güvence altına almak ve olası tehditlere karşı önlem almak önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, IIoT sensörlerinden toplanan verilerin ağ trafiğine bakılarak saldırı altında olup olmadığını belirlemek için derin öğrenme tabanlı bir mimari kullanıldı. Saldırıya uğramamış veriler Ethereum Blok Zincir ağına kaydedildi. Ethereum blok zincir ağı, sensör verilerinin merkezi bir otoriteye dayanmadan güvenli bir şekilde saklanmasını ve herhangi bir saldırı durumunda veri kaybının önlenmesini sağlamaktadır. Blok zincir ağı üzerinden iletişim süreci sayesinde veri güncelleme ve paylaşımı kolaylaştırıldı. Önerilen derin öğrenme tabanlı saldırı tespit sistemi, normal ve anormal verileri %100 doğrulukla

[1]*Corresponding author contact: emrullah.sahin@dpu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-3390-6285)
Software Engineering, Faculty of Engineering, Kutahya Dumlupinar University, Kutahya Turkey
[2]Contact: naciye.arslan@dpu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-3208-7986)
Software Engineering, Faculty of Engineering, Kutahya Dumlupinar University, Kutahya Turkey
[3]Contact: firat.aydemir@dpu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-8965-1429)
Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kutahya Dumlupinar University, Kutahya Turkey

ayırabilmektedir. Anormal verilerinde, hangi saldırı tipine ait oldukları ortalama %95 doğrulukla tanımlandı. Saldırılara maruz kalmayan veriler blok zincir ağında işlendi ve tespit edilen saldırı verileri için uyarı sistemi geliştirildi. Bu çalışma, şirketlerin IIoT sensör verilerinin güvenliğini sağlamak için kullanabileceği bir yöntem sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Endüstriyel Nesnelerin İnterneti, Blok Zinciri, Siber Güvenlik, Sızma Tespit Sistemi, Derin Öğrenme

I. INTRODUCTION

The Internet of Things (IoT) is a network that connects real-life objects such as devices, vehicles, and appliances. These objects are equipped with sensors, software, and connectivity features, allowing them to gather and share data over the Internet. IoT is utilized in various fields such as Industry 4.0, smart cities, healthcare, and transportation [1]. Since IoT devices are connected to the internet, systems are vulnerable to attacks [2]. With the increasing number of IoT devices, the demand for cybersecurity solutions has also risen. The International Data Corporation (IDC) predicts that by 2025, there will be 55.7 billion connected devices, and generated data by these devices will significantly increase from 18.3 zettabytes in 2019 to 73.1 zettabytes [3]. Therefore, it is expected that the cybersecurity market will reach $270 billion by 2026.

The Industrial Internet of Things (IIoT) is a subset of IoT and consists of a collection of interconnected devices, sensors, networks, and software that encompass all stages of a manufacturing process or industry. IIoT systems are utilized to enhance the performance, efficiency, and security of industrial processes or machine operations [4]. However, when system security is compromised, processes can fail, or systems may become unable to fulfil their functions. These security vulnerabilities can result in production losses, increased costs, or customer attrition. Additionally, they can lead to the unauthorized acquisition or use of personal data belonging to employees or customers by third parties.

IoT intrusion detection is defined as any unauthorized action or activity that causes harm to the IoT ecosystem [5]. It refers to unauthorized access to data or devices, alteration or destruction of data or devices, and disruption of the normal functioning of the IoT system [6]. Examples of IoT intrusion detection include malicious software attacks, denial of service attacks, and unauthorized access to devices. With the increasing number of connected devices, IoT intrusion detection has become a significant concern in the field of cybersecurity. Deep learning is utilized as an effective tool in IoT intrusion detection. The IoT ecosystem typically generates a large amount of data, and analyzing and protecting it against intrusions can be challenging using traditional methods. Deep learning can process these large datasets and identify meaningful patterns and behaviors [7].

IIoT and blockchain technology can be combined to enhance the security of industrial systems and processes [8]. Blockchain is a distributed data structure that records transactions without the need for a central authority. Each block in a blockchain contains multiple transactions, and when a new transaction occurs on the blockchain, the record of that transaction is added to the copies of the ledger held by all participants [9]. Blockchain transactions are secured using cryptography, and the ledger is maintained by multiple computers rather than a central authority. Therefore, making changes to historical transaction records requires modifying each copy, which is highly challenging. The identities of the parties involved in transactions are encoded and protected. As a result, blockchain technology has become a popular choice for applications such as digital currencies, supply chain management, and voting systems [10].

In the context of IIoT, blockchain can be used to create an immutable record of sensor data and system events, which can be utilized to detect and prevent security threats [11]. For example, data collected by an IoT device can be recorded on the blockchain network and accessed by other devices, ensuring data integrity and preventing data manipulation. Furthermore, transactions conducted through blockchain technology are performed securely and encrypted, thereby enhancing the security of IoT devices [12]. In the tracking process of products manufactured in a factory, data collected by IoT sensors can be recorded on the blockchain to enable tracking information such as the current stage of products and the devices involved in processing [13]. Another example is the combined use of blockchain and IoT in the energy market, where IoT devices present in many homes can monitor energy production and consumption in real-time. This data can be recorded on the blockchain to facilitate the creation of a fair energy market between energy producers and consumers. Additionally, energy transactions conducted through blockchain technology are executed securely and transparently.

Blockchain technology, unlike traditional databases, enables trust between parties involved in transactions without the need for a central authority. Transactions on the blockchain network are shared fairly among the participating parties, and no single entity can control the network. This demonstrates that blockchain can be used as a secure and reliable means for financial transactions, industrial data storage, and commercial operations [14].

When delving into the fundamentals of why blockchain is considered trustworthy, we encounter the consortium mechanism. A blockchain consortium is a group of organizations that come together to operate a blockchain network [15]. Blockchain consortiums typically use Proof-of-Stake (PoS) variations as a consensus algorithm, maintaining blockchain integrity and verifying transactions while ensuring security and stability [16]. However, depending on trust levels within the consortium, other methods such as Proof of Authority (PoA) and Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) may be preferred. For a democratic approach, Delegated Proof of Stake (DPoS) allows token holders to elect validators. For specific needs, consortiums can integrate various consensus algorithms using a pluggable consensus method. These range from Federated Byzantine Agreement (FBA), Proof of Elapsed Time (PoET) to traditional methods like Proof of Work (PoW) and PoS [17,18]. As technology advances, new consensus methods will emerge to meet evolving requirements.

In our study, we proposed a deep learning-based intrusion detection system integrated with blockchain. To prevent attacks on industrial IoT devices, we first check if the incoming data to our system has been compromised. If there is malicious data as a result of an attack, we determine the type of attack it belongs to. We store IoT sensor data containing normal network traffic that is not exposed to attacks in the blockchain system.

The following sections will delve into a deeper analysis and comparisons with other studies in the field. Investigations related to IoT threats and anomaly detection from various studies will be examined in Section I. Detailed insights into the definition of the dataset, a range of attacks and anomalies, learning models, and system frameworks are provided in Section II. Section III encompasses our experiment methodology, findings from the analysis, and comparisons with the most recent and advanced techniques in the field. Lastly, Section IV, and V, discloses the conclusions of our study, along with a perspective on potential future applications.

A. Related Works

A review of studies on the security of IoT devices in the literature reveals three distinct phases: machine learning, deep learning, and blockchain-related research.

The authors propose an Intrusion Detection System (IDS) for detecting injection attacks in smart cities. They employ two feature selection techniques, namely constant removal and recursive feature elimination, and test them with Decision Tree (DT), Random Forests (RF), and Support Vector Machines (SVM) classifiers. They use the AWID dataset, which contains real Wi-Fi traces. By utilizing only 8 selected features through constant removal and recursive feature elimination, they achieve the highest accuracy rate (99%) with the DT classifier [3].

In their study, the authors created a simulated dataset for botnet attacks. They compare SVM, LSTM, and RNN models to classify the attacks using the generated dataset. They present binary classification results for both attacked and non-attacked attack types. Using SVM with all features, they achieve the highest accuracy rate [1].

Using a specifically designed IoT/IIoT testbed that includes a range of typical devices, sensors, protocols, and cloud/edge setups, Ferrag et al. produce a dataset. Data from various IoT devices, including inexpensive digital sensors, ultrasonic sensors, water level detection sensors, pH sensor probes, soil moisture sensors, heart rate sensors, flame sensors, and others are included in the dataset. Along with developing the dataset, they also identify and analyze fourteen attacks that they group into five categories: information gathering, man-in-the-middle attacks, injection attacks, and other attacks related to IoT and IIoT communication protocols. To identify these attacks, they contrast deep learning with conventional machine learning methods (DT, RF, KNN, and SVM) [19].

Babu et al. aim to address security concerns in smart cities. They propose a permission-based blockchain system using the mediator PUF (Physically Unclonable Function) model. Additionally, they propose a collaborative detection system utilizing machine learning techniques (SVM, RF, LR, DT) to detect DDoS attacks on IoT devices. Their ensemble model (SVM+RF+LR+DT) achieves the highest accuracy rate (97.39%) [20].

Tahir et al. propose a new authentication and authorization framework for blockchain-enabled IoT networks in healthcare applications. The framework utilizes a probabilistic model that uses random numbers in the authentication process and establishes a secure connection between IoT devices for data collection. The framework addresses critical security, privacy, and legal requirements in healthcare informatics. The proposed model is evaluated using the AVISPA tool and the Cooja simulator [21].

Chen et al. propose a blockchain-based system for Healthcare IoT that addresses isolated information and security gaps. The proposed system focuses on balancing data sharing and privacy protection. To achieve this, they designed a privacy protection method based on content extraction signatures, which provides detailed privacy protection to patients. Additionally, they designed a fault-tolerant Byzantine leader selection mechanism to enhance the security of the Raft algorithm while maintaining data sharing efficiency. Lastly, they design a summary contract to ensure efficient data acquisition. The proposed mechanism is evaluated through simulation and analysis for efficiency and security [22].

When reviewing the literature, it is observed that most studies perform intrusion detection on network traffic datasets obtained from IoT sensors or attempt to enhance security by storing IoT data in a blockchain mechanism. In our proposed system, we have a two-phase security mechanism. In the first phase, intrusion detection is performed, and if a sensor is under attack, our alert system is activated to provide information about the type of attack. If data is received from an unaffected sensor, the second phase of our work, which is the blockchain mechanism, records the sensor data. A similar architecture to our proposed system has not been found in the literature.

II. MATERIAL AND METHODS

A. Dataset

In this study, the EdgeIIotset dataset prepared specifically for deep learning algorithms was used to check for any intrusion or tampering in the data received from the sensors. The EdgeIIotset dataset is a new cybersecurity dataset that can be used for IoT and IIoT applications [19]. Researchers have created this dataset to enable machine learning algorithms to perform intrusion and tampering detection on sensor data. Additionally, the researchers of the IIoT-Edge dataset prepared a subset called DNNEdgeIIoT-dataset to test deep learning-based IDS. IoT and IIoT detection, Cloud computing, Blockchain network, Fog computing, NFV, SDN, and Edge computing are the seven layers that make up the dataset. It contains network traffic information gathered from a variety of sensors, including ultrasonic, water level detection, pH, soil moisture, pulse rate, and flame sensors. The report also includes information on 14 distinct attacks against IoT and IIoT connectivity protocols. Denial-of-Service/Distributed denial-of-service, Information gathering, Man-in-the-middle, Injection, and Malware are the five basic categories into which these types of attacks fall.

In our data preprocessing phase, after removing rows with missing values and splitting the dataset into training (80%) and testing (20%) sets, we focused on converting categorical output values into numerical form. For this conversion, we utilized pandas' dummy encoding method. This technique transforms each categorical feature into multiple binary columns, representing the presence (1) or absence (0) of each unique value in the original feature.

Mathematically, for a categorical variable C with m unique values, dummy encoding creates m new binary features. Each feature D_i corresponds to one of the m values, where $D_i = 1$ if C equals the $i^{\{th\}}$ value, and $D_i = 0$ otherwise. This method ensures that the model interprets these features as distinct categories without any inherent order.

This process, along with the normalization of data to a range between 0 and 1, prepared our dataset for network processing. The transformed class distribution and statistical values are presented in Figure 1, reflecting the dataset's state after these preprocessing steps.

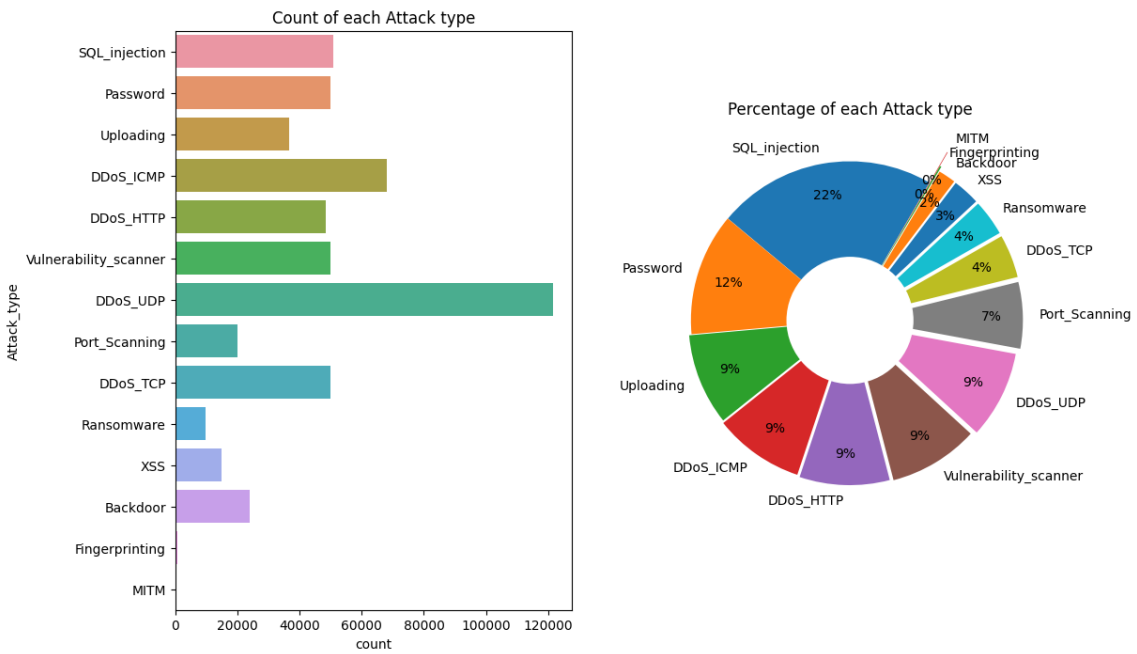


Figure 1. Distribution graphs of the EdgeIIoT dataset based on classes.

B. Feature Selection and SmoteENN

In our study, to determine the best features in the dataset and thereby achieve improved results, the Recursive Feature Elimination with Cross-Validation (RFECV) technique [23,24] is employed. This method systematically combines feature elimination with model validation, executed through the following steps:

Initial Setup:

- Let $F = \{f_1, f_2, \dots, f_{n\}}$ represent the set of all n features in the dataset.
- A Random Forest classifier, denoted as E, is utilized as the base estimator. This choice is motivated by the classifier's capability to compute feature importances, which are essential for the elimination process.

Recursive Feature Elimination (RFE):

- The importance of each feature is evaluated by the estimator E. In the case of the Random Forest classifier, this is typically based on metrics like Gini importance or mean decrease in impurity.
- The feature with the least importance, say f_{least}, is identified and eliminated, resulting in a reduced feature set $F' = F \setminus \{f_least\}$.

Cross-Validation (CV) Integration:

- The dataset is partitioned into k equal-sized subsets for k-fold cross-validation.
- For each iteration, the estimator E is trained on $k - 1$ subsets and validated on the remaining subset.
- The performance of E is evaluated, typically using metrics like accuracy or F1-score, on the validation subset.
- This process is repeated until each subset has been used for validation once.

Optimization and Selection:

- The average cross-validation score is calculated for each reduced feature set F'.
- The process iteratively continues, eliminating one feature at a time, and tracking the corresponding cross-validation scores.
- The optimal number of features is determined when the highest average cross-validation score is achieved.

Outcome:

- The final set of selected features, denoted as F^*, represents the subset of F that yields the highest cross-validation score, balancing model performance and simplicity.

This methodical approach, underpinned by the rigorous application of RFECV, led to the identification of the most relevant features in our dataset, significantly contributing to the enhanced performance of our model. As a result of this process, from the initial set of 92 features, we successfully identified and selected the 27 most impactful features. These selected features, which represent the optimal subset for our model, are comprehensively listed in Table 1. This strategic reduction and focus on key features have been instrumental in improving the model's accuracy and efficiency.

Table 1. List of the best 27 features obtained using the RFECV method.

No	Feature Name	No	Feature Name	No	Feature Name
1	icmp.checksum	10	tcp.connection.syn	19	http.request.method-0.0
2	icmp.seq_le	11	tcp.connection.synack	20	http.referer-0.0
3	http.content_length	12	tcp.flags	21	http.request.method-GET
4	http.response	13	tcp.flags.ack	22	http.referer-0
5	tcp.ack	14	tcp.len	23	http.referer-127.0.0.1
6	tcp.ack_raw	15	tcp.seq	24	http.request.version-0
7	tcp.checksum	16	udp.stream	25	http.request.version-0.0
8	tcp.connection.fin	17	dns.qry.name	26	http.request.version-HTTP/1.0
9	tcp.connection.rst	18	http.request.method-0	27	http.request.version-HTTP/1.1

To address the class imbalance problem in the dataset, the SMOTEENN (Synthetic Minority Over-sampling Technique with Edited Nearest Neighbors) technique was applied. Class imbalance occurs when one class has significantly more instances than the others. In such cases, machine learning models tend to focus more on the majority class and may misclassify minority class examples. SMOTE is a popular high-speed oversampling technique that generates synthetic examples for the minority class by interpolating among existing examples [25]. However, SMOTE can also introduce noisy examples that may degrade the classifier's performance. On the other hand, ENN is an undersampling technique that removes examples from the majority class that is close to the minority class in the feature space [26]. Since ENN can help in removing the noisy examples generated by SMOTE, it is deemed appropriate to use both methods together. After these procedures, the proportional distribution of the resulting data across the classes is shown in Figure 2.

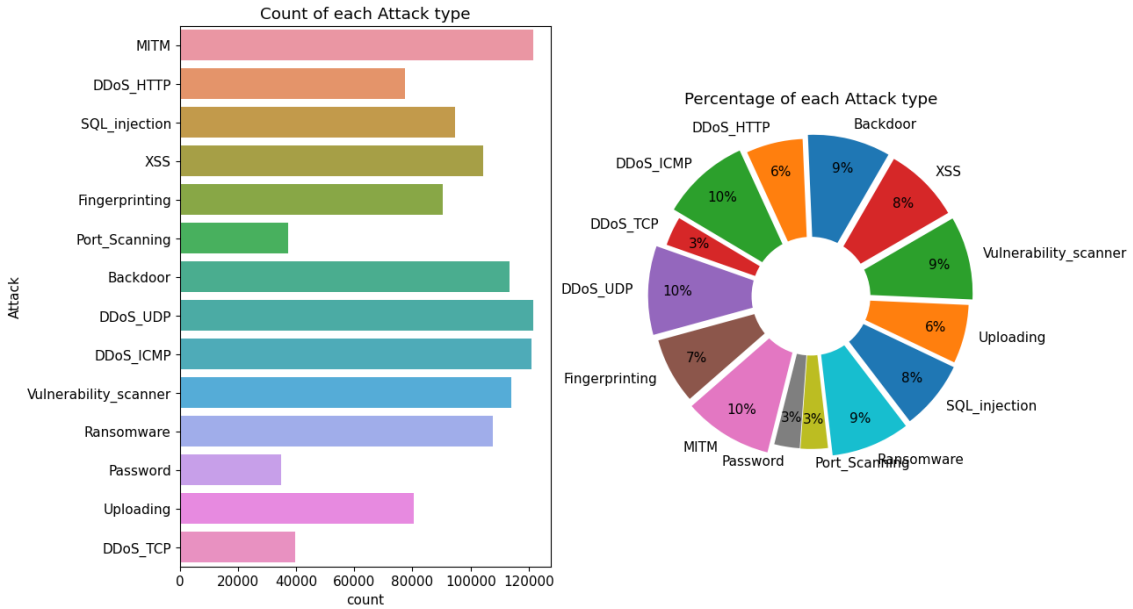


Figure 2. Distribution of data after applying the SmoteENN method for data augmentation.

C. Deep Learning based Attack Detector

After preprocessing the data, the Anomaly Detector model is applied. The Anomaly Detector model performs binary classification, separating the data into two classes: attacked (anomaly) and not attacked (normal). If no anomalies are detected in the incoming sensor data, the data is stored in the Blockchain layer. If an attack is detected in the incoming data, the Intrusion Detector model is used to determine the type of attack among the 14 predefined attack types. The Warning layer is activated, providing the necessary information to the expert using the system. The proposed architectural structure is presented in Figure 3.

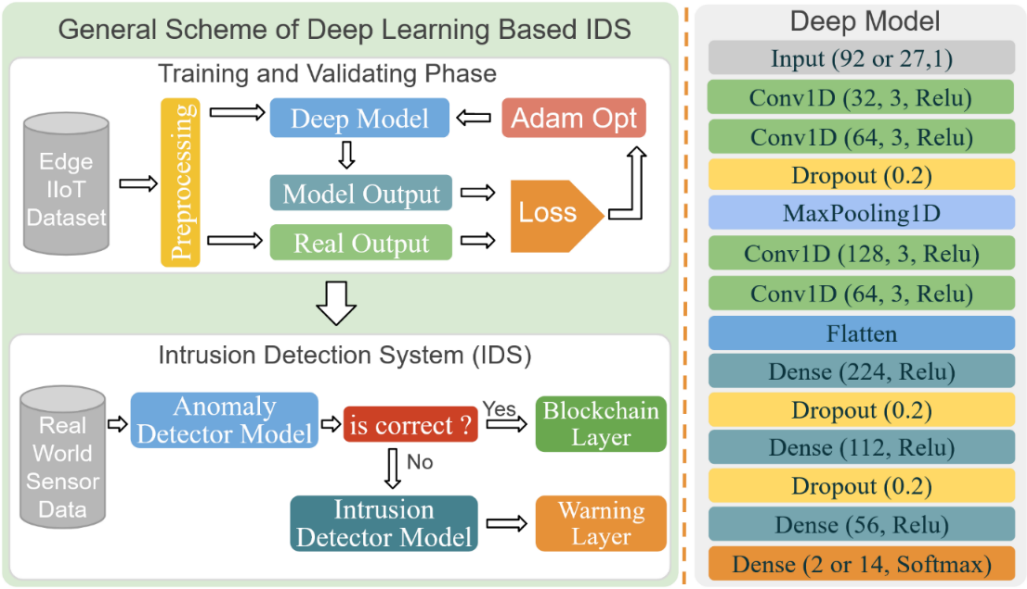


Figure 3. Main diagram of the proposed Deep Learning-based Intrusion Detection System.

The proposed Anomaly and Intrusion Detector models share the same layer composition and workflow. The recommended model starts with two convolutional layers with filter sizes of 32 and 64, and kernel size of 3. A Dropout layer with a rate of 0.2 is added to reduce overfitting by randomly disabling the outputs of neurons [27]. Then, a Max pooling layer is added to reduce the input size by selecting the maximum feature values. Two more convolutional layers with filter sizes of 128 and 64, and kernel size of 3 are added. All convolutional layers use the ReLU activation function to calculate their outputs. A Flatten layer is added to convert the inputs into a vector form [28]. A fully connected layer with 224 neurons and a ReLU activation function is added. Another Dropout layer with a rate of 0.2 is added. A fully connected layer with 112 neurons using the ReLU activation function is added. Another Dropout layer is added. A fully connected layer with 56 neurons is added. The last layer of the model includes the SoftMax method.

D. Blockchain-based IIoT Data Management

Blockchain technology is a method used to enhance the security of digital transactions. This technology enables the establishment of direct trust between the parties involved in the transactions and guarantees the irreversibility of the transactions. The blockchain network is distributed fairly among the parties involved in the transactions, and it is not possible for any party to control the network.

Currently, there are multiple blockchain technologies available. In this study, the Ethereum blockchain network is used. The Ethereum blockchain network is a distributed computer network and an open-source platform that enables the execution of smart contracts [29]. This network is operated by numerous computers and nodes worldwide, and each contributes to the security of the network and the accuracy of the transactions. As a result, the Ethereum network enables secure and fast transactions without the need for a central authority [30]. The Ethereum network verifies transactions using cryptographic techniques and maintains data integrity among all participating nodes. This ensures that all transactions performed on the Ethereum network are carried out securely and transparently.

The Ethereum blockchain network proffers a multitude of advantages primarily due to its prowess in executing smart contracts [31]. It operates on the principle of decentralization, nullifying the need for a central authority, thereby facilitating expeditious and secure transactions. Additionally, Ethereum ensures rigorous security through its verification of transactions using advanced cryptographic techniques, thereby maintaining data integrity across all nodes. Consequently, transactions on the network are secure and resistant to tampering. The speed at which transactions are verified and confirmed is substantially accelerated due to Ethereum's distributed architecture. The hallmark of Ethereum, smart contracts, automate a wide array of processes, thereby mitigating human errors. Moreover, Ethereum offers a transparent transaction framework where all transactions can be tracked and recorded by any observer, boosting transaction transparency and significantly reducing the likelihood of manipulation.

Thanks to these advantages, the Ethereum blockchain network is used in various sectors. In our study, we utilized the Smart Contract feature of the Ethereum network for the storage and management of data from sensors in factories. These contracts are written in the Solidity programming language. Solidity is the most popular programming language for smart contracts on the Ethereum platform [32]. Solidity has a syntax similar to other languages such as C++ and JavaScript. Smart contracts written in Solidity are distributed and executed among the nodes in the Ethereum network.

Once the contract code is written, it is compiled into executable bytecode by the Ethereum Virtual Machine (EVM). The contract code is then sent to the Ethereum network, where it is distributed among the nodes of the network. When a user submits a transaction that affects the contract, the transaction is verified on the network, and the transaction fee required for executing the contract code is paid in Ethereum's cryptocurrency, Ether. Once the transaction is verified and the fee is paid, the contract code is executed by the nodes in the network, and the results are returned to the network.

In this way, you can write smart contracts using Solidity on the Ethereum blockchain network, send them to the network, and perform various transactions through these contracts. Another advantage of using the Ethereum network is its compatibility with IPFS data servers for easy data transfer. IPFS (InterPlanetary File System) is a distributed file system and protocol [31]. The integration of Ethereum with IPFS allows Ethereum smart contracts to hold references to files stored on IPFS and access those files. This integration enables smart contracts on Ethereum to be connected to a distributed file system like IPFS instead of relying on centralized servers.

Technically, the integration between IPFS and Ethereum provides Ethereum smart contracts with the ability to access files stored on IPFS. This is achieved by making IPFS hashes (IPFS addresses) part of the Ethereum smart contracts. A user can store the hash of an IPFS file within an Ethereum smart contract. As a result, the file content is not uploaded to the Ethereum network but is stored on IPFS. IPFS hashes can be placed in the data fields or function parameters of Ethereum smart contracts and later used to access the file.

In summary, in this study, a secure system was developed for the storage, verification, processing, and management of data from IoT sensors in factories. The visual diagram of the proposed Blockchain-based Data Management System is presented in Figure 4. The step-by-step progression of this system is as follows:

1. *Blockchain registration layer*: Allows factories to register with their company information and then register their sensors.
2. *Data reading layer*: Involves transferring data from IoT sensors to distributed edge devices.
3. *Data validation layer*: Involves testing the data transferred to edge devices with a pre-trained Deep Learning-based Intrusion and Intrusion Detection System to check for tampering or attack attempts. If any tampering or attack is detected, send a message to the alert layer in the fifth step; if not, transfer the data to the blockchain layer in the fourth step.
4. *Blockchain data addition layer*: The factory's user and sensor information are verified through the Ethereum network. If the transaction is approved, the validated data from IoT sensors is stored on the IPFS server. During the registration process, the access key obtained from the IPFS server is transferred to the Ethereum network along with the factory and sensor information.
5. *Alert message sending*: The sensor and type of attack information from the alert message are transferred to the factory's alert system.

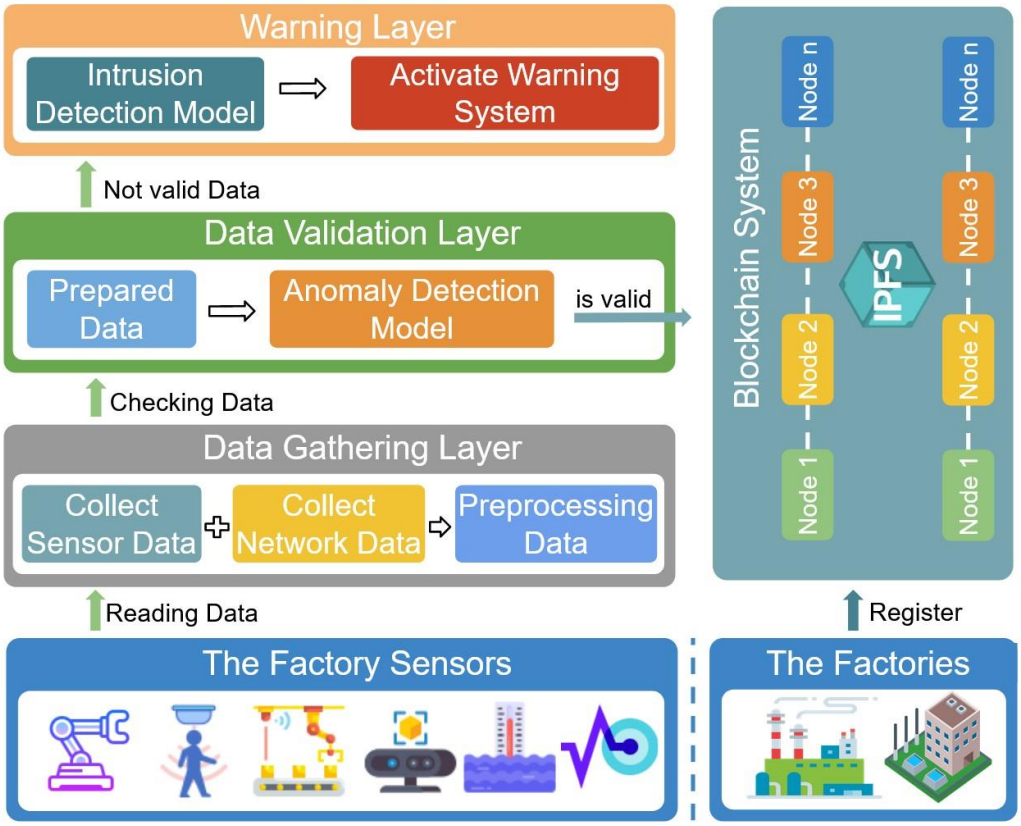


Figure 4. Main diagram of the proposed Blockchain-based Data Management System.

III. Results

A. *Blockchain Implementation*

This study was developed using the Ethereum blockchain. The main coding part was done in the online Remix environment provided by the Ethereum blockchain. This environment allows us to write Smart Contracts and test them on various blockchain networks. Our study works on a private blockchain that we created. The first of our Smart Contracts is the Factory Registration contract. The pseudocode of this contract is provided in Figure 5. The main function of this algorithm is factory Register, which takes factory_name, registry_number, and tax_number as parameters. In this function, the readBlockchain function is called to retrieve the data from the chain and assign it to the "blockchain" variable. Then, if there is a previous record for this factory, it displays a warning message. If there is no previous record, it combines the incoming three parameters with the timestamp value and passes it to the writeBlockchain function.

```
Function factoryRegister(factory_name, registry_number, tax_number)
    blockchain ← call readBlockchain()
    if registry_number in blockchain then
        print "This registry number is already in use."
    else
        data ← [factory_name, tax_number, registry_number, timestamp]
        call writeBlockchain(data)
    endif
endFunction
```

Figure 5. Factory registration function.

Our second Smart Contract in our application is the Sensor Registration. After the factory registration phase, the sensors belonging to these factories are registered on the blockchain along with their MAC addresses. The pseudocode of this contract is provided in Figure 6. First, similar to the first algorithm, data is read from the blockchain. Then, it is determined whether the sensor has been previously registered based on the MAC address. If there is no existing record and the incoming factory_id (factory information) is also validated, the sensor information along with its corresponding factory_id is passed to the writeBlockchain function for registration on the blockchain network.

```
Function sensorRegister (sensor_name, mac_address, factory_id)
    blockchain ← call readBlockchain()
    if mac_address in blockchain then
        print "This Sensor MAC address is already in use."
    else if factory_id not in blockchain
        print "The factory with the given ID does not exist."
    else
        data ← [sensor_name, mac_address, factory_id, timestamp]
        call writeBlockchain(data)
    endif
endFunction
```

Figure 6. Sensor registration function.

The data from the sensors go through the data Control function before being sent to the blockchain network. The pseudocode for this function is provided in Figure 7. We pass the data from the sensors and the network's data to our pre-trained Anomaly Detector model to perform anomaly detection. If an anomaly or attack is detected, we pass the data to our Intrusion Detector model, which performs intrusion detection and returns the type of attack. The information is then directed to the warning Layer. If the data is determined to be healthy, we send the sensor data to the sensorAddData function for further processing.

```
Function dataControl(sensor_id, sensor_data, network_data)
    anomaly_result ← call AnomalyDetectorModel([sensor_data, network_data])
    if anomaly_result then
        intrusion_result ← call IntrusionDetectorModel([sensor_data, network_data])
        call warningLayer(ıntrusion_result)
    else
        call sensorAddData(sensor_id, sensor_data)
endFunction
```

Figure 7. Data control function.

The verified data obtained in the final stage is transferred to the sensor Add Data function. The pseudocode for this function is provided in Figure 8. In the initial step, data is retrieved from the blockchain network, and the sensor information is checked. If the sensor does not exist, a warning is issued. If the sensor information is validated, the incoming data is uploaded to the IPFS (Inter Planetary File System) using the upload IPFS function. The resulting IPFS hash value is then sent to the blockchain network for data access.

```
Function sensorAddData(sensor_id, sensor_data)
    blockchain ← call readBlockchain()
    if sensor_id not in blockchain then
        print "Sensor ID not found in the blockchain."
    else
        ipfs_hash ← call uploadIPFS(sensor_data)
        data ← [sensor_id, ipfs_hash, timestamp]
        call writeBlockchain(data)
endFunction
```

Figure 8. Sensor data recording function.

1) Gas Cost Analysis and Considerations: In this analysis, we focus on the gas costs associated with the "Factory Registration", "Sensor Registration", and "Sensor Data Manager" smart contracts on the Ethereum network. The values are presented in Wei, the smallest denomination of Ether, and represent average costs obtained in the Remix VM (Shanghai) environment. The cost calculations are provided in Table 2.

Table 2. Gas Costs of Smart Contracts (in Wei).

Smart Contract	Operation	Transaction Cost (Wei)	Execution Cost (Wei)
Factory *Registration*	Create	140,000	120,000
	Update	40,000	20,000
	Delete	50,000	40,000
Sensor Registration	Create	160,000	140,000
	Update	50,000	30,000
	Delete	50,000	40,000
Sensor Data Manager	Create	170,000	55,000
	Delete	55,000	45,000

*Considerations on IPFS Costs and Real-world Testing***:** It's important to note that the above gas cost analysis does not include the costs associated with IPFS (InterPlanetary File System). Factories can either host IPFS software on their servers or use third-party hosting services, leading to variability in IPFS-related expenses. Additionally, while the simulations provide useful insights, testing this blockchain application in a real-world factory setting would yield more definitive results.

Scenario Analysis: Gas Cost for 200 Sensors: Let's consider a hypothetical scenario where a factory has 200 sensors, with each sensor transmitting data every five minutes. Assuming the `Create` operation is used for each data transmission in the `Sensor Data Manager` contract, we can estimate the total gas cost over a certain period. For simplicity, we'll calculate the cost for one hour:

- Number of data transmissions per sensor in one hour: $\frac{60\ minutes}{5\ minutes\ /\ sensor}$ = 12 transmissions/sensor.
- Total transmissions for 200 sensors in one hour: 12 transmissions / sensor x 200 sensors = 2400 transmissions.
- Gas cost per transmission (using `Create` in Sensor Data Manager): 170,000 Wei.
- Total gas cost for one hour: 2400 transmissions x 170,000 Wei/transmission.

Now, let's calculate the total gas cost for one hour: Total Gas Cost for 1 Hour = 2400 x 170,000 Wei.

This calculation provides a concrete example of the operational costs associated with this system for a specific use case.

B. Comparison Metrics

Precision, recall, F1-score, and accuracy are metrics used to evaluate the performance of classification models in fields such as machine learning, deep learning, and data science. These metrics are computed according to the following formulas (1-4):

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{1}$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2}$$

$$\text{F1-score} = 2 * \frac{\text{precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \tag{3}$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{4}$$

Here, *TP*, *TN*, *FP*, *FN*, and *FP* indicate the number of true positive predictions, true negative predictions, true false positive predictions, and true negative predictions, respectively. These indicators have a range of 0 to 1, with 0 being the worst performance and 1 the best performance. While accuracy can be more helpful in datasets with balanced class distributions, precision, recall, and F1-score are more insightful in datasets with class imbalance.

Confusion Matrix is a matrix used to evaluate the performance of classification models. The matrix displays the numerical values of true and predicted classes, distinguishing correct classifications,

misclassifications, false positives, and false negatives. Simply put, the Confusion Matrix is a visual tool that depicts the classification ability of a model.

C. Loss Functions

In training our anomaly detection model, we focused on distinguishing between normal and anomalous instances. This task, being a binary classification problem, necessitated the use of the Binary Cross-Entropy (BCE) loss function. The BCE [33] loss is calculated as $-(y\log(p) + (1-y)\log(1-p))$, where y is the true label (0 or 1 for normal and anomalous instances, respectively), and p is the predicted probability of the instance being anomalous. This function is particularly effective in measuring the difference between the predicted probabilities and the actual binary labels, penalizing any significant deviations.

For the intrusion detection model, which involves classifying multiple types of network intrusions, the Categorical Cross-Entropy (CCE [34]) loss function was employed due to its suitability for multi-class classification tasks. The CCE loss is defined as $-\sum_{c=1}^{M} y_{o,c}\log(p_{o,c})$ where M represents the number of classes, $y_{o,c}$ is a binary indicator for whether class c is the correct classification for observation o, and $p_{o,c}$ is the predicted probability of observation o being in class c. The CCE loss function excels in scenarios where each observation is assigned to one, and only one of several categories, making it highly suitable for our model focused on intrusion detection.

Both loss functions were integral in guiding the respective models toward achieving accurate and reliable classifications, a critical aspect for the effective detection of anomalies and intrusions in network environments.

D. Anomaly Detection Results

Our Anomaly Detector model, developed in the Keras framework to discern attacks on sensor data, underwent a rigorous training regimen. It was trained using the Adam optimizer over 30 epochs with a batch size of 256. The training dataset, constituting 80% of the total data, encompassed ~1,500,000 samples, while the test dataset, making up the remaining 20%, contained ~400,000 samples. The performance metrics of the model on this test dataset are illustrated in Table 3.

Table 3. Performance metrics of the Anomaly Detector model on the test dataset.

Dataset Version	Class Name	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
Standard dataset	Normal	0.89	0.99	0.94	0.91
	Anomaly	0.98	0.68	0.80	
Pre-processed dataset	Normal	1.00	1.00	1.00	1.00
	Anomaly	1.00	1.00	1.00	

Despite the dataset exhibiting a significant class imbalance, with a ~3.5:1 ratio between the two classes, the model achieved notable results on the standard dataset. It showed high precision in detecting normal data, at 0.89, with an overall accuracy of 0.91. The model's precision for anomaly detection was impressive at 0.98, although recall and F1-scores were relatively lower.

The model's advanced capabilities, as discussed in the intrusion detection section, played a pivotal role in these outcomes. It demonstrated a strong aptitude for understanding the data, a critical factor in overcoming the challenges posed by class imbalance. Moreover, when tested on the pre-processed dataset, the model's performance was exceptional, achieving 100% accuracy, precision, and F1-score for both classes. This remarkable performance, even on the test dataset, indicates that the model not only understood the data well but also effectively avoided overfitting, showcasing impressive results across the board.

E. Intrusion Detection Results

We utilize our Intrusion Detector model to determine the specific attack types of the data identified as belonging to the anomaly class by our Anomaly Detector model. This model has the same network structure as the Anomaly Detector, except for the last layer, which contains 14 neurons representing the different attack classes. We trained this model using the Keras framework, performing the training process for 50 epochs with a batch size of 256 and utilizing the Adam optimization method. The training dataset consisted of approximately 60% of the total data, encompassing around 1,000,000 samples. The validation dataset contained approximately 20% of the data, with ~400,000 samples. The remaining 20% comprised the test dataset, also containing ~400,000 samples.

Due to the imbalanced distribution of the 14 attack classes in our dataset, we had to work on multiple versions. The first version includes only the pre-processed results of the standard 92 features in the dataset. The Confusion matrix and ROC area under the curve (AUC) obtained from the test dataset for this version are provided

in Figure 9, and Table 4. When examining these figures, we can observe that the obtained results have achieved high accuracy rates in certain classes but showed very low performance in multiple classes.

Table 4. Performance of Intrusion Detector model on the test dataset for the standard 92-feature model.

Class Name	Precision	Recall	F1-Score
Backdoor	0.96	0.98	0.97
DDoS_HTTP	0.75	0.95	0.84
DDoS_ICMP	1.00	1.00	1.00
DDoS_TCP	0.82	1.00	0.90
DDoS_UDP	1.00	1.00	1.00
Fingerprinting	0.92	0.69	0.79
MITM	1.00	1.00	1.00
Password	0.45	0.89	0.60
Port_Scanning	1.00	0.49	0.66
Ransomware	1.00	0.87	0.93
SQL_injection	0.81	0.21	0.33
Uploading	0.68	0.48	0.56
Vulnerability_scanner	1.00	0.85	0.92
XSS	0.58	0.38	0.46
Accuracy			0.82
Macro avg	0.85	0.77	0.78
Weighted avg	0.86	0.82	0.81

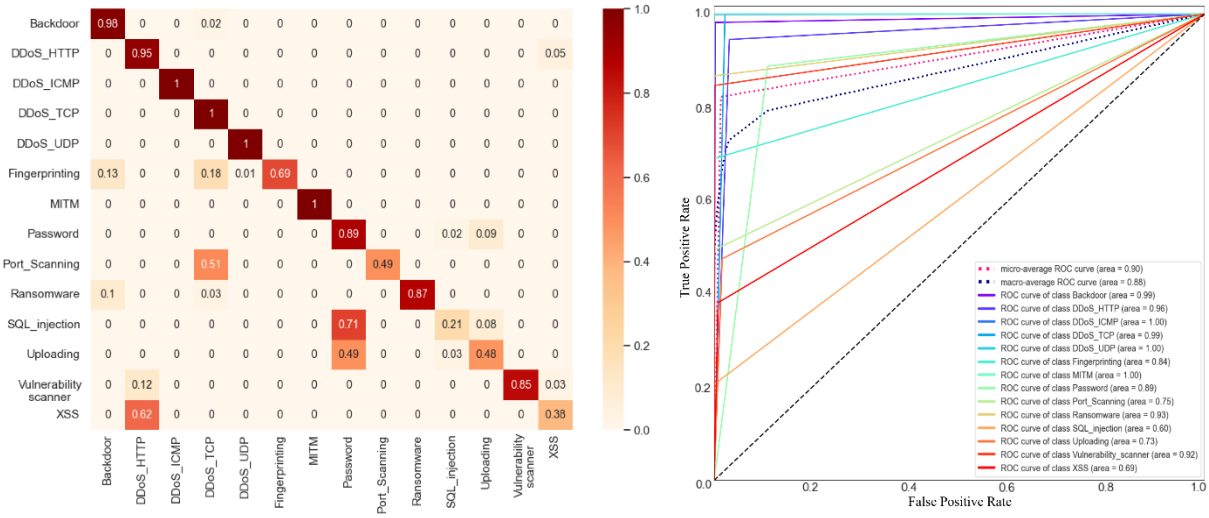


Figure 9. Confusion matrix values (column a) and ROC area indicator (column b) for the standard 92-feature model.

In the initial stage of our multi-class (14 classes) intrusion detection system, we faced a perplexing challenge. Some classes were identified with high accuracy, while others were markedly less accurate. This inconsistency prompted an investigation to ascertain whether the issue was rooted in the model design or the dataset. To this end, we conducted extensive tests on the Resnet50 [35] and Transformer [36] architectures.

The test results were revealing:

- *Transformer*: This model achieved an accuracy of 0.79, an F1-score of 0.74, a recall of 0.78, and a precision of 0.75. Despite these figures, the performance across different classes was uneven.
- *Resnet50*: It showed a better accuracy of 0.93, but like the Transformer, the F1-score was 0.72, recall 0.76, and precision 0.73, again with variable performance across classes.

Ultimately, these tests led us to conclude that the problem did not lie within the network architectures. Rather, it was the dataset itself that was the source of the issue, specifically the class imbalance within it.

To address the imbalance in our dataset, we implemented a multi-faceted strategy focusing on dataset enhancement. In terms of feature selection, we adhered to the methodology outlined in the Material Methods

section B of our study, utilizing the RFECV (Recursive Feature Elimination with Cross-Validation) technique. This approach enabled us to efficiently narrow down from 92 features to the 27 most impactful ones, ensuring a more focused and relevant dataset for our models.

For data augmentation, we primarily utilized the SmoteENN method. While we experimented with various Smote techniques, SmoteENN emerged as the most effective in our context. Its combination of Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) and Edited Nearest Neighbors (ENN) provided a robust solution to our class imbalance issue.

After extensive testing with different combinations of features and data augmentation methods, we found that the best results were achieved with a specific configuration. The combination of using just the 27 selected features, applying class weighting, and incorporating the SmoteENN method for data augmentation proved to be the most successful. This particular setup not only addressed the class imbalance effectively but also enhanced the overall accuracy and reliability of our model, making it adept at handling the complexities of multi-class intrusion detection.

In the final phase of our research, we applied the updated version of our dataset to train our proposed model. The performance of these models is depicted in Figure 10. On the left column of the figure, we present the training and validation accuracy of the models, while the right column features the training and validation loss visual graphs. Careful analysis of these visual graphs shows that our training process was effectively balanced. Both the accuracy and loss visual graphs demonstrate a stable and consistent progression, indicating that our models were adeptly trained, avoiding common pitfalls such as overfitting or underfitting. The steady convergence of these graphs is a testament to the effectiveness of our dataset enhancements, particularly the refined feature selection through RFECV and the implementation of the SmoteENN method for data augmentation. This equilibrium in the training and validation process suggests that our models are not only well-calibrated but also possess a strong capability for generalization, making them robust tools for multi-class intrusion detection.

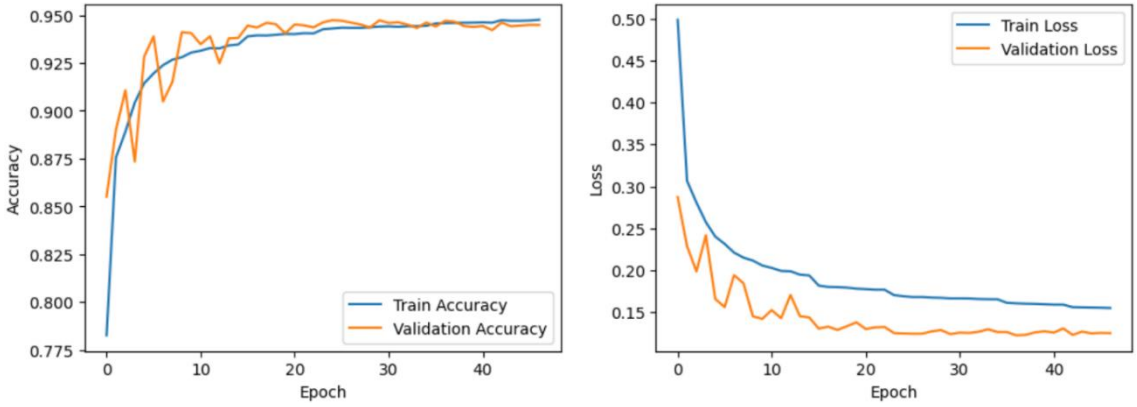


Figure 10. Visual schema of proposed model: Training and validation accuracy and loss graphs.

In our continued effort to thoroughly understand the results of training the proposed model with the updated dataset, we present a detailed analysis in Figure 11. The left column of this figure features the Confusion Matrix, while the right column displays the ROC curves. A comprehensive examination of these elements reveals significant insights. Compared to the initial results shown in Figure 9, the high-performance capability of the network now extends across all classes. This is a clear indication that the modifications we made, particularly in addressing the dataset imbalance, have substantially improved the model's performance. Moreover, a closer look at the individual class performances in the Confusion Matrix and the ROC curves indicates a notable reduction in the imbalance problem, especially in those classes where it was previously more pronounced. This improvement is not just quantitative but qualitative as well, demonstrating the model's enhanced ability to detect attacks accurately and reliably across all classes.

In concluding our results section, we highlight the data presented in Table 5, which outlines the average F1-score, precision, recall, and accuracy for each class in our model. Detailed examination of this table shows a pronounced improvement in comparison to the initial data shown in Table 4. The average accuracy, which was initially in the vicinity of 82%, has impressively risen to approximately 95%. Similarly, the average F1-score, previously at around 81%, has also escalated to about 95%. These enhancements in the average performance metrics across all classes clearly demonstrate the substantial improvements achieved in our model. This leap in average accuracy and F1-scores is a testament to the effectiveness of the adjustments we made to the model and our approach in tackling dataset imbalances. These collective improvements underscore our model's enhanced capability in accurately and reliably detecting multi-class attacks, providing a strong and conclusive finish to our analysis of the results.

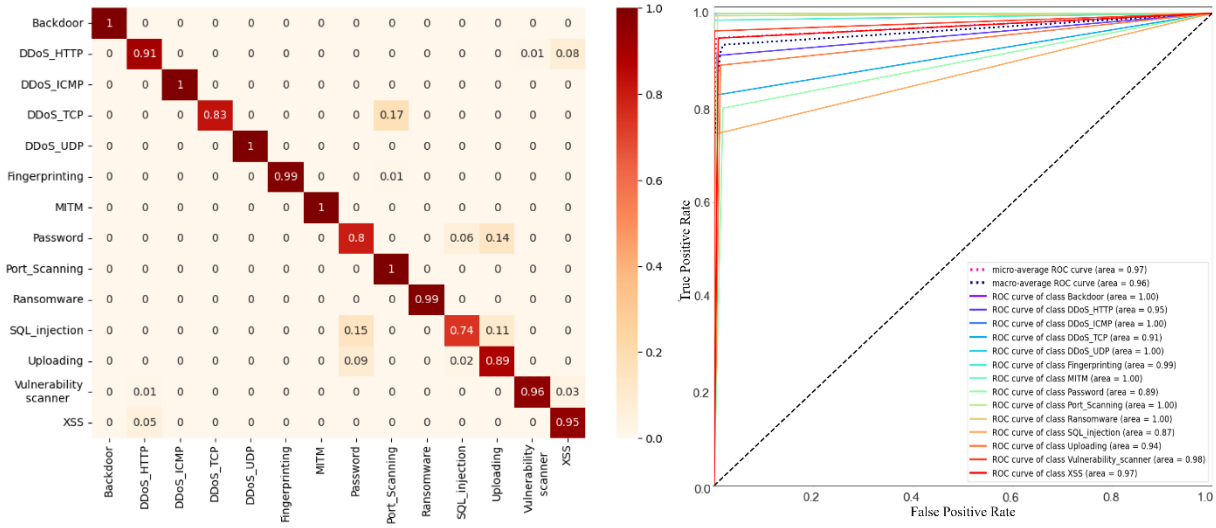


Figure 11. Confusion matrix values (column a) and ROC area indicator (column b) for the improved Intrusion Detector model.

Table 5. Performance of Proposed Intrusion Detector model on the test dataset.

Class Name	Precision	Recall	F1-Score
Backdoor	1.00	1.00	1.00
DDoS_HTTP	0.92	0.91	0.91
DDoS_ICMP	1.00	1.00	1.00
DDoS_TCP	1.00	0.83	0.90
DDoS_UDP	1.00	1.00	1.00
Fingerprinting	0.99	0.99	0.99
MITM	1.00	1.00	1.00
Password	0.56	0.80	0.66
Port_Scanning	0.82	1.00	0.90
Ransomware	1.00	0.99	1.00
SQL_injection	0.95	0.74	0.84
Uploading	0.83	0.89	0.86
Vulnerability_scanner	0.99	0.96	0.98
XSS	0.91	0.95	0.93
Accuracy			0.95
Macro avg	0.93	0.93	0.93
Weighted avg	0.95	0.95	0.95

IV. DISCUSSION

1) Blockchain Implementation Discussion: In this study, we conducted tests on our Ethereum blockchain-based applications named Factory Registration, Sensor Registration, and Sensor Data Manager using the Remix IDE's Virtual Machine environment. These tests included gas calculations, providing us with preliminary insights into the operational aspects of our blockchain implementation. However, it's important to note that the results obtained in a simulated environment, while valuable, may not fully capture the complexities and costs associated with real-world factory settings. Therefore, for more accurate and realistic assessments, especially in terms of cost-effectiveness and practical feasibility, conducting tests in actual factory environments is crucial. This approach will allow us to better understand the scalability, security, and cost implications of deploying our blockchain solution in real-world industrial scenarios, providing a more comprehensive and realistic evaluation.

2) Design of the Proposed Deep Learning-Based IDS: Regarding the design of our proposed deep learning-based Intrusion Detection System, the development process involved experimenting with various layers, filter sizes, kernel dimensions, and activation functions. While the final model emerged as a result of these extensive trials, we acknowledge that the process, though informed by various architectures in the literature, was somewhat prolonged and not fully streamlined. In future work, the adoption of methods like Hyperparameter Optimization (HPO) and Neural Architecture Search (NAS) could significantly enhance the efficiency and effectiveness of the model design process. These advanced techniques would enable a more systematic and optimized exploration of network architectures, potentially leading to more robust and performing models.

Incorporating these methods in future research could streamline the development process, leading to quicker, more efficient iterations and potentially more innovative solutions in the field of intrusion detection.

V. CONCLUSIONS

This study presents a method for ensuring the security of data from IIoT sensors in factories. The security of data is determined based on deep learning techniques to identify whether the data from IIoT sensors have been subjected to attacks. The data that is not exposed to attacks is stored and decentralized on the Ethereum blockchain network, ensuring its security and preventing data loss in the event of an attack. Ethereum blockchain is a distributed database that securely stores data without relying on any central authority. This method can be considered as a significant step towards securing IIoT sensor data. Secure storage of data prevents businesses from experiencing significant data loss. Additionally, the process of decentralization facilitates data updates and sharing. In the future, this method can be further improved to provide a stronger solution for securing IIoT sensor data. This study encourages further research in the field of IIoT security.

REFERENCES

[1] Koroniotis, N., Moustafa, N., Sitnikova, E., & Turnbull, B. (2019). Towards the development of realistic botnet dataset in the internet of things for network forensic analytics: Bot-iot dataset. *Future Generation Computer Systems*, *100*, 779-796.

[2] Hasan, M., Islam, M. M., Zarif, M. I. I., & Hashem, M. M. A. (2019). Attack and anomaly detection in IoT sensors in IoT sites using machine learning approaches. *Internet of Things*, *7*, 100059.

[3] Gaber, T., El-Ghamry, A., & Hassanien, A. E. (2022). Injection attack detection using machine learning for smart IoT applications. *Physical Communication*, *52*, 101685.

[4] Puri, V., Priyadarshini, I., Kumar, R., & Kim, L. C. (2020, March). Blockchain meets IIoT: An architecture for privacy preservation and security in IIoT. In *2020 International Conference on Computer Science, Engineering and Applications (ICCSEA)* (pp. 1-7). IEEE.

[5] Tsimenidis, S., Lagkas, T., & Rantos, K. (2022). Deep learning in IoT intrusion detection. *Journal of network and systems management*, *30*, 1-40.

[6] Khraisat, A., & Alazab, A. (2021). A critical review of intrusion detection systems in the internet of things: techniques, deployment strategy, validation strategy, attacks, public datasets and challenges. *Cybersecurity*, *4*, 1-27.

[7] Şahin, E., & Talu, M. F. (2022). Wy-Net: A New Approach to Image Synthesis With Generative Adversarial Networks. *Journal of Scientific Reports-A*, (050), 270-290.

[8] Jia, B., Zhang, X., Liu, J., Zhang, Y., Huang, K., & Liang, Y. (2021). Blockchain-enabled federated learning data protection aggregation scheme with differential privacy and homomorphic encryption in IIoT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *18*(6), 4049-4058.

[9] Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. (2016). *Bitcoin and cryptocurrency technologies: a comprehensive introduction*. Princeton University Press.

[10] Taş, R., & Tanrıöver, Ö. Ö. (2020). A systematic review of challenges and opportunities of blockchain for E-voting. *Symmetry*, *12*(8), 1328.

[11] Kumar, T., Harjula, E., Ejaz, M., Manzoor, A., Porambage, P., Ahmad, I., Liyanage. M., Braeken. A., Ylianttila, M. (2020). BlockEdge: blockchain-edge framework for industrial IoT networks. *IEEE Access*, *8*, 154166-154185.

[12] Guo, X., Zhang, G., & Zhang, Y. (2022). A Comprehensive Review of Blockchain Technology-Enabled Smart Manufacturing: A Framework, Challenges and Future Research Directions. *Sensors*, *23*(1), 155.

[13] Abdelmaboud, A., Ahmed, A. I. A., Abaker, M., Eisa, T. A. E., Albasheer, H., Ghorashi, S. A., & Karim, F. K. (2022). Blockchain for IoT applications: taxonomy, platforms, recent advances, challenges and future research directions. *Electronics*, *11*(4), 630.

[14] Tapscott, A., & Tapscott, D. (2017). How blockchain is changing finance. *Harvard Business Review*, *1*(9), 2-5.

[15] Samuel, O., Omojo, A. B., Mohsin, S. M., Tiwari, P., Gupta, D., & Band, S. S. (2022). An anonymous IoT-based E-health monitoring system using blockchain technology. *IEEE Systems Journal*.

[16] Ray, P. P., Chowhan, B., Kumar, N., & Almogren, A. (2021). BIoTHR: Electronic health record servicing scheme in IoT-blockchain ecosystem. *IEEE Internet of Things Journal*, *8*(13), 10857-10872.

[17] Fu, X., Wang, H., & Shi, P. (2021). A survey of Blockchain consensus algorithms: mechanism, design and applications. *Science China Information Sciences*, *64*, 1-15.

[18] Uddin, M. A., Stranieri, A., Gondal, I., & Balasubramanian, V. (2021). A survey on the adoption of blockchain in iot: Challenges and solutions. *Blockchain: Research and Applications*, *2*(2), 100006.

[19] Ferrag, M. A., Friha, O., Hamouda, D., Maglaras, L., & Janicke, H. (2022). Edge-IIoTset: A new comprehensive realistic cyber security dataset of IoT and IIoT applications for centralized and federated learning. *IEEE Access*, *10*, 40281-40306.

[20] Babu, E. S., SrinivasaRao, B. K. N., Nayak, S. R., Verma, A., Alqahtani, F., Tolba, A., & Mukherjee, A. (2022). Blockchain-based Intrusion Detection System of IoT urban data with device authentication against DDoS attacks. *Computers and Electrical Engineering*, *103*, 108287.
[21] Tahir, M., Sardaraz, M., Muhammad, S., & Saud Khan, M. (2020). A lightweight authentication and authorization framework for blockchain-enabled IoT network in health-informatics. *Sustainability*, *12*(17), 6960.
[22] Chen, S., Fu, X., Si, H., Wang, Y., Gao, S., & Wang, C. (2022). Blockchain for Health IoT: A privacy-preserving data sharing system. *Software: Practice and Experience*, *52*(9), 2026-2044.
[23] Senan, E. M., Al-Adhaileh, M. H., Alsaade, F. W., Aldhyani, T. H., Alqarni, A. A., Alsharif, N., ... & Alzahrani, M. Y. (2021). Diagnosis of chronic kidney disease using effective classification algorithms and recursive feature elimination techniques. *Journal of Healthcare Engineering*, *2021*.
[24] Wu, J., Zheng, D., Wu, Z., Song, H., & Zhang, X. (2022). Prediction of Buckwheat Maturity in UAV-RGB Images Based on Recursive Feature Elimination Cross-Validation: A Case Study in Jinzhong, Northern China. *Plants*, *11*(23), 3257.
[25] Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, *16*, 321-357.
[26] Wilson, D. L. (1972). Asymptotic properties of nearest neighbor rules using edited data. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (3), 408-421.
[27] Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*, *15*(1), 1929-1958.
[28] Ozdemir, D., & Arslan, N. N. (2022). Analysis of Deep Transfer Learning Methods for Early Diagnosis of the Covid-19 Disease with Chest X-ray Images. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *10*(2), 628-640.
[29] Kushwaha, S. S., Joshi, S., Singh, D., Kaur, M., & Lee, H. N. (2022). Systematic review of security vulnerabilities in ethereum blockchain smart contract. *IEEE Access*, *10*, 6605-6621.
[30] Oliva, G. A., Hassan, A. E., & Jiang, Z. M. (2020). An exploratory study of smart contracts in the Ethereum blockchain platform. *Empirical Software Engineering*, *25*, 1864-1904.
[31] Azbeg, K., Ouchetto, O., & Andaloussi, S. J. (2022). BlockMedCare: A healthcare system based on IoT, Blockchain and IPFS for data management security. *Egyptian Informatics Journal*, *23*(2), 329-343.
[32] Hussien, H. M., Yasin, S. M., Udzir, N. I., Ninggal, M. I. H., & Salman, S. (2021). Blockchain technology in the healthcare industry: Trends and opportunities. *Journal of Industrial Information Integration*, *22*, 100217.
[33] Ho, Y., & Wookey, S. (2019). The real-world-weight cross-entropy loss function: Modeling the costs of mislabeling. *IEEE access*, *8*, 4806-4813.
[34] Zhang, Z., & Sabuncu, M. (2018). Generalized cross entropy loss for training deep neural networks with noisy labels. *Advances in neural information processing systems*, *31*.
[35] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
[36] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems.*

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 385-393, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1379760
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi – Research Article

Isı Yalıtımının Farklı Dış Duvar Modellerindeki Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi

Numerical Investigation of the Effect of Thermal Insulation on Different Exterior Wall Models

Mehmet Kan[1*]

Geliş / Received: 22/10/2023 ***Revize / Revised: 14/01/2024*** ***Kabul / Accepted: 14/01/2024***

ÖZ

Enerji kaynaklarının azalması ile enerji ihtiyacı her geçen gün hızla artmaktadır. Enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla Dünyada farklı enerji arayışlarına gidilmekte var olan tüketimin de azaltılmasına yönelik uğraşlar devam etmektedir. Ülkemizde, enerji tüketiminin önemli bir kısmını binaların ısıtılmasına harcanmaktadır. Bunun için enerji tasarrufu ve yok olan yakıtların tüketiminin azaltılmasına yönelik ısı yalıtımı uygulamaları daha fazla yer almaktadır. Yalıtım malzemesi kalınlığının belirlenmesi ve uygun yalıtım malzemesinin seçilmesi hem verim açısından hem de ekonomiklik açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, bir dış duvarın farklı duvar modellerine göre poliüretan yalıtım malzemesi kullanılarak termal davranışları irdelenmiştir. Yapı malzemesi olarak tuğla ve gaz beton kullanılan yalıtımlı (poliüretan) ve sandviç duvar olmak üzere 4 farklı duvar modelleri için Ansys yazılımı kullanılarak analizler yapılmıştır. Duvar modelleri 2 cm iç sıva, 13,5 cm tuğla/15 cm gaz beton ve 3 cm dış sıva, sandviç duvarda 2 cm iç sıva, iç tarafta 8 cm tuğla/8 cm gaz beton, dış tarafta 13,5 cm tuğla/15 cm gaz beton ve 3 cm dış sıvadan ve yalıtım malzemesinden (poliüretan) oluşmaktadır. 3. iklim bölgesinde bulunan Ankara ili ele alınarak bu duvar modelleri için analizlerden elde edilen sıcaklık ve ısı akısı verileri ile hesaplamalar sonucunda elde edilen optimum yalıtım kalınlıkları ve geri ödeme süreleri karşılaştırılmıştır. Analizler ve yapılan hesaplamalar sonucunda sandviç duvar modelinde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Optimum yalıtım kalınlığı, ısı yalıtımı, HAD analizi.

ABSTRACT

As energy resources diminish, the need for energy increases rapidly from day to day. Various energy sources are being sought worldwide to meet energy needs, and efforts to reduce current consumption continue. In our country, a significant part of energy consumption is spent on heating buildings. For this reason, thermal insulation applications are increasingly used to save energy and reduce the consumption of waste fuels. Determining the insulation thickness and selecting the appropriate insulation material is very important from both efficiency and economy points of view. In this study, the thermal behavior of an exterior wall with polyurethane insulation material was investigated according to different wall models. The analyzes were carried out using Ansys software for four different wall models: insulated (polyurethane) and sandwich walls, as well as brick and aerated concrete as building materials. Wall models: 2 cm interior plaster, 13.5 cm brick/15 cm aerated concrete and 3 cm exterior plaster, 2 cm interior plaster on the sandwich wall, 8 cm brick/8 cm aerated concrete on the inside, 13.5 cm brick/15 on the outside It consists of 2 cm aerated concrete and 3 cm exterior plaster and insulation material (polyurethane). Considering Ankara, which is in the 3rd climate zone, the temperature and heat flux data obtained from the analyzes for these wall models were compared with the optimum insulation thicknesses and payback periods

[1]*Sorumlu yazar iletişim: mehmetkan@sdu.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-7336-1489)
Makine Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

obtained because of the calculations. In conclusion the analyzes and calculations, it was found that the sandwich wall model gave better results.

Keywords- Optimum insulation thickness, thermal insulation, CFD analysis.

I. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin sürekli gelişmesi, sanayileşme, nüfusun hızlı bir şekilde artması ve fosil kökenli yakıtların azalması nedeniyle ülkelerin yeni enerji kaynaklarına talepleri artmaktadır. Artan enerji ihtiyacına karşılamak için alternatif enerji kaynaklarına yönelimler ve arayışlar devam etmektedir. Bu yüzden ülkeler fosil kökenli yakıt tüketimini azaltarak, yenilenebilir enerji kaynaklarına ağırlık vermek için çalışmalar yapmaktadır. Bununla birlikte enerji tüketimini azaltmak için enerji tasarruf planlamaları yapılmaktadır. Bu enerji tasarruf planlamalarının başında ısı yalıtımı gelmektedir.

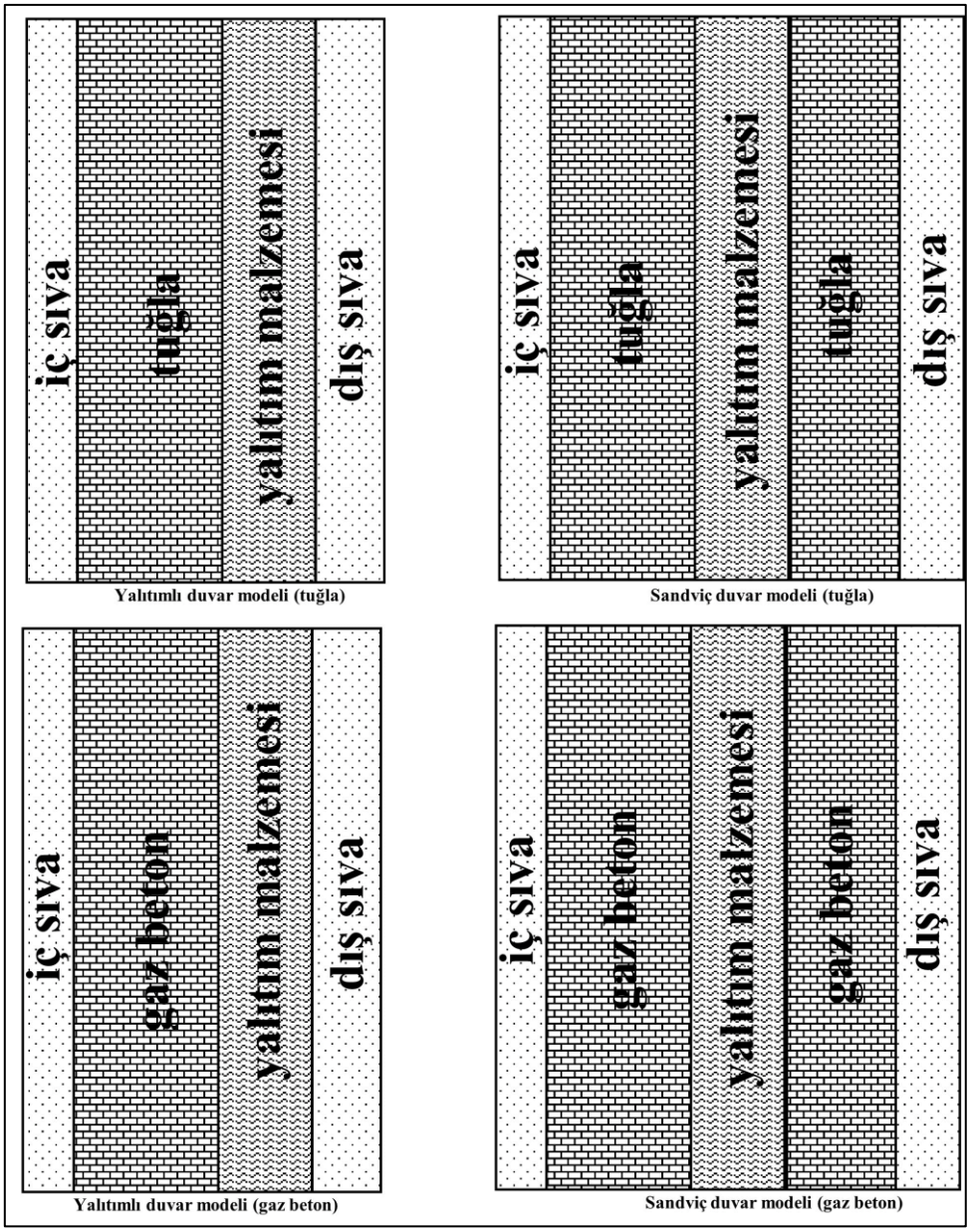
Kış aylarında iç ortam sıcaklığı dış ortamdan daha yüksektir. Bu yüzden ısı geçişi dışarıya doğru olacağından ısı yalıtım malzemeleri ön plana çıkmaktadır. Bu ısı geçiş miktarı yapının ısı geçirgenlik katsayısına bağlıdır. Bu amaçla binanın iklim şartları göz önünde bulundurularak ısı geçirgenlik katsayısına göre tasarlanmalıdır [1]. Enerji, tüm dünya ülkeleri için önemlidir. Ülkemizde, enerji kaynaklarının yetersiz olması nedeniyle enerji ihtiyacının çoğunu yurtdışından karşılamaktadır. Bu yüzden enerji ihtiyaçları daha da artmaktadır. Enerji ihtiyacını azaltmak ve fosil kökenli yakıtların çevreye olumsuz etkilerinin minimize etmek için ısı yalıtımının önemi daha iyi anlaşılmaktadır. [2-4]. Yüksek sıcaklıktaki ortamlardan düşük sıcaklığa sahip ortamlara doğru ısı transferi gerçekleşmektedir. Ayrıca ısıl direnç azaldıkça ısı akışının hızı da artmaktadır. Bu nedenle kışın meydana gelen ısı kayıplarını ve yazın da oluşan ısı kazanımlarını azaltmakla birlikte yapılarda harcanan enerji miktarının da azaltılması gerekmektedir. Binalarda enerji kayıplarını azaltmak ve enerji maliyetini aza indirgemek için ısı yalıtımı yapılmaktadır [5-6]. Isı yalıtımı, iklim şartlarına göre yazın sıcak havayı önleyerek soğutma veya kışın soğuk havayı önleyerek ısıtma problemlerinin azaltılmasına yardımcı olur. Isı yalıtımı sayesinde iki ortam arasında sıcaklık farkından meydana gelen ısı kayıpları azaltılabilir. Fakat yalıtım malzemelerinin ilk yatırım maliyetleri yüksektir. Bununla beraber elde edilen enerji tasarrufları sayesinde amortisman süresi göz önüne alındığında ilerideki yıllarda enerji sarfiyatını engellediği ve enerji tüketiminin azaldığını tespit etmişlerdir [7-10]. Enerji tasarrufu sağlamak amacıyla binalarda enerji ihtiyaçlarını azaltmak için ısı yalıtımı daha da önem kazanmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte saman, kil, toprak gibi organik malzemelerden yapılan yalıtım malzemeleri yerine polistren, poliüretan veya taş yünü, cam yünü gibi inorganik bileşenli malzemeler almıştır [11]. Poliol reçinesi ve yangın geciktirici katkı maddelerinden oluşan poliüretan; çatılarda, döşemelerde, sandviç panellerde ve endüstriyel yapılarda yaygın olarak kullanılan uygulama alanlarındandır [12]. Gürel ve Cingiz [13] yaptıkları çalışmada yatay delikli tuğla ve gaz beton yapı malzemeleriyle ve dıştan yalıtımlı ve sandviç yalıtımlı bir bina dış duvarı modelleyerek ısı kaybı hesaplamışlar ve ömür maliyet analizine göre optimum ısı yalıtım kalınlıklarını, geri ödeme sürelerini ve enerji tasarruflarını belirlemişlerdir. Kandemir vd. [14] bu çalışmada dıştan yalıtım uygulamasında taş yünü ve cam yünü yalıtım malzemesi kullanarak Ankara için iki farklı tuğla duvar ve gaz beton duvar modellerine uygulamışlardır. Sonuç olarak yalıtım malzemesi olarak taş yünü olan gaz betonun kullanılmasının daha uygun olduğunu söylemişlerdir. Öztunalı ve Dereli [15] yaptıkları çalışmada, Edirne ili için iki yalıtım malzemesine göre dış ve sandviç duvar modellerinde farklı yakıt türleri kullanılarak geri ödeme sürelerini ve optimum yalıtım kalınlıklarını belirlemişlerdir. Kürekçi vd. [16] bu çalışmada bütün iller için dıştan yalıtımlı bir duvar modelinde doğal gaz ve ithal kömüre göre beş farklı yalıtım malzemelerine ait geri ödeme süreleri ve optimum yalıtım kalınlığı belirlediklerini söylemişlerdir. Ertürk [17] yaptığı çalışmada yalıtım malzemesiyle birlikte hava boşluğunun eklemesinin ısı yalıtımındaki etkisini incelemiştir. Sandviç duvar modeli için EPS, XPS ve taş yünü yalıtım malzemeleri kullanarak, XPS için optimum yalıtım kalınlığı belirlemişlerdir. Yu vd. [18] yaz-kış mevsimleri için Çin'in farklı bölgelerinde farklı yalıtım malzemelerine ait optimum yalıtım kalınlıklarını karşılaştırmışlardır. Gölcü vd. [19] dış duvar modelinde taş yününü yalıtım malzemesi olarak kullanarak enerji tasarruflarını, optimum yalıtım kalınlıklarını ve geri ödeme sürelerini hesapladıklarını belirtmişlerdir. Yavuz vd. [20] çalışmalarında bir yapının yalıtımlı ve yalıtımsız durumlarında meydana gelen ısıl problemleri analiz etmişlerdir. XPS yalıtım malzemesi olarak kullanıldığında optimum yalıtım kalınlığı 0.0882 m olarak hesaplamışlardır. Uçar ve Balo [21] çalışmalarında değişik iklimlere sahip bölgelerde optimum yalıtım kalınlıklarını ve yatırım maliyetlerini inceleyerek, bölgelerdeki farklılıklardan dolayı enerji tasarrufunun değiştiği gözlemlemişlerdir. Liu vd. [22] Çin'de bulunan farklı şehirler için EPS ve XPS için optimum yalıtım kalınlıklarını bulmak amacıyla yaptıkları çalışmada hesaplamalar sonucunda optimum yalıtım kalınlığının XPS ve EPS için sırasıyla 0.053-0.069 m ve 0.081-0.105 m arasında değiştiği belirtmişlerdir. Aktemur ve Atikol [23] sandviç duvar modelinde Muğla, Kocaeli, Ardahan ve Ankara için farklı yalıtım malzemesi ve yakıtlara göre optimum yalıtım kalınlıklarını tespit etmişlerdir. Yaptıkları hesaplamalara göre optimum yalıtım kalınlığının 2.8-45.1 cm arasında değişim gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, bir dış duvarın farklı duvar modellerine göre poliüretan yalıtım malzemesi kullanılarak termal davranışları irdelenmiştir. Yapı malzemesi olarak tuğla ve gaz beton kullanılan yalıtımlı (poliüretan) 4 farklı duvar modeli için Ansys yazılımı kullanılarak analizler yapılmıştır. Ankara iline ait bu duvar modelleri için analizlerden elde edilen sıcaklık ve ısı akısı verileri ile hesaplamalar sonucunda elde edilen geri ödeme süreleri ve optimum yalıtım kalınlıkları karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Dış Duvar Modelleri ve Matematiksel Analizi

Ülkemizde, genellikle sandviç duvar ve dıştan yalıtımlı duvar tipi olmak üzere iki çeşit dış duvar yalıtım uygulaması kullanılmaktadır. Her ne kadar tuğla yapı malzemesi olarak kullanılsa da son yıllarda gaz beton kullanımı da yaygınlaşmıştır. Binalardaki dış duvarlarda en çok ısı kayıp-kazançları meydana gelmektedir. Yalıtım malzemesi olarak poliüretan yalıtımlı duvar ve sandviç duvar model uygulamalarında kullanılmıştır. Şekil 1'de duvar modelleri verilmiştir. Yapılan bu çalışmada yalıtım malzemesi olarak poliüretan kullanılan iki adet (tuğla ve gaz beton), iki adet sandviç duvar (tuğla ve gaz beton) olmak üzere dört farklı duvar modelleri incelenmiştir. 1. yalıtımlı duvar modelinde sırasıyla iç sıva, tuğla, yalıtım malzemesi ve dış sıva; 2. yalıtımlı duvar modelinde sırasıyla iç sıva, gaz beton, yalıtım malzemesi ve dış sıvadan oluşmaktadır. 1. sandviç duvar modelinde sırasıyla iç sıva, tuğla, yalıtım malzemesi, tuğla ve dış sıva; 2. sandviç duvar modelinde sırasıyla iç sıva, gaz beton, yalıtım malzemesi, gaz beton ve dış sıvadan oluşmaktadır. Ayrıca duvar bileşenlerine ait kalınlıklar Tablo 1'de x (m) olarak verilmiştir.



Şekil 1. Farklı dış duvar modelleri

Binalarda ısı kaybının en fazla olduğu ve dış ortamın olumsuz etkilerinin görüldüğü yerler genellikle bina duvarlarıdır. Bu yüzden yalıtım malzemelerini seçerken bina duvarının dış tarafında meydana gelen ısı kayıpları dikkate alınmalıdır. Ülkemizde "TS 825 (Binalarda Isı Yalıtımı Kuralları Standardı) Standardı" ısı yalıtımlarında dikkat edilmektedir. Ülkemiz TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standartlılarında dört iklim bölgesinden oluşmaktadır [24]. Bu çalışmada 3. İklim bölgesinde yer alan Ankara ili için dört farklı duvar modelleri tasarlanmıştır. Tasarlanan duvar modelleri için Tablo 1'de dış duvar bileşenlerine ait özellikler yer almaktadır.

Tablo 1. Dış duvar bileşenlerinin özellikleri [6,15]

Duvar bileşenleri	x (m)	k (W/m K)	R (m^2K/W)
Dış sıva	0.03	0.87	0.02
Tuğla	0.135	0.45	0.3
Gaz beton	0.15	0.24	0.65
Poliüretan		0.035	
İç sıva	0.02	1.4	0.02
R_i			0.13
R_o			0.04
R_{wt} Tuğla duvar			0.52
R_{wt} Gazbeton duvar			0.84
R_{wt} Sandviç duvar			0.69

Binada meydana gelen ısı kayıpları genellikle en çok duvar ve pencerelerde meydana gelmektedir. Denklem 1'de dış duvar için birim yüzeydeki ısı kaybı (q) verilmiştir [2, 15, 25, 26].

$$q = U.\Delta T \tag{1}$$

Burada U ve ΔT sırasıyla toplam ısı transfer katsayısı ve gün içerisindeki dış ortam sıcaklığı ile iç ortam sıcaklığının farkını ifade etmektedir. Bu durumda gerçekleşen yıllık ısı kazanç ve kaybı (q_A) Denklem 2'de verilmiştir [2, 15, 26].

$$q_A = 86400.DG.U \tag{2}$$

Burada DG derece-günü ifade etmektedir. DG değeri belirli bir denge sıcaklık dikkate alınarak hesaplanır. Denge sıcaklığı, binadaki ısı kaynaklarıyla (insan, aydınlatma, güneş ışınımı vs.) binada olan ısı kayıplarının eşit (dengede) olduğu sıcaklık olarak tanımlanır. Bu nedenle binanın yapısal özellikleri (duvar tipi, yalıtım durumu, hava sızıntıları, güneş ışınımı durumu), iklim koşulları ve bina kullanıcılarının kişisel tercihleri gibi birçok faktör DG değerinin belirlenmesini etkilemektedir. Ülkemizde, TS 825'de derece-gün (DG) sayılarına göre il merkezleri için 4 yalıtım bölgesine ayrılmıştır. 1. bölge ısıtma için en az enerji ihtiyacının olduğu, 4. bölge ise en fazla enerji ihtiyacının olduğu bölgeyi temsil etmektedir.

Duvarın toplam ısı transfer katsayısı Denklem 3' te verilmiştir [2, 15, 26].

$$U = \frac{1}{Ri + R_w + R_y + R_o} \tag{3}$$

Burada iç ve dış ortamların, yalıtımsız duvar tabakaları ve yalıtım malzemesinin ısıl dirençleri sırasıyla R_i ve R_o, R_w ve R_y'dir. R_y Denklem 4'teki bağıntıyla hesaplanabilir. Ayrıca Denklem 5'te toplam ısı transfer katsayısı (U) verilmiştir [26].

$$R_y = \frac{x_y}{k_y} \tag{4}$$

$$U = \frac{1}{R_{wt} + \frac{x_y}{k_y}} \tag{5}$$

Burada x_y, k_y ve R_{wt}, sırasıyla yalıtım malzemesinin kalınlığı, ısıl iletkenliği ve yalıtım malzemesi hariç duvarın toplam ısıl direncini ifade etmektedir.

Isı kazanç-kaybını önemli ölçüde azaltmak için binaların dış duvarlarına yalıtım yapılması gerekmektedir. Bu yüzden yalıtımın optimum kalınlığının tespit edilmesi enerji tasarrufu da sağlanmış olacaktır. Optimum yalıtımın kalınlığı, enerji ve yatırım maliyeti ile yıllık maliyetlerin daha düşük ve ekonomik açıdan daha verimli olacaktır. Isıtma ($C_{A,I}$) ve soğutma ($C_{A,S}$) yıllık enerji maliyeti için Denklem 6-7 ile hesaplanır [2, 15, 26]:

$$C_{A,I} = \frac{86400.IDG.C_f}{\left(R_{wt} + \frac{x_y}{k_y}\right).H_u.\eta} \tag{6}$$

$$C_{A,S} = \frac{86400.SDG.C_e}{\left(R_{wt} + \frac{x_y}{k_y}\right).COP} \tag{7}$$

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan Ankara ili için Isıtma derece-gün değeri (IDG) ve soğutma derece-gün değeri (SDG) sırasıyla 2335 ve 229 olarak belirlenmiştir [27]. Yakıt fiyatı (\$/kg), elektriğin fiyatı (\$/kWh), yakıtın alt ısıl değeri (J/kg), ısıtma sisteminin verimi ve soğutma performans katsayısı sırasıyla C_f, C_e, H_u, η ve COP ile ifade edilir. Toplam yıllık enerji maliyeti (C_A) Denklem 8 ile yazılır.

$$C_A = C_{A,I} + C_{A,S} \tag{8}$$

Yalıtılmış bir binanın toplam maliyeti (C_T) Denklem 9 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$C_T = C_A.PWF + C_y.x_y \tag{9}$$

Burada C_y, x_y, C_A, N, PWF, i ve g sırasıyla, yalıtımın fiyatı ($/m^3), kalınlığı, birim yüzey için yıllık ısıtma ve soğutma maliyetinin toplamı, yıllık ömür üzerinden toplam ısıtma maliyeti, şimdiki değer faktörü, faiz oranı ve enflasyon oranıdır. PWF, i ve g' ye bağlı olarak Denklem 10 ile hesaplanır. Ayrıca optimum yalıtım kalınlığı (x_{opt}), Denklem 11 ile elde edilir [2, 15, 26].

$$PWF = \frac{(1+r)^N - 1}{r.(1+r)^N}, \qquad i>g \qquad r = \frac{i-g}{1+g} \tag{10}$$

$$x_{opt} = 293.94\sqrt{\frac{PWF.k}{C_y}\left(\frac{C_f.IDG}{H_U.\eta} + \frac{C_e.SDG}{3{,}6.10^6.COP}\right)} - k_y.R_{wt} \tag{11}$$

Denklem 12 ile geri ödeme periyodu (P_b) hesaplanır.

$$P_b = \frac{\ln\left[1-\left(\frac{i-g}{1+g}\right).\left(\frac{C_y.x_y}{S_A}\right)\right]}{\ln\left(\frac{1+g}{1+i}\right)} \tag{12}$$

Burada S_A yıllık tasarrufu ifade etmekte olup, yalıtımsız-yalıtımlı duvarların yıllık enerji maliyetleri Denklem 13'te verilmiştir [2, 15, 26].

$$S_A = (C_A)_{yalsz} - C_A \tag{13}$$

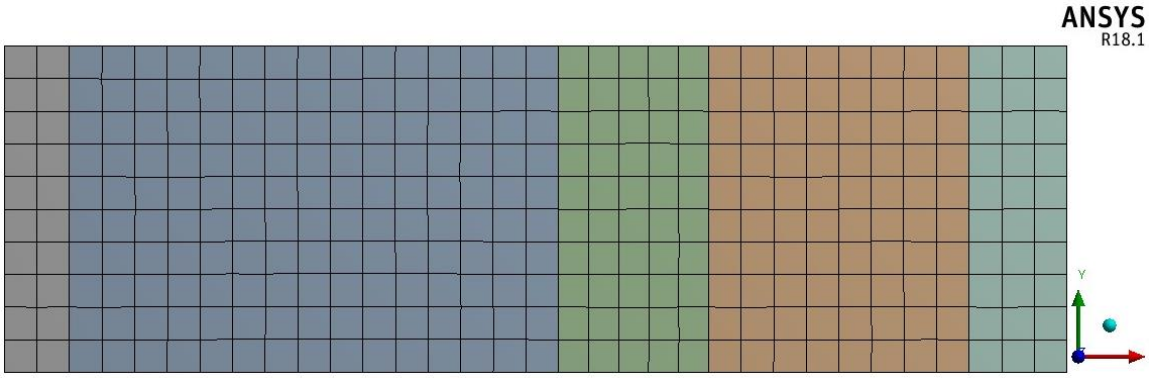
Hesaplamalarda kullanılan yakıtın ve yalıtım malzemelerinin özellikleri Tablo 2' de verilmiştir. Hesaplamalarda; i (%)=36; g (%)=30; PWF=7,55; N=10 yıl olarak alınmıştır [2,15].

Tablo 2. Hesaplamalarda kullanılan parametreler [2,15]

Doğalgaz		Poliüretan	
Parametre	Değeri	Parametre	Değeri
C_f [$/m^3]	0,259	C_y [$/m^3]	75
H_u [J/m^3]	34,526*10^6	k [W/mK]	0.035
H [%]	93		

B. Dış Duvar Modellerinin Nümerik Analizi

HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) analizlerinde kullanılmak üzere dış duvar modelleri için sayısal ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 2'de duvar modeline ait ağ yapısı verilmiştir. Bu modelde ortalama 1761002 eleman ve 1249600 adet düğüm noktası bulunmaktadır.



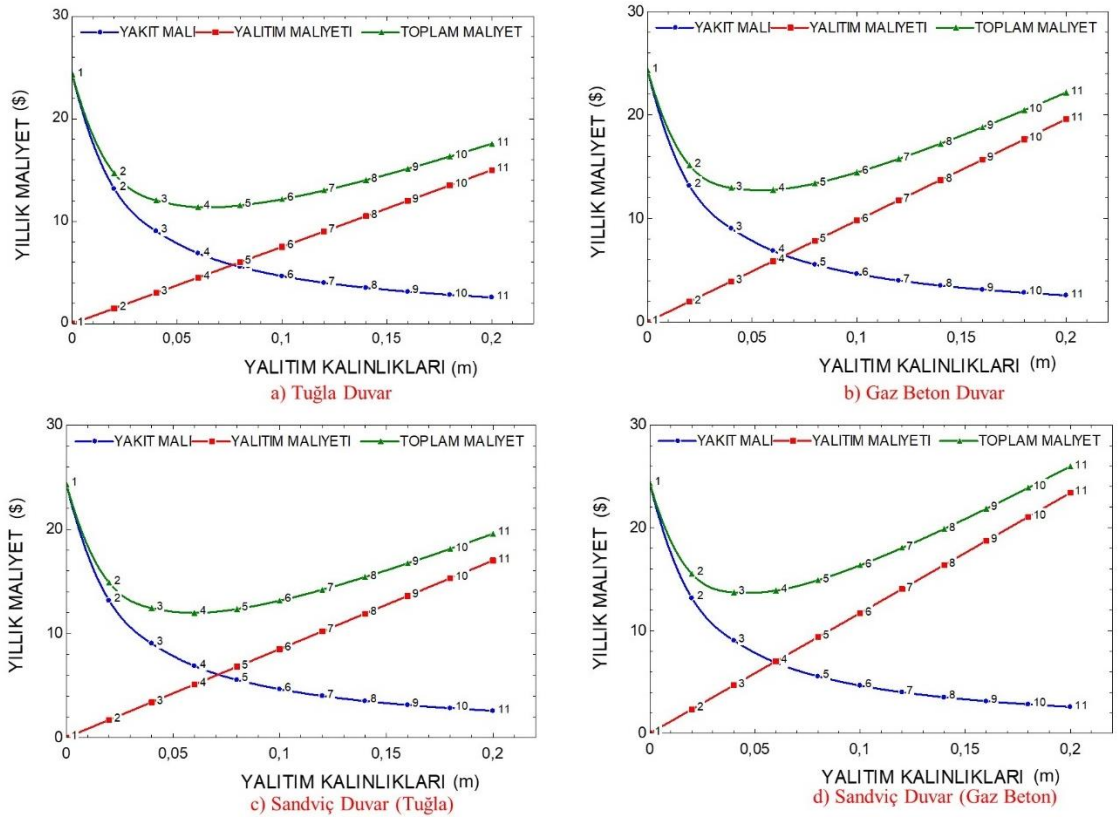
Şekil 2. Duvar modeli ağ yapısı

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Binaların yalıtılması; yakıt maliyetini ve toplam ısıtma maliyetini etkileyen önemli bir faktördür. Yalıtım kalınlığının artması ile ısı kaybı ve gerekli enerji ihtiyacı azalırken toplam maliyette düşer. Fakat gereksiz ve fazla

yalıtım kalınlığı yalıtım maliyetini ve toplam maliyeti artırır. Yalıtım kalınlığı belirlenirken optimum yalıtım kalınlığının önemi ve maliyet üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır.

Şekil 3'te farklı duvar modelleri için elde edilen yakıt, yalıtım ve yıllık maliyetleri verilmiştir.



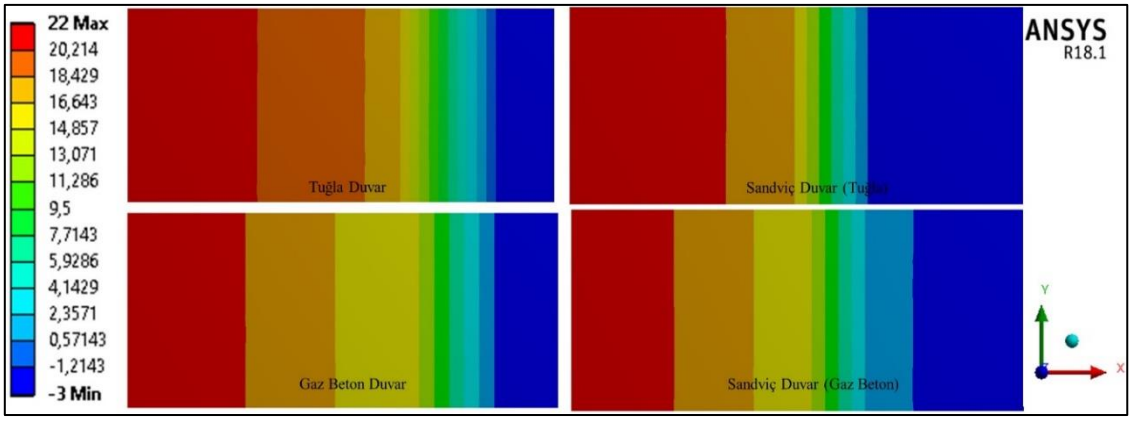
Şekil 3. Farklı duvar modelleri için elde edilen yakıt, yalıtım ve yıllık maliyetleri

Duvar modelleri için hesaplanan optimum yalıtım kalınlığı ve geri ödeme süresi Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'e göre yalıtım kalınlığının en düşük sandviç duvar (gaz beton) duvar modelinde elde edildiği ve en yüksek değerin ise tuğla duvar modelinde olduğu; geri ödeme süreleri bakımından tuğla duvar modelinde en düşük olduğu, sandviç duvar (gaz beton) duvar modelinde yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Duvar modelleri için hesaplanan optimum yalıtım kalınlığı ve geri ödeme süresi

Duvar modeli	Optimum Yalıtım Kalınlığı (m)	Geri Ödeme Süresi (yıl)
Tuğla duvar modeli	0.64	2.1
Gaz beton duvar modeli	0.52	3.7
Sandviç duvar (Tuğla) modeli	0.57	4.8
Sandviç duvar (Gaz beton) modeli	0.46	5.4

Optimum yalıtım kalınlıkları belirlendikten sonra bu yalıtım malzemesi ve duvar modelleri için termal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Ankara iline ait ocak ayı verilerine göre iç ve dış ortam sıcaklıkları sırasıyla 22 °C ve -3°C olduğu belirlenmiştir [27]. Şekil 4'te duvar modelleri için sıcaklık dağılım konturlarının değişimleri verilmiştir.



Şekil 4. Farklı yalıtım kalınlığına sahip duvar modellerinin sıcaklık konturları

Sıcaklık konturları incelendiğinde dış ve iç sıva tarafındaki sıcaklık farkı olduğu görülmüştür. İç ortam sıcaklık değişimi bakımdan incelendiğinde en iyi sonucun sandviç duvar (gaz beton) modelinde yaklaşık 2 °C iken, iç ortam sıcaklık değişimi en kötü yaklaşık 4 °C ile tuğla duvar modelinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hesaplanan optimum yalıtım kalınlıkları ile analizlerden elde edilen sıcaklık dağılımları birbiriyle örtüşmektedir. Sandviç duvar (gaz beton) modelinde diğer duvar modellerine göre ısı kaybı daha az olduğu gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda ısı kayıpları incelendiğinde en düşük ısı kaybının sandviç duvar (gaz beton) modelinde en yüksek ısı kaybının tuğla duvar modelinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda tuğla, gaz beton, sandviç duvar (tuğla) ve sandviç duvar (gaz beton) duvar modellerinde birim alan için ısı kaybı değerleri sırasıyla 7190 W/m^2, 4800 W/m^2, 4660 W/m^2 ve 3300 W/m^2 olarak bulunmuştur.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada bir binanın dış duvar modelleri için 3D tasarımlar yapılarak, hesaplamalar ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 4 farklı duvar modelleri için termal davranışları irdelenmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen sıcaklık ve ısı kaybı verileri ve hesaplamalar sonucunda elde edilen optimum yalıtım kalınlıkları ve geri ödeme süreleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en iyi optimum yalıtım kalınlığı sandviç duvar (gaz beton) modelinde 0.46 m olurken, optimum yalıtım kalınlığı en kötü 0.64 m ile tuğla duvar modelinde gözlemlenmiştir. Ayrıca birim alan için ısı kaybı değerleri bakımından en iyi ve en kötü sonucun sırasıyla sandviç duvar (gaz beton) ve tuğla duvar modellerinde 7190 W/m^2 ve 3300 W/m^2 olarak bulunmuştur. İç ortam sıcaklık değişimi bakımdan incelendiğinde en iyi sonucun sandviç duvar (gaz beton) modelinde yaklaşık 2 °C iken, iç ortam sıcaklık değişimi en kötü yaklaşık 4 °C ile tuğla duvar modelinde olduğu gözlemlenmiştir. Analizler ve yapılan hesaplamalar sonucunda sandviç duvar modelinde daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışma ile hesaplamaların yanında duvar modellerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılarak literatüre katkı sağlamaktadır. Binalarda yalıtım yapılmasının yalıtım ve yakıt maliyetleri toplam ısıtma maliyetini etkileyen en önemli faktörlerdir. Yalıtım kalınlığının artması ile ısı kaybı azalır. Fakat gereksiz ve fazla yalıtım kalınlığı yalıtım maliyetini arttırır. Bu yüzden yalıtım maliyeti artarsa toplam maliyet artar. Yalıtım kalınlığı belirlenirken optimum yalıtım kalınlığının önemi ve maliyet üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] Karadayı, T. T. ve Yüksek, İ. (2016). Yapılarda Isı Yalıtım Malzemeleri Seçimi Üzerine Bir Araştırma. *Tesisat Dergisi, 242,* 90-102.

[2] Kaynakli, A. G. Ö. ve Yamankaradeniz, R. (2007). Isıtma Süreci ve Optimum Yalıtım Kalınlığı Hesabı. *VII. Ulusal Tesis. Müh. Kongresi,* 187-195.

[3] Ogulata R.G. (2002). Sectoral energy consumption in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 6,* 471-480.

[4] Kaygusuz, K. ve Kaygusuz, A. (2004). Energy and sustainable development. Part II: Environmental impacts of energy use. *Energy Sources 26,* 1071-1082.

[5] Demirbaş, A. (2001). Energy balance, energy sources, energy policy, future developments and energy investments in Turkey. *Energy Conversion and Management 42,* 1239-1258.

[6] Bektaş, V. Çerçevik, A. E. Kandemir, S. Y. (2017). Binalarda Isı Yalıtımının Önemi ve Isı Yalıtım Malzemesi Kalınlığının Yalıtıma Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4*(1), 36-42.

[7] Soğukoğlu, M. ve Vatan, M. (2014). Mevcut betonarme konut binalarında enerji verimliliğinin artırılması için mimari çözüm önerileri. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi, 21*, 13-22.

[8] Kibici, İ. (2006). Bina yöneticileri. *İzodergi, 118*, 60-62.

[9] Kozak, M. ve Kozak, Ş. (2005). Su ve Isı yalıtımının Yapılarda Emniyet ve Ekonomi Açısından Önemi. *SDU Teknik Bilimler Dergisi, 5*(1), 38-47.

[10] Topçuoğlu, K. (2017). Yalıtım Teknolojisi, 2. basım, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti.

[11] Özel, M. ve Şengür, S. (2012). Farklı yakıt türü ve yalıtım malzemelerine göre optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi, 132*, 5-11.

[12] Özer, N. Özgünler, S. A. (2019). Yapilarda Yaygin Kullanilan Isi Yalitim Malzemelerinin Performans Özelliklerinin Duvar Kesitleri Üzerinde Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24*(2), 25-48.

[13] Gürel, A. E., Cingiz, Z. (2011). Farklı dış duvar yapıları için optimum ısı yalıtım kalınlığı tespitinin ekonomik analizi. *Sakarya University Journal of Science, 15*(1), 75-81.

[14] Kandemir, Y. Bektaş, S. Açikkalp, E. (2019). Dıştan yalıtım uygulamalarında farklı duvar modelleri için optimum yalıtım kalınlıklarının belirlenmesi ve ekonomik analizleri. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10*(1), 275-288.

[15] Öztuna, S. Dereli, E. (2009). Edirne İlinde Optimum Duvar Yalitim Kalinliğinin Enerji Tasarrufuna Etkisi. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 10*(2), 139-147.

[16] Kürekci, N. Bayrakçı, A. T. Çubuk, M. Emanet, Ö. (2012). Türkiye'nin Tüm İlleri İçin Optimum Yalıtım Kalınlığı. *Tesisat mühendisliği, 131*, 5-21.

[17] Ertürk, M. (2016). Bina dış duvarlarında farklı yalıtım malzemesi ve hava boşluğu kullanımının, birim alandaki enerji tasarrufu ve kişi başı emisyon hesaplamalarında yeni bir yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 395-406.

[18] Yu, J. Yang, C. Tian, L. Liao, D. (2009). A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China, *Applied Energy, 86*, 2520-2529.

[19] Gölcü, M. Dombaycı, A, Ö. Abalı, S. (2006). Denizli İçin Optimum Yalıtım Kalınlığının Enerji Tasarrufuna Etkisi ve Sonuçları. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21*(4), 639-644.

[20] Yavuz Ç. Yetkin S. El E. (2017). Dıştan Farklı Yalıtım Malzemeleriyle Kaplı Bir Duvar Modelinin Isıl Analizi. *International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology (IMESET'17 Bitlis)*.

[21] Uçar, A. ve Balo, F. (2010). Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. *Renewable Energy, 35*(1), 88-94.

[22] Liu, X. Chen, Y. Ge, H. Fazio, P. Chen, G. (2015). Determination of optimum insulation thickness of exterior wall with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Procedia Engineering, 121*, 1008-1015.

[23] Aktemur, C. ve Atikol, U. (2017). Optimum Insulation Thickness for the Exterior Walls of Buildings in Turkey Based on Different Materials, Energy Sources and Climate Regions, International *Journal of Engineering Technologies, 3*(2) 72-82.

[24] TS 825, (2008). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[25] Sezer, F. Ş. (2005). Türkiye'de Isı Yalıtımının Gelişimi ve Konutlarda Uygulanan Dış Duvar Isı Yalıtım Sistemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10*, 2-8.

[26] Hasan A. (1999). Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. *Applied Energy, 63*, 115-124.

[27] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2023). *Ankara ili için Isıtma derece-gün değeri ve soğutma derece-gün değeri.* https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/gun-derece.aspx?g=merkez&m=06-00&y=2023&a=01

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 394-406, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1407442
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

Effects of Thin Cell Layer Technique and Nutrient Media Contents of Regeneration and Browning Characteristics of the *Laurus nobilis L.* Explants

İnce Hücre Tabaka Tekniğinin ve Besin Ortamı İçeriklerinin *Laurus nobilis* L. Eksplantlarının Rejenerasyon ve Kararma Karakteristiklerine Etkileri

Büşra Toska[1], Halide Hande Güngör[2*], Aynur Gürel[1]

Geliş / Received: 21/12/2024 ***Revize / Revised: 26/01/2024*** ***Kabul / Accepted: 01/02/2024***

ABSTRACT

The aim of this study is in order to investigate the effects of explant source, explant type and MS media composition containing different concentrations of sucrose, activated carbon and Coconut milk for regeneration and browning of *Laurus nobilis* L. using thin cell layer (TCL) culture system. A higher rate of callus (57.15%) and shoot (2%) regeneration and a lower rate of blackening were determined in transversely cut stem TCL explants compared to leaf explants. While 1.33% callus regeneration was achieved in leaf explants; shoot regeneration could not be achieved. While more callus regeneration (35.17%) was found in explants taken from the field, more shoot regeneration (1.5%) and lower rate of browning were obtained in explants taken from *in vitro*. In the sugar trials, the highest callus regeneration (40.83%) was defined in MS medium containing 30 g/L sucrose supplemented with 1 mg/L BAP, and the highest shoot regeneration (2.5%) was determined in MS medium containing 45 g/L and 60 g/L sucrose supplemented with 1 mg/L BAP. When explant type, explant source and nutrient media composition are considered together; the highest callus regeneration (100%) was obtained in field-sourced stem TCL explants cultured in medium containing 25 mL/L coconut milk and 1 mg/L BAP. The highest shoot regeneration (6.6%) was determined in *in vitro* stem TCL explants cultured in MS media containing 30, 45, 60 g/L sucrose and 1 mg/L BAP. The lowest percentage of browning (50%) was obtained from *in vitro* stem TCL explants cultured in MS medium containing 2 g/L activated carbon and 1 mg/L BAP.

Keywords- **browning;** ***callus; Laurus nobilis L.; regeneration; Thin Cell Layer***

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, İnce Hücre Tabaka (TCL) sistemi kullanılarak *Laurus nobilis* L. bitkisinin rejenerasyonu ve kararması üzerine eksplant kaynağı, eksplant tipi ve farklı konsantrasyonlarda sükroz, aktif karbon ve Hindistan cevizi sütü içeren MS ortamı kompozisyonunun etkilerini araştırmaktır. Enine kesilmiş sap TCL eksplantlarında yaprak eksplantlarına kıyasla daha yüksek oranda kallus (%57.15) ve sürgün (%2) rejenerasyonu ve daha düşük

[1]Contact: busratoska2000@gmail.com (https://orcid.org/0009-0008-8877-6861)
Faculty of Engineering, Department of Bioengineering, Ege University, Izmir 35040, Turkey
[2]*Corresponding author contact: handegungr@gmail.com (https://orcid.org/0000-0003-4155-4926)
Institute of Science and Technology, Department of Biotechnology, Ege University, Izmir 35040, Turkey
[3]Contact: aynurgurel@gmail.com (https://orcid.org/0000-0002-7002-9752)
Faculty of Engineering, Department of Bioengineering, Ege University, Izmir 35040, Turkey

oranda kararma belirlenmiştir. Yaprak eksplantlarında %1.33 oranında kallus rejenerasyonu elde edilirken; sürgün rejenerasyonu elde edilememiştir. Arazideki dişi *Laurus nobilis* L. ağacından alınan eksplantlarda daha fazla kallus rejenerasyonu (%35,17) elde edilirken; *in vitro* koşullarda çimlendirilen tohumlardan alınan eksplantlarda daha yüksek oranda sürgün rejenerasyonu (%1,5) ve daha düşük oranda kararma belirlenmiştir. Şeker denemelerinde, en yüksek kallus rejenerasyonu (%40,83) 30 g/L sükroz içeren besin ortamında; en yüksek sürgün rejenerasyonu (%2,5) 45 g/L ve 60 g/L sükroz içeren besin ortamında elde edilmiştir. Eksplant kaynağı, eksplant tipi ve besin ortamı kompozisyonu interaksiyonu beraber incelendiğinde, en yüksek kallus rejenerasyonu (%100) 25 mL/L Hindistan cevizi sütü içeren besin ortamında kültüre alınan arazi kaynaklı sap eksplantlarında; en yüksek sürgün rejenerasyonu (%6,6) 30 g/L, 45 g/L ve 60 g/L sükroz içeren besin ortamında kültüre alınan *in vitro* kaynaklı sap TCL eksplantlarında; en düşük kararma yüzdesi (%50), 2 g/L aktif karbon içeren besin ortamında kültüre alınan *in vitro* kaynaklı sap TCL eksplantlarında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- kararma; kallus; Laurus nobilis L.; rejenerasyon, İnce Hücre Tabaka

I. INTRODUCTION

The homeland of the *Laurus nobilis* L. plant is stated as the Mediterranean countries in some sources, and Western Asia Minor (Anatolia) and the Balkans in some sources. There are approximately 45 genera and 1000 species in the Lauraceae family, and two species in the *Laurus* genus: *L. canariensis* Willd and *Laurus nobilis* L.. In the plant kingdom, *Laurus nobilis* L. (the laurel plant) is included in the vascular plants subkingdom, seed plants phylum, dicotyledons class, *Magnoliidae* subclass, angiosperms subsection, *Laurales* order, *Lauraceae* family and *Laurus* genus. *Laurus nobilis* has four subspecies: aurea, crispa and undula, which have wavy edges, and angustifolia, which has narrow leaves [1,2].

Laurus nobilis L., a plant of the scrub flora; it is a shrub-shaped plant that can withstand temperatures as low as 15 °C, is dioecious and evergreen, can grow up to 10-15 m tall and has dense branches [3,4]. Its fresh shoots are green and later turn red-black and are naked. Its leaves are fragrant. Its fruit is black in color, resembling an olive, and has a thin, oily wall apart from its chickpea-sized seeds. *Laurus nobilis* L. leaf is 5-10 cm long, its edges are slightly wavy, it has an elliptical structure and tapers towards both ends. The upper surface of the leaf is shiny dark green. Fresh *Laurus nobilis* L. leaves are light green in color and have thin veins. Fresh leaves have little aromatic smell [5].

The most commonly used parts of the plant are its leaves and fruits [6]. *Laurus nobilis* L. leaves, fresh or dried, are used as spices to add flavor to dishes [3]. In addition, since its leaves and fruits have aromatic and stimulating properties [6], the oils obtained from leaves are used in the cosmetic and pharmaceutical industries [3,7]. Essential oils obtained from fruits and seeds are used in the treatment of arthritis, psoriasis, eczema and herpes [7]. *Laurus nobilis* L. tree is also used as an ornamental plant. It can be planted to provide shade in gardens and parks or grown as a small tree. In addition, the branches of the tree are a source of wood used in fireplace fires [8]. 90% of the *Laurus nobilis* L. in the world is found in Turkey and spreads over an area of approximately 150 thousand hectares. Around 22 thousand tons of dried bay leaves are produced every year and approximately 1 million people are employed in this field. When we look at the foreign trade figures in Turkey, it is seen that the total laurel exports increased more than 3 times from 2005 to 2017, and as of 2017, dried laurel exports reached 40 million dollars ($ 36,058,749). Considering the exported by-products, the economic volume of bay laurel is estimated to be over 100 million dollars. Considering the high export potential of bay laurel and the diversity of its by-products, it is predicted that it will become an increasingly demanded product in the world [9].

Laurus nobilis L. areas are being destroyed due to excessive collection and faulty cultural practices. In addition, the production amount is not sufficient to meet the ever-increasing demands. Therefore, studies to protect, propagate and develop the *Laurus nobilis* L. are becoming more important day by day [9]. Like other *Laurus* species, propagation of *L. nobilis* by seedlings is difficult due to poor fruit set, very low germination and double dormancy in the bark [3]. In addition to these, there are restrictions such as the low yield of small seeds obtained from wild trees, pollination difficulties, and the fact that *Laurus nobilis* L. is a forest plant, harvesting the land in every 3 years. For all these reasons, there is a need for alternative propagation procedures such as plant tissue culture techniques that can clonally produce a large number of plants that are not affected by seasonal changes in a short time and in a narrow area [10].

Plant cell, tissue and organ cultures are very valuable tools that are used for basic and applied studies as well as for the commercial market. Plant cell, tissue and organ cultures are techniques designed for the growth and reproduction of plant materials. For this reason, various tissue culture methods are used in plant tissue cultures to protect endangered species and to produce species that are difficult to propagate [11]. Tissue culture techniques have different types of culture such as embryo culture, protoplast culture, meristem culture, anther and pollen

culture, ovary and ovule culture, callus culture and micropropagation [12]. Embryo culture is defined as the isolation of embryos from plant seeds and ovules and then culturing them in nutrient media. The most important issue in embryo culture is to determine a culture environment that supports the regular development of embryos cultured at different development periods. The technique in which protoplasts are cultured is called protoplast culture. When the cell wall of a plant cell is removed, the remaining part is the protoplast. Protoplasts can survive in isotonic environments, form a new cell wall, divide by mitosis, form new cell groups (microcallus) and then new plants. The culture of the meristematic dome smaller than 1 mm is called meristem culture. Meristem cultures are especially used to obtain virus-free plants. Anther culture is the separation of anthers containing immature pollen (microspores) from the buds and placing them in artificial nutrient media under *in vitro* conditions, where haploid embryos are obtained from immature pollen. The formation of haploid embryos and plants by culturing unfertilized ovaries or egg cells is called ovary or ovule cultures [13].

Micropropagation, one of the plant cell, tissue and organ culture techniques, is the process of propagating and rooting shoots obtained directly (organogenesis or somatic embryogenesis) or indirectly (callus, protoplast, etc.) from organized meristems and somatic cells that are not yet mature or have completed their maturation [13]. Callus, plant wound tissue, are cell masses without morphological order obtained by placing explants taken from the mother plant that have not lost their ability to divide into sterile nutrient media under *in vitro* conditions [14]. Callus can initiate from various plant parts such as pollen, embryo, petiole, root parts and internodes, where cells with the ability to divide are located [12]. Callus culture is a technique in which organ or tissue explants taken from plants are cultured in in vitro conditions, mostly in semi-solid nutrient media containing carbon sources and plant growth regulators, and unorganized cells are formed [11]. The process by which plant organs are derived from the callus mass is called indirect organogenesis [15]. In indirect organogenesis, plant regeneration is carried out by taking advantage of the pluripotent feature of the callus [16]. The production of buds or shoots directly from the tissue without the callus stage is called direct organogenesis [15]. In somatic embryogenesis, plant somatic cells undergo differentiation into embryonic stem cells and then form full plants through embryonic development, indicating that plant cells are totipotent thanks to the embryogenic callus. Somatic embryos can be produced directly from somatic cells or indirectly from embryonic callus. Under suitable conditions, somatic embryos can develop into shoots and roots. Callus occurs in both indirect organogenesis and indirect embryogenesis; however, the properties of the callus are different. Somatic embryogenesis induces embryogenic callus with totipotency and then into a somatic embryo, while organogenesis induces non-embryogenic callus with pluripotency. Furthermore, indirect organogenesis can cause genetic instability and somaclonal variance [16].

In the thin cell layer (TCL) culture system, longitudinal thin cell layer culture (lTLC) is obtained from different plant organs (stems, leaves, inflorescences, flower organs, apical region or embryo) by cutting them longitudinally when 1-2 mm remains, or transverse thin cell layer culture (tTCL) is obtained by cutting them transversely. While lTCLs are cut longitudinally and contain only one tissue type, such as a single layer of epidermal cells; now that TCLs are cut transversely, they contain a small number of cells from different tissue types [17,18]. Since the surface area of an explant in contact with the nutrient medium is greater in TCL explants compared to conventional explants, the components in the nutrient medium can reach the recipient cells of the explants more. This allows faster and more successful *in vitro* growth and morphogenesis to be observed in TCL explants [19]. Although they are much smaller than traditional explants, the regeneration potential of explants obtained with the TCL culture system is considerably higher than traditional explants. Factors such as explant type, morphological characteristics and source of the explant directly affect the regeneration potential [20]. TCL culture is also an effective method for inducing specific morphogenic pathways such as controlled somatic embryo production [18].

In addition to being used for in vitro micropropagation and synthetic seed production, the TCL technique is also successfully used in cryopreservation and genetic research [19]. It is also a very advantageous method for the propagation and protection of endangered and economically important plants [21,22]. One of the important advantages of the TCL technique is its ability to induce somatic embryogenesis, the formation of embryos from somatic cells. In this way, it is used as a highly efficient method for clonal propagation as it enables the production of many genetically identical plants from a single explant [20].

There are a number of factors that affect the regeneration capacity of TCL explants. The influence of parent plant and origin is an important factor, but other biotic factors such as genotype (species and variety), tissue or organ from which the explant is prepared, age, size and shape of the parent tissue or organ also affect regeneration success. While genotype determines the regeneration ability of plants through their genetic structure and characteristics, the selected tissue or organ of the explant also affects its regeneration potential. Younger tissues or organs from the parent plant may often have higher regeneration capacity. Besides, the regeneration of TCL explants is also related to the size and shape of the donor tissue, since tissues or organs of a certain size and shape may show better regeneration. Biotic factors such as microbial infections (fungi, bacteria or viruses) are also important. Therefore, it is important to ensure sterile working conditions. Additionally, growth hormones,

nutrients, light conditions and other physical environmental factors used in tissue culture may also affect regeneration capacity. Trial and error methods can be used to determine optimal regeneration conditions [18,20].

Within the scope of this study, the regeneration of L *Laurus nobilis* L., which is difficult to propagate by seed and vegetative propagation methods, was attempted under *in vitro* conditions. Due to the increasing demand and the excessive and destructive use of its natural distribution areas, alternative production techniques are needed for the production of this plant. At this point, it was decided to use the TCL culture technique, which offers a wide range of advantages compared to other plant tissue culture techniques. In addition, within the scope of this study, various experiments were carried out to determine the effect of explant source, TCL type and nutrient medium composition on callus and shoot regeneration. When the literature studies on the regeneration of the *Laurus nobilis* L. were examined so far, no study using the TCL technique was found. Therefore, this study is intended to be pioneering and guiding. When the data obtained from this study were evaluated, it was aimed to establish an effective regeneration protocol by determining the best explant source, TCL type and nutrient medium composition for callus and shoot regeneration in *Laurus nobilis* L.

II. MATERIAL AND METHOD

A. Plant Material

In this study seed, leaf and stem explants to be obtained from the female tree of *Laurus nobilis* L. at the Aegean Agricultural Research Institute were used as starting materials. After the seeds were germinated under *in vitro* conditions, the leaf and stem parts *in vitro* plantlets and also the leaf and stem parts taken from the female tree were cut transversely using the TCL technique and used for regeneration experiments (Figure 1).

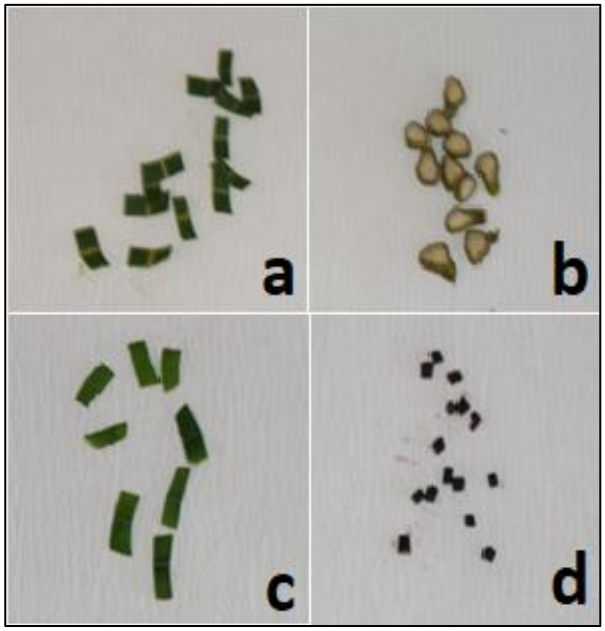


Figure 1. TCL explants a. leaf TCL explants taken from the female tree, b. stem TCL explants taken from the female tree, c. leaf TCL eksplants taken from *in vitro* plantlets, d. stem TCL explants taken from *in vitro* plantlets.

B. Sterilization

Seed, leaf and stem explants taken from the field were surface sterilized. For the sterilization of leaf explants, firstly, pre-washing (rinsing in water with detergent for 1 minute and waiting in running water for 10 minutes) and then sterilization in a laminar air flow cabinet (waiting in 0.1% $HgCl_2$ for 1 minute, then rinsing with sterile water 5 times) were carried out. For the sterilization of stem explants, the method of keeping them in 70% ethyl alcohol during 1 minute and in 25% bleach for 5 minutes in a laminar air flow cabinet and then rinsing with sterile water 5 times was used. For sterilization of seeds without pericarp, they were kept in 70% ethyl alcohol for 1 minute and 0.1% $HgCl_2$ for 5 minutes in a laminar flow cabinet and then rinsed with sterile water 5 times.

C. Germination

A cut was made on the edge of the seed to break dormancy. Afterwards, the seeds were cultured in glass tubes containing 10 mL MS [23] nutrient medium supplemented with 1 mg/L BAP (30 g/L sucrose, 3 g/L gelrite, pH 5.8).

D. Regeneration

Both sterilized leaf and stem explants taken from female *Laurus nobilis* L. tree and also taken from seeds germinated under *in vitro* conditions were cut transversely at a thickness of 0.5 - 1 mm using the TCL system and cultured in the nutrient media containing with different amount of sucrose, activated carbon and Coconut milk specified in Table 1. Explants were maintained in a 16-hour light and 8-hour dark photoperiod, 24 ± 2 ºC and 3500 lux light intensity.

Table 1. Nutrient media codes and ingredients

Nutrient media codes	Amount of sucrose (g/L)	Amount of activated carbon (g/L)	Amount of Coconut Milk (mL/L)
B1	15 g/L	-	-
B2	30 g/L	-	-
B3	45 g/L	-	-
B4	60 g/L	-	-
B5	30 g/L	0.5 g/L	-
B6	30 g/L	1 g/L	-
B7	30 g/L	1.5 g/L	-
B8	30 g/L	2 g/L	-
B9	30 g/L	-	25 ml/L
B10	30 g/L	-	50 ml/L

*MS-based nutrient media containing 1 mg/L BAP were used (3g/L gelrite).

E. Statistical evaluation

The trials were carried out with 3 replications, with 10 explants in each trial, according to the randomized plot design. Minitab 17 Statistical Software (Minitab Inc, PA, USA) was used to evaluate the data obtained. Statistically, differences between applications were compared based on the Tukey test with an error limit of %5 and expressed with different letters.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. *Effect of explant type on callus regeneration, shoot regeneration and browning*

When the effect of explant type on callus and shoot regeneration is examined; a higher percentage (%) was defined in stem TCL explants compared to leaf TCL explants taken from field and *in vitro*. While 57.15% callus-forming explant percentage were obtained from stem TCL explants; in leaf TCL explants, this value was found as 1.33%. Considering the effect of explant type on shoot formation, shoot regeneration was not achieved in leaf TCL explants; 2% shoot regeneration rate was determined in stem TCL explants. Browning was observed at a rate of 100% in leaf TCL explants and 87.5% in stem TCL explants (Table 2).

Table 2. Effect of explant type on callus formation, shoot formation and browning

Explant type	Percentage of explants forming callus (%)	Percentage of explants forming shoot (%)	Browning percentage (%)
Stem	57.15**a**±3,91	2**a**±0.572	87.5**b**±3.15
Leaf	1.33**b**±0,556	0**b**±0	100**a**±0

*Tukey was applied for forming callus, Fisher was applied for forming shoot and for browning.

B. *Effect of explant source on callus regeneration, shoot regeneration and browning*

When the explant source was considered in terms of callus formation, a higher rate of callus was obtained in TCL explants taken from the field compared to TCL explants taken from plants grown *in vitro*. While determining the percentage of callus-forming explants in TCL explants taken from the field as 35.17%; in TCL explants taken from *in vitro*, this value was found 23.32%. The highest percentage of shoot-forming explants (1.5%) was defined in TCL explants taken from *Laurus nobilis* L. seeds germinated *in vitro*. Very similar browning rates (%) of explants taken from the field and from *Laurus nobilis* L. plants germinated under i*n vitro* conditions were obtained (Table 3).

Table 3. Effect of explant source on callus regeneration, shoot regeneration and browning

Explant source	Percentage of explants forming callus (%)	Percentage of explants forming shoot (%)	Browning percentage (%)
Field	35.17**a**±5,21	0.5**a**±0.284	94.17**a**±2.44
In vitro	23.32**b**±3,70	1.5**a**±0.522	93.33**a**±2.30

*Tukey was applied for forming callus, Fisher wat applied for forming shoot and browning.

C. *Effect of nutrient media on callus regeneration, shoot regeneration and browning*

The highest percentage of callus-forming explants (40.83%) was obtained in B2 (MS + 1 mg/L BAP + 30 g/L sucrose) nutrient medium. The highest shoot regeneration (2.5%) was defined in B3 (MS + 1 mg/L BAP + 45 g/L sucrose) and B4 (MS +1 mg/L BAP + 60 g/L sucrose) nutrient media. No shoot regeneration was observed on B5 (MS + 1 mg/L BAP+ 0.5 g/L activated carbon), B6 (MS + 1 mg/L BAP+ 1 g/L activated carbon), B7 (MS + 1 mg/L BAP+ 1.5 g/L activated carbon) and B8 (MS + 1 mg/L BAP + 1.2 g/L activated carbon) nutrient media. The lowest browning percentage was determined as 77.5% in B8 (MS + 1 mg/L BAP + 1.2 g/L activated carbon) nutrient medium. The highest percentage of browning explants (100%) was found in B1 (MS + 1 mg/L BAP + 15 g/L sucrose), B2 (MS + 1 mg/L BAP + 30 g/L sucrose), B4 (MS + 1 mg/L BAP + 60 g/L sucrose), B9 (MS + 1 mg/L BAP + 25 ml/L coconut water) and B10 (MS + 1 mg/L BAP + 50 ml/L coconut water) nutrient media (Table 4).

Table 4. Effect of nutrient media on callus regeneration, shoot regeneration and browning

Nutrient media code	Percentage of explants forming callus (%)	Percentage of explants forming shoot (%)	Browning percentage (%)
B1	26.67**ab**±8.01	0.83**a**±0.833	100**a**±0
B2	40.83**a**±11.8	1.67**a**±1.12	100**a**±0
B3	19.17**b**±6.68	2.50**a**±1.79	97.5**ab**±2.5
B4	17.5**b**±7.99	2.50**a**±1.31	100**a**±0
B5	29.92**ab**±11.4	0**a**±0	86.67**bc**±7
B6	31.67**ab**±10.3	0**a**±0	85.83**bc**±7.83
B7	33.33**ab**±10.7	0**a**±0	90**abc**±7.18
B8	36.67**ab**±11.6	0**a**±0	77.5**c**±8.89
B9	32.50**ab**±12.5	1.67**a**±1.12	100**a**±0
B10	24.17**ab**±11.3	0.83**a**±0.833	100**a**±0

*Tukey was applied for forming callus, Fisher was applied for forming shoot and browning.

D. *Effect of explant type, explant source and nutrient medium interaction on callus regeneration, shoot regeneration and browning*

Regarding the explant type*explant source*nutrient medium interaction on callus formation, the highest percentage of callus-forming explants (100%) was obtained in the stem TCL explants of the female *Laurus nobilis* L. tree in the field cultured in B9 (MS + 1 mg/L BAP + 25 mL/L coconut milk) nutrient medium; the lowest callus-forming explant percentages (0%) were obtained both *in vitro* and in field leaf TCL explants. The highest shoot formation percentage (6.66%) was found in the stem TCL explants from *in vitro* cultured in B2 (MS + 1 mg/L BAP + 30 g/L sucrose), B3 (MS + 1 mg/L BAP + 45 g/L sucrose) and B4 (MS + 1 mg/L BAP + 60 g/L sucrose).

No shoot regeneration was observed in leaf explants taken from *in vitro* and the field. The lowest percentage of browning explants (50%) was defined from the stem TCL explants of the female *Laurus nobilis* L. tree in the field cultured in B8 (MS + 1 mg/L BAP + 2 g/L activated carbon) nutrient medium (Table 5).

Table 5. Effect of explant type, explant source and nutrient medium interaction on callus regeneration, shoot regeneration and browning

Explant source	Explant type	Nutrient media	Percentage of explants forming callus (%)	Percentage of explants forming shoot (%)	Browning percentage (%)
IN VITRO	STEM	B1	23.33**efg**±6.67	3.33**ab**±3.33	100**a**±0
		B2	63.33**abcdef**±3.33	6.67**a**±3.33	100**a**±0
		B3	40**cdefg**±5.77	6.67**a**±6.67	90**ab**±10
		B4	26.67**defg**±6.67	6.67**a**±6.67	100**a**±0
		B5	46.33**bcdefg**±27.5	0**b**±0	83.33**abcd**±16.7
		B6	63.33**abcdef**±13.3	0**b**±0	70**bcde**±15.3
		B7	66.67**abcdef**±20.3	0**b**±0	73.33**bcde**±26,7
		B8	70**abcde**±5.77	0**b**±0	50**e**±0
		B9	30**defg**±10	3.33**ab**±3.33	100**a**±0
		B10	10**g**±0	3.33**ab**±3.33	100**a**±0
	LEAF	B1	16.67**fg**±3.33	0**b**±0	100**a**±0
		B2	6.67**g**±3.33	0**b**±0	100**a**±0
		B3	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B4	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B5	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B6	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B7	3.33**g**±3.33	0**b**±0	100**a**±0
		B8	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B9	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B10	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
FIELD	STEM	B1	66.67**abcdef**±12	0**b**±0	100**a**±0
		B2	93.33**ab**±3.33	0**b**±0	100**a**±0
		B3	36.67**cdefg**±14.5	3.33**ab**±3.33	100**a**±0
		B4	43.33**bcdefg**±26	3.33**ab**±3.33	100**a**±0
		B5	73.33**abcde**±12	0**b**±0	63.33**cde**±18.6
		B6	63.33**abcdef**±12	0**b**±0	73.33**bcde**±26.7
		B7	63.33**abcdef**±8.82	0**b**±0	86.67**abc**±13.3
		B8	76.67**abcd**±14.5	0**b**±0	60**de**±26.5
		B9	100**a**±0	3.33**ab**±3.33	100**a**±0
		B10	86.67**abc**±13.3	0**b**±0	100**a**±0
	LEAF	B1	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B2	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B3	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B4	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B5	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B6	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B7	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B8	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B9	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0
		B10	0**g**±0	0**b**±0	100**a**±0

*Tukey was applied for forming callus, Fisher was applied for forming shoot and browning.

Callus and shoot regeneration achieved and browning observed in experiments using different 10 nutrient media, 2 explant types and 2 explant sources are given in Figure 2, Figure 3 and Figure 4.

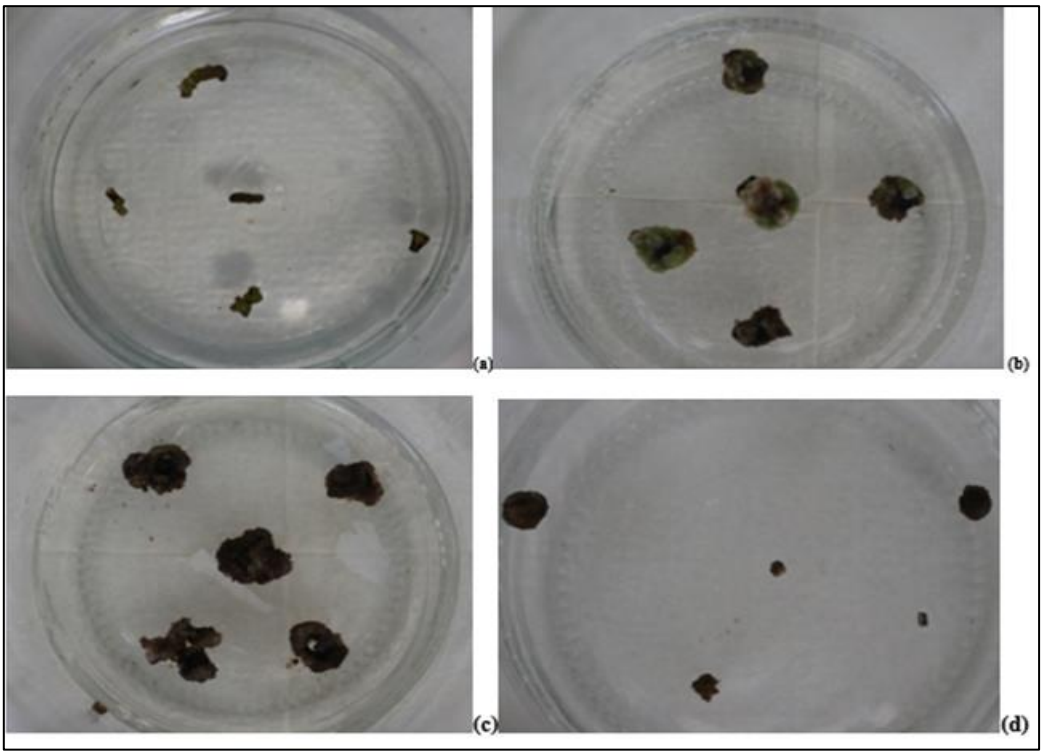


Figure 2. Calli regeneration obtained in the trials: a. Calli formed on explants belonging to the *in vitro* sourced leaf explant*B2 nutrient medium, b. Calli formed on explants belonging to the field sourced stem explant*B2 nutrient medium, c. Calli formed on explants belonging to the field sourced stem explant*B10 nutrient medium, d. Calli formed on explants of *in vitro* derived stem explant*B2 nutrient medium.

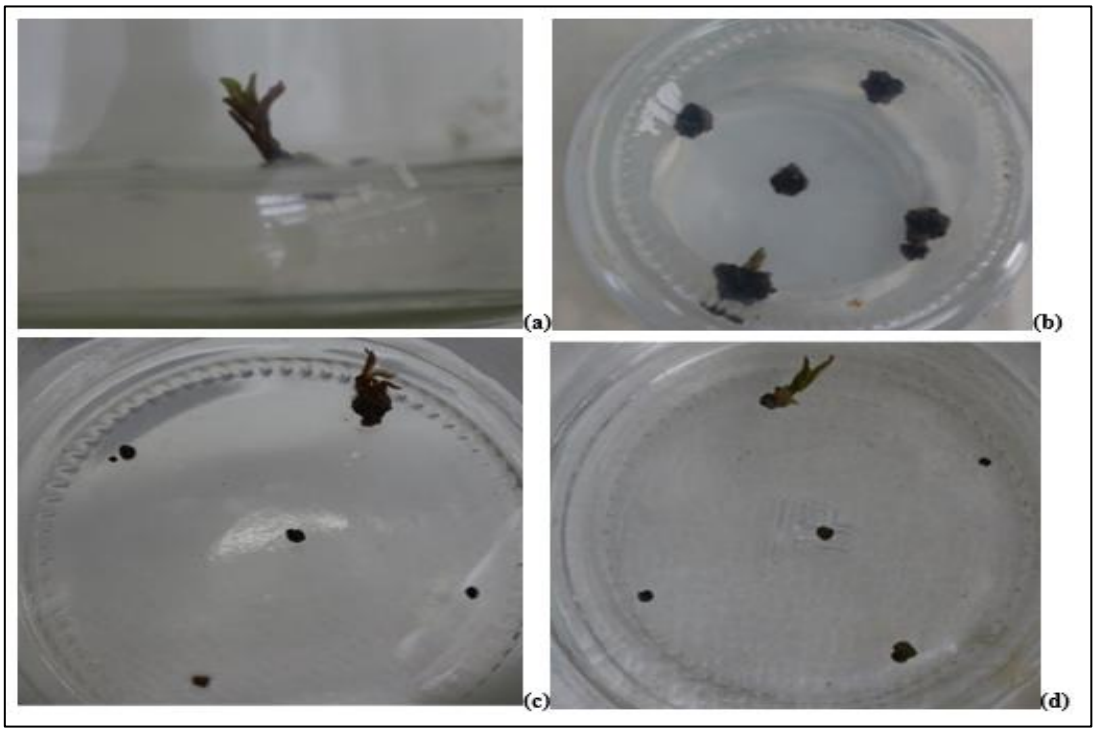


Figure 3. Shoot regeneration achieved in the trials: a. Shoots formed in explants of *in vitro* sourced stem explant*B4 nutrient medium, b. Shoots formed on explants belonging to the in vitro sourced stem explant*B9 nutrient medium, c.Shoots formed in explants belonging to the field derived stem explant*B10 nutrient medium, d.Shoot formation on explants of *in vitro* sourced stem explant*B9 nutrient medium.

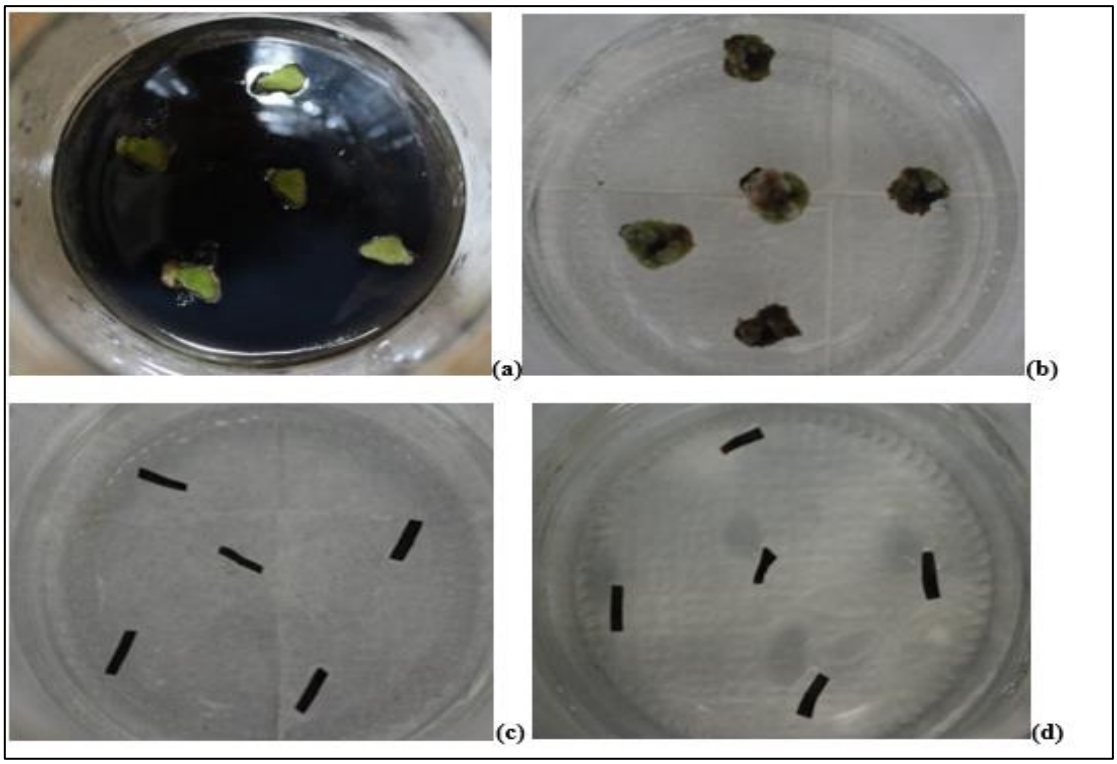


Figure 4. Browning situation observed in the trials: a. No browning explants belonging to the field-derived stem explant*B8 nutrient medium, b. Explants belonging to the field-derived stem explant*B9 nutrient medium, c. Explants belonging to the field-derived leaf explant*B1 nutrient medium, d. Explants of *in vitro* sourced leaf explant*B4 nutrient medium.

IV. DISCUSSION AND CONCULUSION

In this study, an attempt was made to determine the most suitable explant source, explant type and nutrient medium combination for the propagation of the bay plant, which is difficult to propagate by traditional methods, with alternative production techniques. In this context, leaf and stem explants taken both from the field and from seeds germinated under *in vitro* conditions were cut and cultured using the TCL technique. Since 1973, TCL explants have been used to check the organogenesis potential of a wide variety of plants. This is because the TCL system contains a wide range of advantages: higher regeneration potential compared to traditional *in vitro* methods [24], more effective transport of media components to target cells, early morphogenesis [25], cells in the TCL system have more contact with the nutrients and growth regulators in the culture medium than all explants [26], and micropropagation is easier and more efficient than other micropropagation techniques [27].

In this research, callus regeneration was obtained higher in stem TCL explants compared to leaf TCL explants. While 57.15% callus regeneration was achieved in stem TCL explants; this rate was achieved as 1.33% in leaf TCL explants. Küçükrecep and Tekdal carried out a study aiming to successfully create callus regeneration from the leaf and stem explants of selected Turkish genotypes of Common Bean. According to the results, the highest callus ratio was obtained stem explants [28]. In the study conducted by Mahood et al., a higher rate of callus regeneration was obtained in stem explants of *Gazania rigens* plant compared to leaf explants [29]. These results support our findings obtained in our study. Callus regeneration (100%) was achieved in stem TCL explants of female *Laurus nobilis* L. tree cultured in MS nutrient medium supplemented with 1 mg L^{-1} BAP and containing 25 mL L^{-1} coconut milk. Many studies have reported the growth-promoting effects of coconut milk. The growth-stimulating effects of coconut milk are due to its content of free amino acids, reduced nitrogen, myo-inositol and sorbitol, as well as unidentified substances [30]. George's study, revealed that coconut milk was useful for inducing the development of both callus and suspension cultures and at the initiation of morphogenesis [31]. Stanica et al. used modified MS + NAA 0.01 mg/L + BA 0.3 mg/L + ascorbic acid 250 mg/L + adenine sulfate 1 mg/L and DKW + IBA 0.1 mg/L as the basic nutrient medium in the tissue culture study conducted on *Laurus nobilis* L. The best result was achieved as 62% rate of callus development in the MS nutrient medium with 1 mg/L BA [32]. The data obtained in our study is higher than the literature.

While 2% average of shoot regeneration acording to two explant sources was observed in the cultivated stem TCL explants which found to be more successful since no shoot regeneration occurred in the leaf explants. Shoot regeneration percentages of TCL explants taken from *in vitro* plants were higher than those of TCL explants

taken from field. No shoot formation occurred in leaf TCL explants taken both *in vitro* and in the field. This is thought to be due to the fact that lTCL explants contain a single type of tissue, while tTCL explants contain a small number of cells in different tissue types [19]. In this research, all nutrient media were supplemented with 1 mg/L BAP. Blakesley and Constantine stated that BAP is a shoot-stimulating cytokinin that is widely used in many plant species, and emphasized that when used in combination, the ratios of cytokinin and auxin in combination are of critical importance in stimulating shoot formation [32]. Cytokinines are one of the growth regulators widely used in plant tissue culture technology. Cytokinines cause a variety of physiological effects when administered at low concentrations as high molecular weight nitrogenous bases. For example, they promote axillary bud growth and stimulate the division and differentiation processes of plant cells [34]. Mechanisms such as cell division and callus formation can be stimulated by plant growth regulators [35].

In this study, the highest shoot regeneration (6.6%) was obtained *in vitro* stem TCL explants cultured in MS nutrient media containing 30, 45 and 60 g L^{-1} sucrose supplemented with 1 mg L^{-1} BAP. Nhut et al. found that in their study established with stem transverse TCL explants of *Lilium longiflorum* plant, a higher rate of shoot regeneration was obtained in nutrient media containing 30 and 40 g L^{-1} sucrose compared to nutrient media containing less concentration of sucrose. Shoot regeneration efficiency was obtained at a lower rate in nutrient media containing 10 and 20 g L^{-1} sucrose [36]. In the study by Gauchan, the effect of various concentrations of different sugars on root and shoot formation in maize was reported that all concentrations of maltose and sucrose showed a good growth response in shoot and root [37]. Zulfiqar et al., as a result of their study on the avocado plant, reported that there are some factors that determine the success of *in vitro* plant regeneration, and that the ontogeny of the mother plant, explant source (apical or axillary), the location of the explant in the mother plant, its metabolic state and genotype are effective on the regeneration potential [38]. Ismail et al. found that young explants were more likely to form shoots than mature explants [39]. The findings obtained in this study support the results obtained in our study.

Oxidation of phenolic compounds originating from the cut surface of explants in the nutrient medium can cause significant problems in the culture of some plant species. This situation causes browning of the nutrient medium and toxic effects in the tissues, negatively affecting the development and differentiation abilities of the explants. To prevent the nutrient medium and tissues from browning, phenolic compounds must be removed from the environment. For this purpose, phenolic compounds are removed from the environment by using phenolic adsorbents such as activated carbon or polyvinylpyrrolidone (PVP). These chemicals adsorb phenolic compounds and neutralize them [40]. In plant tissue culture studies, it has been shown that activated carbon can promote the irreversible adsorption of inhibitory compounds in the culture medium and significantly reduce the levels of toxic metabolites, phenolic exudation, and brown exudate accumulation [41]. In this study, it was determined that adding 2 mg/L activated carbon to the nutrient medium reduced the browning percentage (77.5%). In a study conducted in Tunisia, Souayah et al. stated that the best shoot development in the propagation of *Laurus nobilis* L. by tissue culture was with the addition of BAP + GA_3 (1g/L) to 1/3 MS medium. He stated that activated carbon improves shoot, root and callus development. In various species of the family Lauraceae, one of the main problems is high levels of tannins and phenolic compounds that leach into the environment, where they undergo oxidation and interfere with growth. Therefore, the role of activated carbon appears to be essential in the process due to its ability to neutralize the reaction of tannins [42].

Laurus nobilis L. is an evergreen tree from the Lauraceae family, belonging to the Mediterranean climate, with shiny dark green leaves and small greenish yellow flowers, containing aromatic, valuable essential oils. It is widely used in ornamental plants, cosmetics and food fields. In addition to the fact that *Laurus nobilis* L. seeds have a double dormancy and low germination rate, alternative production techniques such as plant tissue culture techniques are needed for the production of the *Laurus nobilis* L. due to reasons such as excessive collection and destruction of *Laurus nobilis* L. areas due to faulty cultural processes. By using plant tissue culture techniques, the problems encountered in traditional *Laurus nobilis* L. production can be eliminated in a short time and regardless of the season, and it becomes possible to obtain a large number of plants. This research is a pioneering study, as there has been no study conducted using the "Thin Cell Layer (TCL) Culture System" on the plant *Laurus nobilis* L. to date.

According to the results of this study, important findings were obtained when examined in terms of callus and shoot formation, and it was determined that the *in vitro* regeneration potential of stem TCL explants of *Laurus nobilis* L. plant was higher compared to leaf explants. TCL explants taken from female *Laurus nobilis* L. trees in the field were found to have a higher tendency to form callus, whereas TCL explants belonging to plants grown *in vitro* were more convenient in order to form shoots. It has been determined that adding activated carbon to the nutrient medium reduces browning. With the important findings to be obtained, it is obvious that TCL technique will be addressed more comprehensively in this plant species.

ACKNOWLEGMENT

We would like to thank TUBITAK for supporting our work within the scope of the 2209-A University Students Research Projects Support Program.

REFERENCES

[1] Baydar, H. (2009). *Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Bilimi ve Teknolojisi*. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları*. Turkey, 339.

[2] Boza, A. (2011). *Karaburun Çeşme ve Dilek Yarımadası'nda Bulunan Doğal Defne (Laurus nobilis L.) Populasyonları Üzerinde Araştırmalar*. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[3] Canhoto, J.M., Lopes, M.L., & Cruz, G.S. (1999). Somatic Embryogenesis Induction in Bay Laurel (Laurus nobilis L.). *Somatic Embryogenesis in Woody Plants, 4*, 341-367.

[4] Boza, A., & Altun, Z.G. (2013). Karaburun, Urla (Çeşme yarımadası) ve Dilek yarımadasında bulunan doğal defne (Laurus nobilis L.) popülasyonlarında fenolojik gözlemler ve yağ analizleri. *Ege Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Teknik Bülten*, Türkiye.

[5] Başer, B.C., Yılmaz, A., & Mutlu, O.A. (2018). Defne İşleme ve Paketleme Tesisi Ön Fizibilitesi Raporu. *Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı*, Türkiye.

[6] Özçelik, H., & Balabanlı, C. (2005). Burdur ilinin tıbbi ve aromatik bitkileri. *1. Burdur Sempozyumu*. 16 - 19 Kasım, Burdur, 1127- 1137.

[7] Rady, M.R., & Youssef, A.A. (1999). Comparison Of Essentıal Oils And Fats from In Vitro Cultures And Field Collected Material Of Laurus Nobilis. *Journal of Agricultural Sciences Mansoura University, 24(7):* 3401 - 3412.

[8] Parlar, E. (2017). *Laurus nobilis L. (Akdeniz Defnesi) Bitkisinde Flow Sitometri Yöntemi ile Cinsiyet Tayini*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Tekirdağ.

[9] Yılmaz, A., & Çiftçi, V. (2021). Türkiye'de Defne (Laurus nobilis L.) Bitkisinin Durumu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 22*, 325-330.

[10] Al Gabbiesh, A.H., Ghabeish, M.H.I., Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2015). Plant Regeneration Through Somatic Embryogenesis From Calli Derived From Leaf Bases of Laurus nobilis L. (Lauraceae). *Plant Tissue Culture and Biotechnology, 24(2),* 213–221.

[11] Gürel, A., Hayta, Ş., Nartop, P., Bayraktar, M., &Fedakar S.O. (2013). *Bitki Hücre, Doku ve Organ Kültürü Uygulamaları. Ege Üniversitesi Basım Evi*. İzmir, 1-16.

[12] Dinçer, D., Bekçi. B., & Bekiryazıcı. F. (2016). Türkiye'deki Doğal Bitki Türlerinin Üretiminde Doku Kültürü Tekniklerinin Kullanımı. *Nevşehir Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 5*, 295–295.

[13] Babaoğlu, M., Gürel, E., Özcan, S. (2002). *Bitki Biyoteknolojisi. Selçuk Üniversitesi Yayınları*. Konya, 374.

[14] Erkoyuncu, M.T., & Yorgancılar, M. (2015). Bitki Doku Kültürü Yöntemleri ile Sekonder Metabolitlerin Üretimi. *Selçuk Tarım Bilimleri Dergisi, 2(1),* 66-76.

[15] Gallego, A. (2023). *In Vitro Plant Regeneration Overview: Understanding Organogenesis vs. Somatic Embryogenesis.* https://goldbio.com/articles/article/Plant-Regeneration-Overview-Organogenesis-vs-Somatic-Embryogenesis.

[16] Long, Y., Yang, Y., Pan, G. & Shen, Y. (2022). New Insights Into Tissue Culture Plant-Regeneration Mechanisms. *Frontiers in Plant Science, 13*, 926752.

[17] Tran Thanh Van, K. (1980). Control of Morphogenesis by Inherent and Exogenously Applied Factors in Thin Cell Layers. *International Review of Cytology, 32*, 291-311.

[18] Tran Thanh Van, M. (2003). *Thin Cell Layer Culture System: Regeneration and Transformation Applications. Kluwer Academic Publisher*. Netherlands, 1-16.

[19] Güngör, H.H., Bayraktar, M., & Gürel, A. (2022). Bitki Doku Kültürlerinde İnce Hücre Tabaka (TCL) Kültür Sistemi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(2),* 449-460.

[20] Teixeira Da Silva, J.A., & Dobranszki, J. (2015). Dissecting the Concept of the Thin Cell Layer: Theoretical Basis and Practical Application of the Plant Growth Correction Factor to Apple, Cymbidium and Chrysanthemum. *Journal of Plant Growth Regulation, 33*, 881–895.

[21] Tripathi, D., Rai, K.K., Rai, S.K., & Rai, S.P. (2018). An Improved Thin Cell Layer Culture System for Efficient Clonal Propagation and İn vitro Withanolide Production in a Medicinal Plant Withania coagulans. *Dunal Industrial Crops and Products, 119,* 172–182.

[22] Sabooni, N., & Shekafandeh, A. (2017). Somatic Embryogenesis and Plant Regeneration of Blackberry Using the Thin Cell Layer Technique. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 130(2),* 313–321.

[23] Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiol. *Plant, 15,* 473- 497.

[24] Hossain, M.M., Kant, R., Pham, V., & Winarto, B. (2013). The Application of Biotechnology to Orchids. *Critical Reviews in Plant Sciences, 32,* 69–139.

[25] Da Silva, J.A.T., Altamura, M.M., & Dobranszki, J. (2015). The Untapped Potential of Plant Thin Cell Layers. *Journal of Horticultural Research, 23(2),* 127-131.

[26] Monja-Mio, K.M., & Robert, M.L. (2013). Direct Somatic Embryogenesis of Agave fourcroydes Lem. through Thin Cell Layer Culture. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 49(5),* 541-549.

[27] Ekmekçigil, M., Bayraktar, M., Akkuş, Ö., & Gürel, A. (2019). High-frequency Protocorm-like Bodies and Shoot Regeneration through a Combination of Thin Cell Layer and RITA® Temporary Immersion Bioreactor in Cattleya forbesii Lindl. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 136,* 451–464.

[28] Küçükrecep, A., & Tekdal, D. (2021). Callus Induction from Leaf and Stem Explants of Selected Turkish Genotypes of Common Bean. *Acta Scientific AGRICULTURE, 5(11),* 2-5.

[29] Mahood, H.E., Sarropoulou, V., & Tzatzani, T.T. (2022). Efect of explant type (leaf, stem) and 2,4-D concentration on callus induction: infuence of elicitor type (biotic, abiotic), elicitor concentration and elicitation time on biomass growth rate and costunolide biosynthesis in gazania (Gazania rigens) cell suspension cultures. *Bioresources and Bioprocessing, 9(100),* 1-14.

[30] Häkkinen, S.T., Nygren, H., Nohynek, L., Puupponen-Pimiä, R., Heiniö, R.L., Maiorova, N., Rischer, H., & Ritala, A. (2020). Plant cell cultures as food—aspects of sustainability and safety. *Plant Cell Reports, 39,* 1655–1668.

[31] George, E.F. (2008). *Plant propagation by tissue culture*. Springer, Holanda, 1–28.

[32] Stanica, F., Standardi, A., Hoza, D., & Tudor, T.A. (1992). Studies on Micropropagation of Laurel (Laurus nobilis L.). *Horticultura, 35,* 83-90.

[33] Blakesley, D., & Constantine, D. (1992). Uptake and metabolism of 6-benzyladenine in shoot cultures of a range of species. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 28,* 183-186.

[34] Çetin, N., Güler, B., & Gürel, A. (2021). In Vitro Regeneration Potential of Thin Cell Layer Explants of Lentisk (Pistacia lentiscus var. Chia) Plant. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2),* 960-977.

[35] Taiz, L., Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology 3rd Edition*. Massachusetts,623.

[36] Nhut, D.T., Van Le, B., Fukai, S., Tanaka, M., & Tran Thanh Van, K. (2001). Effects of activated charcoal, explant size, explant position and sucrose concentration on plant and shoot regeneration of Lilium longiflorum via young stem culture. *Plant Growth Regulation, 33,* 59–65.

[37] Gauchan, D.P. (2012). Effect Of Different Sugars On Shoot Regeneration Of Maize (Zea Mays L.). *Kathmandu University Journal Of Science, Engineering And Technology,* 8(1), 119-124.

[38] Zulfiqar, B., Abbasi, N.A., Ahmad, T., & Hafiz, I.A. (2009). Eksplant Kaynaklarının ve Farklı Bitki Büyüme Düzenleyici Konsantrasyonlarının Avokado (Persea americana Mill.) Cv. "Fuerte. *Pakistan Botanik Dergisi, 41,*2333-2346.

[39] Ismail, H., Abdul Shukor, N., Mohd Yusoff, A., Hasnida Hassan, N., Zainudin, F., Abdullah, N., & Abdul Rahman, S.S. (2012). In vitro shoot induction of Acacia auriculiformis from juvenile and mature sources. *Journal of Biotechnology and Pharmaceutical Research, 3(5),* 88-93.

[40] Özkaynak, E., & Samancı, B. (2003). Mikroçoğaltımda Çevresel Kontrol Faktörleri. *Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi, 20(1),* 7-18.

[41] Thomas, T.D. (2008). The Role of Activated Charcoal in Plant Tissue Culture. *Biotechnology Advances, 26(6),* 618-631.

[42] Souayah, N., Khouja, M.L., Khaldi, A., Rejeb, M.N., & Bouzid, S. (2002). Breeding improvement of Laurus nobilis L. by conventional and in vitro propagation techniques. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants, 9*, 101–105.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 407-421, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1407429
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi – Research Article

Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Sisteminde R404A Alternatifi GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanılmasının Termodinamik Analizi

Thermodynamic Analysis of Using with Low GWP Refrigerants Alternative of R404A in Vapor Compression Refrigeration System

Nazan Sevtap Can[1], Ragıp Yıldırım[2], Arzu Şencan Şahin[3*]

Geliş / Received: 20/12/2023 ***Revize / Revised: 13/02/2024*** ***Kabul / Accepted: 15/02/2024***

ÖZ

Isıtma ve soğutma endüstrisinde çalışma akışkanı olarak soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Çevresel sorunların artmasıyla birlikte dünyada giderek artan sera gazı emisyonu, küresel ısınma gibi çevresel problemlerin önüne geçmek için çevreye zarar veren akışkanların kullanımı azaltılmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda birçok soğutucu akışkan geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu çalışmada, küresel ısınma potansiyeli (GWP) yüksek olan R404A yerine alternatif soğutucu akışkanlarının kullanıldığı buhar sıkıştırmalı soğutma sisteminin teorik analizi, mühendislik denklem çözücü (EES) programı kullanılarak yapılmıştır. Buhar sıkıştırmalı soğutma sisteminde GWP değeri düşük olan R454A, R454C, R455A, R457A ve R459B soğutucu akışkanları kullanılmıştır. Soğutucu akışkanların termodinamik özellikleri REFROP yazılımından alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek soğutma performans katsayısı (COP) değeri, kondenser sıcaklığı 30ºC ve evaporatör sıcaklığı 5 ºC iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 8.03 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, COP değeri 7.94 olarak bulunmuştur. En yüksek ekserji verimi ise kondenser sıcaklığı 30ºC ve evaporatör sıcaklığı -5ºC iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 0.59 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde ekserji verimi 0.58 olarak bulunmuştur. En yüksek ekserji yıkımının ise soğutma sisteminin evaporatöründe olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, R457A'nın hem GWP hem de COP ve ekserji verimliliği açısından R404A yerine kullanılabilecek en uygun alternatif soğutucu akışkanlardan biri olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Soğutma, enerji, ekserji Yeni nesil soğutucu akışkanlar

ABSTRACT

Refrigerants are used as working fluids in the heating and cooling industry. In order to prevent environmental issues such as greenhouse gas emissions and global warming, which are on the rise due to increasing environmental problems worldwide, the use of environmentally harmful fluids is tried to be reduced. In this study, the theoretical

[1]İletişim: cnazansevtap@gmail.com (https://orcid.org/0000-0003-1002-9109)
Makine Mühendisliği, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
[2]İletişim: ryildirim@mehmetakif.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-0902-3420)
Elektrik ve Enerji, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
[3]*Sorumlu yazar iletişim: arzusencan@isparta.edu.tr (https://orcid.org/ 0000-0001-8519-4788)
Makine Mühendisliği, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

analysis of a vapor compression refrigeration system using alternative refrigerants instead of R404A, which has a high global warming potential (GWP), was carried out using the Engineering Equation Solver (EES) program. R454A, R454C, R455A, R457A and R459B refrigerants with low GWP were used in the vapor compression refrigeration system. The thermodynamic properties of the refrigerants were obtained from REFROP software. As a result of the analysis, the highest coefficient of performance (COP) value was found to be 8.03 in the system operating with R457A refrigerant when the condenser temperature was 30ºC and the evaporator temperature was 5ºC. Under the same conditions, the COP value was found to be 7.94 in the system operating with R404A refrigerant. The highest exergy efficiency was found to be 0.59 in the system operating with R457A refrigerant when the condenser temperature was 30ºC and the evaporator temperature was -5ºC. Under the same conditions, the exergy efficiency was found to be 0.58 in the system operating with R404A refrigerant. The highest exergy destruction was observed in the evaporator of the cooling system. As a result, it was determined that R457A is one of the most suitable alternative refrigerants that can be used instead of R404A in terms of both GWP and COP and exergy efficiency.

Keywords- Cooling, energy, exergy, new generation refrigerants

I. GİRİŞ

Soğutma, ısı pompası sistemleri ve organik Rankine çevrimlerinde kullanılan R134a, R410A ve R404A gibi yüksek GWP (küresel ısınma potansiyeli) değerine sahip soğutucu akışkanlar, iklim değişikliği üzerindeki etkileri nedeniyle aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmaktadır. Bu nedenle çevre dostu aynı zamanda yüksek enerji performansına sahip soğutucu akışkanların kullanılması önemlidir. Bazı ülkeler veya kuruluşlar, sera gazlarını sınırlandırmak için alternatif soğutucu akışkanların geliştirilmesini teşvik etmek amacıyla bir dizi yasa ve yönetmelik yayınlamıştır. Avrupa Birliği 2015 yılında HFC'leri (Hidroflorokarbonlar) azaltmaya başlamıştır ve yayınlanan F-gaz yönetmeliği 2030 yılı sonuna kadar HFC soğutucu akışkanlarının %79'unu aşamalı olarak ortadan kaldırmayı planlamaktadır. Aynı zamanda, kullanılabilir soğutucu akışkanların GWP değeri de belirtilmiştir [1,2]. Türkiye'de 2010 yılından itibaren CFC (kloroflorokarbon) ve HCFC (Hidrokloroflorokarbon) soğutucu akışkanların kullanımı yasaklanmıştır. HCF'lerin ise 2030 yılına kadar kullanımına müsaade edilmektedir. Dolayısıyla, R404A gibi soğutucu akışkanların küresel ısınma üzerindeki etkisi önemli olduğundan, yüksek GWP'li HFC'ler HCFC'lerin yerini alacak en uygun seçenek olarak görülmemektedir. Küresel iklim değişikliği üzerinde yüksek etkiye sahip bu soğutucu akışkanların yerini alacak alternatif soğutkanlara yönelik teşvik de artmaktadır [3].

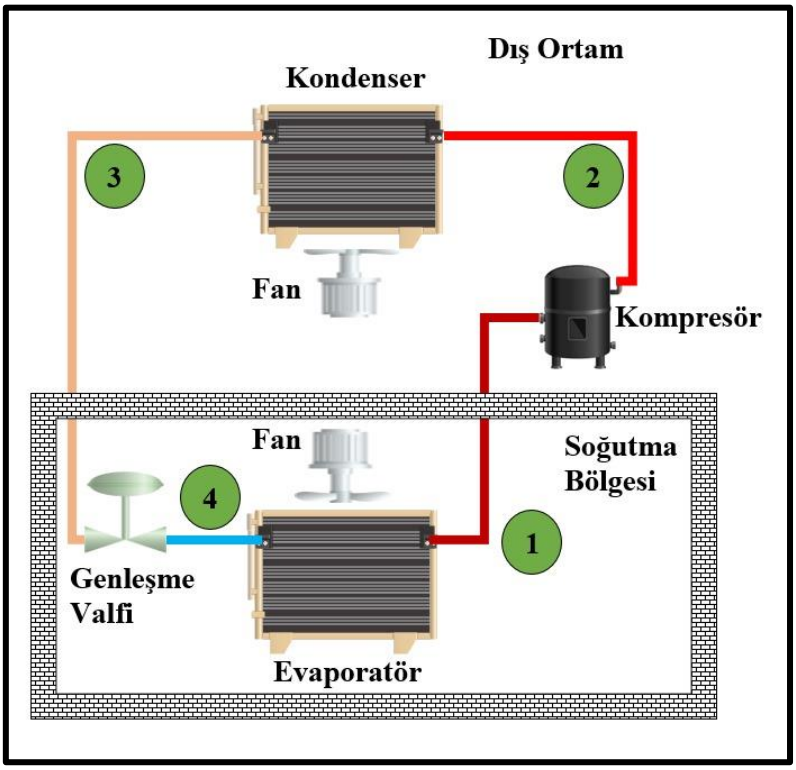
Literatürde, R404A ve alternatiflerine ilişkin bazı çalışmalar yer almaktadır. Altınkaynak çalışmasında R404A'ya alternatif soğutucu akışkanlar R455A, R454C, R452A için bir soğutma sisteminin kapsamlı bir termodinamik performans analizi yapmıştır. R455A, R454C, R452A ve R404A için COP değerleri sırasıyla 2.63, 2.30, 2.31 ve 2.47' dir. R455A, R454C, R452A ve R404A için ekserji değerleri sırasıyla % 43.9, %38.7, %38.8 ve %42.3 olarak bulunmuştur. Bu alternatifler soğutkanlar arasında en iyi akışkanın R455A olduğu tespit edilmiştir [4]. Devecioğlu ve Oruç çalışmalarında soğutma sistemlerinde kullanılan R404A ve R452A soğutucu akışkanlarını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. R452A kullanıldığında COP değerinin R404A'dan yaklaşık %3 ila %8 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. Sistemin güç tüketimi de yaklaşık %5 oranında azaltılmıştır [5]. Oruç ve Devecioğlu yaptıkları çalışmalarında R404A'yı, R454A ve R454C ile deneysel olarak karşılaştırmışlardır. R454A ve R454C' nin COP değerlerinin R404A'dan sırasıyla yaklaşık %14 ve %10 daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir [6]. Llopis ve ark., R404A'ya alternatif olan daha düşük GWP değerlerine sahip R459B, R454C, R455A ve R457A soğutucu akışkanlarının enerji performansını deneysel olarak araştırmıştır. R454C, R459B, R457A, R455A'nın enerji tüketiminin R404'e göre sırasıyla %2.45, %11.55, %10.69 ve %2.9 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [7]. Yıldırım vd., R404A ve R454C soğutucu akışkanlarının enerji ve çevresel performansını, farklı evaporatör ve kondenser sıcaklığı için karşılaştırmışlardır. R454C, R404A'dan yaklaşık %4 daha yüksek bir COP değerine sahipken, yaşam döngüsü iklim performansının yaklaşık %3.5 daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir [8]. Ender, çalışmasında R404A soğutucu akışkanı kullanan buhar sıkıştırmalı soğutma sisteminde herhangi bir değişiklik olmaksızın R404A yerine R442A ve R453A kullanımını deneysel olarak incelemiştir. R442A ve R453A'nın soğutma kapasitelerinin R404A'ya göre sırasıyla %6.92 ve %3.10 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [9]. Mendoza-Miranda vd., R134a ve R404A'nın yerine kullanılabilen R448A ve R450A soğutkanlarının soğutma sistemlerindeki performansını araştırmışlardır [10]. Mota-Babiloni vd., R404A'ya alternatif R448A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemi güç tüketimi, soğutma kapasitesi ve COP değerleri açısından kıyaslamışlardır [11]. Li yaptığı çalışmada, R404A akışkanı yerine kullanılabilecek R452A akışkanının R404A'ya göre sera gazı emisyonlarını %5-15 oranında azalttığını göstermiştir [12].

Literatür özetlerinde görüldüğü gibi, R404A'nın alternatifleri olan akışkanlarla ilgili bazı çalışmalar mevcuttur. Ancak R454A, R454C, R455A, R457A, R459B soğutkanlarının hepsinin karşılaştırmalı olarak

incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada; R404A ve R404A'ya alternatif beş soğutucu akışkanla çalışan soğutma sistemi enerji ve ekserji performansları açısından karşılaştırılmıştır. Teorik olarak yapılan analizlerde EES programı kullanılmıştır. Literatürde çoğunlukla bu alternatif soğutucu akışkanlar ayrı ayrı incelendiğinden birbirleriyle aynı çalışma parametrelerinde karşılaştırma imkânı olamamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, bahsedilen alternatif soğutkanların hepsi aynı çalışma parametrelerinde mukayese edildiğinden en uygun soğutucu akışkanın belirlenmesi mümkün olmaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, R404A'ya alternatif soğutucu akışkanların kullanıldığı ve şematik diyagramı Şekil 1'de verilen buhar sıkıştırmalı bir soğutma sisteminin teorik olarak termodinamik analizleri yapılmıştır. Bu amaçla EES programı kullanılmıştır.



Şekil 1. Buhar sıkıştırmalı soğutma sisteminin şematik diyagramı

Bu çalışmada incelenen alternatif soğutucu akışkanlar (R454A, R454C, R455A, R457A, R459B) özellikle güvenlik ve çevresel etkiler bakımından değerlendirilerek seçilmişlerdir. Alternatif soğutkan seçiminde GWP değeri en önemli etkenlerden biridir. Bu akışkanların GWP değerlerinin R404A'dan oldukça düşük olması, alternatif soğutkan olarak seçilmelerinde en önemli etken olmuştur. Tablo 1'de bu soğutucu akışkanların özellikleri verilmiştir. Soğutucu akışkanlara ait diğer termodinamik özellikler REFROP yazılımından alınmıştır.

Tablo 1. R404A Alternatifi Olan Soğutucu Akışkanların Özellikleri [13, 14]

Soğutucu akışkan	GWP	Emniyet Sınıfı
R404A	3943	A1
R454A	238	A2L
R454C	146	A2L
R455A	146	A2L
R457A	139	A2L
R459B	143	A2L

Soğutma sisteminin analizinde yapılan kabuller Tablo 2'de görülmektedir. Çevre sıcaklığı 20 ^{o}C ve çevre basıncı 1 atm olarak alınmıştır.

Tablo 2. Sistem için yapılan kabuller

Soğutma Yükü (Q_e)	1 kW
Kondanser Sıcaklığı (T_c)	30ºC, 35 ºC ve 40 ºC
Evaporatör Sıcaklığı (T_e)	-40 ºC ile 5 ºC (her bir 5 ºC adım için)
Kompresör İzentropik Verimi	0.80
Aşırı Kızdırma Sıcaklığı	7 ºC
Aşırı Soğutma Sıcaklığı	7 ºC

Alternatif soğutucu akışkanların kullanıldığı soğutma sisteminin enerji analizinde; kompresör enerji tüketimi ($\dot{W}_c$), soğutkan debisi ($\dot{m}_r$), soğutma performans katsayısı (COP) ve ikinci yasa verimi (η_{II}) karşılaştırma parametreleri olarak kullanılmış ve Eşitlikler (1-5) aşağıda verilmiştir.

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_r\,(h_ç - h_g)_e \tag{1}$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}_r\,(h_ç - h_g)_c \tag{2}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_C} \tag{3}$$

$$\dot{m}_r = (\dot{V}\,\rho)_{emme_hattı} \tag{4}$$

$$CR = \left(\frac{P_ç}{P_g}\right)_{kompresör} \tag{5}$$

T_L ve T_H sıcaklık sınırları arasında çalışan bir soğutma sisteminin en yüksek COP değeri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$COP_{rev} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \tag{6}$$

Gerçek bir soğutma sisteminin COP'si her zaman tersinir bir soğutma sisteminin COP'sinden daha düşüktür. Soğutma sisteminin ikinci yasa (ekserji) verimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

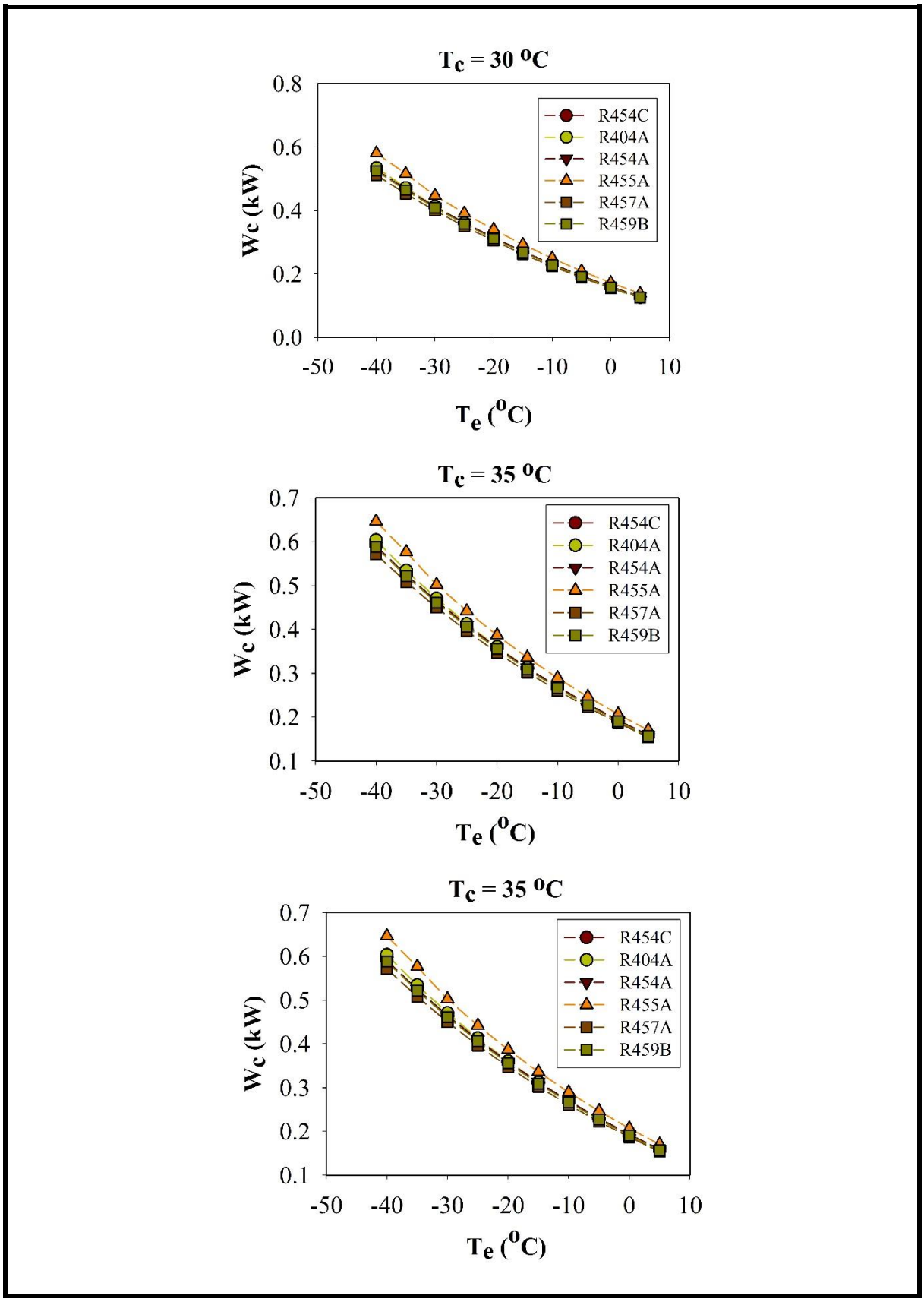
$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}} \tag{7}$$

Soğutma sisteminin ekserji yıkımı Eşitlik (8) ile hesaplanabilir [15].

$$\dot{E}x_d = \dot{W}_C - \left[-\dot{Q}_e\left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right)\right] \tag{8}$$

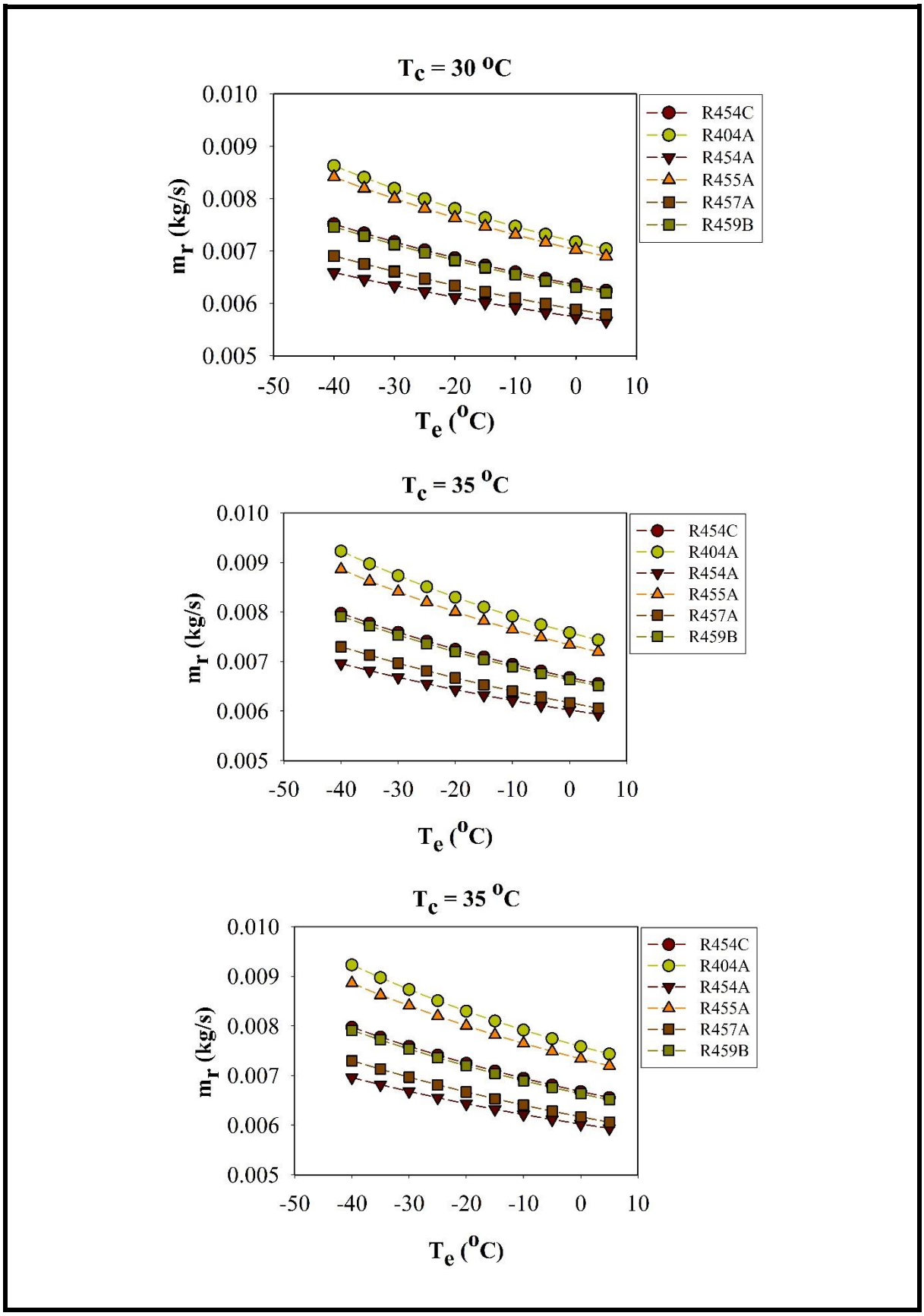
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, R404A'nın alternatifleri olarak GWP'si düşük olan R454A, R454C, R455A, R457A ve R459B soğutucu akışkanların kompresör gücü, soğutucu akışkan debisi, COP ve ekserji verimleri incelenmiştir [16]. Şekil 2'de, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların kompresör enerji tüketiminin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için evaporatör sıcaklığının artmasıyla ve kondenser sıcaklığının azalmasıyla kompresör enerji tüketiminin azaldığı görülmektedir. En yüksek kompresör enerji tüketimi, R455A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığında 0.718 kW olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, kompresör enerji tüketimi 0.683 kW olarak bulunmuştur. En düşük kompresör enerji tüketimi ise R457A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığı için 0.125 kW olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, kompresör enerji tüketimi 0.126 kW olarak bulunmuştur.



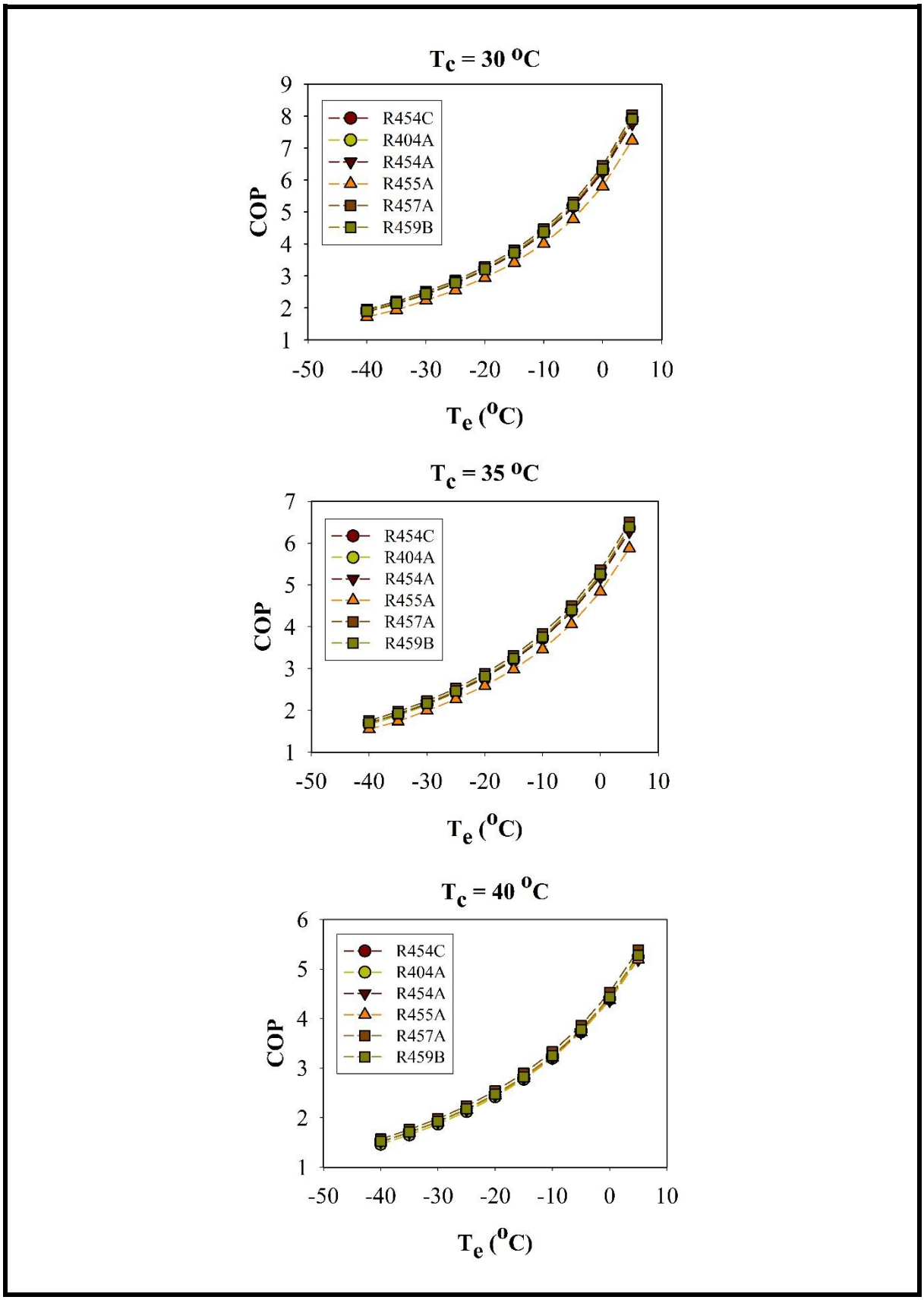
Şekil 2. Kompresör enerji tüketiminin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

Şekil 3'te, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların kütlesel debilerinin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için evaporatör sıcaklığının artmasıyla ve kondenser sıcaklığının azalmasıyla kütlesel debinin azaldığı görülmektedir. En yüksek kütlesel debi, R404A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığında 0.010 kg/s olarak bulunmuştur. En düşük kütlesel debi ise R454A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığı için 0.005 kg/s olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, kütlesel debi 0.007 kg/s olarak bulunmuştur.



Şekil 3. Soğutucu akışkanların kütlesel debilerinin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

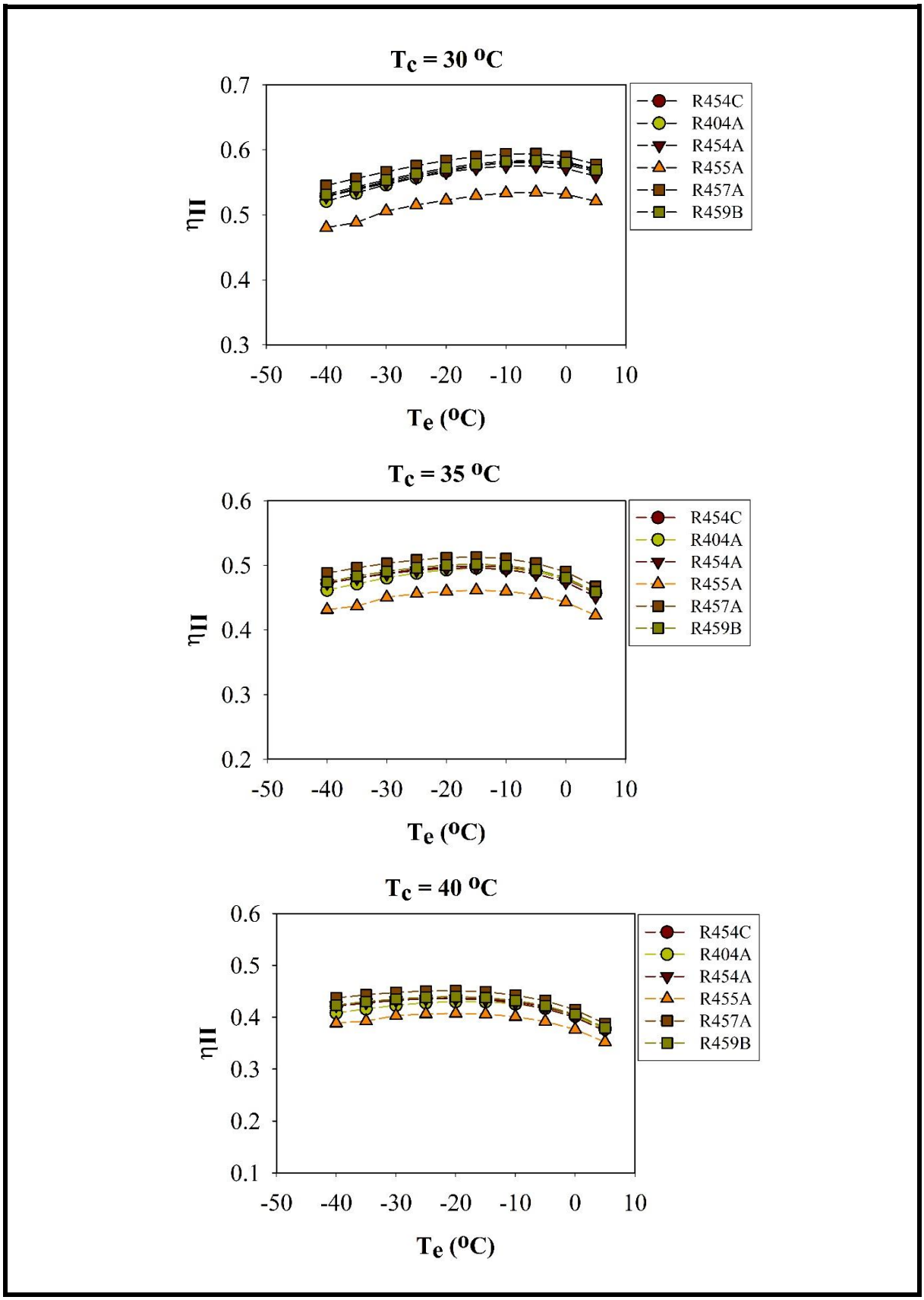
Şekil 4'de, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların COP değerinin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için evaporatör sıcaklığının artmasıyla ve kondenser sıcaklığının azalmasıyla COP değerinin arttığı görülmektedir. En yüksek COP değeri R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde, 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığında 8.03 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde, COP değeri 7.94 olarak bulunmuştur. En düşük COP değeri ise R455A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığı için 1.39 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde COP değeri ise 1.46 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Soğutucu akışkanların COP değerlerinin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

Şekil 5' te, 30°C, 35°C ve 40°C kondenser sıcaklığı için farklı soğutucu akışkanların ekserji verimliliğinin evaporatör sıcaklığıyla değişimi gösterilmektedir. Tüm soğutucu akışkanlar için kondenser sıcaklığının azalmasıyla ve evaporatör sıcaklığının artmasıyla ekserji veriminin arttığı görülmektedir. Fakat ekserji veriminin

-5°C evaporatör sıcaklığında maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı görülmektedir. En yüksek ekserji verimi, R457A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde -5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığında 0.59 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde ekserji verimi 0.58 olarak bulunmuştur. En düşük ekserji verimi ise R455A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 5°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığı için 0.35 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda, R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde ekserji verimi 0.37 olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Soğutucu akışkanların ekserji veriminin farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıklarında karşılaştırılması

Tablo 3' te, yine aynı çalışma şartlarında (kondenser sıcaklığı 35ºC ve evaporatör sıcaklığı -10 ºC) tüm soğutucu akışkanlar için elde edilen sonuçların genel bir karşılaştırması görülmektedir. Tablo 3' te görüldüğü gibi

en yüksek COP değeri R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 3.83 olarak bulunmuştur. En yüksek ekserji verimi de yine R457A soğutucu akışkanıyla çalışan sistemde 0.51 olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Tüm soğutucu akışkanlar için elde edilen sonuçların genel bir karşılaştırması

Parametre	R404A	R454C	R454A	R455A	R457A	R459B
$\dot{m}_r$ (kg/s)	0.008	0.007	0.006	0.008	0.006	0.007
$\dot{W}_c$ (kW)	0.27	0.26	0.20	0.20	0.21	0.26
$\dot{Q}_c$ (kW)	1.26	1.26	1.27	1.29	1.26	1.26
COP	3.72	3.74	3.71	3.45	3.83	3.75
CR	3.71	3.83	3.80	3.63	3.87	3.85
Ex_d (kW)	0.36	0.36	0.36	0.38	0.35	0.35
η_{II}	0.49	0.49	0.49	0.46	0.51	0.50

Literatürde R404A soğutucu akışkanına alternatif olan düşük GWP oranına sahip alternatif soğutucu akışkanlar ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bazılarının mevcut çalışma ile karşılaştırması yapılarak Tablo 4'te verilmiştir. Genel olarak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir. Fakat çalışma parametre ve kabullerinin her çalışmada aynı alınmamasından dolayı, elde edilen sonuçların farklı olacağı da aşikârdır. Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla bu alternatif soğutucu akışkanlar ayrı ayrı incelendiğinden birbirleriyle aynı çalışma parametrelerinde karşılaştırma imkânı olamamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, bahsedilen alternatif soğutucu akışkanların hepsi aynı çalışma parametrelerinde mukayese edildiğinden en uygun soğutucu akışkanın belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Tablo 4. Mevcut çalışmanın literatürde bulunan çalışmalar ile karşılaştırılması

Yazar(lar)	Yıl	Akışkan	Analizler	Sonuçlar
Yıldırım vd. [8]	2021	R404A R454C	-Enerji -Çevresel etki	• R404A'ya alternatif R454C soğutucu akışkan bir soğutma sisteminde incelenmiştir. • Beş farklı evaporatör sıcaklığı (-15°C, -10°C, -5°C, 0°C ve 5°C) ve sabit bir kondenser sıcaklığı (35 °C) için analizler yapılmıştır. • Çalışmada, R454C'nin enerji performans (COP) değeri R404A'dan yaklaşık olarak %4 oranında daha yüksek olduğu belirtilmiştir. • R454C'nin yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP) değeri R404A'dan biraz düşük (yaklaşık %3.5) olduğu ifade edilmiştir. • Son olarak soğutma sistemlerinin çevresel etkilerinin azaltılması için sadece düşük GWP soğutucu akışkanların kullanılması tek başına yeterli bir kriter olmadığı bunun yanında soğutma sisteminin enerji performansının arttırılması ve çevre dostu enerji kaynaklarının kullanılması önerilmiştir.
Li [12]	2017	R404A R452A	-Enerji -Çevresel etki	• Yazar, gıda taşımacılığı soğutma sektörünün yaşam döngüsü iklim performansını kapsamlı bir araştırmasını yapmıştır. • Çalışmada R404A soğutucu akışkanına alternatif olarak düşük GWP'li R452A soğutucu akışkanı seçilmiştir. • Düşük GWP oranına sahip R452A, R404A ile karşılaştırıldığında %5 ile %15 arasında emisyonların azalmasını sağladığı ifade edilmiştir.
Llopis vd. [7]	2019	R404A R454C R459B R457A R455A	-Enerji	• Çalışma kapsamında ticari bir soğutma sisteminde R404A yerine daha düşük GWP oranına sahip soğutucu akışkanlar (R4554C, R459B ve R457A, R455A) deneysel incelenmiştir. • R454C, R459B, R457A, R455A'nın R404'a göre enerji tüketimleri sırasıyla %2.45, %11.55, %10.69, % 2.9 oranında daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir. • Alternatif soğutucu akışkanların tümünün optimum şarj oranlarının R404A'dan daha düşük olduğu belirtilmiştir. • Alternatif soğutucu akışkanların R404A ya göre enerji performansını iyileştirebileceği sonucuna varılmıştır.
Oruç ve Devecioğlu [6]	2021	R404A R454A R454C	-Enerji	• Çalışmada, R404A'ya alternatif olarak daha düşük GWP'ye sahip R454A ve R454C akışkanlarının performansı deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırmıştır. • Çalışmada farklı buharlaşma sıcaklığı (-5°C, 0°C, 5°C) ve farklı kondenser sıcaklığı (30 °C, 40 °C, 50°C) kullanılmıştır. • R404A ile karşılaştırıldığında, R454A ve R454C'nin tüm kondenser sıcaklıklarında ölçülen kompresör güç tüketimi sırasıyla %6 ve %15 oranında azaldığı ifade edilmiştir.

				• R454A ve R454C'nin R404A'ya kıyasla COP değerleri incelendiğinde sırasıyla %14 ve %10 daha yüksek olduğu belirtilmiştir.
Bu çalışma	2024	R404A R454A R454C R455A R457A R459B	-Enerji -Ekserji	• On bir farklı evaporatör sıcaklığı (-40 °C, -35°C, -35°C, -30°C, -25°C, -20°C, -15°C, -10°C, -5°C, 0°C, 5°C), üç farklı kondenser sıcaklığı (30°C, 35°C, 40°C), sabit soğutma yükü (1 kW), 0.8 kompresör izantropik verimi ve 7 °C aşırı kızdırma ve aşırı soğutma şartları için R404A'ya alternatif soğutucu akışkanlar bir soğutma sistemi için incelenmiştir. • En yüksek COP değeri R457A soğutucu akışkanı sahiptir. 5°C evaporatör sıcaklığı ve 30°C kondenser sıcaklığında R457A ve R404A'nın COP değerleri sırasıyla 8.03 ce 7.94'tür. • En düşük COP değerine sahip soğutucu akışkan R455A'dır. -40°C evaporatör sıcaklığı ve 40°C kondenser sıcaklığında R455A ve R404A'nın COP değerleri sırasıyla 1.393 ve 1.464'tür. • R454C, R457A ve R459B soğutucu akışkanlarının kompresör enerji tüketimleri R404A'ya göre sırasıyla %2.98, %6.62 ve %3.57 oranında daha düşük olduğu görülmüştür. • R454C, R457A ve R459B soğutucu akışkanlarının COP değerleri R404A'ya göre sırasıyla %3.07, %7.09 ve %3.7 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. • En yüksek ekserji verimi ise kondenser sıcaklığı 30 ºC ve evaporatör sıcaklığı -5 ºC iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 0.594 olarak hesaplanmıştır.

IV. SONUÇLAR

GWP değeri düşük olan yeni nesil soğutucu akışkanlarla çalışan sistemlerin R404A soğutucu akışkanıyla çalışan sisteme göre yakın veya daha yüksek verimlilik sağladığı görülmüştür. Çalışma sonucunda R404A yerine alternatif R454C, R454A, R455A, R457A ve R459B soğutucu akışkanlar kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Sistemdeki soğutucu akışkan debileri açısından alternatif soğutkanlar R404A ile karşılaştırıldığında; R454C soğutucu akışkanında %14.48, R454A ve R457A akışkanlarında sırasıyla %34.71 ve %22.11 ve R459B akışkanında %15.19 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Kompresör enerji tüketimi karşılaştırıldığında; R454C soğutucu akışkanında %2.98, R457A ve R459B soğutucu akışkanları için sırasıyla %6.62 ve %3.57 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Sistemin performans katsayılarında R454C soğutucu akışkanında %3.07, R457A ve R459B soğutucu akışkanlarında sırasıyla %7.09 ve %3.7 oranında artış meydana gelmiştir.
- En yüksek ekserji verimi ise kondenser sıcaklığı 30 ºC ve evaporatör sıcaklığı -5 ºC iken R457A soğutucu akışkanı ile çalışan sistemde 0.59 olarak bulunmuştur.

R404A'nın düşük GWP'li alternatif soğutucu akışkanlarla yer değiştirmesi durumunda soğutma sisteminde daha düşük soğutucu akışkan yükleri, daha az enerji tüketimi ve daha yüksek performans değerleri mümkün olmaktadır. Böylece çalışmada sunulan verilerin ticari öneme sahip olduğu da görülmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, enerji ve ekserji verimliliği kriterleri açısından soğutma sistemi tasarımcılarına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

COP	Performans katsayısı
CR	Sıkıştırma oranı
$\dot{E}x_d$	Ekserji yıkımı (kW)
h	Entalpi (kJ/kg)
$\dot{m}$	Kütlesel debi (kg/s)
$\dot{Q}$	Birim zamanda ısı geçişi (kW)

T	Sıcaklık (°C veya K)
$\dot{V}$	Hacimsel debi (m^3/s)
$\dot{W}$	Güç (kW)
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
η_{II}	Ekserji verimi

Alt İndisler

c	Kondenser
C	Kompresör
ç	Çıkan
e	Evaporatör
g	Giren
H	Isı atılan ortam
L	Soğutulan ortam
0	Çevre
r	Soğutucu akışkan
rev	Tersinir

KAYNAKLAR

[1] The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases. 2006.

[2] The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EC) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006. 2014.

[3] Sürerdem, K. (2020). *Çatı tipi klimalarda kullanılan soğutucu akışkanların performans ve çevresel etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] Altınkaynak, M. (2021). Exergetic Performance Analysis of HFO Based Refrigerants (R452A, R454C, R455A). *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *25*(2), 245-254.

[5] Devecioğlu, A. G., & Oruç, V. (2020). Experimental comparison of R404A and R452A in refrigeration systems. *Science and Technology for the Built Environment*, *27*(1), 61-69.

[6] Oruç, V., & Devecioğlu, A. G. (2021). Experimental investigation on the low-GWP HFC/HFO blends R454A and R454C in a R404A refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, *128*, 242-251.

[7] Llopis, R., Calleja-Anta, D., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., Catalán-Gil, J., & Cabello, R. (2019). R-454C, R-459B, R-457A and R-455A as low-GWP replacements of R-404A: Experimental evaluation and optimization. *International Journal of Refrigeration*, *106*, 133-143.

[8] Yıldırım, R., Kumaş, K., & Akyüz, A. Ö. (2021). Soğutma Sisteminde R404A Yerine R454C Soğutucu Akışkanın Kullanılmasının İncelenmesi: Enerji ve Çevresel Analizi. *Teknik Bilimler Dergisi*, *11*(2), 47-51.

[9] Ender, S. (2018). *R404a soğutucu akışkanı kullanan sistemlerde R442a ve R453a soğutucu akışkanları kullanılarak sistem verimliliklerinin artırılması*. Yüksek lisans tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

[10] Mendoza-Miranda, J. M., Mota-Babiloni, A., & Navarro-Esbrí, J. (2016). Evaluation of R448A and R450A as low-GWP alternatives for R404A and R134a using a micro-fin tube evaporator model. *Applied Thermal Engineering*, *98*, 330-339.

[11] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Peris, B., Molés, F., & Verdú, G. (2015). Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems. *Energy Conversion and Management, 105*, 756-762.

[12] Li, G. (2017). Comprehensive investigation of transport refrigeration life cycle climate performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 21*, 33-49.

[13] Zhang, L., Yang, Z., Zhai, R., Lv, Z., Zhang, Y., & Deng, Q. (2022). Flammable performance and experimental evaluation of a new blend as R404A lower-GWP alternative. *International Journal of Refrigeration, 135*, 113-120.

[14] Yang, Z., Feng, B., Ma, H., Zhang, L., Duan, C., Liu, B., ... & Yang, Z. (2021). Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants. *International Journal of Refrigeration, 126*, 12-22.

[15] Yıldırım, R., Gungor, A., Akyüz, A., & Tuncer, A. D. (2023). A new approach for environmental analysis of vapor compression refrigeration systems: Environmental impact index. *Thermal Science and Engineering Progress, 42*, 101871.

[16] Can, S.N. (2023). *Buhar Sıkıştırmalı Soğutma Sisteminde R404A Alternatifi GWP Değeri Düşük Soğutucu Akışkanların Kullanılmasının Termodinamik Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 422-436, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1360451
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Araştırma Makalesi - Research Article

The Efficient Robust Conformable Methods for Solving the Conformable Fractional Cahn-Allen Equation

Uyumlu Kesirli Mertebeden Cahn-Allen Denklemini Çözmek için Etkili Uyumlu Yöntemler

Özkan Avit[1], Halil Anaç[2*]

Geliş / Received: 14/09/2023 ***Revize / Revised: 30/01/2024*** ***Kabul / Accepted: 01/03/2024***

ABSTRACT

This study focuses on the novel conformable methods employed to obtain new numerical solutions for the Cahn-Allen equation with conformable fractional derivatives. One of the two distinct methods put forth is the Cq-HATM, a hybrid technique that integrates the q-homotopy analysis transform method with the Laplace transform, utilizing the definition of conformable derivative. The CHPETM is a hybrid technique that combines the homotopy perturbation method with the Elzaki transform (ET). New numerical solutions of the conformal fractional differential Cahn-Allen equation were obtained using CHPETM and Cq-HATM. The computer simulations have been conducted in order to provide validation for the efficacy and reliability of the proposed methods. Upon performing a comparative analysis between the exact solutions and the solutions obtained through the novel methods, it becomes evident that both of these approaches exhibit simplicity, efficacy, and proficiency in addressing nonlinear conformable time-fractional coupled systems.

Keywords- Cahn-Allen equation, conformable homotopy perturbation Elzaki transform method, conformable Elzaki transform

ÖZ

Bu çalışma, uyumlu kesirli türevli Cahn-Allen denkleminin yeni sayısal çözümlerini elde etmek için kullanılan yeni uyumlu yöntemlere odaklanmaktadır. Öne sürülen iki farklı yöntemden biri, uyumlu kesirli türev tanımını kullanarak, q-homotopi analizi dönüşüm yöntemi ile Laplace dönüşümünün birleşiminden oluşan hibrit bir yöntem olan Uq-HADY' dir. UHPEDM, homotopi pertürbasyon yöntemininin Elzaki dönüşümüyle birleşiminden oluşan hibrit bir yöntemdir. Uyumlu kesirli türevli Cahn-Allen denkleminin yeni nümerik çözümleri UHPEDM ve Uq-HADY kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen metodların etkinliğinin ve güvenilirliğinin doğrulanmasını sağlamak amacıyla bilgisayar simülasyonları yapılmıştır. Kesin çözümler ile yeni yöntemlerden elde edilen çözümler arasında karşılaştırma analizi yapıldığında, bu yaklaşımların her ikisinin de doğrusal olmayan uyumlu zaman-kesirli bağlı sistemleri ele almada basitlik, etkinlik ve yeterlilik sergiledikleri ortaya çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler-Cahn-Allen denklemi, uyumlu homotopi pertürbasyon Elzaki dönüşüm metodu, uyumlu Elzaki dönüşümü

[1]Contact: secondauthor@example.com (https://orcid.org/XXXX-XXXX-XXXX-XXhttps://orcid.org/0009-0003-7503-1012XX)
Mathematical Engineering of Department, Gumushane University, Address Gumushane University Faculty of Engineering and Natural Sciences
[2]*Corresponding author contact: halilanac0638@gmail.com (https://orcid.org/0000-0002-1316-3947)
Computer Technologies, Gumushane University, Address Gumushane University Torul Vocational School

I. INTRODUCTION

Extensive study has been conducted in the topic of fractional calculus, leading to its formal definition by numerous esteemed scientists. The researchers have formulated novel conceptualizations of fractional calculus (FC), which subsequently laid the foundational framework for the field of fractional analysis. Fractional differential equations (FDEs) are frequently employed in the construction of nonlinear models. The utilization of FC has been utilized to analyze and explore diverse topics, such as chaos theory, financial models, disordered environments, and optics. The application of solutions generated from FDEs plays a crucial role in the discovery and understanding of nonlinear occurrences in the natural world. A diverse range of analytical and numerical methods are employed in order to get precise solutions for fractional differential equations that incorporate nonlinear phenomena, due to their inherent complexity. [1-11].

Khalil et al. have recently introduced a novel conceptualization of fractional derivative and fractional integral in their scientific publication. The authors have successfully demonstrated that the newly presented definition exhibits the fundamental characteristics of the classical derivative as described in classical analysis, while also adding a limit form that closely approaches the definition of the classical derivative. The author introduces a novel conception of the fractional derivative in their scholastic contribution. The definition presented incorporates a variety of mathematical concepts, including the product rule, quotient rule, chain rule, fractional Rolle's theorem, and fractional mean value theorems. The utilization of the conformable fractional derivative is regarded as a key and very advantageous approach. Furthermore, it increases our ability to articulate the actions exhibited by tangible entities. The utilization of the conformable fractional derivative gives an innovative approach for addressing intricate problem domains. Fractional order models are commonly employed in the field of engineering and applied sciences due to their ability to offer a more precise representation of real-world phenomena. Conformable fractional derivatives have been employed by a multitude of academics across several academic fields. The utilization of the conformable fractional operator serves as a viable approach to tackle specific limitations that are present in existing fractional operators. The subject matter being examined spans a range of mathematical concepts, such as the mean value theorem, the chain rule, the product rule for differentiating two functions, the derivative of the quotient of two functions, and Rolle's theorem [12].

The Elzaki transform method has been utilized for solving the ordinary differential equations. Differential transform method (DTM) in conjunction with ET has been employed to address a range of nonlinear differential equations. The Homotopy Perturbation Elzaki Transform Method (HPETM) was initially introduced by Elzaki and Hilal in their original work. Furthermore, the HPETM has successfully solved three nonlinear partial differential equations (PDEs). Elzaki and Kim employed a novel hybrid approach that combines the ET with the modified variational iteration method to tackle the radial diffusivity and shock wave equations in their research. Aggarwal et al. employed the method of ET to obtain solutions for the first kind Volterra integral equations. HPETM is applied to construct a solution for the fractional Navier-Stokes equations [13-18].

However, it is imperative to recognize that the fractional order has the ability to exhibit both time and space. The topic under consideration pertains to the advancing field of fractional partial differential equations (FPDEs) that encompass operators with varying orders of fractional differentiation. Numerous rigorous numerical methods have been devised and documented in scholarly publications, with substantial contributions from respected experts within the discipline. A multitude of approaches have been proposed in academic literature to tackle mathematical conundrums. This collection of techniques includes Adomian Decomposition Method (ADM), Homotopy Analysis Method (HAM), Homotopy Perturbation Method (HPM), Collocation Method, Sumudu Transform Method (STM), DTM, and Variational Iteration Method (VIM) [19-38].

Yasar and Giresunlu employed the homotopy analysis method to obtain the fractional order analytical solution to the Cahn–Allen equation (CAE) [44]. The time-fractional CAE was examined using the fractional sub-equation method to provide an approximation solution for the S-H equation [45]. Yasar et al. employed the (G'/G)-expansion method to obtain a series solution for the space-time CAE [46]. Hariharan and Kannan employed the Haar wavelet method to provide a numerical solution for the CAE [47]. Tascan and Bekir discovered both solitary and periodic wave solutions for the CAE [48]. The modified handy equation technique is utilized to provide novel feasible solutions for the CAE, and the resulting outcomes are also consistent with the penalties proposed by Tariq and Akram [49]. Bekir [50] utilized the double exp-function method to solve the CAE and obtain solutions for one-soliton and two-soliton cases. Guner et al. investigate three methods for analyzing the time-fractional order CAE [51].

The primary objective of this project is to acquire innovative numerical solutions for the Cahn-Allen equation with conformable fractional derivative (CFD). This will be achieved by employing the conformable q-homotopy analysis transform method (Cq-HATM). The secondary objective of the study is to acquire innovative numerical solutions for the Cahn-Allen equation using CFD. The objective will be accomplished by the utilization of the conformable homotopy perturbation Elzaki transform method (CHPETM).

The subsequent enumeration presents a detailed inventory of the other constituents of the study. The following section of the article provides a thorough explanation of the fundamental principles that underlie conformable fractional calculus and the Elzaki transform in Section 2. Section 3 introduces novel numerical approaches that are capable of conforming to specific requirements. Section 4 of the document presents an illustrative example of the conformable time-fractional Cahn-Allen equation. The findings are presented in Section 5.

II. PRELIMINARIES

This section presents a set of foundational definitions.

Definition 2.1. [12, 39-41] Let a function $g: [0, \infty) \to \mathbb{R}$. Then, CFD of g order α is defined as

$$T_\alpha(g)(x) = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{g(x + \varepsilon x^{1-\alpha}) - g(x)}{\varepsilon}, \alpha \in (0, 1]. \tag{2}$$

for all $x > 0$.

Theorem 2.1. [12, 39-41] Assume that $\alpha \in (0, 1]$ and The functions g and h exhibit α −differentiability at a point $x > 0$., The following conditions exist:

$$(i)\ T_\alpha(ag + bh) = aT_\alpha(g) + bT_\alpha(h), \text{for all } a, b \in \mathbb{R}, \tag{3}$$

$$(ii) T_\alpha(x^p) = px^{p-1}, \text{for all } p \in \mathbb{R}, \tag{4}$$

$$(iii) T_\alpha(\lambda) = 0, for\ all\ constant\ functions, f(t) = \lambda, \tag{5}$$

$$(iv) T_\alpha(gh) = gT_\alpha(h) + hT_\alpha(g), \tag{6}$$

$$(v) T_\alpha\left(\frac{g}{h}\right) = \frac{hT_\alpha(g) - gT_\alpha(h)}{h^2}. \tag{7}$$

Definition 2.2. [42] Assume that $\alpha \in (0, 1]$, $h: [0,\infty) \to \mathbb{R}$ is function. The conformable fractional Elzaki transform (CFET) of order α of h is defined as

$${}_cE_\alpha[h(t)] = T_\alpha(v) = \int_0^\infty pK_\alpha(-p, t)h(t)d_\alpha t, \tag{8}$$

where $K_\alpha(-p, t) = E_\alpha\left(-\frac{1}{p}, t\right), p > 0$.

Definition 2.3. [42] Assume that $\alpha \in (0, 1]$, $h: [0,\infty) \to \mathbb{R}$ is function. The CFET for the CFD of the function $h(t)$ is defined as

$${}_cE_\alpha[T_\alpha h(t)](p) = \frac{1}{p}\ {}_cE_\alpha[h(t)](p) - ph(0). \tag{9}$$

III. THE NOVEL NUMERICAL TECHNIQUES

This section presents an overview of Cq-HATM and CHPETM.

A. Conformable q-homotopy analysis transform method

A new method is presented. Consider the conformable time-fractional order nonlinear partial differential equation (CTFNPDE) to give the main idea of Cq-HATM:

$${}_tT_\alpha w(x, t) + Aw(x, t) + Hw(x, t) = h(x, t), t > 0, \alpha \in (n - 1, n], \tag{10}$$

where A is linear, , H is nonlinear operators, $h(x, t)$ is the nonhomogeneous term, and ${}_tT_\alpha$ is a CFD of order α.

Now, by performing conformable Laplace transform (CLT) on Eq. (10) and using initial condition, then we get

$$s\mathcal{L}_\alpha[w(x,t)] - \sum_{m=0}^{k-1} w(x,0) + \mathcal{L}_\alpha[Aw(x,t)] + \mathcal{L}_\alpha[Hw(x,t)] = \mathcal{L}_\alpha[h(x,t)]. \tag{11}$$

If we simplify the Eq. (11), then we have

$$\mathcal{L}_\alpha[w(x,t)] - \frac{1}{s}w(x,0) + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[Aw(x,t)] + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[Hw(x,t)] - \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[h(x,t)] = 0. \tag{12}$$

We define the nonlinear operator by the assist of HAM for real function $\varphi(x,t;q)$ as follows

$$N[\varphi(x,t;q)\,] = \mathcal{L}_\alpha[\varphi(x,t;q)\,] - \frac{1}{s}\varphi(x,t;q)\,(0^+) + \frac{1}{s}(\mathcal{L}_\alpha[A\varphi(x,t;q)] + \mathcal{L}_\alpha[H\varphi(x,t;q)]$$

$$-\mathcal{L}_\alpha[h(x,t)]), \tag{13}$$

where $q\epsilon\left[0,\frac{1}{n}\right]$.

We establish a homotopy in the following:

$$(1-nq)\mathcal{L}_\alpha[\varphi(x,t;q) - w_0(x,t)] = hqH^+(x,t)H[\varphi(x,t;q)], \tag{14}$$

where, $h \neq 0$ is an auxiliary parameter and $\mathcal{L}_\alpha$ demonstrates conformable Laplace transform. For $q = 0$ and $q = \frac{1}{n}$, the outcomes in Eq. (14) are respectively provided:

$$\varphi(x,t;0) = w_0(x,t), \varphi\left(x,t;\frac{1}{n}\right) = w(x,t). \tag{15}$$

Hence, by incrementing q from 0 to $\frac{1}{n}$, then the solution $\varphi(x,t;q)$ converges from $w_0(x,t)$ to the solution $w(x,t)$. Employing the Taylor theorem around q and expanding $\varphi(x,t;q)$ and then, we obtain

$$\varphi(x,t;q) = w_0(x,t) + \sum_{i=1}^{\infty} w_m(x,t)q^m, \tag{16}$$

where

$$w_m(x,t) = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \varphi(x,t;q)}{\partial q^m}|_{q=0}. \tag{17}$$

Eq. (16) converges at $q = \frac{1}{n}$ for the appropriate $w_0(x,t)$, n and h. Then, we have

$$w(x,t) = w_0(x,t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{18}$$

If we differentiate the zeroth order deformation Eq. (14) m −times with respect to q and we divide by $m!$, respectively, then for $q = 0$, we obtain

$$\mathcal{L}_\alpha[w_m(x,t) - k_m w_{m-1}(x,t)] = hH^+(x,t)\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1}), \tag{19}$$

where the vectors are defined by

$$\vec{w}_m = \{w_0(x,t), w_1(x,t), \dots, w_m(x,t)\}. \tag{20}$$

When we apply to the inverse CLT to Eq. (19), then we obtain

$$w_m(x,t) = k_m w_{m-1}(x,t) + h\mathcal{L}_\alpha{}^{-1}[H^+(x,t)\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1})], \tag{21}$$

where

$$\mathcal{R}_m(\vec{w}_{m-1}) = \mathcal{L}_\alpha[w_{m-1}(x,t)] - \left(1-\frac{k_m}{n}\right)\frac{1}{s}w_0(x,t) + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha(Aw_{m-1}(x,t) + H^+_{m-1}(x,t)$$

$$-h(x,t)\big), \tag{22}$$

and

$$k_m = \begin{cases} 0, & m \le 1, \\ n, & m > 1. \end{cases} \tag{23}$$

where, H^+_m is homotopy polynomial and presented as

$$H^+_m = \frac{1}{m!}\frac{\partial^m \varphi(x,t;q)}{\partial q^m}\Big|_{q=0} \text{ and } \varphi(x,t;q) = \varphi_0 + q\varphi_1 + q^2\varphi_2 + \cdots. \tag{24}$$

By utilizing Eqs. (21)-(22),then we obtain

$$w_m(x,t) = (k_m + h)w_{m-1}(x,t) - \left(1-\frac{k_m}{n}\right)\frac{1}{s}w_0(x,t) + \mathrm{h}\mathcal{L}_\alpha{}^{-1}\left[\left(\frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[Rw_{m-1}(x,t)\right.\right.$$

$$\left.\left.+H_{m-1}(x,t) - f(x,t)]\right)\right]. \tag{25}$$

By using q-HATM, the series solution is

$$w(x,t) = \sum_{m=0}^{\infty} w_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{26}$$

III. CONFORMABLE ELZAKI ADOMIAN DECOMPOSITION METHOD

The analysis of the CTFNPDE in Eq. (10) is performed.

Now, by performing conformable Elzaki transform (CET) on Eq. (10) and using initial condition, then we have

$$\frac{1}{v}\,{}_cE_\alpha[w(x,t)] - vw(x,0) + {}_cE_\alpha[Aw(x,t) + Hw(x,t)] = {}_cE_\alpha[h(x,t)]. \tag{27}$$

If we simplify the Eq. (27), then we get

$${}_cE_\alpha[w(x,t)] = v^2 w(x,0) + v\,{}_cE_\alpha[h(x,t)] - v\,{}_cE_\alpha[Aw(x,t) + Hw(x,t)]. \tag{28}$$

On applying inverse CET to Eq. (28), then we have

$$w(x,t) = C(x,t) - \left({}_cE_\alpha\right)^{-1}\{v\,{}_cE_\alpha[Aw(x,t) + Hw(x,t)]\}. \tag{29}$$

Now, HPM is utilized, then it is obtained as

$$w(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(x,t). \tag{30}$$

Also, the nonlinear term has been decomposed as

$$Hw(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} p^n H_n(w), \tag{31}$$

where the homotopy polynomial $H_n(w)$ is given by

$$H_n(w_0, w_1, \dots, w_n) = \frac{1}{n!}\frac{\partial}{\partial p^n}\left[H\left(\sum_{i=0}^{\infty} p^i w_i\right)\right]_{p=0}, n = 0,1,2,\dots \tag{32}$$

Eqs. (30)-(31) are substituted in Eq. (29), then we have

$$\sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(x,t) = G(x,t) - p\left\{(E_\alpha^c)^{-1}\left\{v^2 E_\alpha^c\left[A\sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(x,t) + \sum_{n=0}^{\infty} p^n H_n(w)\right]\right\}\right\} \tag{33}$$

where $G(x,t)$ is the term consisting of the initial condition and the external source term.

If we compare the identical powers of p, the resulting iterations are as follows:

$$p^0: w_0(x,t) = G(x,t),$$

$$p^1: w_1(x,t) = -E^{-1}\{v^2 E[Aw_0(x,t) + H_0(w)]\}$$

$$p^2: w_2(x,t) = -E^{-1}\{v^2 E[Aw_1(u,t) + H_1(w)]\}$$

$$p^3: w_3(x,t) = -E^{-1}\{v^2 E[Aw_2(u,t) + H_2(w)]\}$$

$$\vdots \tag{34}$$

Ultimately, the solution $u(x,t)$ is approximated as follows.

$$w(x,t) = \lim_{p\to 1}\sum_{n=0}^{\infty} p^n w_n(x,t) = w_0(x,t) + w_1(x,t) + w_2(x,t) + \cdots \tag{35}$$

IV. RESULTS

This section seeks to provide graphic depictions of the conformable time-fractional Cahn-Allen equation.

Example 3.1. [43] Consider the conformable time-fractional Cahn-Allen equation (CTFCAE)

$$\{\ D_t^\alpha w(x,t) - w_{xx}(x,t) + w^3(x,t) - w(x,t) = 0\ , \qquad t > 0, \qquad 0 < \alpha \le 1 \tag{36}$$

with the initial conditions

$$w(x,0) = \frac{1}{1 + e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}}. \tag{37}$$

Case (i) Cq-HATM solution

CLT is employed to Eq. (37), and by applying Eq. (38), the resulting expression is produced as

$$\mathcal{L}_\alpha[w(x,t)] - \frac{1}{s}w(x,0) + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha[-w_{xx} + w^3 - w] = 0. \tag{38}$$

The nonlinear operators are defined by employing Eq. (38):

$$N[\varphi(x,t;q)] = \mathcal{L}_\alpha[\varphi(x,t;q)] - \frac{1}{s}\left(\frac{1}{1+e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}}\right) + \frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha\left[-\frac{\partial^2\varphi(x,t;q)}{\partial x^2} + \varphi^3(x,t;q)\right.$$
$$\left.-\varphi(x,t;q)\right]. \tag{39}$$

The $m-th$ order deformation equations are defined by the application of the proposed algorithm:

$$\mathcal{L}_\alpha[w_m(x,t) - k_m w_{m-1}(x,t)] = h\mathcal{R}_m(w_{m-1}), \tag{40}$$

where

$$\mathcal{R}_m(w_{m-1}) = \mathcal{L}_\alpha[w_{m-1}] - \frac{1}{s}\left(1-\frac{k_m}{n}\right).\left(\frac{1}{1+e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}}\right)$$
$$+\frac{1}{s}\mathcal{L}_\alpha\left[-\frac{\partial^2 w_{m-1}}{\partial x^2} + \sum_{r=0}^{m-1}\left(\sum_{j=0}^{r} w_j.w_{r-j}\right)w_{m-1-r} - w_{m-1}\right]. \tag{41}$$

By utilizing the inverse CLT to Eq. (40), we obtain

$$w_m = k_m w_{m-1} + h\mathcal{L}_\alpha{}^{-1}[\mathcal{R}_m(w_{m-1})]. \tag{42}$$

By employing initial conditions, we are able to drive

$$w_0(x,t) = \frac{1}{1+e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}}, \tag{43}$$

To get the value of $w_1(x,t)$, we substitute $m=1$ into Eq. (42), resulting in the following expression:

$$w_1(x,t) = h\left(\frac{-3e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}}{2\left(1+e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}\right)^2}\right)\frac{t^\alpha}{\alpha}, \tag{44}$$

In a similar vein, by substituting $m=2$ into Eq. (42), the resulting value for $w_2(x,t)$ can be obtained:

$$w_2(x,t) = (n+h)w_1 + h\frac{t^{2\alpha}}{8\alpha^2}\frac{9\left(e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}-1\right)he^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}}{2\left(1+e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}\right)^3}. \tag{45}$$

Similarly, by substituting $m=3$ into Eq. (42), the resulting value for $w_3(x,t)$ can be obtained:

$$w_3(x,t) = (n+h)w_2 - 27h^2\frac{e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}}{16\alpha^2(1+e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}})^4}$$
$$+\left[\frac{-4(n+h)\left(e^{-x\sqrt{2}}-1\right)t^{2\alpha}}{6} + \left(e^{-x\sqrt{2}} - 4e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} + 1\right)h\frac{t^{3\alpha}}{3\alpha}\right]. \tag{46}$$

By employing this approach, it is possible to identify the remaining terms. The solutions of the CTFCAE are determined through the Cq-HATM:

$$w(x,t) = w_0(x,t) + \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m. \tag{47}$$

By substituting $\alpha = 1, n = 1,\ h = -1$ into Eq. (47), we have that the resulting outcome, denoted as $\sum_{m=1}^{M} w_m(x,t)\left(\frac{1}{n}\right)^m$ to the exact solution $w(x,t) = \frac{1}{1+e^{\left(\frac{-x\sqrt{2}}{2} - \frac{3t}{2}\right)}}$ of the CTFCAE when $M \to \infty$.

Case (ii) CHPEDM solution

By employing the CET to Eq. (36) and utilizing Eq. (37), the resulting expression is obtained.

$$\frac{1}{s}E_\alpha^c[w(x,t)] - sw(x,0) + E_\alpha^c[-w_{xx} + w^3 - w] = 0, \tag{48}$$

Rearranging Eq. (48), then we obtain

$$E_\alpha^c[w(x,t)] = s^2\frac{1}{1+e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}} - sE_\alpha[-w_{xx} + w^3 - w], \tag{49}$$

By utilizing the inverse CET on Eq. (48), we are able to derive the following result:

$$w(x,t) = \frac{1}{1+e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}} - (E_\alpha^c)^{-1}\left[sE_\alpha^c[-w_{xx} + w^3 - w]\right], \tag{50}$$

Let us consider the assumption that the answer to the infinite series can be expressed in the following form:

$$w(x,t) = \sum_{m=0}^{\infty} w_m(x,t). \tag{51}$$

Utilizing HPM, now, if we rewrite Eq. (50), then it is obtained as

$$\begin{aligned}\sum_{m=0}^{\infty} p^m w_m(x,t) &= \left(\frac{1}{1+e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}}\right)\\ &+p\left\{E_\alpha^{-1}\left[sE_\alpha\left(-\sum_{m=0}^{\infty} p^m (w_m)_{xx} + \sum_{m=0}^{\infty} p^m H_m(w) - \sum_{m=0}^{\infty} p^m w_m\right)\right]\right\},\end{aligned} \tag{52}$$

The symbols $H_m(w)$ represent He's polynomials, that are utilized to represent nonlinear variables. Some components of $H_m(w)$ are as follows.

$$H_0(w) = {w_0}^3, \tag{53}$$

$$H_1(w) = 3{w_0}^3 w_1, \tag{54}$$

$$H_2(w) = 3{w_0}^3 w_2 + 3{w_1}^2 w_0, \tag{55}$$

If the powers of p are compared, they are obtained in the same manner.

$$p^0: w_0(x,t) = 1 + e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}}, \qquad H_0(w) = (1 + e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}})^3, \tag{56}$$

$$p^1: w_1(x,t) = \frac{3e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} t^{\alpha}}{2\alpha\left(1 + e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}\right)^2}, \qquad H_1(w) = \frac{3(1 + e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}})^2 . 3e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} t^{\alpha}}{2(1 + e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}})^2 \alpha}, \tag{57}$$

$$p^2: w_2(x,t) = \frac{9(e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} - 1)t^{\alpha} e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}}{8\alpha^2(1 + e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}})^3}, H_2(w) = \frac{27e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}(3e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} - 1)t^{2\alpha}}{8\alpha^2(1 + e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}})^5}, \tag{58}$$

By continuing in a similar manner, the outcomes for CTFCAE can be derived.

$$w(x,t) = \sum_{m=0}^{\infty} w_m(x,t) = w_0(x,t) + w_1(x,t) + w_2(x,t) + \cdots$$

$$= 1 + e^{\frac{-x}{\sqrt{2}}} + \frac{3e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} t^{\alpha}}{2\alpha\left(1 + e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}\right)^2} + \frac{9(e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}} - 1)t^{\alpha} e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}}}{8\alpha^2(1 + e^{\frac{-x\sqrt{2}}{2}})^3}. \tag{59}$$

Fig. 1 displays the 3D graphical representations of Cq-HATM, the exact solution, and the absolute error for $w(x,t)$.

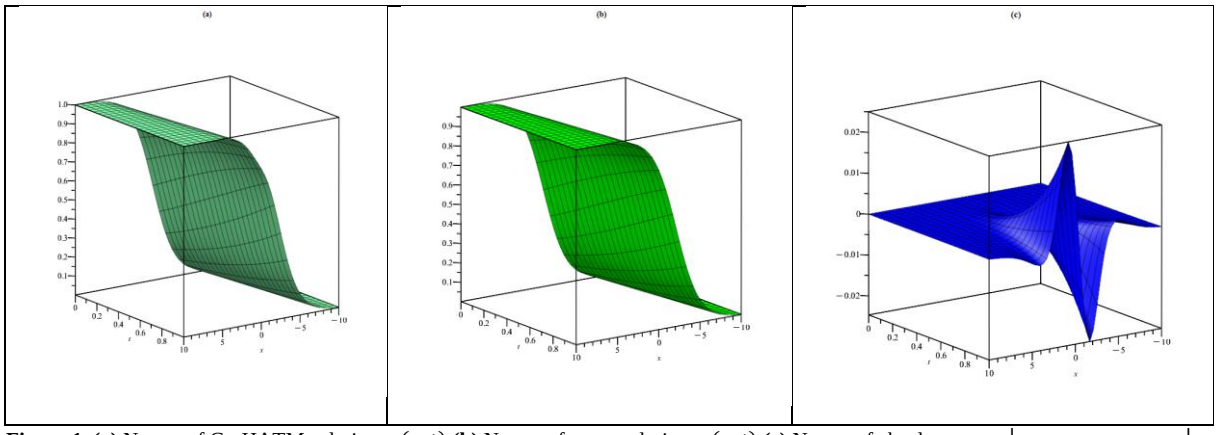


Figure 1. (a) Nature of Cq-HATM solution $w(x,t)$ **(b)** Nature of exact solution $w(x,t)$ **(c)** Nature of absolute error=$|w_{exact} - w_{Cq-HATM}|$ at $h = -1, n = 1, \alpha = 1$ for CTFCAE.

Fig. 2 presents the three-dimensional graphical depictions of CHPETM, the exact solution, and the absolute error for $w(x,t)$.

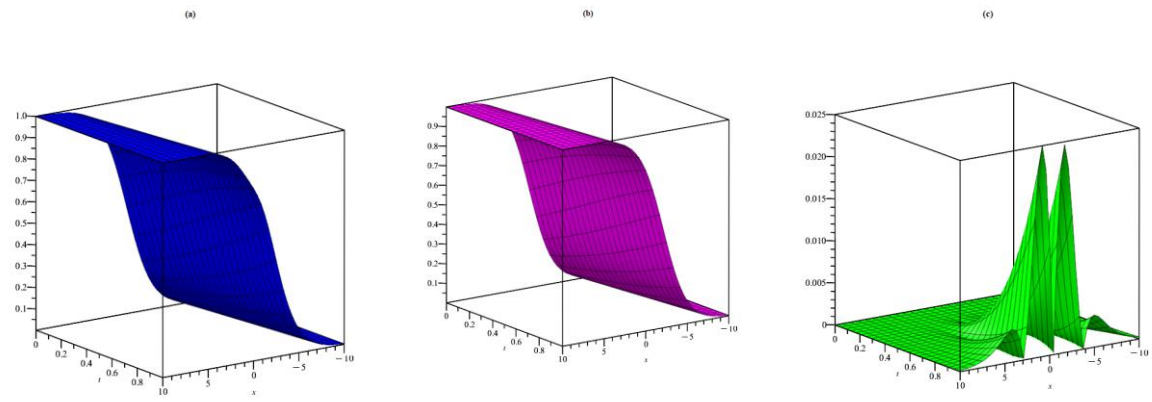


Figure 2. (a) Nature of CHPETM solution $w(x,t)$ **(b)** Nature of exact solution $w(x,t)$ **(c)** Nature of absolute error=$|w_{exact} - w_{CHPETM}|$ at $\alpha = 1$ for CTFCAE.

Figure 3 shows the two-dimensional graphical representations of Cq-HATM and CHPETM for $w(x,t)$ solutions for different α values.

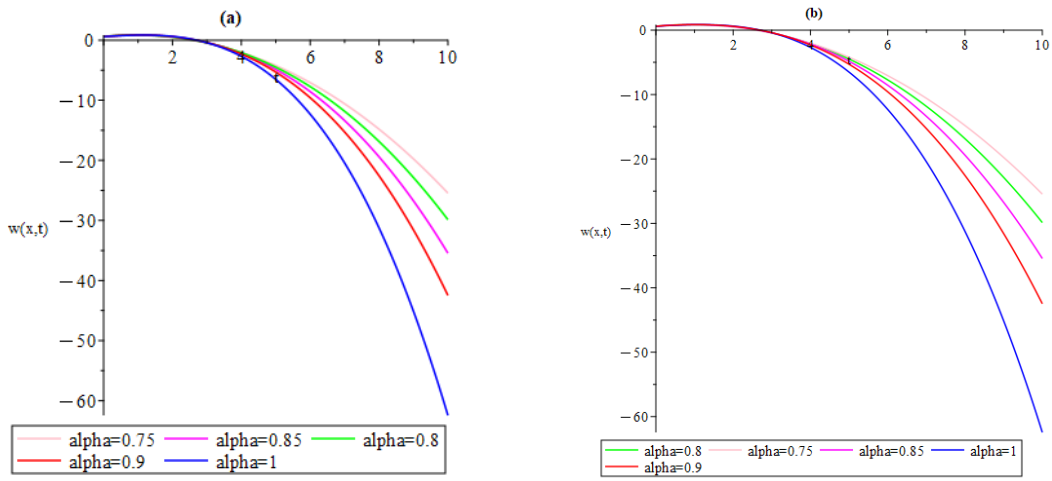


Figure 3. The comparison of the Cq-HATM solutions for $w(x,t)$ **(b)** The comparison of the CHPETM solutions for $w(x,t)$ at $h = -1, n = 1, x = 0.5$ with different α.

Table 1 shows the numerical solutions of $\mathrm{w(x,t)}$ obtained from the solution of CTFCAE with Cq-HATM for different $\mathrm{x, t}$ and α values.

Table 1. *Numerical solution of $w(x,t)$ by Cq-HATM for CTFCAE with different x, t and α at $n = 1, h = -1$.*

x	t	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 1$
1	0.001	2.1×10^{-3}	1.3×10^{-3}	7.6×10^{-4}	4.0×10^{-4}	1.4×10^{-10}
	0.002	3.5×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.3×10^{-3}	7.0×10^{-4}	7.1×10^{-11}
	0.003	4.6×10^{-3}	2.9×10^{-3}	1.7×10^{-3}	9.7×10^{-4}	1.3×10^{-10}
	0.004	5.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	4.7×10^{-11}
	0.005	6.6×10^{-3}	4.2×10^{-3}	2.6×10^{-3}	1.4×10^{-3}	2.1×10^{-10}
2	0.001	1.5×10^{-3}	9.3×10^{-4}	5.4×10^{-4}	2.8×10^{-4}	1.3×10^{-10}
	0.002	2.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	9.3×10^{-4}	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-10}
	0.003	3.2×10^{-3}	2.1×10^{-3}	1.2×10^{-3}	6.9×10^{-4}	1.9×10^{-10}
	0.004	4.0×10^{-3}	2.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	8.7×10^{-4}	2.7×10^{-10}
	0.005	4.6×10^{-3}	3.0×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.9×10^{-10}
3	0.001	9.2×10^{-4}	5.6×10^{-4}	3.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.3×10^{-15}
	0.002	1.5×10^{-3}	9.4×10^{-4}	5.6×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.7×10^{-14}
	0.003	1.9×10^{-3}	1.2×10^{-3}	7.7×10^{-4}	4.2×10^{-4}	1.8×10^{-13}
	0.004	2.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	9.6×10^{-4}	5.2×10^{-4}	5.9×10^{-13}
	0.005	2.8×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.1×10^{-3}	6.3×10^{-4}	1.4×10^{-12}
4	0.001	5.1×10^{-4}	3.1×10^{-4}	1.8×10^{-4}	9.5×10^{-5}	3.6×10^{-15}
	0.002	8.3×10^{-4}	5.2×10^{-4}	3.1×10^{-4}	1.6×10^{-4}	5.8×10^{-14}
	0.003	1.0×10^{-3}	7.0×10^{-4}	4.2×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.9×10^{-13}
	0.004	1.3×10^{-3}	8.6×10^{-4}	5.3×10^{-4}	2.9×10^{-4}	9.3×10^{-13}
	0.005	1.5×10^{-3}	1.0×10^{-3}	6.2×10^{-4}	3.4×10^{-4}	2.2×10^{-12}

5	0.001	2.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	9.5×10^{-5}	5.0×10^{-5}	3.6×10^{-15}
	0.002	4.3×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.6×10^{-4}	8.7×10^{-5}	5.8×10^{-14}
	0.003	5.7×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}	2.9×10^{-13}
	0.004	6.9×10^{-4}	4.5×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.5×10^{-4}	9.3×10^{-13}
	0.005	8.1×10^{-4}	5.2×10^{-4}	3.2×10^{-4}	1.8×10^{-4}	2.2×10^{-12}

Table 2 presents the numerical solution of the function $w(x,t)$, which was derived from the solution of the CTFCAE using the CHPETM. The table displays the results for various values of x, t, and α.

Table 2. *Numerical solution of $w(x,t)$ by CHPETM for CTFCAE with different x, t and α.*

x	t	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.9$	$\alpha = 1$
1	0.001	2.1×10^{-3}	1.3×10^{-3}	7.6×10^{-4}	4.0×10^{-4}	1.4×10^{-10}
	0.002	3.5×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.3×10^{-3}	7.0×10^{-4}	7.1×10^{-11}
	0.003	4.6×10^{-3}	2.9×10^{-3}	1.7×10^{-3}	9.7×10^{-4}	1.3×10^{-10}
	0.004	5.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}	2.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	4.7×10^{-11}
	0.005	6.6×10^{-3}	4.2×10^{-3}	2.6×10^{-3}	1.4×10^{-3}	2.1×10^{-10}
2	0.001	1.5×10^{-3}	9.3×10^{-4}	5.4×10^{-4}	2.8×10^{-4}	1.3×10^{-10}
	0.002	2.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	9.3×10^{-4}	5.0×10^{-4}	1.0×10^{-10}
	0.003	3.2×10^{-3}	2.1×10^{-3}	1.2×10^{-3}	6.9×10^{-4}	1.9×10^{-10}
	0.004	4.0×10^{-3}	2.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	8.7×10^{-4}	2.7×10^{-10}
	0.005	4.6×10^{-3}	3.0×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.9×10^{-10}
3	0.001	9.2×10^{-4}	5.6×10^{-4}	3.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}	2.3×10^{-15}
	0.002	1.5×10^{-3}	9.4×10^{-4}	5.6×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.7×10^{-14}
	0.003	1.9×10^{-3}	1.2×10^{-3}	7.7×10^{-4}	4.2×10^{-4}	1.8×10^{-13}
	0.004	2.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	9.6×10^{-4}	5.2×10^{-4}	5.9×10^{-13}
	0.005	2.8×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.1×10^{-3}	6.3×10^{-4}	1.4×10^{-12}
4	0.001	5.1×10^{-4}	3.1×10^{-4}	1.8×10^{-4}	9.5×10^{-5}	3.6×10^{-15}
	0.002	8.3×10^{-4}	5.2×10^{-4}	3.1×10^{-4}	1.6×10^{-4}	5.8×10^{-14}
	0.003	1.0×10^{-3}	7.0×10^{-4}	4.2×10^{-4}	2.3×10^{-4}	2.9×10^{-13}
	0.004	1.3×10^{-3}	8.6×10^{-4}	5.3×10^{-4}	2.9×10^{-4}	9.3×10^{-13}
	0.005	1.5×10^{-3}	1.0×10^{-3}	6.2×10^{-4}	3.4×10^{-4}	2.2×10^{-12}
5	0.001	2.6×10^{-4}	1.6×10^{-4}	9.5×10^{-5}	5.0×10^{-5}	3.6×10^{-15}
	0.002	4.3×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.6×10^{-4}	8.7×10^{-5}	5.8×10^{-14}
	0.003	5.7×10^{-4}	3.6×10^{-4}	2.2×10^{-4}	1.2×10^{-4}	2.9×10^{-13}
	0.004	6.9×10^{-4}	4.5×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.5×10^{-4}	9.3×10^{-13}
	0.005	8.1×10^{-4}	5.2×10^{-4}	3.2×10^{-4}	1.8×10^{-4}	2.2×10^{-12}

Table 3 shows the comparison of absolute errors of Cq-HATM, CHPETM and NITM.

Table 3. *Absolute errors obtained with Cq-HATM and CHPETM compared to NITM [43] for CTFCAE when α=1.*

x	t	$NITM$ [43]	$Cq-HATM$	$CHPETM$
1	0.001	3.3×10^{-11}	2.6×10^{-14}	2.6×10^{-14}
	0.002	2.6×10^{-10}	4.1×10^{-13}	4.1×10^{-13}
	0.003	8.9×10^{-10}	2.1×10^{-12}	2.1×10^{-12}
	0.004	2.1×10^{-9}	6.7×10^{-12}	6.7×10^{-12}
	0.005	4.1×10^{-9}	1.6×10^{-11}	1.6×10^{-11}
2	0.001	4.9×10^{-11}	1.7×10^{-14}	1.7×10^{-14}
	0.002	3.9×10^{-10}	2.8×10^{-13}	2.8×10^{-13}
	0.003	1.3×10^{-9}	1.4×10^{-12}	1.4×10^{-12}
	0.004	3.1×10^{-9}	4.5×10^{-12}	4.5×10^{-12}
	0.005	6.2×10^{-9}	1.1×10^{-11}	1.1×10^{-11}
3	0.001	4.1×10^{-11}	2.3×10^{-15}	2.3×10^{-15}
	0.002	3.3×10^{-10}	3.7×10^{-14}	3.7×10^{-14}
	0.003	1.1×10^{-9}	1.8×10^{-13}	1.8×10^{-13}
	0.004	2.6×10^{-9}	5.9×10^{-13}	5.9×10^{-13}
	0.005	5.1×10^{-9}	1.4×10^{-12}	1.4×10^{-12}
4	0.001	2.6×10^{-11}	3.6×10^{-15}	3.6×10^{-15}
	0.002	2.0×10^{-10}	5.8×10^{-14}	5.8×10^{-14}
	0.003	7.0×10^{-10}	2.9×10^{-13}	2.9×10^{-13}
	0.004	1.6×10^{-9}	9.3×10^{-13}	9.3×10^{-13}
	0.005	3.2×10^{-9}	2.2×10^{-12}	2.2×10^{-12}
5	0.001	1.4×10^{-11}	3.6×10^{-15}	3.6×10^{-15}
	0.002	1.1×10^{-10}	5.8×10^{-14}	5.8×10^{-14}
	0.003	3.9×10^{-10}	2.9×10^{-13}	2.9×10^{-13}

0.004	9.3×10^{-10}	9.3×10^{-13}	9.3×10^{-13}
0.005	1.8×10^{-9}	2.2×10^{-12}	2.2×10^{-12}

V. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 exhibits the three-dimensional representations of the numerical solutions acquired by the Cq-HATM, alongside the exact solutions and the absolute errors between the Cq-HATM solutions and the exact solutions for the CTFCAE. Figure 2 exhibits the graphical representations in three dimensions that illustrate the numerical solutions acquired by the CHPETM for the CTFCAE. Furthermore, the figure 2 also presents the exact solutions and the absolute errors between the CHPETM solutions and the exact solutions. Figure 3 shows the 2D comparison of the solutions obtained with methods Cq-HATM and CHPETM for the CTFCAE. Table 1 displays the numerical solutions of w(x,t) obtained using Cq-HATM for several values of α, specifically $\alpha = 0.75, \alpha = 0.8, \alpha = 0.85, \alpha = 0.9$, and $\alpha = 1$, for CTFCAE. In addition, Table 2 presents the numerical solutions of $w(x,t)$ acquired through the use of CHPETM for various values of α, namely $\alpha = 0.75, \alpha = 0.8, \alpha = 0.85, \alpha = 0.9$, and $\alpha = 1$, for CTFCAE. Table 3 presents the absolute errors of the NITM solutions in the literature, Cq-HATM solutions and CHPETM solutions for the CTFCAE. Table 3 demonstrates that the two recently developed methods exhibit lower errors compared to NITM.

VI. CONCLUSION

This work investigates the CTFCAE using two novel numerical approaches, specifically Cq-HATM and CHPETM. The numerical findings have provided confirmation of the reliability of these newly developed methods. The newly introduced techniques for addressing nonlinear fractional partial differential equations have been found to hold significant benefits and exhibit a high level of efficacy.

REFERENCES

[1] Liouville J. (1832). Mémoire sur quelques questions de géométrie et de mécanique, et sur un nouveau genre de calcul pour résoudre ces questions. *Ecole polytechnique, 13*, 71-162.

[2] Miller, K. S., Ross, B. (1993). An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations, Wiley, New York.

[3] Podlubny, I. (1999). Fractional differential equations, mathematics in science and engineering, Academic Press, New York.

[4] Baleanu, D., Diethelm, K., Scalas, E., Trujillo, J. J. (2012). *Fractional calculus: models and numerical methods*, World Scientific, London.

[5] Povstenko, Y. (2015). Linear fractional diffusion-wave equation for scientists and engineers. Birkhäuser, Switzerland.

[6] Baleanu D., Wu G.C., Zeng S.D. (2017). Chaos analysis and asymptotic stability of generalized Caputo fractional differential equations. *Chaos Solitons Fractals, 102*, 99–105.

[7] Sweilam, N. H., Abou Hasan, M. M., Baleanu, D. (2017). New studies for general fractional financial models of awareness and trial advertising decisions. *Chaos, Solitons & Fractals, 104*, 772-784.

[8] Liu D. Y., Gibaru O., Perruquetti W., Laleg-Kirati T. M. (2015). Fractional order differentiation by integration and error analysis in noisy environment. *IEEE Transactions on Automatic Control, 60*, 2945–2960.

[9] Esen A., Sulaiman T.A., Bulut H., Baskonus H. M. (2018). Optical solitons to the space-time fractional (1+1)-dimensional coupled nonlinear Schrödinger equation. *Optik, 167*, 150–156.

[10] Caponetto R., Dongola G., Fortuna L., Gallo A. (2010). New results on the synthesis of FO-PID controllers. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 15*, 997–1007.

[11] Veeresha, P., Prakasha, D.G., Baskonus, H. M. (2019). Novel simulations to the time-fractional Fisher's equation. *Mathematical Sciences, 13*(1), 33-42.

[12] Khalil, R., Al Horani, M., Yousef, A., Sababheh, M. (2014). A new definition of fractional derivative. *Journal of computational and applied mathematics, 264*, 65-70.

[13] Aggarwal, S., Chauhan, R., Sharma, N. (2018). Application of Elzaki transform for solving linear Volterra integral equations of first kind. *International Journal of Research in Advent Technology, 6*(12), 3687-3692.

[14] Elzaki, T. M. (2011). Applications of new transform "Elzaki transform" to partial differential equations. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics, 7*(1), 65-70.

[15] Elzaki, T. M. (2012). Solution of nonlinear differential equations using mixture of Elzaki transform and differential transform method. *In International Mathematical Forum, 7*(13), 631-638.

[16] Elzaki, T. M., Hilal, E. M. A. (2012). Homotopy perturbation and Elzaki transform for solving nonlinear partial differential equations. *Mathematical Theory and Modeling, 2*(3), 33-42.

[17] Elzaki, T. M., Kim, H. (2015). The solution of radial diffusivity and shock wave equations by Elzaki variational iteration method. *International Journal of Mathematical Analysis, 9*(22), 1065-1071.

[18] Jena, R. M., Chakraverty, S. (2019). Solving time-fractional Navier–Stokes equations using homotopy perturbation Elzaki transform. *SN Applied Sciences, 1*(1), 1-16.

[19] Abu-Gdairi, R., Al-Smadi, M., Gumah, G. (2015). An expansion iterative technique for handling fractional differential equations using fractional power series scheme. *Journal of Mathematics and Statistics, 11*(2), 29–38.

[20] Baleanu, D., Golmankhaneh, A. K., Baleanu, M. C. (2009). Fractional electromagnetic equations using fractional forms. *International Journal of Theoretical Physics, 48*(11), 3114–3123.

[21] Baleanu, D., Jajarmi, A., Hajipour, M. (2018). On the nonlinear dynamical systems within the generalized fractional derivatives with Mittag–Leffler kernel. *Nonlinear Dynamics, 2018*(1), 1–18.

[22] Baleanu, D., Asad, J. H., Jajarmi, A. 2018. New aspects of the motion of a particle in a circular cavity. *Proceedings of the Romanian Academy Series A, 19*(2), 143–149.

[23] Baleanu, D., Jajarmi, A., Bonyah, E., Hajipour, M. (2018). New aspects of poor nutrition in the life cycle within the fractional calculus. *Advances in Difference Equations, 2018*(1), 1-14.

[24] Anaç, H., Merdan, M., Bekiryazıcı, Z., Kesemen, T. (2019). Bazı Rastgele Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Diferansiyel Dönüşüm Metodu ve Laplace-Padé Metodu Kullanarak Çözümü. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9*(1), 108-118.

[25] Ayaz, F. (2004). Solutions of the system of differential equations by differential transform method. *Applied Mathematics and Computation, 147*(2), 547-567.

[26] He, J. H. (1999). Variational iteration method-a kind of non-linear analytical technique: some examples. *International Journal of Non-linear Mechanics, 34*(4), 699-708.

[27] He, J. H. (2003). Homotopy perturbation method: a new nonlinear analytical technique. *Applied Mathematics and Computation, 135*(1), 73-79.

[28] He, J. H. (2006). Homotopy perturbation method for solving boundary value problems. *Physics Letters, 350*(1-2), 87-88.

[29] He, J. H. (2006). Addendum: new interpretation of homotopy perturbation method. *International Journal of Modern Physics B, 20*(18), 2561-2568.

[30] Jajarmi, A., Baleanu, D. (2018). Suboptimal control of fractional-order dynamic systems with delay argument. *Journal of Vibration and Control, 24*(12), 2430-2446.

[31] Jajarmi, A., Baleanu, D. (2018). A new fractional analysis on the interaction of HIV with CD4+ T-cells, *Chaos, Solitons & Fractals, 113*, 221-229.

[32] Kangalgil, F., Ayaz, F. (2009). Solitary wave solutions for the KdV and mKdV equations by differential transform method. *Chaos, Solitons & Fractals*, *41*(1), 464-472.

[33] Klimek, M. (2001). Fractional sequential mechanics-models with symmetric fractional derivative. *Czechoslovak Journal of Physics*, *51*(12), 1348-1354.

[34] Merdan, M. (2010). A new applicaiton of modified differential transformation method for modeling the pollution of a system of lakes. *Selçuk Journal of Applied Mathematics, 11*(2), 27-40.

[35] Alkan, A. (2022). Improving Homotopy Analysis Method with An Optimal Parameter for Time-Fractional Burgers Equation. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 4*(2), 117-134.

[36] Wang, K., Liu, S. (2016). A new Sumudu transform iterative method for time-fractional Cauchy reaction-diffusion equation. *Springer Plus*, *5*(1), 865.

[37] Wazwaz, A. M. (1999). A reliable modification of Adomian decomposition method. *Applied Mathematics and Computation*, *102*(1), 77-86.

[38] Aslefallah, M., Abbasbandy, S., Yüzbaşi, Ş. (2023). Numerical Solution for a Class of Nonlinear Emden-Fowler Equations by Exponential Collocation Method. *Applications and Applied Mathematics: An International Journal (AAM)*, *18*(1), 10.

[39] Abdeljawad, T. (2015). On conformable fractional calculus. *Journal of computational and Applied Mathematics*, *279*, 57-66.

[40] Ala, V., Demirbilek, U., Mamedov, K. R. (2020). An application of improved Bernoulli sub-equation function method to the nonlinear conformable time-fractional SRLW equation. *AIMS Mathematics*, *5*(4), 3751-3761.

[41] Gözütok, U., Çoban, H., Sağıroğlu, Y. (2019). Frenet frame with respect to conformable derivative. *Filomat*, *33*(6), 1541-1550.

[42] Shrinath, M., Bhadane, A. (2019). New conformable fractional Elzaki transformation: Theory and applications. *Malaya Journal of Matematik*, *1*, 619-625.

[43] Ali, L., Shah, R., & Weera, W. (2022). Fractional View Analysis of Cahn–Allen Equations by New Iterative Transform Method. *Fractal and Fractional*, *6*(6), 293.

[44] Yasar, E., Giresunlu, I. B. (2016). The (G'/G, 1/G)-expansion method for solving nonlinear space-time fractional differential equations. *Pramana*, 87, 17.

[45] Esen, A., Yagmurlu, N. M., Tasbozan, O. (2013). Approximate analytical solution to time-fractional damped Burger and Cahn-Allen equations. *Appl. Math. Inf. Sci.*, 7, 1951.

[46] Jafari, H., Tajadodi, H., Baleanu, D. (2014). Application of a homogeneous balance method to exact solutions of nonlinear fractional evolution equations. *J. Comput. Nonlinear Dyn*., 9, 021019-1.

[47] Hariharan, G., Kannan, K. (2009). Haar wavelet method for solving Cahn-Allen equation. *Appl. Math. Sci.*, 3, 2523–2533.

[48] Tascan, F., Bekir, A. (2009). Travelling wave solutions of the Cahn-Allen equation by using first integral method. *Appl. Math. Comput.*, 207, 279–282.

[49] Tariq, H., Akram, G. (2017). New traveling wave exact and approximate solutions for the nonlinear Cahn-Allen equation: Evolution of a nonconserved quantity. *Nonlinear Dyn.*, 88, 581–594.

[50] Bekir, A. (2012). Multisoliton solutions to Cahn-Allen equation using double exp-function method. *Phys. Wave Phenom*., 20, 118–121.

[51] Guner, O., Bekir, A., Cevikel, A.C. (2015). A variety of exact solutions for the time fractional Cahn-Allen equation. *The European Physical Journal Plus*, 130, 1-13.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 437-450, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1326097
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makale-Review Article

Ahşap Plastik Kompozit Malzemelerin Çevresel Sürdürülebilirlik Uygulamaları: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Environmental Sustainability Applications of Wood Plastic Composite Materials: Life Cycle Assessement

Gözde Çolak Bayram[1], Burçin Atılgan Türkmen[2*], Gamzenur Özsin[3]

Geliş / Received: 11/07/2023 ***Revize / Revised: 09/01/2024*** ***Kabul / Accepted: 09/01/2024***

ÖZ

Ahşap-plastik kompozit (APK) malzemeler, çevre dostu alternatifler arayan endüstriler için çok yönlü ve sürdürülebilir bir çözüm sunan malzemeler olarak geliştirilmiştir. Fonksiyonel malzemelerin çevreye olan etkilerini analiz etmek amacıyla uygulanan yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ise, sürdürülebilirlik kavramının gitgide önem kazandığı günümüzde birçok bilimsel çalışmanın odak noktası haline gelmiştir. Ancak, farklı malzeme gruplarına özgü çevresel sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü değerlendirmesi araştırmalarını bütünleşik bir biçimde özetleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, APK özelinde bir derleme çalışmasına literatürde rastlanmamaktadır. Bu kapsamda, APK için hazırlanan YDD çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve bu konudaki güncel literatür bulguları ilk kez derlenmiştir. Bu amaçla, öncelikle YDD'nin temelleri açıklanmış; ardından farklı lignoselülozik biyokütle örnekleri ve polimer birleşimlerinden elde edilen kompozitlerin çeşitli çevresel etki kategorilerindeki sonuçları değerlendirilmiştir. Böylece, APK malzemelerin çevresel sürdürülebilirliğine etki edebilecek parametreler tartışılmıştır. Sonuç olarak, geleneksel malzemelere alternatif olarak kullanılabilecek APK'lerin üretim süreçlerinde daha sürdürülebilir malzeme ve yöntemler belirlenmiştir. Ayrıca, farklı malzeme kompozisyonları için YDD'nin daha yaygın bir şekilde uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Güncel literatür verilerinin de desteklediği üzere, bu malzemelerin aynı işleve sahip benzer malzemelere göre daha çevre dostu olduğu sonucuna varılmış; daha sürdürülebilir bir yaklaşım için APK malzemelere yönelik önerilerle makale sonlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler- Ahşap, kompozit, polimer, sürdürülebilirlik, yaşam döngüsü değerlendirmesi

ABSTRACT

Wood-plastic composite (WPC) materials have been developed as a versatile and sustainable solution for industries looking for environmentally friendly alternatives. Life cycle assessment (LCA), which is applied to analyze the environmental impact of functional materials, has become the focus of many scientific studies as the concept of sustainability is becoming increasingly important. However, while there are studies that summarize environmental sustainability and LCA research specific to different material groups in an integrated manner, there is no compilation study specific to WPC in the literature. In this context, the LCA studies prepared for WPCs have been comprehensively reviewed and the current literature findings on this subject have been compiled for the first time. For this purpose, firstly, the basics of LCA are explained and then the results of composites obtained from different

[2]*Sorumlu yazar iletişim: burcin.atilganturkmen@bilecik.edu.tr (https://orcid.org/0000-0003-3220-3817)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye
[1] İletişim: colak.gozde@hotmail.com (https://orcid.org/0000-0002-2170-4838)
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye
Işıksoy Tekstil, Demirtaş Dumlupınar Organize Sanayi Bölgesi, Bursa-Türkiye
[3] İletişim: gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-5091-5485)
Kimya Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik-Türkiye

lignocellulosic biomass samples and polymer composites are evaluated in various environmental impact categories. Thus, the parameters that can influence the environmental sustainability of WPC materials are discussed. As a result, more sustainable materials and methods have been identified in the production processes of WPCs that can be used as an alternative to traditional materials. Furthermore, the necessity of more widespread application of LCA for different material compositions is emphasized. As supported by the current literature, it is concluded that these materials are more environmentally friendly than similar materials with the same function, and the article is concluded with suggestions for WPC materials for a more sustainable approach.

Keywords- **Wood, composite, polymer, sustainability, life cycle assessment**.

I. AHŞAP-PLASTİK KOMPOZİT MALZEMELERİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİ

En genel tanımı ile "bugünün ihtiyaçlarını, gelecek kuşakların da kendi ihtiyaçlarını karşılayabilme olanağından ödün vermeksizin karşılayabilmek" şeklinde açıklanan sürdürülebilirlik kavramı malzeme üretim teknolojileri açısından büyük önem arz etmektedir [1]. Malzemelerin sürdürülebilirliği, ekonomik, sosyal ve çevresel boyutları bir arada bulunduran çok yönlü bir kavramdır. Sürdürülebilirliğin ekonomik boyutu; istihdam oluşturma kapasitesi, üretimde kaynak verimliliği, düşük maliyet, ekonomik büyüme ve atıkların değerlendirilerek yenilenebilir kaynakların kullanımı gibi başlıkları incelerken, çevresel boyutu ise çevrenin korunması ve kaynakların ekosisteme zarar vermeden kullanılması konularını ele almaktadır. Sürdürülebilirliğin sosyal boyutunun kapsamı ise, fırsat eşitliği, sağlık ve eğitim dahil olmak üzere temel ihtiyaçların giderilerek kaliteli bir yaşamın toplumsal düzeyde sağlanmasının yanı sıra hak ve özgürlüklerin güvence altına alınmasını da gerektirmektedir [2, 3].

Sürdürülebilir malzemeler, çevreye zarar vermeyen ve üretiminde yenilenemeyen malzemelerin kullanımının sınırlı olduğu yeşil malzemeler olarak tanımlanabilmektedir. Bu tür malzemeler, polimerler ve seramikler gibi biyobazlı malzemelerden yeniden işlenebilen veya yeniden kullanılabilen geri dönüştürülmüş malzemelere kadar çeşitlilik göstermektedir. Sürdürülebilir malzemeler, istenilen hacimde üretilebilirken, üretim ve kullanım süreçlerinde ekosistemi ve insan sağlığını olumsuz etkilemez. Ayrıca bu malzemelerin kullanım ömrü sonunda yeniden kullanılabilmesi ya da yüksek oranda geri dönüştürülebilmesi mümkündür. Kullanım ömrü boyunca ise malzeme seçiminde ekonomik olması, ihtiyaçları karşılaması, kaliteli ve sürdürülebilir olması da tercihi etkilemektedir [4, 5]. Malzemelerin sürdürülebilirliği için hammadde eldesinden üretim, kullanım ve ömrünün sonuna kadar tüm malzeme yaşam döngüsüne bakılmalı ve sürdürülebilirliği analiz etmek için güvenilir ve detaylı verilere dayalı kapsamlı yaşam döngüsü değerlendirmeleri uygulanmalıdır. Bu nedenle, yakın gelecekteki küresel ekonomi hedeflerine ve 2050 yılı net sıfır emisyon hedefine ulaşabilmek için sürdürülebilir malzemeler üretmek ve kullanmak kilit noktadır [6].

Günümüzde nüfusun hızla artması ve modernleşmeye paralel olarak ahşap-plastik kompozitlere olan talep artmaktadır. Mevcut kaynakların küresel talebi karşılayabilmesine dair çalışmalar ve potansiyel hammaddelerin kullanımının bir zorunluluk haline gelmesi, bu talebin ana nedenlerindendir. Bu nedenle, malzemelerin üretim süreçleri, ürün kullanım ömrü gibi kıstaslar ve sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla malzeme tasarımına yönelik verilerin endüstriyel boyutta izlenmesi gerekmektedir. Geleneksel polimer matrisli kompozitlere kıyasla daha sürdürülebilir ve çevre dostu olduğu düşünülen ahşap-plastik veya ahşap-polimer kompozit (APK) malzemeler, temelde iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu malzemelerin içeriğinde bulunan ahşap fazı, yani biyokütle, sağlığa zararlı madde içermeyen, yenilenebilir ve fazla atık oluşturmadan üretilebilen doğal bir malzemedir. Bu malzemenin üretiminde kullanılan fosil enerji miktarı düşüktür ve bünyesinde CO_2 depolamaktadır. Ayrıca bu malzeme, genel olarak enerji ve ham madde kullanımı yoğun olmayan işlemlerden geçirilerek kullanılabilmektedir. Hammaddesi biyokütle olan malzemelerin sahip olduğu diğer avantajlar ise ömürleri bitince yeniden kullanılabilmeleri, biyolojik yolla bertaraf edilebilmeleri ve enerji veya ham madde olarak değerlendirilebilmeleridir [7, 8]. Ayrıca, biyokütle kaynaklarının tüm dünya çapında mevcut olması ve dolayısıyla temininde bölgesel bağımlılık yaratmaması da endüstriyel süreçlerde bu anlamda büyük bir avantaj olarak göze çarpmaktadır [9]. Polimerik fazda kullanılan makromoleküler yapıdaki malzemeler ise günümüzde artan nüfusun ihtiyacını karşılama konusunda en yaygın kullanılan malzeme türüdür. Polimerlerin farklı uygulamalarda yoğun kullanımları dolayısıyla [10] farklı ekosistemler üzerindeki potansiyel etkilerinin incelenmesi ve çevresel sürdürülebilirliklerinin irdelenmesi konusunda birçok çalışmanın tartışma konusu olmuştur [11-16]. Polimerlerin üretimini genel olarak karmaşık, enerji yoğun ve nispeten ucuz bir süreç olarak tanımlayabilmek mümkündür. Fakat, çoğunlukla tek kullanımlık malzeme üretiminde tercih edilen polimerik malzemeler kullanım ömrünü tamamladıktan sonra doğada yok olmadığından çevre ve insan sağlığını uzun yıllar olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle plastik polimerik malzemenin yeniden kullanımı ya da geri dönüştürülmesi sürdürülebilir üretim için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, plastiklerin malzemelerin çevresel sürdürülebilirliğini artırmak için, tüketimin azaltılması, iyileştirilmiş geri dönüşüm altyapısı, biyo-esaslı alternatiflerin geliştirilmesi ve plastik kullanımı ve bertarafına ilişkin kamu bilinci ve eğitimi dahil olmak üzere kapsamlı bir strateji izlenilmesi de gerekmektedir. Ağırlıklı olarak ham petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıt bazlı hammaddelerden elde edilmesi

nedeniyle, bu kaynakların yenilenemez ve sınırlı olması polimerik malzemelerin sürdürülebilirliği konusunda dikkat çeken birincil endişedir. Atık yönetimi açısından bakıldığında ise yanlış atık dönüşüm/bertaraf süreçlerinin uygulanması ekosistemleri ve canlı yaşamını olumsuz yönde etkileyen plastik kirliliğine neden olabilir. Bu polimerik malzemelerin geri dönüşümü genellikle çevresel olarak sürdürülebilir bir çözüm olarak sunulsa bile, uygulanan süreçler beraberinde zorlukları da getirebilir. Örneğin, farklı plastik türlerinin atık toplama esnasında kontaminasyonu, son tüketici farkındalığı eksikliği ve ekonomik uygulanabilirlik gibi kıstaslar geri dönüşümde sürdürülebilirliği etkileyebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, polimerik malzemeler için döngüsel ekonomi modeline geçiş, uzun vadeli çevresel sürdürülebilirlik için çok önem arz etmektedir. Odaklanılabilecek uygulamalar ise geri dönüştürülebilir ürünler tasarlanması, geri dönüşüm altyapısının oluşturulması, daha çevre dostu ürün tasarımı yoluyla atık oluşumunun en aza indirgenmesi ve yenilikçi geri dönüşüm ve ileri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesi sıralanabilmektedir. APK malzemelerin üretimi ile plastik içine ahşap biyokütle kaynağı katkılanarak atık değerlendirme hedef alınarak katma değere sahip fonksiyonel malzemeler elde edilebilmektedir [17].

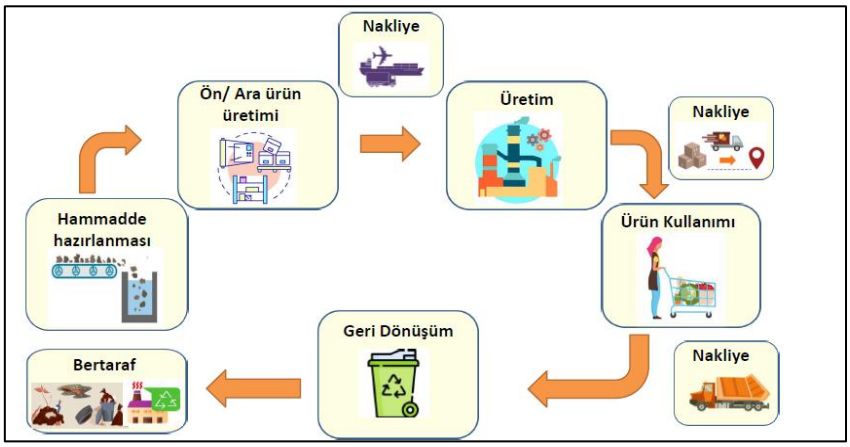
APK malzemelerin üretimi esnasında plastik malzemelerin tekrar kullanılması sağlanarak çevresel etkilerinin önemli ölçüde azaltılabileceği bilinmektedir [18, 19]. APK malzemeler, geleneksel malzemelere fonksiyonel bir alternatif sunmasının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından da çeşitli avantajlar sunmaktadır. Kompozit yapısında bulunan ahşap bileşeni yenilenebilir biyokütle kaynaklarından elde edildiği için kaynak verimliliğine ve tedarikte sürekliliğe katkı sağlamaktadır. Kompozit yapısındaki bitkisel kökenli ahşap bileşenin ayrıca ağaçların büyümesi sırasında karbondioksiti tutucu olması ise APK malzemelerin, diğer pek çok malzeme gruplarının üretimine kıyasla düşük sera gazı salınımı ile sonuçlandığını göstermektedir [20-22]. Diğer bir değişle, ahşap biyokütle kaynaklarının yapı içinde kullanımı sadece APK'lerdeki yenilenemeyen malzeme miktarını dengelemenin yanı sıra, atmosferik karbonu tutar ve malzeme çıkarma ve işlemenin enerji kullanımına bağlı iklim değişikliği potansiyelini düşürür [23, 24]. Ürün formülasyonu ve üretim süreçlerinde hammaddelerin dikkatli bir şekilde tedarik edilmesi ve sürdürülebilir üretim uygulamalarına bağlılık gibi kıstaslar da APK malzemelerin çevresel faydalarını en üst düzeye çıkarmak için çok önemlidir. Özellikle yerel kaynaklı biyokütlelerin üretim sürecinde kullanılabilmesi, nakliyeyle ilişkili çevresel etkilerin azaltılarak bölgesel ekonomileri destekleyeceği bilinmektedir [25-27]. Ayrıca geri dönüştürülmüş ahşap parçacıkları ve polimerlerin kompozit yapısına katkılanarak üretilen APK malzemeler ile kaynakların çok daha verimli bir şekilde kullanılması, aynı zamanda plastik atıkların neden olduğu kirliliğin azaltılmasını ve işlenmemiş malzemelere olan talebi azaltılmasını sağlamaktadır [28, 29]. Özellikle işlenmemiş birincil plastik kullanımının azaltılması ile petrol-esaslı polimerlerin üretim ve işlenmesiyle ilişkili çevresel etkinin azaltılması da polimerik malzemeler yerine APK kullanımı ile mümkündür [30]. APK malzemelerin üretim sonrasında kullanımına bakıldığında ise bu malzemelerin çok yönlülüğü, geleneksel malzemelerin yerini almasına ve birçok endüstride sürdürülebilir alternatifler olarak konumlanması dikkat çekmektedir [31, 32]. Örneğin, APK malzemelerin, sıcaklık, nem ve ultraviyole ışınlarındaki değişiklikler gibi zorlu çevre koşullarına dayanıma olanak sağlayan fiziksel özellikleri, bu kompozitlerin geleneksel malzemelere göre uzun ömürlü ve dayanıklı olmasına yol açmaktadır [33]. Bu nedenle APK malzemeler uygulamalarda sık sık malzeme değiştirme ve bakım ihtiyacını azaltarak zaman içinde daha az malzeme tüketimine yol açar ve dolayısıyla çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada APK malzemelerin çevresel sürdürülebilirliklerinin karşılaştırılması amacıyla bu malzemeler için yürütülen yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü değerlendirmesi kavramları irdelenmiş ve sonrasında ve APK malzemeler özelinde literatür bulguları tartışılmıştır. Böylece, farklı malzeme kombinasyonları ve süreçlerin çevresel etkileri konusunda yapılan çalışmalar derlenerek elde edilen veriler sunulmuştur. Yürütülen bu araştırma ahşap plastik malzemelerin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin derlendiği ilk çalışmadır. Kompozit malzemelerin çevresel sürdürülebilirliklerini analiz eden çalışmaların derlenerek irdelenmesi malzemelerin ve üretim sistemlerinin gelecek vizyonunun belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

II. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), tüm yaşam döngüleri boyunca süreçlerin ürünlerin ve hizmetlerin çevresel yüklerini değerlendirmek, raporlamak ve yönetmek için kullanılan bir analiz yöntemidir [14]. Bu yöntem Şekil 1'de gösterildiği gibi ham maddelerin çıkarılmasını ve işlenmesini kapsayan bir ürün, süreç veya sistemin üretim, nakliye ve dağıtım; kullanım, yeniden kullanım, bakım, geri dönüşüm ve nihai bertaraf gibi tüm yaşam döngüsü basamaklarını kapsamaktadır. YDD, yaşam döngüsü düşüncesi doğrultusunda "beşikten mezara" tüm yaşam döngüsü yaklaşımını benimser. Böylece, daha geleneksel analizlerde dikkate alınmayan etkiler de dahil olmak üzere, ürün yaşam döngüsündeki tüm aşamalardan kaynaklanan çevresel etkilerin detaylı ve sistematik bir şekilde analizi sağlanmaktadır [15]. Bu analizde ürün, proses ya da hizmetlerin belirlenen yaşam döngüsü basamakları için kullanılan kaynakların ve üretilen kirleticilerin bir envanteri oluşturulur. Elde edilen çevresel etki sonuçları ise ürün, sistem ya da hizmetin çevresel performansını optimize etmek, yeni ürün ya da süreç tasarımı,

alternatifleri değerlendirmek, eko-etiket ya da ürünlerin çevresel ürün beyanının yapılması için kullanılmaktadır [34, 35].



Şekil 1. Yaşam döngüsü basamakları [36].

III. YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ METODOLOJİSİ

Yaşam döngüsü değerlendirmesi, ürünlerin, hizmetlerin ve süreçlerin yaşam döngüsündeki çevresel etkileri ölçmek ve analiz etmek için metodolojik bir çerçevedir. YDD metodolojisi, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından oluşturulan Çevre Yönetim Sistemleri ile tanınan 14000 serisi standartları arasında ISO 14040 ve ISO 14044 [37, 38] standartlarına göre tanımlanmıştır. Bu standart serisi, yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarının gerçekleştirilmesine ve bildirilmesine yönelik genel çerçeveyi, prensipleri ve gereklilikleri belirtmektedir.

Yaşam döngüsü değerlendirmesi yöntemi Şekil 2'de gösterildiği gibi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır [39]:

- Amaç ve kapsam tanımı
- Envanter analizi,
- Etki değerlendirmesi,
- Sonuçların değerlendirilmesi.

Şekil 2. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Metodolojisi [37, 38]

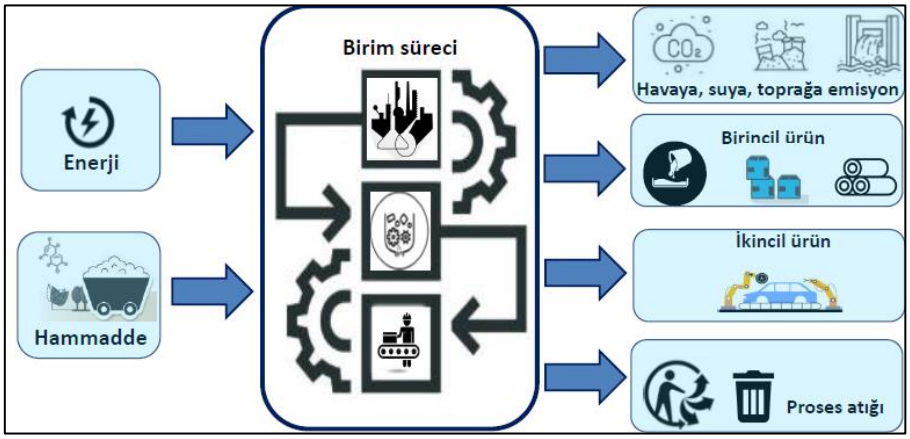
A. Amaç ve kapsam tanımı

YDD'nin ilk aşamasında çalışmanın amacı, kapsamı, sistem sınırları ve detay düzeyi tanımlanmaktadır. Çalışmanın kapsamı tanımlanırken sistem ve sınırları, veri ihtiyaçları ve tahminler belirtilir. Sistem sınırı, hangi basamakların sistem içerisinde değerlendirileceğini tanımlar. Ayrıca YDD çalışmasındaki bir ürünün işlevinin nicelik olarak belirtilmiş tanımı olan fonksiyonel birim bu basamakta belirlenmektedir [39, 40].

Kompozit malzemeler için yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarında, fonksiyonel birim, değerlendirmenin referans birimini tanımlayan kritik bir parametredir. Fonksiyonel birim, çalışılan ürün veya sistemin performansının veya işlevinin bir ölçüsüdür ve farklı alternatiflerin karşılaştırılması için bir temel sağlamaktadır [41]. Seçilebilecek fonksiyonel birim, hedeflenen uygulama alanına bağlı olarak APK malzemesinin ağırlığına, hacmine, kullanım özelliklerine veya yüzey alanına bağlı olabilir. Ayrıca, fonksiyonel birim tanımlarken APK'nın beklenen ekonomik ömrünü de dikkate almak, malzemenin tüm yaşam döngüsü boyunca performansını doğru bir şekilde yansıtmasını sağlamaktadır. Ayrıca, ürün kalitesindeki oluşabilecek olası değişiklikler veya kompozit malzemenin zaman içindeki uygulamasındaki değişiklikler gibi fonksiyonel birimdeki herhangi bir değişkenliği hesaba katmak da önem arz etmektedir [11, 42, 43].

B. Envanter analizi

YDD'nin ikinci aşaması envanter analizidir. Bu basamak veri toplama ve hesaplama prosedürlerini içerir. Bu veriler çalışmanın temeli olacağından bu basamak kilit öneme sahiptir. Verilere bağlı olarak sistem sınırları değiştirilebilir ya da yeniden tanımlanabilir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, envanter analizinde çevreden gelen tüm girdilerin (su, enerji ve hammadde gibi) sınırdan sisteme akışının ve sistemden tüm çıktıların (ürün, yan ürün, enerji, hammadde, emisyon ve atık gibi) sınırdan çevreye akışı dikkate alınır. Yaşam döngüsü envanteri aşamasında hedef ve kapsam tanımlama aşamasında tanımlanan sistem sınırlarına göre akış şemasının oluşturulması, fonksiyonel birime bağlı olarak tüm birim süreçleri için veri toplama ve sistemin çevresel yükünün hesaplanması gerçekleştirilir [19].



Şekil 3. Bir birim sürecin girdi ve çıktılarını gösteren yaşam döngüsü envanterinin şematik gösterimi [44].

Yaşam döngüsü değerlendirmesinde envanter analizi basamağında sonuçlarının güvenilirliğini ve geçerliliğini doğrudan etkilediği için veri kalitesinin ve doğrululuğunun gözden geçirilmesi son derece önemlidir [42]. Verilerin güncel olması, güvenilir kaynaklardan elde edilmesi ve mümkünse doğrudan toplanan ya da ölçülen değerlerin oluşturduğu birincil verilerin kullanımı esas alınmalıdır. Ancak birincil verilere erişilememesi durumunda bilimsel saygınlığı kanıtlanmış veri tabanlarından veya yayınlarda gelen ikincil verilerde kullanılabilir. Ayrıca, yürütülecek çalışma ile ilgili konum ve zamana bağlı faktörlerin de veri toplarken göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu noktada önemli değişimleri veya nüansları belirlemeyi engelleyebilecek, aşırı derecede genelleştirilmiş veya toplu verilerin kullanımından kaçınmak da diğer bir önemli husustur. Veri tutarlılığı açısından ve hesaplamalardaki hataları önlemek ve en aza indirgemek için ise ölçüm birimleri gibi verilerin kesinliğinin sağlanması da gerekmektedir.

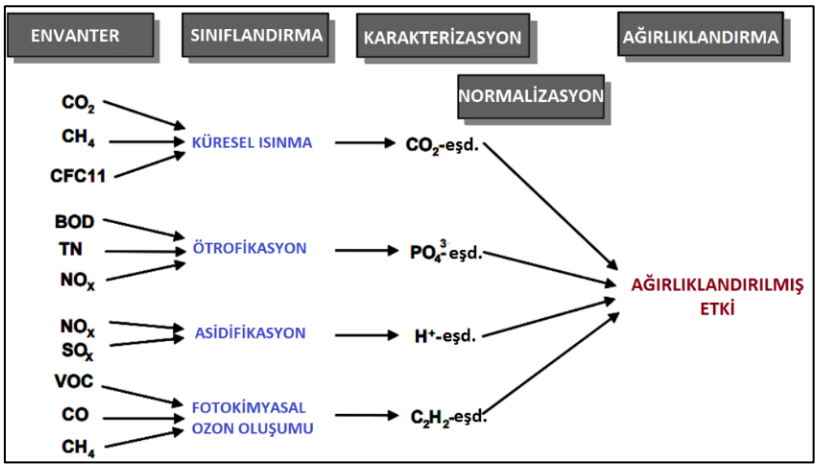
C. Etki Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi basamağında envanter analizine dayalı olarak elde edilen enerji, su ve hammadde kullanımı verilerinin potansiyel çevre etkileri değerlendirilmektedir. Bu basamak ilk olarak emisyonları etki kategorilerine ayıran ve ikinci olarak karşılaştırmaya olanak sağlamak için bunları ortak birimlerle karakterize eden çevresel etki değerlendirme yöntemleri aracılığıyla yapılır [45].

Yaşam döngüsü çevresel etki değerlendirmesi hesaplamaları günümüzde sıklıkla GaBi, OpenLCA ve SimaPro gibi yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Bazı yazılımlar kendi veritabanlarıyla birlikte

kullanılabilirken Ecoinvent, NEEDS gibi küresel ve ülkelere özel hazırlanan veri tabanları ile de desteklenmesi gerekebilmektedir. Yaşam döngüsü değerlendirme için kullanılan yazılımların birçoğu yaşam döngüsü maliyetlendirmesi ve yaşam döngüsü raporlamasını da gerçekleştirmektedir. CML, ReCiPe, gibi değişik yaşam döngüsü etki değerlendirme yöntemi mevcuttur. Farklı yöntemler genellikle farklı sonuçlar verir, bu da YDD uygulayıcısının en uygun yöntemi seçmesini ve hangi sonuçların en iyi veya en olası etki tahminini verdiğini belirlemesini karmaşık hale getirmektedir. Bu yöntemler çeşitli açılardan farklılık gösterse de temel ayrımlardan biri orta nokta ve son nokta yöntemleri arasındadır. Bu yöntemler, etkiyi hesaplamak için neden-sonuç zincirindeki farklı aşamaları kullanmaktadır [46].

Şekil 4'te gösterildiği gibi etki değerlendirmesi sınıflandırma, karakterizasyon, normalleştirme ve ağırlıklandırma gibi basamaklardan oluşur. Her çalışma için farklılık göstermekte olup ilk iki aşama zorunlu, son iki aşama ise isteğe bağlıdır [47].



Şekil 4. Etki analizi basamakları ve ilişkisi [47]

Sınıflandırma, yaşam döngüsü envanter girdi ve çıktılarının çalışma amacına uygun olarak seçilen etki kategorilerine ayrılmasıdır. Örneğin, sınıflandırma aşamasında, sera gazı neden olan tüm girdiler/çıktılar iklim değişikliği etki kategorisine atanır [39]. YDD'de en yaygın olarak dikkate alınan çevresel etkiler kaynak kullanımı, insan sağlığı ve ekolojik hususlarla ilgili olup aşağıda listelenmiştir. Bu liste küreselden yerele doğru etki ölçeği sırasına göre düzenlenmiştir [48].

- Abiyotik ve biyotik kaynakların tükenmesi
- Küresel ısınma
- Ozon tabakasının incelmesi
- Fotokimyasal ozon oluşumu veya duman oluşumu
- Asitleşme
- Ötrofikasyon
- İnsan toksisitesi
- Ekotoksisite
- Katı atık, tehlikeli ve radyoaktif atıklar

Karakterizasyon, her envanter akışının ilgili çevresel etkisine yönelik potansiyel etkilerinin büyüklüğünün değerlendirilmesidir. Örneğin, iklim değişikliği etkileri hesaplanırken, yaşam döngüsü envanter analizinde daha önce envanteri çıkarılan tüm sera gazı emisyonları, karbondioksite göre etki yoğunlukları açısından ağırlıklandırılır ve kg CO_2 eşdeğeri olarak ifade edilir. Karakterizasyon aşamasında envanter analizinde hesaplanan yükler, her bir yükün uygun etki kategorilerine nicel katkısını belirlemek için bir karakterizasyon faktörü ile çarpılır. Karakterizasyon faktörleri maddeye veya kaynağa özgüdür [46, 48].

Normalleştirme aşamasında, farklı çevresel etki potansiyelleri, kabul görmüş normalizasyon yöntemleri kullanılarak ortak referans sistemine göre birimsiz hale getirilerek karşılaştırılır. Etkiler, belirli bir zaman diliminde belirli bir alandaki toplam etkilere göre de normalleştirilebilir [49]. Ancak, yerel ve bölgesel ölçekte bazı etki kategorilerinin (örneğin insan toksisitesi, asitlenme) göreceli katkıları küresel ölçekteki toplam etkiye (örneğin küresel ısınma, abiyotik tükenme) kıyasla çok daha küçük ve bazen ihmal edilebilir görünebileceğinden normalleştirme sonuçları dikkatle yorumlanmalıdır [39, 50, 51].

Ağırlıklandırma aşamasında ise hangi çevresel etki potansiyelinin daha önemli olduğu ortaya koyulur. Bu basamakta her çevresel etki kategorisi için azaltım hedeflerine dayanan ağırlıklandırma yöntemlerinden biri kullanılarak belirli katsayılarla çarpılır [48]. Ağırlıklandırma, analiz sonuçlarının yorumlanmasını ve iletişimini destekler.

D. Sonuçların Değerlendirilmesi

YDD'nin son aşaması sonuçların değerlendirilmesidir ve bu basamağın amacı sonuçları analiz etmek, veri hassaslık analizini değerlendirmek, en fazla etkinin geldiği basamakların bulunması ve sonuçların raporlanmasıdır. Bu aşamada aynı zamanda bir YDD veya bir yaşam döngüsü envanteri çalışmasının sonuçlarının çalışmanın amaç ve kapsam tanımına uygun olarak, kolayca anlaşılabilir, eksiksiz ve tutarlı bir sunumu sağlanır [39, 52].

APK malzemeler için bir YDD çalışmasının sonuçlarını yorumlarken dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. YDD'de sonuçların yorumlanmasında kullanılması gereken yaklaşımlar [49].

Yöntem	Amaç
En çok etkinin geldiği noktaların belirlenmesi	Detaylı, sayısal ve karşılaştırmalı veriler ile malzemenin yaşam döngüsü ile ilişkili sera gazı emisyonları, su kullanımı veya toksik salınımlar gibi çevresel etkilere en çok sebep olan basamakların tespit etmek.
Alternatif hammaddelerin ve üretim sürecinin kıyaslanması	İncelenen kompozit malzemenin çevresel sürdürülebilirliğinin, kompozit içindeki bileşenler ve diğer alternatif malzemeler ile karşılaştırmak. Farklı tasarım seçeneklerini tespit ederek, iyileştirme fırsatlarını belirlemek.
Modeldeki belirsizliklerin, varsayımların ve sınırlamaların değerlendirilmesi	Envanter analizinde veya etki değerlendirmesinde yapılan varsayımları, veri kalitesini ve model belirsizliklerinin sonuçlar üzerindeki değişimini yorumlamak.

IV. AHŞAP PLASTİK KOMPOZİTLERİN YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ: GÜNCEL LİTERATÜR ÖRNEKLERİ

YDD, tüm dünyada kullanılan, sürekli gelişmekte olan, asıl ürünleri hedef alan ve standardize edilmiş bilimsel bir analiz metodudur [53]. YDD çok çeşitli ürün, hizmet ve sistemler için geniş uygulama alanına sahiptir [49] ve kompozit malzemelerin yaşam döngüsü boyutunda çevresel etkilerinin analiz edildiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen ahşap ve plastik temelli kompozit malzemeler için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmalarına ait bilgiler Tablo 2'de sunulmuştur. Çalışmalar değerlendirildiğinde, kullanılan hammadde türü, çalışma kapsamı ve amacı, fonksiyonel birim ve odaklanılan çevresel etki kategorilerine göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Genel olarak tek kompozit malzemenin çevresel etkileri hesaplanırken, bazı çalışmalarda [54-56] alternatif hammaddelerle üretilen APK malzemelerin çevresel etkilerinin karşılaştırıldığı görülmüştür. Fonksiyonel birim genel olarak ağırlığa bağlı seçilirken APK malzeme alanına [56, 57] ve kullanımına [58] bağlı seçilen fonksiyonel birime göre hesaplamaların yapıldığı çalışmalar da literatürde mevcuttur. Bütün çalışmalarda küresel ısınma potansiyeli (KIP) hesaplanmıştır. Sadece iki çalışmada [59, 60] asidifikasyon potansiyeli (AP) ve üç çalışmada [59-61] ötrofikasyon potansiyeli (ÖP) hesaplanmamıştır. Diğer yayınlarda hesaplanan çevresel etki kategorileri ise çalışmanın amacına göre farklılık göstermektedir.

Tablo 2. APK malzemeler için yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi çalışmaları

APK Bileşimi	Fonksiyonel birim	Etki kategorileri	Amaç	Sonuç	Referans
Ahşap (yumuşak odunumsu)-HDPE	1 kg APK	AP, ATP element, FOOP, KIP, ÖP, OTİP	Alternatif malzeme kullanımı Kullanım ömrü sonu değerlendirilmesi	İkincil ahşap kullanımı en çevreci yaklaşımdır. Malzeme geri dönüşümü, yakıt olarak kullanılarak bertarafına göre daha çevre dostu bir yöntemdir.	[62]
Ladin ağacı-PP	100 kg APK	ATP fosil, AP, ATP element, KIP, ÖP	Alternatif malzeme kullanımı Kullanım ömrü sonu değerlendirmesi	APK içeriğinde geri dönüştürülmüş PP ve mineral yün kullanılması daha az çevresel etki göstermektedir. Geri dönüştürülmüş PP'nin kullanım ömrü sonunda işlenmesi toplam emisyonları önemli ölçüde azaltmaktadır.	[63]
Ahşap tozu-HDPE	30 m^2 APK	AP, ATP element, EE, FYK, KIP, ÖP, SK, SP	Ahşaba yapılan ön işlemin etkisinin belirlenmesi	Alkali bakır kuarterner ile ön işlem yapmanın ÖP dışındaki etki kategorilerinde daha iyi sonuç vermektedir	[57]
Çam ağacı talaşı-PLA	1 ton APK	AP, FOOP, KIP, ÖP, SP	APK içindeki katkıların (polihidroksialkanoatlar) incelenmesi Üretim süreçlerinin iyileştirilmesi	Katkısız APK için su tüketimi daha yüksektir. FOOP tüm kompozitler için en önemli etki kategorisidir. Ahşap kurutma işlemi optimizasyonu ve atık su ıslahı çalışmaları ile AKP üretim sürecinin çevresel etkiler azaltılabilir.	[64]
Odun atığı-Üre formaldehit reçine	1 ton ahşap	KIP	İnşaat odun atığının yönetim stratejilerinin (APK içinde, çimento katkısı, yakıt ve arazi dolgusu olarak kullanımının) karşılaştırılması	Atık ahşabın APK içinde kullanımının çevresel sürdürülebilirliğe katkısı bulunmaktadır. Atık ahşap için en iyi atık yönetiminin yakıt olarak kullanımı olduğu belirlenmiştir.	[59]
Odun lifi-PP	1 ton odun lifi	AP, FYK, ITP	APK'nın PP malzemeler ile karşılaştırılması	APK'nın, PP malzemelere göre daha çevre dostudur.	[61]
Ahşap (%50 yumuşak odunumsu + %50 sert odunumsu biyokütle)-polimer	1 ton ahşap, 1 kamyon ahşap	AP, FYK, KIP, ÖP, OTİP,	Toz ve pelet halinde kullanılan ahşabın etkisinin saptanması	APK üretimi için, pelet şeklinde ahşap kullanımının ekonomik ve çevresel faydaları bulunmaktadır.	[65]

Ladin talaşı-PP / Ladin talaşı polimer karışımı	1000 kg APK	FYK, KIP	İnşaat ve yıkım atıklarının APK'da kullanımının incelenmesi	Geleneksel atık bertarafı yöntemlerine göre inşaat atıklarının APK'da kullanımı avantajlı bir yöntemdir.	[60]
Çam iğnesi-PLA Kenevir lifi-PLA	1 kg PLA	AP, ATP element, ITP, KEP, KIP, ÖP, OTİP, TSEP	Kendiliğinden yetişebilen (çam iğnesi) veya yetişemeyen (kenevir) biyokütle çeşitlerinin karşılaştırılması Biyokütle oranının etkisinin incelenmesi	Kenevir lifi ile üretilen kompozitler daha üstün özelliklere sahip olmasına rağmen, çam iğnesi lifleri, düşük toksisite göstergelerine sahiptir. PLA oranının azaltılması ile çevresel etkiler azalmaktadır.	[54]
Keten lifi-PLA Kenevir lifi-PLA Pirinç kabuğu-PLA Ahşap tozu-PLA Kurutulmuş damıtma-tane ve çözünürleri (DDSA)-PLA	1 kg APK	AP, KIP, ÖP, OTİP, SP	Organik ve inorganik (cam elyaf ve talk) dolgu malzemelerinin karşılaştırılması Hammadde tedariği, işlenmesi, nakliyesi ve kullanım ömrü sonu ile ilişkili maliyetleri, emisyonları ve enerji yoğunluğunun belirlenmesi	Organik biyo-esaslı malzemelerin kullanımı daha düşük bir ekonomik/çevresel etki ve enerji yoğunluğu elde edilir.	[55]
Çam talaşı-PLA	1 ton APK	AP, ATP element, FOOP, KIP, ÖP, SP	Stiren-bütadien-stiren (SBS) ile modifikasyonun ve SBS miktarının etkisinin belirlenmesi	SBS ile modifiye edilen APK'ler, SBS içermeyenlere göre daha çevre dostudur. APK içindeki biyokütle miktarı arttıkça çevresel etkiler azalmaktadır.	[66]
Ahşap tozu-HDPE	1000 kullanım	ATP fosil, AP, KIP, ÖP, OTİP	Ahşap, plastik ve APK'nin kıyaslanması	APK, KIP (biyojenik karbon hariç) hariç tüm kategorilerde en düşük çevresel etkiye sahiptir.	[58]
Ahşap-PE Ahşap-PVC	1 m^2 APK	AP, FOOP, KIP, ODF, ÖP	Malzeme bileşimi ve geometrisi farklı olan iki farklı APK'nın, iki farklı ahşap zemin kaplaması (çam ve bilinga) ile karşılaştırılması	Ham ahşaptan (çam) yapılmış malzeme, çevreye en zararsız olmasına rağmen, APK kullanım ömrü ve geri dönüşüm bakımından avantaj sunmaktadır.	[56]

Abiyotik kaynakların tükenme potansiyeli (fosil olmayan) (ATP elements), Abiyotik kaynakların tükenme potansiyeli (fosil) (ATP fosil), Ekolojik etki (EE), Fotokimyasal ozon oluşturma potansiyeli (FOOP), Fosil yakıtk (FYK), İnsan toksisite potansiyeli (İTP), Karasal ekotoksisite potansiyeli (KEP), Küresel ısınma potansiyeli (KIP), Ozon tabakasının incelmesi potansiyeli, (OTİP), Ötrofikasyon potansiyeli (ÖP), Su kullanımı (SK), Sis potansiyeli (SP), Tatlı su canlılarına ekotoksisite potansiyeli (TSEP)

Tablo 2'de sunulan literatür bulguları incelendiğinde, genel olarak geri dönüştürülmüş malzemelerin ham madde olarak kullanılmasının yanı sıra, doğal malzemelerin de üretimde kullanılmasıyla elde edilen çeşitli alternatif kompozit malzemelerin farklı sektörlerde kullanımının çevresel etkilerinin değerlendirildiği görülmektedir. Ayrıca, hazırlanan çalışmaların bir kısmı, yaşam sonu basamağı için uygulanan farklı atık yönetimi alternatiflerinin çevresel etkilerini karşılaştırmaya odaklanmıştır. Çalışmaların amacına ve kapsamına uygun olarak farklı fonksiyonel birim ve çevresel etki kategorileri seçimi yapıldığı sonucuna varılmış; dolayısıyla, çalışmaların mukayese edilebilmesi açısından bir standardizasyon eksikliği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, yapılan literatür taramasında çok az sayıda çalışmada veriler için hassasiyet analizi yapılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kompozitlerin içeriğinde ahşap kullanılmasının çevresel etki kategorileri özelinde KIP değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ancak, malzemelerin performansları, ekonomik ömrü, bakım ve onarım gibi faktörler göz önünde bulundurulmalı; ayrıca geleneksel malzemelerle, özellikle de kompozit yapısını oluşturan ahşap ve polimerik malzemelerle kıyaslanmasının gerekliliği de belirginleşmektedir. Göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husus, yürütülen çalışmalarda çevresel sürdürülebilirlik için etki kategorileri incelenirken, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik analizlerinin değerlendirilmemiş olmasıdır. Bu nedenle, farklı hammadde kombinasyonlarını inceleyen çalışmaların yanı sıra, biyokütle ve polimer hammaddelerinin eldesinden APK kullanım ömrünün sonuna kadar atılmasına kadar tüm aşamalarının dikkate alındığı, beşikten mezara yaklaşımıyla çevresel, ekonomik ve sosyal bir analizin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik açısından büyük bir önem taşımaktadır.

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

APK malzemelerin çevre dostu ve eko-sürdürülebilir olmaları, onları modern hayatın pek çok uygulamasında tercih edilen malzemelerden biri haline getirmiştir. Son yıllarda, teknolojik gelişmeler doğrultusunda fonksiyonel ve uzun ömürlü malzemelere olan talebin artmasıyla birlikte, ahşap-plastik kompozitlerde malzeme seçimi, üretim tasarımı, maliyet azaltımı ve çevresel sürdürülebilirlik gibi konular önem kazanmıştır. Bu çalışmada, literatür taraması ile elde edilen veriler doğrultusunda, APK malzemelere yönelik farklı çevresel etki kategorileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. İncelenen literatür, belirli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmayı amaçlayan çevresel etki çalışmalarının gün geçtikçe arttığını ancak halen yeterli seviyeye ulaşmadığını göstermektedir. Özellikle APK malzemelerin kullanım alanları ve küresel üretim hacmindeki beklenen artış göz önüne alındığında, yaşam döngüsü değerlendirme çalışmalarının bütünleşik bir yaklaşımla artırılması gerekliliği dikkat çekmektedir. Sonuç olarak, kaynak verimliliğini destekleyen, sorumlu üretim ve geri dönüşüm uygulamalarını teşvik eden yöntemler, APK malzemelerin döngüsel ekonomiye sağladığı katkıyı artırmaktadır. Bu malzemelerin dayanıklılığı, çok yönlülüğü ve yerel kaynak potansiyeli ile birleştiğinde, uzun ömür ve enerji verimliliği ilkeleri ile uyum içinde sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, APK malzemelerin üretim sürecine ikincil geri dönüştürülmüş ahşap ve polimer kaynaklarının dahil edilmesi, teknolojik inovasyonun ekolojik sorumlulukla uyumlu olduğu daha sürdürülebilir bir geleceğe katkı sunmaktadır. Ayrıca, APK malzemelerin yaşam döngüsü çevresel sürdürülebilirlik analizlerine ek olarak, ekonomik ve sosyal etkilerinin de değerlendirilmesinin, bu sektörün sürdürülebilirliğine önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı destekleyen Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne 2022-01.BŞEÜ.03-07 numaralı BAP Projesi kapsamında verdikleri destek için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] United Nations. (1987). *The Brundtland Commission, Our Common Future, The Report of the World Commission on Environment and Development Oxford University Press, Oxford.*

[2] Harris, J. M. (2003). Sustainability and sustainable development. *International Society for Ecological Economics, 1*(1), 1-12.

[3] [Azapagic, A. and Perdan, S. (2000). Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework. *Process Safety and Environmental Protection, 78* (4), 243-261.

[4] Tufan, M. Z. and Cengiz, Ö. (2012). Sürdürülebilirlik kavrami ve yapi malzemeleri için sürdürülebilirlik kriterleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 2*(1), 6-13.

[5] Ding, G. K. C. (2014). *3 - Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: An overview*. Woodhead Publishing, 38-62.

[6] Titirici, M., Baird, S. G., et al. (2022). The sustainable materials roadmap. *Journal of Physics: Materials*, *5*(3), 032001.

[7] Goldhahn, C., Cabane, E., et al. (2021). Sustainability in wood materials science: An opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences 379*, 20200339.

[8] Özsin, G., Çolak, G., et al. (2024). Sürdürülebilir Ahşap Plastik Kompozit Malzemeler: Hammaddeler, Yapısal Özellikler, Üretim Süreçleri ve Güncel Eğilimler. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *10*(2), 264-280.

[9] Woodard, A. C. and Milner, H. R. (2016). *7 - Sustainability of timber and wood in construction*. Woodhead Publishing, 129-157.

[10] Andrady, A. L. and Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1526), 1977-1984.

[11] Biçergil, G. and Atılgan Türkmen, B. (2023). Evaluation of environmental impacts in PVC sector: the case of Turkey. *Plastics, Rubber and Composites*, *52*(4), 238-247.

[12] Örücü, E. and Atılgan Türkmen, B. (2022). Evaluating the sustainability of car mat manufacturing. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00402.

[13] Isola, C., Sieverding, H. L., et al. (2017). Life cycle assessment of photodegradable polymeric material derived from renewable bioresources. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2935-2944.

[14] Alsabri, A. and Al-Ghamdi, S. G. (2020). Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports*, 6, 364-370.

[15] Das, S., Liang, C., et al. (2021). *Life Cycle Assessment of Polymers and Their Recycling*. American Chemical Society, Vol. 1391, 143-170.

[16] Boone, L., Préat, N., et al. (2023). Environmental performance of plastic food packaging: Life cycle assessment extended with costs on marine ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 894, 164781.

[17] Kazemi Najafi, S. (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review. *Waste Management*, 33(9), 1898-1905.

[18] Vidal, R., Martínez, P., et al. (2009). Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1), 73-82.

[19] Bergman, R., Oneil, E., et al. (2013). *Comparative life-cycle assessment of California redwood decking, Corrim, 1-9.*

[20] Das, O., Babu, K., et al. (2022). Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112054.

[21] Al Faruque, M. A., Salauddin, M., et al. (2022). Bast Fiber Reinforced Green Polymer Composites: A Review on Their Classification, Properties, and Applications. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8006-8021.

[22] Sun, W., Sun, Y., et al. (2023). Research on Biomass Waste Utilization Based on Pollution Reduction and Carbon Sequestration, 15(5), 4535.

[23] Hill, C., Norton, A., et al. (2015). *12 - Environmental impacts of wood composites and legislative obligations*. Woodhead Publishing, 311-333.

[24] Schwarzkopf, M. J. and Burnard, M. D. (2016). *Wood-Plastic Composites—Performance and Environmental Impacts*. Springer Singapore, 19–43.

[25] Rabbat, C., Awad, S., et al. (2022). Sustainability of biomass-based insulation materials in buildings: Current status in France, end-of-life projections and energy recovery potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111962.

[26] Pokhrel, G., Kizha, A. R., et al. (2021). Transportation Cost Analysis on Alternative Wood Feedstocks for Manufacturing Wood-Plastic Composites. *Bioresources*, 17, 634-651.

[27] Braghiroli, F. L. and Passarini, L. (2020). Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. *Current Forestry Reports*, 6(2), 172-183.

[28] Xiao, R., Yu, Q., et al. (2023). Visual design of high-density polyethylene into wood plastic composite with multiple desirable features: A promising strategy for plastic waste valorization. *Journal of Building Engineering*, 63, 105445.

[29] Huang, Y., Lu, L., et al. (2022). Eco-friendly wood-plastic composites from laminate sanding dust and waste poly(propylene) food pails. *Waste Management*, 149, 96-104.

[30] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., et al. (2022). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 31, e00382.

[31] Ge, S., Ouyang, H., et al. (2023). High-performance and environmentally friendly acrylonitrile butadiene styrene/wood composite for versatile applications in furniture and construction. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 6(1), 44.

[32] Ramesh, M., Rajeshkumar, L., et al. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects, 14(3), 589.

[33] Nukala, S. G., Kong, I., et al. (2022). Preparation and Characterisation of Wood Polymer Composites Using Sustainable Raw Materials, 14(15), 3183.

[34] Brusseau, M. L. (2019). *Chapter 32 - Sustainable Development and Other Solutions to Pollution and Global Change*. Academic Press, 585-603.

[35] Finnveden, G. and Potting, J. (2014). *Life Cycle Assessment*. Academic Press, 74-77.

[36] Jacquemin, L., Pontalier, P.-Y., et al. (2012). Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1028-1041.

[37] ISO. (2006). *Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

[38] ISO. (2006). *Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

[39] Baumann, H. and Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application.* Studentlitteratur.

[40] Demirer, G. N. (2011). *Sürdürülebilir Üretim ve Tüketim Yayınları - I, Yaşam Döngüsü Analizi, Pratik Yaşam Döngüsü Analizi Klavuzu AB Sürecinde İşletmeler ve Kamu için Yaşam Döngüsü Analizi Yöntem ve Örnekleri*.

[41] Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1-21.

[42] Germirli Babuna, F., Baş, B. , Atılgan Türkmen, B. & Elginöz Kanat, N. (). . (2023). Türk Endüstrisi için Temiz Üretim ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Örnekleri . Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik, 24(2) , 55-64.

[43] Orucu, E. and Atilgan Turkmen, B. (2022). Evaluating the sustainability of car mat manufacturing. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00402.

[44] Rajendran, S. (2020). *Applications of Recycled Plastics and Life Cycle Assessment*. University of Sheffield, Sheffield.

[45] Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2(3), 273-277.

[46] Azapagic, A. (2004). *Life Cycle Thinking and Life Cycle Assessment (LCA)*. In *Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists.* John Wiley & Sons Ltd., 426-437.

[47] Lee, K.-M. and Inaba, A. (2004). *Life Cycle Assessment, Best Practices of ISO 14040 Series, Committee on Trade and Investment, Asia-Pacific Economic Cooperation, Ministry of Commerce, Industry and Energy Republic of Korea*.

[48] EU. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance.European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: First edition Luxembourg.*

[49] Baumann, H. and Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA : An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Studentlitteratur AB, Lund, Sweden, 19-69.

[50] Bruijn, H., Duin, R., et al. (2002). *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

[51] Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Springer Science & Business Media.

[52] Rebitzer, G., Ekvall, T., et al. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720.

[53] Azapagic, A. (2010). *Measuring Sustainable Development: An Overview. In Sustainable Development in Practice: Case Studies for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons Ltd., 26-55.*

[54] Operato, L., Vitiello, L., et al. (2023). Life cycle assessment of poly(lactic acid)-based green composites filled with pine needles or kenaf fibers. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135901.

[55] Haylock, R. and Rosentrater, K. A. (2018). Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Polylactic Acid Composites with Traditional and Bio-Based Fillers. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(4), 1484-1503.

[56] Feifel, S., Stübs, O., et al. (2015). Comparing wood–polymer composites with solid wood: the case of sustainability of terrace flooring. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(6), 829-836.

[57] Bolin, C. A. and Smith, S. (2011). Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 620-629.

[58] Khan, M. M. H., Deviatkin, I., et al. (2021). Environmental impacts of wooden, plastic, and wood-polymer composite pallet: a life cycle assessment approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1607-1622.

[59] Hossain, M. U. and Poon, C. S. (2018). Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 387-397.

[60] Liikanen, M., Grönman, K., et al. (2019). Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, *225*, 716-727.

[61] Xu, X., Jayaraman, K., et al. (2008). Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites. *Journal of Materials Processing Technology*, *198*(1), 168-177.

[62] Sommerhuber, P. F., Wenker, J. L., et al. (2017). Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 235-248.

[63] Väntsi, O. and Kärki, T. (2015). Environmental assessment of recycled mineral wool and polypropylene utilized in wood polymer composites. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 38-48.

[64] Qiang, T., Yu, D., et al. (2014). Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates. *Journal of Cleaner Production*, *66*, *1*39-145.

[65] Pokhrel, G., Gu, H., et al. (2021). Life Cycle Assessment (LCA) of Wood Flour and Pellets for Manufacturing Wood-Plastic Composites (WPCs). *Recent Progress in Materials*, 4(1), 1-1.

[66] Qiang, T., Chou, Y., et al. (2019). Environmental Impacts of Styrene-Butadiene-Styrene Toughened Wood Fiber/Polylactide Composites: A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment, *16*(18), 3402.

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science
11(2), 451-468, 2024
DOİ: 10.35193/bseufbd.1285705
e-ISSN: 2458-7575 (https://dergipark.org.tr/tr/pub/bseufbd)

Derleme Makalesi- Review Article

Defne Uçucu Yağının Fitokimyasal İçeriği ve Farmakolojik Etkilerinin Değerlendirilmesi

Evaluation of Phytochemical Content and Pharmacological Effects of Laurel Essential Oil

Şeyda Güneş[1], Melek Karaaslan[2*], Burçin Ergene[3]

Geliş / Received: 19/04/2023 ***Revize / Revised: 28/09/2023*** ***Kabul / Accepted: 07/11/2023***

ÖZ

Yaygın olarak defne adıyla bilinen *Laurus nobilis* L., Lauraceae familyasına ait bir tür olup, Akdeniz ikliminin karakteristik bir bitkisidir. Bitki, ülkemizde kıyı kesimlerinde yayılış göstermektedir ve yapraklarından elde edilen uçucu yağı, halk arasında gıdalarda aroma verici ve baharat olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, terpenik bileşiklerce zengin uçucu yağının, antimikrobiyal, antioksidan, insektisit, akarisidal, antikonvülsan, sitotoksik vb. birçok biyolojik aktiviteye sahip olduğu gösterilmiştir. Uçucu yağın ana bileşiminde yaklaşık 322 bileşik tespit edilmiş olup, ana bileşenlerin 1,8-sineol, α-terpinil asetat olduğu belirlenmiştir. Bu derlemede, *L. nobilis* yapraklarından elde edilen uçucu yağın geleneksel kullanımı, fitokimyasal içeriği ve biyolojik aktiviteleri vurgulanarak, uçucu yağ hakkında yapılan çalışmaların bilimsel bir sentezinin sunulması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler- Biyolojik Aktivite, Fitokimyasal Çalışma, Defne, Geleneksel Kullanım, Laurus Nobilis

ABSTRACT

Laurus nobilis L., commonly known as laurel, is a species belonging to Lauraceae family and a characteristic plant of the Mediterranean climate. The plant is distributed in the coastal areas of our country, and the essential oil obtained from its leaves is used as a flavoring agent and spice in public. The studies conducted on the essential oil, which is rich in terpenic compounds, revealed various biological activities such as antimicrobial, antioxidant, insecticide, acaricidal, anticonvulsant, and cytotoxic activity. Approximately 322 components have been determined in the content of the essential oil and the major components were identified as 1,8-cineole, α-terpinyl acetate. In this review, it is aimed to present a scientific synthesis of the studies on the essential oil by emphasizing the traditional use, phytochemical content and biological activities of the essential oil obtained from the leaves of *L. nobilis.*

Keywords- Biological Activity, Laurel, Laurus Nobilis, Phytochemical Study, Traditional Use

[1] *İletişim: seydagunes1589@hotmail.com (https://orcid.org/0000-0001-5695-0070)*
Eczacılık Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[2]* *Sorumlu yazar iletişim: mkaracaoglu@ankara.edu.tr (https://orcid.org/0000-0002-9910-2909)*
Farmakognozi Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye
[3]*İletişim: ergene@pharmacy.ankara.edu.tr (https://orcid.org/0000-0001-6927-6652)*
Farmakognozi Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye

I. GİRİŞ

Çok çeşitli özelliklere sahip olan bitkiler, insanoğlunun varoluşundan bu yana besin barınak vb. çok çeşitli ihtiyaçlarını karşılamışlardır. Zamanla insanlar bazı bitkilerin şifalı etkilerini keşfederek, bunları hastalıkların tedavisinde kullanmaya başlamışlardır. Bu geleneksel kullanım, deneme yanılma yoluyla keşfedilip geliştirilerek nesilden nesile aktarılmış ve günümüze ulaşmıştır [1]. Bitkilerle tedavi hakkındaki ilk kayıtlar M.Ö. 5000 yıllarında Mezopotamya uygarlığında görülmüş ve 250 bitkisel droğun kullanıldığı tespit edilmiştir [2].

Tıbbi ve aromatik bitkiler; sağlığın sürdürülmesi, hastalıkların iyileştirilmesi ve önlenmesi amacıyla tamamlayıcı olarak geleneksel ve modern tıpta kullanılmakta olup, içerdikleri etken bileşikler ve kullanım amaçları bakımından çeşitlilik göstermektedir [2]. Tıbbi ve aromatik bitkiler; uçucu yağ eldesinde, içerdikleri pigmentler dolayısıyla boya ve vernik yapımında, gıdalara renk ve tat vermek amacıyla baharat olarak, karakteristik kokularından dolayı kozmetik parfümeride, dahilen ve haricen kullanım ile hastalıkların tedavisinde, depolanan gıdaların böceklenmeden uzun ömürlü olmasını sağlamada, çeşitli içecek ve şerbetlerin hazırlanmasında, vücutta performans arttırma vb birçok alanda uzun yıllar kullanım alanı bulmuştur [3, 4]. Çeşitli bitki türlerinden elde edilen uçucu yağların kimyasal bileşimi ve biyolojik aktiviteleri yapılan çalışmalarla da gösterilmiştir [5].

Uçucu yağların kullanım alanları incelendiğinde; en çok antiseptik etkileri ile kullanımları öne çıksa da farklı biyolojik etkileri ile hastalıkların tedavisinde, parfüm, sabun, krem gibi kozmetik ürünlerin içeriğinde, ayrca iştah açıcı ve gıda koruyucu özellikleriyle kullanılmışlardır. Eski bir yöntem olan mumyalama tekniğinde, insanlar ölen hükümdarlarının vücutlarını koruyup, naaşın bozulmasını engellemek için uçucu yağlardan çokça faydalanmışlardır. Günümüzde yapılan bilimsel çalışmalarla, uçucu yağların antimikrobiyal, analjezik, sedatif, antienflamatuvar, spazmolitik, lokal anestezik, antibakteriyel, antifungal, antioksidan, insektisit, sitotoksik, antiviral vb. etkiler gösterdiği ispatlanmıştır [6]. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), bu tespitleri dikkate alarak geleneksel tedavide kullanılan bitkiler ve bitkisel ilaçlar hakkında çalışmalar yürütmüş; stratejiler ortaya koymuş, kılavuzlar, standartlar ve yayınlar hazırlamıştır [7].

Türkiye, üç ayrı bölgenin kesiştiği bir coğrafyada yer alması dolayısıyla, yedi farklı iklime, çok değişken nitelikte topraklara, jeomorfolojik ve topografik özelliklere sahip bir ülkedir. Bu durum, ülkemizde oldukça zengin bir bitki florasının gelişmesine olanak sağlamıştır. Türkiye'nin sahip olduğu 12 bin civarındaki bitki taksonunun yaklaşık 3800 tanesi endemiktir [8]. Ülkemizin önemli tıbbi ve aromatik bitkilerinden birisi olan defne (*Laurus nobilis* L.), dünyada diğer tıbbi ve aromatik bitkiler kadar yaygın olarak kullanılmamakla birlikte, Türkiye'de popülerliği yüksek olan bitkilerdendir [9].

Bitkiler aleminde, damarlı bitkiler sınıfında olan *L. nobilis*, bilimsel sınıflandırılmasına bakıldığında tohumlu bitkiler (Spermatophyta) şubesi, dikotiledonlar (Magnoliopsida) sınıfı, Magnoliidae alt sınıfı, kapalı tohumlular (Angiospermae) alt bölümü, Laurales takımı, defnegiller (Lauraceae) familyası ve *Laurus* cinsi içerisinde yer almaktadır [8,12].

Laurus cinsi, dünya genelinde yaklaşık olarak 45 cins ve 1000 türü barındıran Lauraceae familyasına aittir. Cinsin *Laurus canariensis* Willd. ve *Laurus nobilis* olmak üzere iki türü bulunmaktadır. *L. nobilis* türünün yaprak kenarları dalgalı olan *aurea, crispa* ve *undula* ile dar yapraklı olan *angustifolia* olmak üzere dört alt türü bulunmaktadır [10]. Akdeniz defnesi olarak bilinen bu tür, çok dallı, aromatik, geniş yapraklı, ince, yaprak dökmeyen bir ağaç veya büyük bir çalıdır. Doğal koşullarda boyu 2-20 m'ye kadar ulaşır. Kabuk pürüzsüz, ince ve soluk gri olup yoğun ince dallar piramidal şekilli bir taç şeklini oluşturur. Yapraklar alternan, kısa saplı, uzun, mızrak veya dikdörtgen-mızrak şekillerinde, akut, derimsi yapıda ve kenarları dalgalıdır. Yaprakların üst yüzeyi parlak koyu yeşil; alt yüzeyi ise tüysüz olup belirgin bir orta damara ve soluk yeşilden kahverengiye dönen bir renge sahiptir. Defne, iki evcikli bir ağaçtır. Bu türün çiçekleri, ilkbaharın başından ortasına kadar görünen salkımlar halinde, 4-5 çiçekli, kısa püsküllü parlak sarı-yeşildir. Erkek çiçekler 4–5 mm uzunluğunda 8-14 stamenli, çoğu 2 bazal bezlidir. Dişi çiçekler yaklaşık 4-5 mm uzunluğunda, 2-4 staminotludur ve nektar içerirler. Ayrıca meyveler tek tohumlu, oval 10-15 mm boyutlarında parlak siyah dut benzeri ve ince perikarpa sahip olup, kırıldığında tohum kabuğu perikarpın iç yüzeyine yapışan bir çekirdeği açığa çıkarır [11–15].

L. nobilis, mitolojide Apollon Defnesi adlı ailenin bir üyesi kabul edilmektedir. Genellikle defne, defne ağacı, gar, Grek defnesi veya tatlı defne olarak adlandırılmaktadır [16]. Defne yapraklarından uçucu yağ elde edilirken meyve ve tohumları sabit yağ taşımaktadır. Elde edilen sabit yağlar genel olarak sabun yapımında kullanılmaktadır. Akdeniz iklimine özgü maki denilen bitki örtüsünün karakteristik bir türü olan defne, Kuzey Afrika, Batı Asya ve Güney Avrupa'nın yanı sıra ülkemizde tüm kıyı kesimlerinde doğal olarak yetişmektedir [9, 17, 18]. Kışları ılık, yazları sıcak bölgelerde; nemin yeterli olduğu dere yataklarında ve balçık, kum ve kil karışımları halinde bulunan alanlarda yayılış göstermektedir. Ana kaya ise kalker ve şist olup ayrıca defne bitkisi topraktaki tuz stresine dayanıklıdır [9].

Defnegiller olarak da bilinen Lauracea familyası, ülkemizde tek cins ve tek tür ile temsil edilmektedir. Güneyde 1000-1200 m rakıma kadar ulaşabilmektedirler [9, 19]. Şekil 1'de gösterildiği gibi Hatay yöresinden başlayıp Karadeniz'in Kuzeydoğusuna kadar uzanmakla birlikte subtropik iklimin etkisine bağlı olarak iç kısımlara da yayılabilmektedir [20].

Şekil 1. Defne bitkisinin Türkiye'deki yayılış alanları [21]

Halk arasında defne bitkisi, özellikle et ve balık yemeklerinin hazırlanmasında baharat olarak kullanımı ile öne çıkmaktadır [15]. Bunun dışında, defnenin yaprakları ve meyveleri çeşitli hastalıkları tedavi etmek için oral veya topikal olarak kullanılmaktadır [15, 22]. Yaprakların, Akdeniz bölgesinde geleneksel olarak, yüksek kan şekerini dengelemek amacıyla; uçucu yağın ise, mantar ve bakteriyel kökenli enfeksiyonları engellemek, şişkinlik ve gaz gibi gastrointestinal problemleri tedavi etmek amacıyla kullanıldığı bilinmektedir [23, 24]. Birçok çalışmada; gıda koruma, romatizmal rahatsızlıklar, kanser, epilepsi, mide-bağırsak sorunları ve çeşitli bulaşıcı hastalıkların tedavisinde kullanımı belirtilmiştir [25]. İran halkının geleneksel olarak defne yapraklarını epilepsi, nevralji ve parkinsonizm gibi hastalıkların tedavisinde ve yapraktan elde edilen uçucu yağı hemoroit ve romatizmal ağrılarının giderilmesinde kullandıklarına dair eski kayıtlar mevcuttur [23, 26]. Defne uçucu yağının, haricen sedef hastalığının tedavisi için ve kepek önleyici etkisi ile saç losyonunun bileşiminde kullanıldığı bildirilmiştir [27].

A. Laurus nobilis Uçucu Yağının Fitokimyasal İçeriği

Türk farmakopesine göre defne uçucu yağı; *Laurus nobilis* (Lauraceae) yapraklarından elde edilen en az %48 oranında 1,8-sineol ve %7 α-terpinil asetat içeren berrak, sarı renkli, karakteristik aromatik, baharat kokulu ve kafurumsu tatta bir sıvı olarak tanımlanmıştır [28]. Bitkinin yapraklarından genellikle %1-3 oranında uçucu yağ elde edilmektedir. Defne yaprağının karakteristik aroması ve tadı büyük ölçüde öjenol adlı fenolik bileşikten kaynaklanmaktadır. Doğu Akdeniz Ormancılık Araştırma Müdürlüğü'nün yaptığı bir çalışmada yaprak toplama periyotlarının uçucu yağ oranına etkisi değerlendirilmiş ve en yüksek miktarda uçucu yağın %4,19 oranı ile iki yılda bir hasat edilen ağaçların yapraklarından elde edildiği tespit edilmiştir [29].

L. nobilis yapraklarından elde edilen uçucu yağ örnekleri üzerinde yürütülen çalışmalara dair veriler incelendiğinde; yaklaşık 322 tane bileşen saptanmıştır [15, 30–42]. Bu bileşiklerin bazıları; monoterpen hidrokarbonlar, oksijenli monoterpenler, seskiterpen hidrokarbonlar, oksijenli seskiterpenler ve fenilpropanoitler olarak sıralanabilir. Bileşiklerden öne çıkan bazıları Tablo 1'de listelenmiştir [43–45].

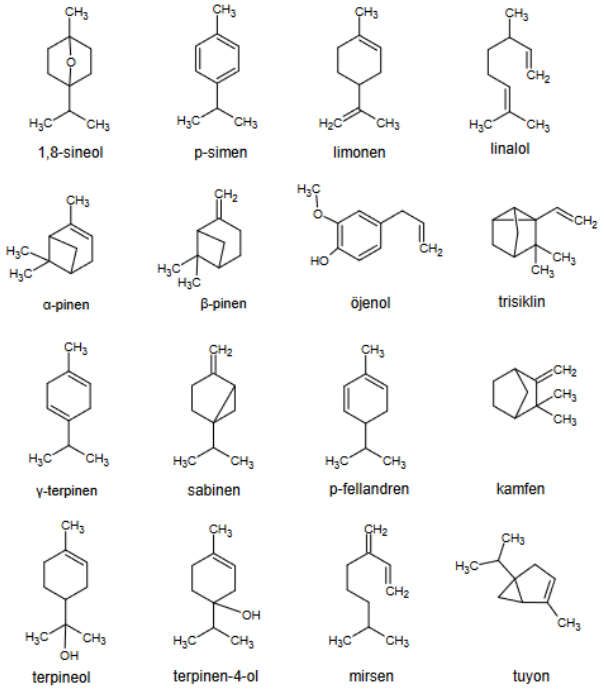
Tablo 1. Defne Uçucu Yağında Bulunan Bileşenlerin Sınıflandırılması

Monoterpen Hidrokarbonlar	Oksijenli Monoterpenler	Seskiterpen Hidrokarbonlar	Oksijenli Seskiterpenler	Asitler ve diğerleri	Fenil propanoitler
α-pinen	α-terpinol	β-elemen	β-karyofillen oksit	formik asit	öjenol
β-pinen	terpinen-4-ol	β-karyofillen	1(12), 8(15)-karyofilladien-9-ol	propiyonik asit	metil öjenol
kamfen	α-terpin	β-selinen	spatulenol	kaprik asit	asetil öjenil
β-mirsen	p-simenol	γ-kadinen	karyofillen oksit	heptanoik asit	sinnamil asetat
β-fenandren	1,8-sineol	8-sadinen	viridiflorol	kaprilik asit	3-4-dimetoksi-allilbenzen
Δ-3-karen	dehidro-1,8 sineol	alloarodendren	β-ödesmol	nonanoik asit	metil kavikol

α-tuyon	linalol	α-selinen	ledol	linalil asetat	hidrosinnamil asetat
α-fellandren	geraniol	β-ödesmol	α-ödesmol	bornilasetat	trans-sinnamil asetat
limonen	kafur	α-kopen	α-kadinol	α-terpinenil asetat	trans-metil
p-simen	linalil asetat	6,9-guadinen		geranil bütanoat	izoöjenol
α-terpinen	terpinil formiat	α-humulen		trans-sinnamil asetat	elemisin
terpinolen	terpinil asetat	allo-aromadendren		karvakrol metil eter	trans-izoöjenol
sabinen	α-terpinil asetat	germasiren D		timol	etil-trans-sinnamat
mirsen	cis-sabinen hidrat	bisiklogermasiren		izobütil izobütirat	
cis-osimen	cis-p-ment-2-en-1-ol	α-bulnesen		2-nonanon	
γ-terpinen	Δ-terpineol	Δ-kadinen		2-undekanon	
terpinolen	nerol	trans-kadina-1,4-dien			
	4-tujanil asetat				
	bornil asetat				
	Δ-terpinil asetat				
	neril asetat				
	geranil asetat				
	trans-p-ment-2-en-1-ol				

Farklı uçucu yağ numunelerinde yürütülen GC-MS analizleriyle yüzlerce farklı bileşen tespit edilmiş olsa da, genel olarak birkaç düzine terpenik bileşik defne uçucu yağının temel içeriğini oluşturmaktadır. Terpenler, esas olarak doymamış hidrokarbon yapısında olmakla birlikte steroitlerin öncü bileşikleri olup, birçok farklı biyolojik işleve sahiptir. Örneğin, hoş ve güçlü kokuları sayesinde bitki savunmasında rol alır ve tozlaşmaya yardımcı olarak görev yaparlar. *L. nobilis* türü, monoterpenler ve seskiterpenler olup bunların türevleri olan oksijenli monoterpenler ve seskiterpenler bakımından zengindir. Uçucu yağında bulunan bu bileşikler arasında; 1,8-sineol (ökaliptol), kamfen, limonen, p-simen, sabinen, terpinen-4-ol, linalol, α-pinen, α-terpinen, α-terpineol, α-tuyon sayılabilir. Ökaliptol, uçucu yağ içeriğinde en çok bulunan oksijenli monoterpendir ve birçok çalışmada, uçucu yağ içindeki oranının %25 ile %60 arasında olduğu tespit edilmiştir. Defne uçucu yağı ayrıca, öjenol (%0,1–5,1) ve metil öjenol (%0,9–21,3) içerir. Öjenol, birçok bitkinin uçucu yağında rastlanan parfüm ve tatlandırıcılarda kullanılan bir alkilbenzen; metil öjenol ise bir fenilpropanoittir ve temel işlevi bitkiye tozlayıcıları çekmektir. Ayrıca epikateşin, prosiyanidin dimer, prosiyanidin trimer, flavonol ve flavon türevleri gibi bazı fenolik bileşenlere ve β-pinen, mirsen, limonen, linalol, kavikol, metil kavikol, α-terpineol, geranil asetat gibi birçok uçucu aktif bileşene sahiptir [46]. Yüksek alkanlar sınıfına giren n-heneikosan, n-heptakosan, n-heptadekan, n-hekzakosan, n-

oktakosan, n-pentakosan, n-tetrakosan, n-trikosan bileşiklerinin miktarları uçucu yağ kütlesinin %1'ini temsil etmekte olup tespit edilebilir sınırın altındadır [15].



Şekil 2. Defne Yaprağı Uçucu Yağının İçeriğindeki Majör Bileşenlerin Molekül Yapıları

GC-MS analiz yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada, Kuzey Kıbrıs'da toplanan defne yapraklarından elde edilen uçucu yağın 81 bileşeni tanımlanmıştır. Yağın, monoterpenik hidrokarbonlar açısından çok zengin olduğu ve 1,8-sineol (%58,59), α-terpinil asetat ve terpinen-4-ol gibi monosiklik monoterpenlerin en büyük fraksiyonu oluşturduğu tespit edilmiştir [30].

Hatay'dan toplanan defne yaprakları ile yapılan bir çalışmada, uçucu yağ verimi %2,3-2,5 olarak tespit tespit edilmiş ve GC-MS analiz yöntemi kullanılarak uçucu yağın içerinde toplam 27 bileşik tanımlanmıştır. Ana bileşikler olarak tespit edilen 1,8-sineol (%51,8), α-terpinil asetat (%11,2) ve sabinen (%10,1) yanında; α-terpineol (%5,2), terpinen-4-ol (%3,1) ve öjenol (%0,4) varlığı da gösterilmiştir [22].

Tunus'ta yapılan bir çalışmada yerli olarak yetişen defne yaprakları toplanarak, uçucu yağının %92,88'ini oluşturan 31 bileşik tanımlanmıştır. Bu bileşikler arasında 1,8-sineol (%46,8) majör bileşik olarak tespit edilmiştir. Uçucu yağ içeriğindeki bileşiklerin %64,29'unu oksijenli monoterpenlerin oluşturduğu ve hidrokarbon monoterpen (%22,98) ve seskiterpen (%5,61) yapısında bileşikler içerdiği tespit edilmiştir. [37].
Türkiye'de yapılan bir çalışmada, defne yapraklarından buhar distilasyonu ile elde edilen uçucu yağda 48 bileşen tespit edilmiştir. GC-MS ile analiz edilen uçucu yağda majör bileşik olarak 1,8-sineol (%46,16), α-terpinil asetat (%10,62), α-pinen (%6,27), terpinen-4-ol (%5,07), sabinen (%4,99) ve β-pinen (%4,47); minör bileşik olarak ise 3-hekzen-1-ol (%0,03), cis-β-o-simen (%0,05) ve 2-metilprop-1-enil-siklohekza-1,3-dien (%0,07) gibi bileşikler tespit edilmiştir [36].

Güney İtalya'nın kıyılarından toplanan defne yapraklarından elde edilen uçucu yağın %91,6'sını oluşturan 55 bileşen tanımlanmıştır. Ana bileşenleri oksijenli monoterpenler (%48,6) olan 1,8-sineol (%31,9), sabinen (%12,2) ve linalol (%10,2) olarak tespit edilmiştir. Bu bileşikler yanında; α-terpinil asetat (%5,9), α-pinen (%5,8), α-terpineol (%3,3), metil öjenol (%3,3), izopulegol (%2,5), öjenol (%1,6), β-pinen (%1,4) ve γ-terpinen (%1,0) olup ayrıca hidrokarbonlardan β-funebren (%0,5), β-elemen (%0,4) ve spatulenol (%0,4) tespit edilmiştir [47].

Süperkritik sıvı ekstraksiyon (SFE) ve hidrodistilasyon (HD) yöntemleri kullanılarak elde edilen defne uçucu yağının GC-MS analiz yöntemiyle bileşenlerinin belirlendiği bir çalışmada; SFE ile %22,84; HD ile %23,51 oranında 1,8-sineol majör bileşik olarak tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra linalol SFE ile %12,46 ve HD ile %10,57; α-terpinil asetat SFE ile %11,36 ve HD ile %10,79; metilöjenol SFE ile %8,09 ve HD ile %9,42 oranları ile diğer önemli bileşenler olarak tespit edilmiştir [48].

Bulgaristan'da yapılan bir çalışmada defnenin farklı kısımlarından elde edilen uçucu yağın kimyasal içeriği incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre; defnenin meyvelerinden %0,78 verim ile elde edilen uçucu yağın ana bileşenleri 1,8-sineol (%33,3), α-terpinil asetat (%10,3), α-pinen (%11,0), β-elemen (%7,5), sabinen (%6,3), β-fellandren (%5,2), bornil asetat (%4,4) ve kamfen (%4,3) olarak tespit edilmiştir. Bitkinin dallarından elde edilen uçucu yağın içeriğinde 1,8-sineol (%48,5), α-terpinil asetat (%13,1), metil öjenol (%6,6), β-linalol

(%3,8), β-pinen (%3,4), sabinen (%3,3) ve terpinen-4-ol (%3,3); yapraklarından elde edilen uçucu yağın bileşiminde ise 1,8-sineol (%41,0), α-terpinil asetat (%14,4), α-pinen (%2,6), β-elemen (%0,78), sabinen (%8,8), β-linalol (%4,9), α-terpineol (%3,1), α-pinen (%2,6) ve terpinen-4-ol (%2,4) tespit edilmiştir [44].
Cezayir'de yetişen defne yapraklarından elde edilen uçucu yağda GC-MS analizi sonucunda 27 kimyasal bileşik tanımlanmıştır. Uçucu yağın %59'unu oksijenli monoterpenlerin oluşturduğu ve ana bileşenlerinin 1,8-sineol (%30,1), α-terpinil asetat (%21,6) ve metil öjenol (%16,9) olduğu belirlenmiştir. [45].

Başka bir çalışmada, defne yapraklarından elde edilen uçucu yağın 26 bileşeni tanımlanmıştır. Uçucu yağın içeriğinin %63,93'ünü oksijenli monoterpenlerin oluşturduğu görülmüştür. Ana bileşen olarak 1,8-sineol (%35,50) ile linalol (%14,10) bileşiklerinin yanında daha düşük oranda sabinen (%9,45) ve terpinil asetat (%9,65) varlığı tespit edilmiştir [49].

İran'da yüksek kesimlerde yetişen defne yapraklarından hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen uçucu yağın içeriğinde 39 bileşenin bulunduğu belirlenen bir çalışmada; ana bileşenler 1,8-sineol, trans-sabinen hidrat, α-terpinil asetat, metil öjenol, sabinen, öjenol ve α-pinen olarak tespit edilmiştir [50].

Hidrodistilasyon yöntemiyle elde edilen defne uçucu yağının, GC-MS ve GC-FID analizleriyle kimyasal bileşenlerinin ve kemotiplerinin tanımlandığı başka bir çalışmada; 26 bileşen tanımlanmıştır. Majör bileşik 1,8-sineol (%52,43) olup, diğer bileşenler α-terpinil asetat (%8,96), sabinen (%6,13), limonen (%5,25), α-pinen (%3,72), linalol (%3,14), terpinen-4-ol (%2,56), α-terpinen (%2,12), α-pinen (%1,98), α-terpineol (%1,56), bornil asetat (%1,89), α-fellandren (%1,28), mirsen (%1,13), kamfen (%1,05), p-simen (%0,94), α-terpinen (%0,98) ve öjenol (%0,56) olarak tespit edilmiştir [51].

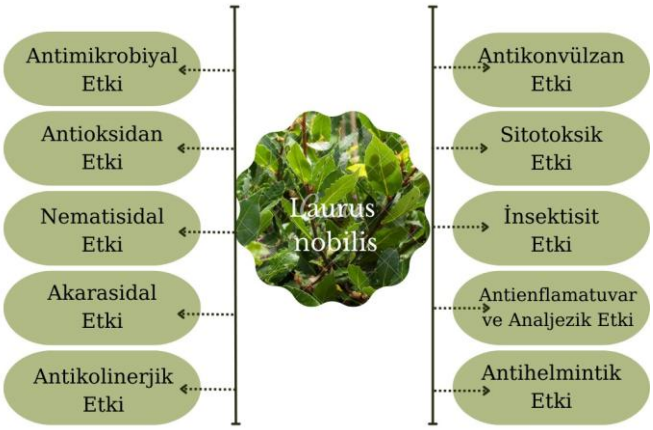
Hatay'da Antakya, Yayladağı ve Samandağı'nda yetişen defnelerin meyve ve yapraklarından elde edilen uçucu yağların kimyasal bileşenlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, farklı bölgelerden toplanan yapraklardan elde edilen üç uçucu yağın yaklaşık %50 oranında 1,8-sineol içerdiği tespit edilmiştir. Tüm örneklerde yaprakların sabinen ve α-terpinil asetat içeriği yüksek iken α-pinen, α-fellandren ve trans-β-osimen içeriğinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Samandağı'ndaki yapraklardan elde edilen uçucu yağın diğerlerine kıyasla en yüksek konsantrasyonda 1,8-sineol (%59,94) içerdiği ve meyve uçucu yağının ana bileşenin trans-β-osimen (%28,35) olduğu tespit edilmiştir. Üç yerden toplanan meyvelerden elde edilen uçucu yağlarda α-pinen, β-pinen, α-fellandren, 1,8-sineol ve trans-β-osimen ana bileşenler olarak tespit edilmiştir [52].

Mikrodalga destekli hidrodistilasyon (MAHD), omik yardımlı hidrodistilasyon (OAHD), hidroakım distilasyon (HSD) ve hidrodistilasyon (HD) gibi farklı yöntemlerle elde edilen defne uçucu yağlarındaki kimyasal bileşenlerin tespit edildiği bir çalışmada; uçucu yağın ana bileşenleri ökaliptol (%34,4–50,0), α-terpinenil asetat (%14,9–18,8), terpinen-4-ol (%4,7–6,0) ve sabinen (%4,9–5,9) olarak tespit edilmiştir. HD ve MAHD yöntemlerinin diğerlerine kıyasla daha yüksek oranlarda ökaliptol içeren uçucu yağ elde edilmesini sağladığı belirlenmiştir [53].

Hidrodistilasyon (HD) ve buhar distilasyonu (SD) yöntemleri kullanılarak defne yapraklarından elde edilen uçucu yağların GC-MS ve GC-FID analizleriyle kimyasal bileşenlerinin karşılaştırıldığı bir başka çalışmada; SD ile 73 bileşen, HD tekniği ile 54 bileşen tanımlanmıştır. Ortak bileşenlerin sayısı 49 olmakla birlikte iki uçucu yağda da en fazla bulunan grupların monoterpenler (SD ile %30,18; HD ile %26,52) ve oksijenli monoterpenler (SD ile %48,92; HD ile %57,78) olduğu, bunların yanı sıra seskiterpenler, oksijenli seskiterpenler, diterpenoidler, fenilpropen türevleri, alkoller, karboniller ve esterler gibi grupların da tespit edildiği belirtilmiştir. Ana bileşen ökaliptol (SD ile %26,99, HD ile %37,29) olup α-terpinil asetat (SD ile %17,46, HD ile %15,33), sabinen (SD ile %13,72; HD ile %10,41) ve α-pinen (SD ile %10,92; HD ile %8,92) gibi bileşiklerin varlığına da rastlanılmıştır [54].

B. Laurus nobilis L. Türünün Biyolojik Aktivitesi

Literatür verilerinin taranması sonucunda, *Laurus nobilis* türünün sergilediği tespit edilen biyolojik etkiler Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. *L. nobilis* Türüne Ait Biyolojik Aktivitelerin Sınıflandırılması

1) *Antimikrobiyal Etki: L. nobilis* meyvelerinden elde edilen uçucu yağın SARS-CoV ve HSV-1 replikasyonuna karşı inhibe edici etkisinin değerlendirildiği bir *in vitro* çalışmada; virüse bağlı gelişen sitopatik etki görsel olarak puanlanmıştır. Defne uçucu yağının SARS-CoV'a karşı IC_{50} (enzim aktivitesini %50 inhibe eden konsantrasyon) değeri 120 µg/mL ve seçicilik indeksi (SI); TC_{50} (hücrelerin %50'sine toksik etki gösteren konsantrasyon) /IC_{50} 4,2 olarak hesaplanmış ve uçucu yağın bu virüse karşı aktivitesinin yüksek olduğu; HSV-1'e karşı IC_{50} değeri 60 µg/mL ve seçicilik indeksi 8,3 ile aktivitesinin oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Yapılan başka bir çalışmada izoborneolün, viral adsorpsiyonu etkilemeden HSV-1 replikasyonunu tamamen inhibe ettiği tespit edilmiştir. *L. nobilis* meyvelerinden elde edilen yağdaki bu monoterpenin miktarı düşük oranda bulunması dolayısıyla, düşük etkinin sebebinin içerisinde az miktarda izoborneol bulunmasından kaynaklandığı düşünülmüştür [27].

L. nobilis yaprağı ile hazırlanan etanollü ekstrelerin antiviral potansiyelleri, doğal olarak BQCV (siyah kraliçe hücre virüsü) ile enfekte olmuş toplayıcı bal arıları üzerinde test edilmiştir. En düşük konsantrasyonda (1 mg/mL) toplam viral yükleri; 5mg/mL ve daha yüksek konsantrasyonlarda ise virüs replikasyonunu azalttığı tespit edilmiştir [55].

Defne uçucu yağının, insanlarda bulunan patojenik bakteriler üzerindeki antibakteriyel aktivitesinin değerlendirildiği bir çalışmada; disk difüzyon yöntemi ile toplam dokuz bakteri suşuna karşı inhibisyon zon çapları tespit edilmiştir. Gram (+) olan *S. aureus* (29mm), *Staphylococcus epidermidis* (26mm) ve *Streptococcus faecalis* (18mm); gram (-) olan *Pseudomonas aeroginosa* (24mm), *Shigella flexneri* (27mm), *Klebsiella pneuomoniae* (21mm), *Salmonella typhi* (18mm), *Serratia marcescens* (26mm) ve *E. coli* (28mm) suşlarının tümüne karşı, tetrasiklinden (8mg/mL) çok daha yüksek bir antibakteriyel aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir [56].
Cezayir'de yapılan bir araştırmada, defne uçucu yağının farklı konsantrasyonlarda hazırlanan dilüsyonlarının yirmi bakteri suşuna karşı antibakteriyel aktivitesinin kıyaslandığı bir çalışmada; uçucu yağ *Pseudomonas aeruginosa* hariç test edilen tüm bakteri suşlarında etkili bulunmuştur. En duyarlı bakteri suşu *Enterobacter* sp. için inhibisyon zon çapları, saf uçucu yağda 22,4 mm ve 1/8 dilüsyonda 16,8 mm olup; en dirençli suşun *P. aeruginosa* olduğu tespit edilmiştir [57].

Defne uçucu yağının 20 bakteri (M01-M20) suşuna karşı antibakteriyel etkisinin *in vitro* olarak değerlendirildiği başka bir çalışmada, disk difüzyon testi kullanılarak en düşük MİK (minimum inhibitör konsantrasyonu) değeri 25 µL/mL konsantrasyonda *Escherichia coli* M18, *Bacillus subtilis* M07, M10 ve *B. circulans* M01, M08 suşlarına karşı ve en yüksek MİK değeri 125 µL/mL konsantrasyonda *E. coli* M19 ve *B. subtilis* M02, M05 suşlarına karşı tespit edilmiştir. Çalışılan numunenin, *B. subtilis* M02, M06 (3 mm) suşlarına karşı düşük antibakteriyel aktivite sergilerken; *E. coli* M18, M20 (8mm) suşlarına karşı yüksek aktivite gösterdiği belirtilmiştir. Bu antimikrobiyal aktivitenin 1,8-sineoldan kaynaklanmış olabileceği bildirilmiştir [58].

Sırbistan'da yapılan bir çalışmada, hidrodistilasyonla elde edilen defne uçucu yağı ve süperkritik sıvı ekstraksiyon yöntemiyle elde edilen ekstrelerin; köpeklerden, sığırlardan, insanlardan ve hayvansal kökenli yiyeceklerden izole edilen *Staphylococcus* suşlarına karşı benzer yüksek antibakteriyel etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir [59].

Avustralya'da yapılan bir çalışmada, *L. nobilis* uçucu yağının antibakteriyel aktivitesinin agar disk difüzyon test yöntemi kullanılarak *Staphylococcus aureus* (MİK=0,35 mg/mL), *Staphylococcus intermedius* (0,56 mg/mL) ve *K. pneumoniae* (MİK=0,70mg/mL) karşı etkinliği gösterilmiştir. *S. aureus* 13 mm zon çapı ile en hassas suş olup; *S. intermedius* 10 mm zon çapı ile orta derecede ve *K. pneumoniae* suşunda ise 7 mm zon çapı ile minimal bir aktivite gözlendiği bildirilmiştir [51].

Ayrı ayrı iki farklı güç (249W ve 622W) seviyesinde mikrodalga destekli çözücüsüz ekstraksiyon (SFME) ve hidrodistilasyon (HD) yöntemleri kullanılarak elde edilen üç farklı defne uçucu yağının antimikrobiyal aktiviteleri karşılaştırılmıştır. Numunelerin *Listeria monocytogenes* hariç, *S. aureus, E. coli* ve *Salmonella typhimurium* bakterilerine karşı güçlü bir antimikrobiyal aktivite sergilediği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, düşük güç seviyesinde SFME ile elde edilen uçucu yağın, *S. aureus* üzerindeki antibakteriyel etkisinin HD ve yüksek güç seviyesinde SMFE ile elde edilen uçucu yağa göre daha zayıf olduğu bildirilmiştir [60].

Türkiye'de yapılan bir çalışmaya göre, *L. nobilis* yaprak uçucu yağının MİK değerleri, *E. coli* için 125µg/mL, *S. enteritidis* için 250 µg/mL ve *L. monocytogene* için 500µg/mL olarak bulunmuştur. Bununla birlikte eritromisin ve sefoksitin antibiyotiklerine kıyasla çok daha yüksek inhibisyon zon çaplarına sahip olduğu tespit edilmiştir. *C. albicans* maya suşu için MİK değeri 250 µg/mL olup, 26mm zon çapı ile flukanozole (10,7mm) kıyasla etkisinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Her testteki inhibisyon çaplarının, MİK değerleri ile anlamlı bir korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir [22].

L. nobilis yaprak uçucu yağının *Salmonella sp. Escherichia coli* ve *Lactobacillus* türlerine karşı antibakteriyel aktivitesinin değerlendiği bir çalışmada, MİK değerleri ve inhibisyon zon çapları sırasıyla 2,5 mg/mL ile 23 mm ve 10 mg/mL ile 19,3 mm ve 20 mg/mL ile 15mm olarak tespit edilmiştir. *Salmonella spp.* en hassas suş olarak bulunurken, diğer bakterilerin yüksek direnç gösterdiklerini tespit edilmiştir [61].
Mısır'da yürütülen bir çalışmaya göre, defne yaprak uçucu yağının, 14 mikroorganizmaya karşı antimikrobiyal aktivitesi, disk difüzyon ve tüp dilüsyon yöntemleriyle *in vitro* olarak değerlendirilmiştir. *Bacillus cereus, S.*

aureus ve *B. subtilis*'in uçucu yağa karşı en duyarlı mikroorganizmaların gram (+) bakteriler olduğu, ancak gram (-) bir bakteri olan *E. coli*'nin uçucu yağa karşı dirençli olduğu bildirilmiştir [31].

L. nobilis yaprak uçucu yağı, antimikrobiyal aktivitesinin belirlenmesi için etanol ve hekzan ile 10 mg/mL ve 20 mg/mL konsantrasyonlarında seyreltilip, disk difüzyon ve agar dilüsyon yöntemiyle 12 bakteri ve 2 fungus üzerinde denenmiştir. Yağın, tüm bakterilerin büyümesinin engellediği bildirilmekle beraber özellikle *L. monocytoge, C. perfiringes ve S. enteritidis* bakterilerine karşı yüksek antibakteriyal etki; *C. albicans ve A. niger*'e karşı da güçlü bir antifungal etki gösterdiği tespit edilmiştir. En düşük etki *K. pneumoniae*'da (MİK=20 mg/mL inhibisyon zon çapı 6,3 mm) alkol seyreltiği ile en yüksek etki *L. monocytoge* (MİK=30 mg/mL inhibisyon zon çapı 16,9 mm) hekzan seyreltiği ile olduğu tespit edilmiştir [62].

Defne yaprağı uçucu yağının, depolanmış pirincin baskın mikrobiyotasını oluşturan gıda kaynaklı mantarlardan olan *Fusarium culmorum* ve *F. verticillioides*'e karşı antifungal etkisinin *in vitro* olarak test edildiği bir çalışmada; uçucu yağın her iki mantarın da üremesini kontrol etme konusunda anlamlı bir inhibisyon gözlemlenmemiştir [63].

Unlu mamullerin bozulmasına neden olan *Eurotium* spp., *Aspergillus* spp. ve *Penicillium* spp. mikroorganizmaları üzerine antifungal aktivitesinin *in vitro* olarak araştırıldığı bir çalışmada; defne uçucu yağı farklı konsantrasyonlarda hazırlanarak %2'lik buğday unu içeren agar kültür ortamına eklenmiştir. Antifungal aktivitenin gıda içerisinde bulunan serbest su miktarına (0,80-0,90) ve ortamın farklı pH koşullarına (5-7,5) bağlı olduğu belirlenmiştir. Ortam koşulu pH 5'te daha etkili olduğu bulunurken; artan pH değerlerinde aktivitenin düştüğü, gıdada su mevcudiyeti arttıkça da aktivitenin arttığı tespit edilmiştir. Defne uçucu yağının potansiyel bir antifungal ajan olduğu belirtilmiştir [64]. Bu ve buna benzer başka çalışma ile; defne yaprağı uçucu yağının *Eurotium, Aspergillus* ve *Penicillium* cinslerine karşı antimikrobiyal etki potansiyelinin olduğundan bahsedilmiştir [65].

Defne uçucu yağının, *Aspergillus flavus*'a karşı MİK ve minimum fungusidal konsantrasyon (MFC) değerleri sırasıyla 1,75 mg/mL ve 2 mg/mL olarak bulunmuştur. Uçucu yağ, 0,25 mg/mL ve 1,50 mg/mL konsantrasyonlarında aflatoksin B1 üretimini sırasıyla %15 ve %86 oranında inhibe etmiştir. Doza bağımlı bir şekilde *Aspergillus carbonarius, A. fumigatus, A. niger, A. ochraceus, A. tamarii, A. terreus, Fusarium sp., Penicillium sp.*, ve *Rhizopus sp.* mantarlarına karşı güçlü bir antifungal etki gözlenmiştir. Gıda modeli çalışması yapıldığında, 6 aylık depolama sırasında fumigasyon işlemi uygulanmış buğday tanelerinde *A. flavus*'a karşı %51,5 ile %76,7 koruma sağlayan dikkate değer bir etkinlik gösterdiği kaydedilmiştir [66].

Farklı zamanlarda toplanan defne yaprak uçucu yağlarının bileşimlerindeki değişikliklerin belirlenmesi, ana bileşenlerin aktivitesinin araştırılması ve antifungal ajanlar olarak kullanımları için en iyi toplanma zamanının belirlenmesinin amaçlandığı bir çalışmada; uçucu yağın, *Fusarium moniliforme, Rhizoctonia solani* ve *Phytophthora capsici* türlerine karşı fungitoksisitesinin uçucu yağdaki ana bileşen olan 1,8-sineolden kaynaklandığı ortaya koyulmuştur [67].

Defne uçucu yağının kitosan nanoemülsiyon kapsülasyonu (CS-Ne-LNEO) halinde hazırlanmış formunun, depolanmış gıdalarda mantar istilasını ve aflatoksin B1 (AFB1) kontaminasyonunu önlemesi bakımından etkinliğinin değerlendirildiği bir çalışmada; 0,4 konsantrasyondan itibaren CS-Ne-LNEO, kapsüllenmemiş uçucu yağa kıyasla düşük konsantrasyonlarda gıdayı kirleten mantarlardan olan *Aspergillus flavus* ve AFB1 üretimine karşı %100 olacak şekilde geniş bir antifungal aktivite yelpazesi sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, CS-Ne-LNEO örneğinin, depolanmış *Phyllanthus emblica* meyve örneklerinde %86,32 ve %81,55 oranında fungal çoğalmayı engellediği görülmüştür. Örneğin, memelilerde yüksek LD50 değeri (13,504 µL/kg vücut ağırlığı) sergilediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, CS-Ne-LNEO örneğinin mantar yerleşimine karşı; kapsüle edilmiş ve edilmemiş uçucu yağ örneklerinin her ikisinin de aşılanmış ve aşılanmamış *P. emblica* meyvelerinde AFB1 oluşumuna karşı %100 inhibisyon sağladığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların; CS-Ne-LNEO'nun daha iyi etkinlik gösterdiğini ve defne uçucu yağı yüklü kitosan nanoemülsiyon formunun depolanmış gıdalarda mantar ve AFB1 kontaminasyonuna karşı tam olarak korunma sağlanması için çevre dostu bir koruyucu olarak önemli bir potansiyel taşıdığını gösterdiği bildirilmiştir [68].

Yapılan bir çalışmada; mısır nişastası ile hazırlanan yenilebilir filmleri güçlendirmek için pirinç proteini (RP: %10-20 a/a) kullanılmış olup, film bileşimine defne yaprak uçucu yağı eklenmiştir. Uçucu yağ içeren yenilebilir filmlerin *B. cereus*'a karşı antimikrobiyal etkisi gözlemlenmiş, ayrıca bu filmler çilek üzerinde de test edilmiş ve ortam koşullarında 5 günlük depolama süresince meyvenin görsel kalitesinin ve raf ömrünün olumlu yönde etkilendiği tespit edilmiştir. %1 (h/h) defne yaprağı uçucu yağı ve %10 RP ve %20 RP içeren film örneklerinin *S. typhi* ve *B. cereus* bakterilerine karşı inhibisyonu gözlenmemiştir. Ayrıca, gıda koruma etkinliğini değerlendirmek için çilek örnekleri; kontrol, %10 RP, uçucu yağ içeren %10RP, %20 RP ve uçucu yağ içeren %20 RP şeklinde hazırlanan filmler üzerine yerleştirilmiş ve 5 gün boyunca ortam koşullarında saklanmıştır. Yenilebilir filmler üzerine yerleştirilen çileklerde 3. güne kadar gözle görülür bir küf oluşumu gözlenmemiş, 4. günde kontrol filmi üzerine yerleştirilen çileklerde küf gelişimi gözlenmiştir. Sonuç olarak; defne yaprağı uçucu yağı ve RP içeren filmlerin aktif ambalaj uygulamaları için uygun olduğu kanıtlanmıştır [69].

Yapılan bir çalışmada, adaçayı (*Salvia officinalis* L.), kekik (*Thymus vulgaris* L.) ve defneden (*Laurus nobilis* L.) elde edilen üç uçucu yağ, *Frankliniella occidentalis* ergin zararlısına karşı ayrı ayrı kullanılmıştır. Daha

sonra da, ikili (1:1) ve üçlü (1:1:1) karışımların fumigant toksisitesi laboratuvar koşullarında araştırılmıştır. *F. occidentalis*'in 3-5 günlük yetişkinlerinin ölüm oranlarının, 2-10 µL/L arasında artan dozda uygulanan uçucu yağ gruplarında 24 saatten 96 saate kadar arttığı belirlenmiştir. Test edilen uçucu yağlar arasında defne uçucu yağının 24. ve 48. saat sayımlarında en yüksek dozda (10 µL/L hava) %100 ölüm oranı sağlandığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda; uçucu yağların ikili ve üçlü karışımları tekli uygulamadan daha etkili olduğu ve en yüksek sinerjik etkinin, 48 saat sonraki tüm uygulama dozlarında (LC_{50}= 10,0 µL/L hava) üçlü uçucu yağ karışımlarında (adaçayı + defne + kekik) görüldüğü bildirilmiştir. Kekik + defne yağı karışımının 24. ve 48. saat sayımlarında, en yüksek dozda %100 ölüm gözlenirken, defne + adaçayı karışımında en yüksek dozda %72,8 ölüm oranı tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu yağların üçlü karışımı ile, tüm ikili karışımlara göre daha başarılı sonuç elde edildiği bildirilmiştir. Çalışmada tespit edilen LC_{90} değerleri, LC_{50} değerleri ile benzerlik gösterip, genel olarak tüm yağlarda ve yağ karışımlarında artan sayım saatlerinde LC değerlerinde düşüş tespit edilmiştir [70].

Syzygium aromaticum, *Artemisia herba-alba* ve *Laurus nobilis* uçucu yağlarını ve bunların karışımlarının, oda sıcaklığında saklanabilen patates çeşidi Ranger Russet için filiz bastırıcı olarak değerlendirildiği bir çalışmada; *A. herba-alba* ve *L. nobilis* uçucu yağlarının birlikte uygulanmasının filiz sayısını değiştirdiği ve farklı oranlarda karışım olarak çalışılan bu üç uçucu yağın, karışım halinde yumru filiz uzunluğunu ve sayısını tek başına kullanılan üç uçucu yağın herhangi birinden daha etkili bir şekilde azaltabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada, diğer sebze ve meyveler de dahil olmak üzere çileklerde antraknoz hastalığının etken organizması olan *Colletotrichum fragariae*'ye karşı antifungal aktiviteleri değerlendirilmiş, ancak defne uçucu yağının *C. frangariae*'ye karşı herhangi bir antifungal etki göstermediği tespit edilmiştir [71].

Cuminum cyminum, *Artemisia sieberi*, *Laurus nobilis*, *Ferula gummosa*, *Lippia citriodora* ve *Cymbopogon citratus* uçucu yağlarının aktif bileşenlerinin ve antibakteriyel etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada; *Staphylococcus aureus* ve *Pseudomonas aeruginosa*'ya karşı IC_{50} değerleri ölçülmüştür. Defne uçucu yağının, *S. aureus* üremesi üzerinde herhangi bir etkisi gözlenmezken; *P. aeruginosa*'ya karşı, çalışılan yağlar arasında en yüksek etkinliği (MİK=0,25 mg/mL) gösterdiği tespit edilmiştir [72].

2) *Antioksidan Etki:* DPPH (1,1-difenil-2-pikrilhidrazil) serbest radikal süpürücü etki ve β-karoten/linoleik asit test sistemleri kullanılarak *L. nobilis* uçucu yağının antioksidan kapasitesinin değerlendirildiği bir çalışmada; uçucu yağın serbest radikal DPPH'e karşı IC_{50} değerinin 94,65 mg/mL olduğu belirlenmiştir. Linoleik asit sisteminde; linoleik asidin oksidasyonunun, uçucu yağ tarafından %64,28 oranında inhibe edildiği gözlenmiştir [73].

Başka bir çalışmada; *L. nobilis*'in yaprak uçucu yağı, iki tamamlayıcı test sistemi olan DPPH serbest radikal süpürücü etki ve β-karoten/linoleik asit testleri kullanılarak antioksidan kapasite açısından taranmıştır. Bu *in vitro* yöntemlerin her ikisinde de uçucu yağ, iyi bilinen sentetik antioksidanlar olan, bütilhidroksitoluen ve askorbik asitten daha düşük aktivite göstermiş olsa da, indirgeyici bir ajan olduğu bildirilmiştir [22].

Defne yapraklarından elde edilen uçucu yağın DPPH, hidroksil ve süperoksit radikallerinin yanı sıra hidrojen peroksit radikal süpürücü aktiviteleri bakımından değerlendirildiği bir çalışmada; uçucu yağın bağımsız olarak kullanıldığı testlerde içeriğindeki üç ana bileşen olan 1,8-sineol, 1-(S)-α-pinen ve R-(+)-limonenden daha yüksek aktivite gösterdiği tespit edilmiştir [74].

Defne uçucu yağının kitosan nanoemülsiyon kapsülasyonunun(CS-Ne-LNEO) yapıldığı bir çalışmada DPPH radikal süpürücü aktivitesi değerlendirilmiş ve IC_{50} değeri 0,004 µL/mL olarak tespit edilmiş olup bu değerin kapsülasyonun yapılmamış halinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta kapsüllenmiş defne uçucu yağının antioksidan kapasitesinin azaldığı tespit edilmiştir [68].

Yapılan bir çalışmada, *L. nobilis* uçucu yağının antioksidan aktivitesi değerlendirilmiş ve yağın DPPH serbest radikaller süpürücü kapasitesinin yüksek olduğu (%76,84) olduğunu tespit edilmiştir [70].

3) *Nematisidal Etki:* Hindistan'da yapılan bir çalışmada, defne yaprağı uçucu yağının *Meloidogyne incognita*'ya karşı nematisidal aktivitesinin, çalışılan tüm konsantrasyon ve sürelerde, yumurtadan çıkmada inhibisyona ve artan yavru ölümüne sebep olduğu *in vitro* olarak gözlenmiştir. *M. incognita* yavrularına karşı en yüksek aktivitenin gözlendiği konsantrasyonlar olan 1,00 mg/mL konsantrasyonda 72. saatte yumurtadan çıkma üzerinde maksimum inhibisyon ve 0,80 mg/mL konsantrasyonda 96. saatte en yüksek ölüm oranının olduğu tespit edilmiştir [75].

Hindistan'da yapılan başka bir çalışmada ise, defne uçucu yağının *Meloidogyne javanica* üzerindeki nematisidal etkileri değerlendirilmiştir. 1000 µL/L konsantrasyonda, 2 günlük inkübasyonun sonunda, %80'in üzerinde aktivite gözlenmiştir [16].

Defne uçucu yağının, domates ve biberde *Meloidogyne incognita*'ya karşı nematisidal aktivitesinin araştırıldığı bir çalışmada; nematot aşılama düzeyi ile kullanılan uçucu yağ konsantrasyonu arasında anlamlı fark bulunmamıştır. Ancak uçucu yağ uygulamasının hem domates hem de biberde nematot popülasyonlarını kısıtladığı gözlenmiştir [16].

4) *Akarisidal Etki: L. nobilis* yaprak uçucu yağının, *Psoroptes cuniculi*'ye karşı akarisidal aktivitesi %10'luk konsantrasyonda %73 ölüm oranı ile etkinlik gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmaya göre %5'lik konsantrasyonda ortalama aktivite önemli ölçüde (%51) düşerken, %2,5; %1,25 ve %0,625'lik konsantrasyonların etkisiz olduğu görülmüştür [76].

Tunus'ta yapılan bir çalışmada, defne uçucu yağı, defne yapraklarından hazırlanan siklohekzan, aseton ve etanollü ekstrelerinin *Hyalomma spupense* ve *Dermanyssus gallinae* üzerindeki toksisitesi değerlendirilmiştir. Uçucu yağ ve ekstrelerin *H. spupense*'e karşı akarasidal etkilerinin tespiti için yetişkin daldırma testi ve larva paket testi yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, uçucu yağın, ekstrelerden daha yüksek akarisidal etki gösterdiği tespit edilmiştir. 100 mg/mL konsantrasyondaki uçucu yağa 24 saat maruz bırakılan *H. spupense* larvalarında ölüm oranı %90,67 (LC_{50}=10,69 mg/mL) olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde, *D. gallinae*'ye karşı da uçucu yağın tüm ekstrelerden daha etkili olduğu gözlenmiştir. Defne ekstreleri arasında en fazla etki gösteren ise %81,27 ölüm oranı ile etanollü ekstre olmuştur. Defne uçucu yağı 320 mg/mL konsantrasyonunda 12 saat maruziyetten sonra %100 ölüm oranına ulaşırken; etanollü ekstrenin, aynı konsantrasyonda 24 saat maruziyetten sonra %100'e ulaştığı bildirilmiştir. En düşük akarisidal aktivite gösteren ekstrenin ise, siklohekzan ekstresi olduğu tespit edilmiştir [77].

5) *Antikolvülzan Etkisi: L. nobilis* yaprak uçucu yağının, deneysel nöbetlere karşı antikonvülsan aktivite açısından değerlendirildiği bir çalışmada; uçucu yağın pentilen tetrazolün neden olduğu tonik konvülsiyonlara karşı koruduğu tespit edilmiştir. Sorumlu bileşenlerin, uçucu yağda bulunan metil öjenol, öjenol ve pinen olduğu bildirilmiştir. Ancak etkin dozlarda, uçucu yağın yan etki göstererek sedasyon ve motor bozukluklara neden olduğu tespit edilmiştir. Bu etkinin ise sineol, öjenol ve metil öjenolden kaynaklanabileceği bildirilmiştir [12].

L. nobilis yaprak uçucu yağının deneysel nöbetlere karşı antikonvülzan aktivitesinin değerlendirildiği bir çalışmada; uçucu yağın tonik nöbetleri engellediği görülmüş ancak yağın etkili olduğu dozda sedasyon ve motor bozukluklarına neden olduğu gözlenmiştir. Bu etki, defne uçucu yağında bulunan metil öjenol, öjenol ve pinen gibi bileşenlerine bağlanmıştır [78].

6) *İnsektisit ve Repellent Etki:* Yapılan bir çalışmada defne yapraklarından elde edilen uçucu yağın tek başına ve kitosan ile birlikte uygulandığında, bir peynir böceği olarak bilinen *Piophila casei*'nin zaman içerisinde yumurtlaması üzerine gösterdiği etki karşılaştırılmıştır. Kurutulmuş et ve peynir kullanılarak gıda örnekleri kontrol, uçucu yağ, kitosan ve kitosan+uçucu yağ içerecek şekilde dört gruba ayrılmıştır. Bu koşullar altında, *P. casei* yumurtlamasını kontrol etmek için kullanılacak en iyi uçucu yağ konsantrasyonu değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, kitozan ile birlikte yapılan uygulamanın, *P. casei*'nin yumurtlama davranışını kontrol etmede en yüksek etkinliği gösterdiği tespit edilmiştir. Bu örneklerde, yumurtlama yüzdesini %40-80'den (kontrol) %5-10'a düştüğü gözlenmiştir. Defne yaprağı uçucu yağının (%1) yumurtlamanın kontrol edilmesinde oldukça iyi bir seçenek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmaya katılan panelistler duyusal profil, genel hoşluk ve hedonik indeksi en yüksek puanlarla kabul etmişlerdir. Bu nedenle, defne uçucu yağ ile karıştırılmış kitosan kullanımının, işlenmiş gıdaların organoleptik nitelikleri olumsuz etkilenmeden *P. casei*'yi uzaklaştırmak için en etkili çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır [79].

Yapılan bir çalışmada; defne yaprak uçucu yağının stabilitesini, çözünürlüğünü, kalıcılık süresini, aktif bileşenlerin taşınmasını ve salınımını artırmak amacıyla uçucu yağların nanoemülsiyonu hazırlanarak istilacı *Xylosandrus compactus* böceği tarafından seçim davranışı, konak kolonizasyonu ve döl üretimi üzerindeki etkileri laboratuvar ve yarı tarla koşullarında değerlendirilmiştir. Hazırlanan nanoemülsiyon, dinamik ışık saçılımı kullanılarak karakterize edilmiştir. Sonuçta defne uçucu yağının nanoemülsiyonunun *X. compactus* seçim davranışı üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı tespit edilmiştir [80].

Halk sağlığı için büyük bir tehdit oluşturan *Chrysomya megacephala* böceğine karşı doğal bir insektisit olarak defne uçucu yağının kullanımının araştırıldığı bir çalışmada; defne uçucu yağı ve bileşikleri, dimetil sülfoksit içinde seyreltilerek uygulanmış ve %63,7 oranında ölüme neden olduğu tespit edilmiştir. Defne uçucu yağının ana bileşenleri olan 1,8-sineol ve linalol ayrı ayrı saf olacak şekilde sırasıyla125 µg/µL ve 30 µg/µL konsantrasyonda uygulanarak sırasıyla %67,6 ve %100 oranında ölüme neden olduğu tespit edilmiştir [81].

Yapılan bir çalışmada, narenciye bahçelerinde gözlenen ve zararlı bir hurma güvesi olan *Ectomyelois ceratoniae*'nin defne yaprak uçucu yağına karşı repellent etkisi araştırılmıştır. Defne yaprak uçucu yağının altı farklı dozu kullanılarak *E. ceratoniae* gelişim evresi takip edilmiştir. Son larva döneminde 24 saat maruziyetten sonra 0,24 µL/cm^2 konsantrasyonda defne uçucu yağının %80 oranında yüksek bir iticilik gösterdiği tespit edilmiştir [82].

Yapılan bir çalışmada, defne uçucu yağının sivrisinek larvası *Culex pipiens*'e karşı insektisit etkisi değerlendirilmiştir. Uçucu yağ, *C. pipiens* larvalarının üçüncü ve dördüncü larva evrelerinde 5-35 µL/L arasında değişen farklı konsantrasyonlarda verildiğinde; her iki aşamada da ölüm gözlenmiş olup, öldürücü konsantrasyonların (LC_{50} ve LC_{90}) üçüncü larva dönemi için sırasıyla 3,74 µL/L ve 14,47 µL/L ve dördüncü larva dönemi için 18 µL/L ve 39,08 µL/L olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, dördüncü larva döneminde LC_{50} ve LC_{90} değerlerinde gelişme süresinde uzama ve üremede bir rahatsızlık olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan en düşük konsantrasyon olan 5 µL/L; 24 saatlik maruziyet süresinin ardından üçüncü aşama larvaları için %32 ve dördüncü aşama larvaları için %25 oranında ölüme neden olmuş, gözlenen bu ölüm oranın (%) zaman ve dozun fonksiyonu olarak arttığı tespit edilmiştir. 72 saat sonra ise, en yüksek konsantrasyon olan 35 µL/L uçucu yağ ile muamele edilen üçüncü aşamadaki tüm larvaların öldüğü (%100), dördüncü aşamadaki larvalarda ise aynı doz için ölüm oranının %85 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak; uçucu yağın larvisidal etkisinin konsantrasyon bağımlı olduğu tespit edilmiştir [83].

Defne yapraklarından elde edilen uçucu yağ, 4-12 mg/g arasında değişen beş farklı konsantrasyonda *Tribolium castaneum*'a karşı böcek öldürücü aktivitesi açısından test edilmiş ve yağın polar fraksiyonunun; nonpolar fraksiyonu ve uçucu yağa kıyasla daha yüksek insektisidal aktivite gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmada, uçucu yağın insektisidal etkisinin doz ve zaman ile ilişkisi anlamlı bulunmuştur [16].

Jeama ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, *L. nobilis* uçucu yağının 7-10 günlük yetişkin *Lasioderma serricorne* popülasyonuna karşı uzaklaştırıcı etkisi değerlendirmiş ve en yüksek etki, yüksek doz-kısa maruz kalma süresinde gözlenmiştir. Bu nedenle, *L. nobilis* uçucu yağının tütün böceğine karşı insektisit etkisinin, tüm konsantrasyonlarda kısa süreli maruziyette etkili olduğu sonucuna varılmıştır. En düşük konsantrasyonda (0,04 $\mu L/cm^2$) 1 saat süreyle maruziyet sonrası insektisit etki %52,5 iken en yüksek konsantrasyonda (12 $\mu L/cm^2$), 1 saatlik maruziyetten sonra kovucu etkinin %92,5'e ulaştığı gözlenmiştir. Ortalama öldürücü doz değeri (RD_{50}) ise 37,84 $\mu L/cm^2$ olarak tespit edilmiştir [84].

Tunus, Cezayir ve Fas'tan toplanan defne yapraklarından elde edilen uçucu yağların kovucu etkisinin araştırıldığı bir çalışmada; depolanmış ürün zararlısı olan *Rhyzopertha dominika* ve *Tribolium castaneum* karşı kovucu ve toksik etkinin büyük ölçüde zararlının türüne ve uçucu yağın kökenine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Filtre kâğıdı testlerinde; Fas'tan toplanan yapraklardan elde edilen *L. nobilis* uçucu yağı, Tunus ve Cezayir'den toplanan yaprakların uçucu yağlarına kıyasla daha etkili bulunmuştur. *R. dominika* için RD_{50} değerleri sırasıyla 0,013; 0,036 ve 0,033 mL/cm^2; *T. castaneum* için ise 0,045; 0,139 ve 0,096 mL/cm^2 olarak tespit edilmiştir. Fumigant aktivite testlerinde, hem *R. dominika* hem de *T. castaneum* zararlılarına karşı, Fas kökenli defne uçucu yağının, Cezayir veya Tunus'tan toplanan yapraklarınkinden daha etkili olduğunu gözlenmiş ve *T. castaneum* için LC_{50} değerleri, 172, 194 ve 217 mL/L hava; *R. dominika* için LC_{50} değerleri 68, 99 ve 113 mL/L hava olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, Akdeniz kökenli bitkilerden elde edilen uçucu yağların hem böcek ilacı hem de depolanmış ürün zararlılarına karşı kovucu etkinliği açıkça doğrulamaktadır [85]. Yapılan başka bir çalışmada; defne yaprağı uçucu yağının, 2 µL/L konsantrasyonda, *Ephestia kuehniella* Zeller'e karşı %82,4 oranında repellent aktivite gösterdiği bildirilmiştir [16] .

L. nobilis yaprak, dal ve gövdelerden elde edilen üç uçucu yağ örneğinin, *T. castaneum*'a karşı iticilik ve toksisite özellikleri açısından değerlendirildiği bir çalışmada; asetonda çözünmüş uçucu yağ emdirilen filtre kâğıdı üzerindeki iticilik testinde böcek sayısında azalma ile gözlenen belirgin kovucu etkinlik tespit edilmiştir. Çalışmada; akut erişkin mortalitesi uygulamanın 3. 5. ve 7. günlerde belirlenmiştir. Konsantrasyonu 10 µL/mL'den az olan gruplarda mortalite gözlenmemiştir. Ancak 50-80 µL/mL arasında, toksisite konsantrasyonla doğru orantılı artarken; 80-100 µL/mL ve daha yüksek konsantrasyonlarda toksiste doz ile negatif korelasyon göstermiştir. 7 gün içinde 50 µL/mL'den düşük konsantrasyonlarda böcek ölümü gözlenmemiş, ancak hayatta kalan böceklerin doğurganlığı azalmıştır [86].

Defne uçucu yağının karışık un böceğine (*Tribolium confusum*) karşı insektisit etkisinin değerlendirildiği çalışmada; uçucu yağın 4, 6, 8, 10, 12 mg/g konsantrasyonları hazırlanmıştır. En düşük konsantrasyon 10. günden sonra, geriye kalan dört konsantrasyon ise ikinci günden itibaren %70'ten fazla ölüm oranı gözlenmiştir. Uçucu yağ için tespit edilen LC_{50} değerleri 2,7-3,6 mg/g arasında olup, *T. castaneum*'a karşı orta derecede etkili olduğu bildirilmiştir [87].

Trogoderma granarium böceğinin larvalarına karşı defne ve adaçayı uçucu yağlarının fumigant toksisitesinin araştırıldığı bir çalışmada; defne ve adaçayı uçucu yağlarının buharlarına 48 saat maruz kalmak, larvaların sırasıyla 60 ve 90 µL/160 cm^3 hava konsantrasyonda yaklaşık %98 ve %100 ölümüyle sonuçlanmıştır [87].

7) *Analjezik ve Antienflamatuvar Etkisi:* Fas defnesinin yapraklarının, uçucu yağının ve ekstresinin insan nötrofillerinin mikrobisidal aktivitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada; ekstre ve uçucu yağın nötrofil mikrobisidal aktivitesi üzerindeki immünomodülatör etkileri 3-(4,5-dimetiltiyazol-2-il)-2,5-difeniltetrazolyum bromür (MTT) testi ile belirlenmiştir. Uçucu yağın, nötrofillerin mikrobisidal aktivitesi 200 µg/mL konsantrasyonda %38,13 olarak maksimum inhibisyon ile inhibe edildiğini ve doza bağlı olduğu bildirilmiştir [88].

L. nobilis'in yapraklarından elde edilen uçucu yağın, farelerde ve sıçanlarda analjezik ve antienflamatuvar etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada; uçucu yağ, kuyruk kaldırma ve formalin testlerinde dikkat çekici seviyede analjezik etki sergilemiştir. Uçucu yağ, 0,03 mL/kg ve üzeri dozlarda, kuyruk kaldırma hareketini 0,06mL/kg morfinin etkisiyle karşılaştırılabilecek ölçüde geciktirmiştir. Formalin testinde, uçucu yağ 0,25 mL/kg konsantrasyonda ağrı nosisepsiyonu önemli ölçüde azalttığı, daha yüksek konsantrasyonlarda ise sedasyon yarattığı tespit edilmiştir. Formaldehit kaynaklı pençe ödemi testinde; 0,2 mL/kg konsantrasyondaki uçucu yağın antienflamatuvar etkisinin piroksikama göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, uçucu yağın günlük olarak verilmesi oluşan enflamasyonu azalttığı, etkinliğinin morfin ve piroksikam gibi nonsteroidal antienflamatuvar ilaçlarla karşılaştırılabilir düzeyde olduğu bulunmuştur [89].

8) *Antikolinerjik Aktivite: L. nobilis* yapraklarından elde edilen uçucu yağ, etanollü ekstre ve dekoksiyonun farklı konsantrasyonları hazırlanarak asetilkolinesteraz (AChE) enzimine karşı inhibisyonun incelendiği bir çalışmada; etanollü ekstrenin 0,5 mg/mL konsantrasyonda %48,4 ve 1 mg/mL konsantrasyonda %64,3 oranıyla en yüksek inhibitör etkiyi gösterdiği tespit edilmiştir. Uçucu yağ 0,5 mg/mL

konsantrasyonda %51,3 oranında inhibe edici etki gösterirken; 1 mg/mL konsantrasyonda herhangi bir inhibisyon gözlenmemiştir. Dekoksiyonun; 0,5 mg/mL konsantrasyonda %19,9; 1mg/mL konsantrasyonda %36,2 ve 5 mg/mL konsantrasyonda %56,1 oranlarında inhibisyon sağladığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çalışılan numuneler arasında en yüksek etki gösteren, defnenin etanollü ekstresi olup, en düşük etki dekoksiyonunda gözlenmiştir [90].

Tunus'tan toplanan *L. nobilis* türünden elde edilen uçucu yağın kimyasal bileşiminin farelerde skopolaminin neden olduğu hafıza bozukluğu üzerindeki anti-amnezik aktivitelerinin Morris su labirenti ve Y labirenti testleri kullanılarak incelendiği bir çalışmada; uçucu yağın ana bileşikleri olan 1,8-sineol ve α-terpinil asetat AChE ile bağlanmıştır. Farelerin beyin dokularındaki kolinerjik sistemle ilgili biyobelirteçlerin, enzim aktivitesi ve protein ekspresyonu seviyeleri ölçülmüş ve kronik skopolamin uygulaması, hem Morris Su Labirenti hem de Y labirenti testlerinde bilişsel performansta belirgin bir düşüşe yol açmış, buna belirgin oksidatif hasar ve asetilkolinesteraz aktivitesinde diğer gruplara kıyasla önemli bir artışın eşlik ettiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, skopolamin grubuyla karşılaştırıldığında, uçucu yağ (100 mg/kg) ile tedavinin bilişsel işlevi önemli ölçüde artırdığı ve oksidatif hasarı iyileştirdiği tespit edilmiştir. Defne uçucu yağının farelerde skopolamin kaynaklı demans üzerinde, potansiyel olarak kolinerjik aktivite ve antioksidan özelliklerin modülasyonu yoluyla elde edilen faydalı etkisinin yanı sıra, ana bileşikler olan 1,8-sineol ve α-terpinil asetatın AChE bağlanmasının, uçucu yağın hafıza güçlendirici potansiyelini ortaya koyduğu bu çalışmayla bildirilmiştir [91].

9) *Sitotoksik Etki:* Mısır'da yapılan bir çalışmada, *L. nobilis* uçucu yağının, beş farklı insan kanser hücre serisinde büyümeyi inhibe edici etkisi incelenmiştir. İnsan karaciğer kanseri hücre hattı (Hepg2) üzerindeki IC_{50} değeri 0,6 µg/mL olarak tespit edilmiş ve karaciğer kanseri hücreleri üzerindeki etkinliğinin, meme, akciğer, beyin, serviks hücre serilerine kıyasla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca taze elde edilmiş *L. nobilis* uçucu yağı, doz bağımlı bir şekilde, test edilen tüm hücre hatları üzerinde belirgin inhibisyon sergilemişken; depolanmış uçucu yağın sitotoksik aktivitesinde dikkat çekici seviyede azalma gözlenmiştir [31].

Nil tilapia (*Oreochromis niloticus*) yavrularının diyetine defne yağının ilavesinin büyüme performansı, karaciğer ve bağırsak histolojisi üzerine etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada, defne yağı balıkların diyetlerine %0; %0,3; %0,6 ve %1,2 oranlarında eklenmiştir. Yaklaşık iki ay boyunca takip edilen balıkların diyetine %0,3 defne yağı ilavesinin histopatolojik bulgulara neden olmadığı, hatta karaciğer ve bağırsak dokularını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, özellikle büyüme ve histolojik analizlerden elde edilen veriler dikkate alındığında, %0,3 defne yağının tilapia kültüründe yem katkı maddesi olarak kullanılabileceği bildirilmiştir [92].

10) *Antihelmintik Etki:* Yapılan bir çalışmada; defne uçucu yağının kimyasal profili, *Haemonchus contortus*'a karşı *in vitro* antihelmintik aktivitesi ve fare helmint parazit modeli *Heligmosomoides polygyrus*'a karşı *in vivo* antihelmintik etkisi araştırılmıştır. *In vitro* antihelmintik potansiyelin değerlendirilmesi sonucunda; 4 mg/mL doza 8 saat maruz kaldıktan sonra 1,72 mg/mL inhibisyon ile *H. contortus* yumurta çıkışına karşı ovisidal etki ve yetişkin solucanların %87,5 hareketsizlik tespit edilmiştir. *In vivo* antihelmintik potansiyel ile ilgili olarak; uçucu yağın 2400 mg/kg dozda 7 günlük oral tedaviden sonra *H. polygyrus*'un yumurta çıkışını tamamen durdurduğu ve toplam solucan sayısında %79,2'lik bir azalma sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, defne uçucu yağının gastrointestinal parazitlere karşı umut verici *in vitro* ve *in vivo* antihelmintik kapasite gösterdiği bildirilmiştir [93].

II. SONUÇLAR

Bu derlemede, literatür verileri ışığında *L. nobilis* türününün botanik özellikleri, etnofarmakolojik kullanımı, fitokimyasal içeriği ve farmakolojik kullanımı anlatılmaya çalışılmıştır. Defne yaprak uçucu yağının, geçmişten günümüze kadar birçok farklı amaç için geleneksel olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar, defne uçucu yağının, gıda endüstrisinde sadece bir baharat ve aroma verici olarak değil, aynı zamanda koruyucu olarak kullanılabildiğini göstermiştir [59].

L. nobilis yapraklarından elde edilen uçucu yağ; monoterpenler, seskiterpenler, fenilpropanoitler ve asitler yönünden zengindir. Yapılan bir çalışmada; bu türün yetiştiği farklı bölgelerden toplanan yapraklardan elde edilen uçucu yağın içeriğindeki majör bileşenlerin aynı kaldığı tespit edilmiştir [75]. Buna karşın uçucu yağ eldesinde kullanılan yöntemler değiştirildiğinde uçucu yağın içeriğindeki majör bileşiklerin oranlarında da değişimler olduğu saptanmıştır. Yapılan bir çalışmaya göre, hidrodistilasyon ve buhar distilasyonu ile uçucu yağda daha fazla seskiterpen elde edilirken, mikrodalga destekli hidrodistilasyon ve hidrodistilasyon yöntemleri ile uçucu yağda daha yüksek miktarda oksijenli monoterpen elde edilmiştir [48, 94].

Bu türün uçucu yağı üzerinde yapılan antimikrobiyal, antioksidan, nematisidal, insektisidal, analjezik ve antienflamatuvar, antikolinerjik, antikonvülsan, akarisidal etki çalışmaları araştırılıp literatür verileri toplanmıştır. Defne uçucu yağının güçlü antibakteriyel aktivitesinin terpenler (linalol), laktonlar, monoterpenler (kamfen, α-pinen) ve oksitleri (1,8-sineol) gibi bileşenler arasındaki sinerjizmaya bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [57]. Defne uçucu yağının kitosan nanoemülsiyon kapsülasyonu halinde hazırlanmış formunun, mantar türü olan Aspergillus flavus suşunda ergosterol biyosentezinde bozulmaya ve Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} iyonlarının ve 260, 280 nm dalga boyunda ışığı absorblayan maddelerin sızıntısında artışa neden olurken, metilglioksal üretiminin engellenmesi antifungal ve anti-aflatoksijenik etki mekanizmasını düşündürmektedir [68]. Yapılan bir çalışmada,

defne uçucu yağının, sivrisinek larvalarına karşı toksik etkileri doğrulanmış ve sonuç olarak, haşere ve böcek vektör kontrolü için doğal larvisidal ajanlar ve biyoinsektisitler üretmek için önemli bir kaynak olarak düşünülebileceği bildirilmiştir [78].

Başka bir çalışmaya göre ise, defne uçucu yağının gram negatif bakterilere kıyasla gram pozitif bakterilere karşı daha etkili olduğu bildirilmiştir [60]. Defne uçucu yağının antifungal aktivitesinin, içeriğinde bulunan bileşiklere bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir [67]. Defne uçucu yağının oksidatif hasarı kontrol ederek gıda güvenliğini artırmak ve raf ömrünü uzatmak için kullanılabilecek doğal bir koruyucu olduğu belirlenmiştir [66].

Defne uçucu yağının sitotoksik aktivitesi hakkkında birçok çalışmalar yapılmıştır. *L. nobilis* uçucu yağının sitotoksik aktivitesinin, içeriğindeki monoterpen ve seskiterpen türevi bileşiklerden kaynaklanabileceği sonucuna varılmıştır. Monoterpen ve seskiterpen türevlerinin bu etkisini destekleyen bir çalışmada; *Abies balsamea* (balsam göknarı) yaprak uçucu yağının GC-MS analizi ile bileşenleri belirlenip, sitotoksisitesi değerlendirilmiştir. Uçucu yağın, esas olarak %96 oranında monoterpenler ve seskiterpenlerden oluştuğu tespit edilmiştir. Bu bileşenlerin birçok kanser hücre hattına karşı aktivitesi bulunmuş ve tümör hücre hatlarının GI_{50} (büyüme inhibisyonu) değerleri 0,76-1,7 mg/mL arasında olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, seskiterpen yapısındaki α-humulen (GI_{50} =53-73 µm) ve γ-karyofillen (GI_{50}=34-102 mg/mL) bileşiklerinin asıl olarak sitotoksisiteden sorumlu olan bileşikler olduğu belirtilmiştir [95,96]. Monoterpenlerin; meme, karaciğer ve/veya akciğer karsinojenezi (tümör oluşumu) gibi kanser oluşumlarının önlenmesinde ve tedavisinde etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmalarla monoterpenler arasında olan d-limonen ve α-pinenin birçok kanser türüne karşı koruyucu ve tedavi edici özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca d-limonenin, sıçanlarda hem spontan hem de kimyasal olarak indüklenen meme, karaciğer, akciğer ve ön mide tümörlerine karşı antikanser etkili olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra meme ve kolorektal kanserlerine karşı koruyucu etki gösterdiği gözlemlenmiştir. α-pinenin, fare B16 melanomuna ve insan HL-60 lösemi hücrelerine karşı sitotoksik etki gösterdiği tespit edilirken, başka bir çalışmada α–pinenin Hep-G2 ve Sk-MEL-28 insan tümör hücre hatlarına karşı da aktif olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte; düşük konsantrasyonda bulunan α-pinen ve d-limonenin, *L. nobilis* uçucu yağının yüksek sitotoksik aktivitesini tam olarak açıklayamasa da; bu etkinin, uçucu yağın ana bileşenleri ile bu aktif kimyasallarının sinerjik etkilerinden kaynaklandığı ayrıca uçucu yağın antioksidan aktivitesinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir [31].

Sonuç olarak; *L. nobilis* uçucu yağının birçok geleneksel kullanımı çeşitli farmakolojik araştırmalar ile doğrulanmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda *L. nobilis* türü ile çeşitli farmasötik formlarda doğal kaynaklı ürünlerin geliştirilmesinin ve ticarileştirilmesinin yararlı olabileceği ancak risk faktörlerinin de belirlenip, klinik çalışmalarla detaylandırılarak, ulaşılan sonuçların literatüre kazandırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Faydaoğlu, E., & Saip Sürücüoğlu, M. (2011). Geçmişten günümüze tıbbi ve aromatik bitkilerin kullanılması ve ekonomik önemi. *Journal of Forestry Faculty*, 11(1), 52–67.

[2] Çırpan, M. (2017). *Bursa–Kurşunlu yöresi Defne (Laurus nobilis L.) sahalarından farklı dönem ve yükseltilerde toplanan defne yapraklarının uçucu yağ verimi ve kimyasal bileşiminin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[3] Lubbe, A., & Verpoorte, R. (2011). Cultivation of medicinal and aromatic plants for specialty industrial materials. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 785–801. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2011.01.019

[4] Gök, Ö., & Gıdık, B. (2019). Tıbbi ve aromatik bitkilerin kullanım alanları. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 136–142.

[5] Çelik, E., & Çelik, G. Y. (2007). Bitki uçucu yağlarının antimikrobiyal özellikleri. *Orlab On-Line Mikrobiyoloji Dergisi*, 05(2), 1–6.

[6] Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils- A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), 446–475. https://doi.org/10.1016/J.FCT.2007.09.106

[7] Pattabanoğlu, E. S. (2018). *Laurus nobilis ve Cistus laurifolius'dan elde edilen uçucu yağların GC-MS analizi ve antimikrobiyal aktiviteleri* (Yüksek Lisans Tezi). Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.

[8] Yıldıztekin, M., Ulusoy, H., & Tuna, A. L. (2019). Türkiye'de tıbbi ve aromatik bitkilerin yetiştiriciliği ve sürdürülebilir gelişimi. *In 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences* (pp. 481–484). Samsun: SETSCI. https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.134

[9] Yılmaz, A., & Çiftçi, V. (2021). Türkiye'de Defne (Laurus nobilis L.) bitkisinin durumu. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 22, 325–330. https://doi.org/10.31590/ejosat.856195

[10] Karık, Ü., Çiçek, F., Oğur, E., Tutar, M., & Ayas, F. (2016). Türkiye'de yayılış gösteren Defne (Laurus nobilis L.) popülasyonlarının meyve özellikleri. *Journal of AARI*, 26(1), 1–16.

[11] Conforti, F., Statti, G., Uzunov, D., & Menichini, F. (2006). Comparative chemical composition and antioxidant activities of wild and cultivated Laurus nobilis L. leaves and Foeniculum vulgare subsp.

piperitum (Ucria) coutinho seeds. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 29(10), 2056–2064. https://doi.org/10.1248/BPB.29.2056

[12] Patrakar, R., Mansuriya, M., & Patil, P. (2012). Phytochemical and Pharmacological Review on Laurus Nobilis. *International Journal of Pharmaceutical and Chemical Sciences*, 1(2), 595–602.

[13] Alejo-Armijo, A., Altarejos, J., & Salido, S. (2017). Phytochemicals and biological activities of Laurel Tree (Laurus nobilis). *Natural Product Communications*, 12(5), 743–757. https://doi.org/10.1177/1934578X1701200519

[14] Mansour, O., Al-Abideen Douba, Z., & Ismail, G. (2018). Review study on the physiological properties and chemical composition of the Laurus nobilis. *The Pharmaceutical and Chemical Journal*, 5(1), 225–231.

[15] Anzano, A., de Falco, B., Grauso, L., Motti, R., & Lanzotti, V. (2022). Laurel, Laurus nobilis L.: A review of its botany, traditional uses, phytochemistry and pharmacology. phytochemistry reviews. *Springer Science and Business Media B.V*. https://doi.org/10.1007/s11101-021-09791-z

[16] Chahal, K. K., Kaur, M., Bhardwaj, U., Singla, N., & Kaur, A. (2017). A review on chemistry and biological activities of Laurus nobilis L. essential oil. *Journal of Pharmacognosy and phytochemistry*, 6(4), 1153–1161.

[17] Mssillou, I., Agour, A., El Ghouizi, A., Hamamouch, N., Lyoussi, B., & Derwich, E. (2020). Chemical composition, antioxidant activity, and antifungal effects of essential oil from Laurus nobilis L. flowers growing in Morocco. *Journal of Food Quality*, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/8819311

[18] Özcan, A. (2020). *Hatay halk kültüründe Defne Ağacı* (Yüksek Lisans Tezi). Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Hatay.

[19] Kaya, B., & Aladağ, C. (2009). *Maki ve garig topluluklarının Türkiye'deki yayılış alanları ve ekolojik özelliklerinin incelenmesi*. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, 67–80.

[20] Özer, S. (2021), *Defne (Laurus nobilis L.) popülasyonuna ait tek bitkilerde bazı morfolojik, fizyolojik ve kalite özelliklerinin belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[21] Davis PH. (1982). *Flora of Turkey* (Vol. 7). Edinburg: Edinburg Universty Pres.

[22] Yilmaz, E. S., Timur, M., & Aslim, B. (2013). Antimicrobial, antioxidant activity of the essential oil of Bay Laurel from Hatay, Turkey. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 16(1), 108–116. https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.764158

[23] Moghtader, M., & Salari, H. (2012). Comparative survey on the essential oil composition from the leaves and flowers of Laurus nobilis L. from Kerman province. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 4(6), 150–153. https://doi.org/10.5897/JENE11.126

[24] Kashkouli, S., Jamzad, M., & Nouri, A. (2018). Total phenolic and flavonoids contents, radical scavenging activity and green synthesis of silver nanoparticles by Laurus nobilis L. leaves aqueous extract. *Journal of Medicinal Plants and By-products* (Vol. 1).

[25] Peixoto, L. R., Rosalen, P. L., Ferreira, G. L. S., Freires, I. A., de Carvalho, F. G., Castellano, L. R., & de Castro, R. D. (2017). Antifungal activity, mode of action and anti-biofilm effects of Laurus nobilis Linnaeus essential oil against Candida spp. *Archives of oral biology*, 73, 179–185. https://doi.org/10.1016/J.ARCHORALBIO.2016.10.013

[26] Abdollahi Fard, M., & Shojaii, A. (2013). Efficacy of Iranian traditional medicine in the treatment of epilepsy. *BioMed Research International*, 2013, 1–8. https://doi.org/10.1155/2013/692751

[27] Loizzo, M. R., Saab, A. M., Tundis, R., Statti, G. A., Menichini, F., Lampronti, I., & Doerr, H. W. (2008). Phytochemical analysis and in vitro antiviral activities of the essential oils of seven Lebanon species. *Chemistry & Biodiversity*, 5, 461–470. https://doi.org/10.1002/cbdv.200890045

[28] Türk Farmakopesi 2017. (2018). Ankara: *T.C. Sağlık Bakanlığı Yayınları*, Türkiye İlaç ve Tıbbi Cihaz Kurumu.

[29] Boza A., (2013) *Karaburun Çeşme ve Dilek Yarımadası'nda Bulunan Doğal Defne (Laurus nobilis L.) Populasyonları Üzerinde Araştırmalar* (Doktora tezi). Ege Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.

[30] Yalçın, H., Akın, M., Şanda, M. A., & Çakır, A. (2007). Gas Chromatography/Mass Spectrometry Analysis of Laurus nobilis essential oil composition of Northern Cyprus. *Journal of Medicinal Food*, 10(4), 715–719. https://doi.org/10.1089/jmf.2007.404

[31] El-Sawi, S. A., Elsayed, I. M., & Amal, M. A. (2009). In vitro cytotoxic, antioxidant and antimicrobial activities of essential oil of leaves of Laurus nobilis L. grown in Egypt and its Chemical Composition. *Medicinal and aromatic plant science and biotechnology*, 3(Special Issue 1), 16–23.

[32] Ramos, C., Teixeira, B., Batista, I., Matos, O., Serrano, C., Neng, N. R., Marques, A. (2012). Antioxidant and antibacterial activity of essential oil and extracts of bay laurel Laurus nobilis Linnaeus (Lauraceae) from Portugal. *Natural Product Research*, 26(6), 518–529. https://doi.org/10.1080/14786419.2010.531478

[33] Abu-Dahab, R., Kasabri, V., & Afifi, F. (2014). Evaluation of the volatile oil composition and antiproliferative activity of Laurus nobilis L. (Lauraceae) on breast cancer cell line models. *Record of Natural Products*, 8(2), 136–147.

[34] Peris, I., & Blázquez, M. A. (2015). Comparative GC-MS analysis of bay leaf (Laurus nobilis L.) essential oils in commercial samples. International *Journal of Food Properties*, 18(4), 757–762. https://doi.org/10.1080/10942912.2014.906451

[35] Pilar Santamarina, M., Roselló, J., Giménez, S., & Amparo Blázquez, M. (2016). Commercial Laurus nobilis L. and Syzygium aromaticum L. Merr. & Perry essential oils against post-harvest phytopathogenic fungi on rice. *LWT*, 65, 325–332. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.08.040

[36] Kıvrak, Ş., Göktürk, T., & Kıvrak, İ. (2017). Assessment of volatile oil composition, phenolics and antioxidant activity of bay (Laurus nobilis) leaf and usage in cosmetic Applications. *International Journal of Secondary Metabolite*, 4(2), 148–161. https://doi.org/10.21448/ijsm.323800

[37] Dhifi, W., El Beyrouthy, M., Mnif, W., Pharm Sci, P. J., Bellili, S., Jazi, S., & Ben Nasr, S. (2018). Phytochemical composition and antioxidant activity of Tunisian Laurus nobilis. *Article in Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences* (Vol. 31).

[38] Elkiran, O., Akbaba, E., & Bagci, E. (2018). Constituents of essential oils from leaves and seeds of Laurus nobilis L.: A chemotaxonomic approach. *Bangladesh Journal of Botany*, 47(4), 893–901. https://doi.org/10.3329/BJB.V47I4.47379

[39] Ordoudi, S. A., Papapostolou, M., Kokkini, S., & Tsimidou, M. Z. (2020). Diagnostic Potential of FT-IR Fingerprinting in botanical origin evaluation of Laurus nobilis L. essential oil is supported by GC-FID-MS data. *Molecules*, 25(3). https://doi.org/10.3390/molecules25030583

[40] Usmani, Q. I., Ahmad, A., & Jamaldeen, F. N. (2021). Laurus nobilis L., (Habb-ul-Ghar), a review on phytochemistry, pharmacology and ethnomedicinal uses. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 11(5), 136–144. https://doi.org/10.22270/jddt.v11i5.5021

[41] Odeh, D., Oršolić, N., Berendika, M., Đikić, D., Drozdek, S. D., Balbino, S., & Jurčević, I. L. (2022). Antioxidant and anti-atherogenic activities of essential oils from Myrtus communis L. and Laurus nobilis L. in rat. *Nutrients*, 14(7). https://doi.org/10.3390/nu14071465

[42] Paparella, A., Nawade, B., Shaltiel-Harpaz, L., & Ibdah, M. (2022). A Review of the botany, volatile composition, biochemical and molecular aspects, and traditional uses of Laurus nobilis. *Plants*. https://doi.org/10.3390/plants11091209

[43] Boulila, A., Hassen, I., Haouari, L., Mejri, F., Amor, I. ben, Casabianca, H., & Hosni, K. (2015). Enzyme-assisted extraction of bioactive compounds from bay leaves (Laurus nobilis L.). *Industrial Crops and Products*, 74, 485–493. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.050

[44] Fidan, H., Stefanova, G., Kostova, I., Stankov, S., Damyanova, S., Stoyanova, A., & Zheljazkov, V. D. (2019). Chemical composition and antimicrobial activity of Laurus nobilis L. essential oils from Bulgaria. *Molecules*, 24(4). https://doi.org/10.3390/molecules24040804

[45] Nabila, B., Piras, A., Fouzia, B., Falconieri, D., Kheira, G., Fedoul, F. F., & Majda, S. R. (2022). Chemical composition and antibacterial activity of the essential oil of Laurus nobilis leaves. *Natural Product Research*, 36(4), 989–993. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1839450

[46] Siriken, B., Yavuz, C., & Guler, A. (2018). Antibacterial activity of Laurus nobilis: A review of literature. *Medical Science and Discovery*, 5(11), 374–379. https://doi.org/10.17546/msd.482929

[47] Caputo, L., Nazzaro, F., Souza, L. F., Aliberti, L., de Martino, L., Fratianni, F., & De Feo, V. (2017). Laurus nobilis: Composition of essential oil and Its Biological Activities. *Molecules*, Vol. 22, Page 930, 22(6), 930. https://doi.org/10.3390/molecules22060930

[48] Caredda, A., Marongiu, B., Porcedda, S., & Soro, C. (2002). Supercritical carbon dioxide extraction and characterization of Laurus nobilis essential oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 1492–1496. https://doi.org/10.1021/jf0108563

[49] Da Silveira, S. M., Luciano, F. B., Fronza, N., Cunha, A., Scheuermann, G. N., & Vieira, C. R. W. (2014). Chemical composition and antibacterial activity of Laurus nobilis essential oil towards foodborne pathogens and its application in fresh Tuscan sausage stored at 7°C. *LWT*, 59(1), 86–93. https://doi.org/10.1016/J.LWT.2014.05.032

[50] Verdian-rizi, M., & Hadjiakhoondi, A. (2008). Essential oil composition of Laurus nobilis L. of different growth stages growing in Iran. Zeitschrift fur Naturforschung - Section C, *Journal of Biosciences*, 63(11–12), 785–788. https://doi.org/10.1515/ZNC-2008-11-1201/machinereadablecitation/ris

[51] Derwich, E., Benziane, Z., Boukir, A., Mohamed, S., & Abdellah, B. (2009). Chemical composition and antibacterial activity of leaves essential oil of Laurus nobilis from Morocco. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 3818–3824.

[52] Sangun, M., Aydın, E., Timur, M., Karadeniz, H., Çalışkan, M., & Özkan, A. (2007). Comparison of chemical composition of the essential oil of Laurus nobilis L. leaves and fruits from different regions of Hatay, Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 28(4), 731–733.

[53] Taban, A., Saharkhiz, M. J., & Niakousari, M. (2018). Sweet bay (Laurus nobilis L.) essential oil and its chemical composition, antioxidant activity and leaf micromorphology under different extraction methods. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 9, 12–18. https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.05.001

[54] Řebíčková, K., Bajer, T., Šilha, D., Ventura, K., & Bajerová, P. (2020). Comparison of chemical composition and biological properties of essential oils obtained by hydrodistillation and steam distillation of Laurus nobilis L. *Plant foods for human nutrition*, 75(4), 495–504. https://doi.org/10.1007/S11130-020-00834-Y

[55] Aurori, A. C., Bobiş, O., Dezmirean, D. S., Mărghitaş, L. A., & Erler, S. (2016). Bay laurel (Laurus nobilis) as potential antiviral treatment in naturally BQCV infected honeybees. *Virus Research*, 222, 29–33. https://doi.org/10.1016/j.vırusres.2016.05.024

[56] Moghtader, M., & Farahmand, A. (2013). Evaluation of the antibacterial effects of essential oil from the leaves of Laurus nobilis L. in Kerman Province. *Journal of Microbiology and Antimicrobials*, 5(2), 13–17. https://doi.org/10.5897/JMA2012.0233

[57] Ouibrahim, A., Tlili-Ait-Kaki, Y., Bennadja, S., Amrouni, S., Djahoudi, A. G., & Djebar, M. R. (2013). Evaluation of antibacterial activity of Laurus nobilis L., Rosmarinus officinalis L. and Ocimum basilicum L. from Northeast of Algeria. *African Journal of. Microbiology Research* , 7(42), 4968–4973. https://doi.org/10.5897/AJMR2012.2390

[58] Abu-Zaid, A. A., Alopidi, M. A., & El-Sehrawy, M. H. (2013). In vitro antibacterial, anticancer and antioxidant properties of some oil plant extract. *Journal of American Science*, 9(11), 83–94.

[59] Ivanović, J., Mišić, D., Ristić, M., Pešić, O., & Žižović, I. (2010). Supercritical CO2 extract and essential oil of bay (Laurus nobilis L.)-chemical composition and antibacterial activity. *The Journal of the Serbian Chemical Society*, 75(3), 395–404. https://doi.org/10.2298/JSC090303003I

[60] Nehir El, S., Karagozlu, N., Karakaya, S., & Sahın, S. (2014). Antioxidant and antimicrobial activities of essential oils extracted from Laurus nobilis L. leaves by using solvent-free microwave and hydrodistillation. *Food and Nutrition Sciences*, 5, 97–106. https://doi.org/10.4236/fns.2014.52013

[61] Yerou Karima, O., & Touil, T. A. (2015). Physicochemical study and antibacterial activity of Laurus nobilis from Mascara (Algeria). *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(5), 1102–1106.

[62] Ertürk, Ö., Aydın, G., & Çol Ayvaz, M. (2020). Laurus nobilis L., Silybum marianum L., Nigella sativa L. ve Prunus cerasus L.'den soğuk pres yöntemi ile izole edilen esansiyel yağ bileşenlerinin antimikrobial ve antioksidan aktiviteleri. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 487–499. https://doi.org/10.30910/turkjans.725987

[63] Roselló, J., Sempere, F., Sanz-Berzosa, I., Chiralt, A., & Santamarina, M. P. (2015). Antifungal activity and potential use of essential oils against Fusarium culmorum and Fusarium verticillioides. *Journal of Essential oil Plants*, 18(2), 359–367. https://doi.org/10.1080/0972060X.2015.1010601

[64] Li, Y.-X., Liu, M., Yang, K., Zheng, W., & Tian, J. (2022). Antimicrobial mechanisms of spice essential oils and application in food industry. *Food Chemistry*, 382, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132312

[65] Guynot, M. E., Ramos, A. J., Setó, L., Purroy, P., Sanchis, V., & Marín, S. (2003). Antifungal activity of volatile compounds generated by essential oils against fungi commonly causing deterioration of bakery products. *Journal of Applied Microbiology*, 94(5), 893–899. https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01927.x

[66] Belasli, A., Ben Miri, Y., Aboudaou, M., Aït Ouahioune, L., Montañes, L., Ariño, A., & Djenane, D. (2020). Antifungal, antitoxigenic, and antioxidant activities of the essential oil from laurel (Laurus nobilis L.): Potential use as wheat preservative. *Food Science and Nutrition*, 8(9), 4717–4729. https://doi.org/10.1002/FSN3.1650

[67] Reyes-Jurado, F., Franco-Vega, A., Ramírez-Corona, N., Palou, E., & López-Malo, A. (2015). Essential oils: antimicrobial activities, extraction methods, and their modeling. *Food Engineering Reviews*, 7, 275–297. https://doi.org/10.1007/s12393-014-9099-2

[68] Singh A., Das S., Chaudhari A. K., Deepika, Soni M., Yadav A., Dwivedy A. K., Kishore Dubey N. (2023). *Laurus nobilis* essential oil nanoemulsion-infused chitosan: A safe and effective antifungal agent for masticatory preservation. *Plant Nano Biology*, 5, 1-11 https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100043.

[69] Kurtfaki, M., & Yildirim-Yalcin, M. (2023). Characterization of Laurus nobilis L. leaf essential oil incorporated maize starch and rice protein films. *Food Measure*, 17, 4954–4962. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02013-4

[70] Kırışık M. (2022) Determination of fumigant toxicity of single, binary and tertiary mixtures of three essential oils against Frankliniella occidentalis Pergande (Thysanoptera: Thripidae). *Research Square*, 1-14.

[71] Thoma, J. L., Cantrell, C. L., Tamang, P., & Zheljazkov, V. D. (2023). Determining the optimum mixture of three essential oils for potato sprout suppression at room temperature storage. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-12.

[72] Nejad, Z. B., Nikrouz, L., & Abdollahi, A. (2023). Antibacterial Activity of Some Iranian Plant Essential Oils as Disinfectant Agents on Surfaces Contaminated with Staphylococcus Aureus and Pseudomonas Aeruginosa. *Journal of Advanced Biomedical Sciences*, 1-14.

[73] Özcan, B., Esen, M., Kemal Sangun, M., Coleri, A., & Çalışkan, M. (2010). Effective antibacterial and antioxidant properties of methanolic extract of Laurus nobilis seed oil. *Journal of Environmental Biology*, 31(5), 637–641.

[74] Başak Şahin, S., & Candan, F. (2013). Effect of Laurus nobilis L. essential oil and its main components on α-glucosidase and reactive oxygen species scavenging activity. Shaheed Beheshti University of Medical Sciences and Health Services. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 12(2), 367–379.

[75] Kaur, M., Chahal, K., Kumar, A., Kaur, R., & Urvashi. (2018). Nematicidal activity of bay leaf (Laurus nobilis L.) essential oil and its components against Meloidogyne incognita. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(2), 1057–1064.

[76] Macchioni, F., Perrucci, S., Cioni, P., Morelli, I., Castilho, P., & Cecchi, F. (2006). Composition and acaricidal activity of laurus novocanariensis and Laurus nobilis essential oils against Psoroptes cuniculi. *Journal of Essential Oil Research*, 18(1), 111–114. https://doi.org/10.1080/10412905.2006.9699403

[77] Alimi, D., Hajri, A., Jallouli, S., & Sebai, H. (2021). In vitro acaricidal activity of essential oil and crude extracts of Laurus nobilis, (Lauraceae) grown in Tunisia, against arthropod ectoparasites of livestock and poultry: Hyalomma scupense and Dermanyssus gallinae. *Veterinary Parasitology*, 298. https://doi.org/10.1016/J.VETPAR.2021.109507

[78] Perry, N., & Perry, E. (2006). Aromatherapy in the management of psychiatric disorders clinical and neuropharmacological perspectives. *CNS Drugs*, 20(4), 257–280.

[79] Parichanon P., Ascrizzi R., Tani C., Sanmartin C., Taglieri I., Macaluso M., Flamini G.,Pieracci Y., Venturi F., & Conti B. (2023). The protective combined effect of chitosan and essential oil coatings on cheese and cured meat against the oviposition of Piophila casei, *Food Bioscience*, 56. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103132.

[80] Gugliuzzo A., Francardi V., Simoni S., Roversi P. F., Ferrati M., Spinozzi E., Perinelli D. R., Bonacucina G., Maggi F., Tortorici S., Tropea Garzia G., Biondi A., & Rizzo R. (2023). Role of plant essential oil nanoemulsions on host colonization by the invasive ambrosia beetle Xylosandrus compactus, *Industrial Crops and Products*, 195, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116437.

[81] Dos Santos A.R., Do Nascimento R.F.S.C., Da Cruz J.P., Da Silva Xavier A., De Souza Ramos A., Ferreira J.L.P., Maria A.C.B., De Almeida M.M.H., Da Silva M.A.M., Gomes Correa P., De Andrade Silva J.R., De Carvalho Queiroz M.M., Amaral A.C.F. (2023). Evaluation of essential oils and diluents against Chrysomya megacephala, an important mechanical vector, *Journal of Natural Pesticide Research*, 3,1-8 https://doi.org/10.1016/j.napere.2023.100024.

[82] Hached W., Chamkhi A., Ncibi S. & Lebdi-Grissa K. (2023). Evaluation of Laurus nobilis essential oil repellent effect on the date moth Ectomyelois ceratoniae under controlled conditions. *International Journal of Zoological and Entomological Letters*. 3(1), 01-04.

[83] Aıssaouı, L. Bouazız, A. Boudjelıda, & H. Nazlı, A. (2023) Phytochemıcal Screenıng And Bıologıcal Effects Of Laurus Nobılıs (Lauraceae) Essentıal Oıl Agaınst Mosquıto Larvae, Culex Pıpıens (Lınneaus, 1758) (Dıptera: Culıcıdae) Specıes. *Applied Ecology And Environmental Research* 21(1):287-300.

[84] Jemaa, J. M.-B., Tersim, N., & Khouja, M. L. (2011). Composition and repellent efficacy of essential Oil from Laurus nobilis aganist adults of the cigarette beetle Lasioderma serricorne (Coleoptera: Anobiidae). *Tunisian Journal of Plant Protection*, 6(1), 29–42.

[85] Mediouni Ben Jemâa, J., Tersim, N., Toudert, K. T., & Khouja, M. L. (2012). Insecticidal activities of essential oils from leaves of Laurus nobilis L. from Tunisia, Algeria and Morocco, and comparative chemical composition. *Journal of Stored Products Research*, 48, 97–104. https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2011.10.003

[86] Andronikashvili, M., & Reichmuth, C. (2003). Repellency and toxicity of essential oils from Ocimum gratissimum (Lamiaceae) and Laurus nobilis (Lauraceae) from Georgia against the rust-red flour beetle (Tribolium castaneum Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). In Advances in stored product protection. *Proceedings of the 8th International Working Conference on Stored Product Protection*, York, UK, 22-26 July 2002 (pp. 749–762). CABI. https://doi.org/10.1079/9780851996912.0749

[87] Chahal, K. K., Singh, D. K., Panchbhaiya, A., Singh, N., Kaur, M., Bhardwaj, U., & Kaur, A. (2017). A review on chemistry and biological activities of Laurus nobilis L. essential oil. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(4).

[88] El Faqer O, Rais S., Elkoraichi I., El Amrani A., Dakir M., Zaid Y., & Mtairag E. M., (2023). Phytochemical characterization and immunomodulatory effects of aqueous and ethanolic extracts and essential oil of Moroccan Laurus nobilis L. (Lauraceae) on human neutrophils. *Journal of Herbmed Pharmacology*. 12(1): 92-99.

[89] Sayyah, M., Saroukhani, G., Peirovi, A., & Kamalinejad, M. (2003). Analgesic and anti-inflammatory activity of the leaf essential oil of Laurus nobilis Linn. *Phytotherapy Research*, 17, 733–736. https://doi.org/10.1002/ptr.1197

[90] Ferreira, A., Proença, C., Serralheiro, M. L. M., & Araújo, M. E. M. (2006). The in vitro screening for acetylcholinesterase inhibition and antioxidant activity of medicinal plants from Portugal. *Journal of Ethnopharmacology*, 108(1), 31–37. https://doi.org/10.1016/J.JEP.2006.04.010

[91] Smach M.A., Hafsa J., Abdallah J.B., Charfeddine B., Limem K. (2024). Neuroprotective and anti-amnesic effects of Laurus Nobilis essential oil against scopolamine-induced memory deficits in mice brain, *Journal of Ethnopharmacology*, 319. https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.117151.

[92] Yazici, M., Mazlum, Y., Naz, M., Urku, C., Turkmen, M., & Akayli, T. (2022). Effects of adding laurel (Laurus nobilis) essential oil to the diet of tilapia fish on growth and intestinal histology. *Aquatic Sciences and Engineering*, 37(4), 195-204. DOI: https://doi.org/10.26650/ASE20221101489

[93] Sebai, E., Abidi, A., Benyedem, H., Dhibi, M., Hammemi, I., & Akkari, H. (2022). Phytochemical profile and anthelmintic effects of Laurus nobilis essential oil against the ovine nematode Haemonchus contortus and the murine helminth model Heligmosomoides polygyrus. *Veterinary Parasitology*, 312.

[94] Fornari, T., Vicente, G., Vázquez, E., García-Risco, M. R., & Reglero, G. (2012). Isolation of essential oil from different plants and herbs by supercritical fluid extraction. *Journal of Chromatography A*, 1250, 34–48. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2012.04.051

[95] Legault, J., Dahl, W., Debiton, E., Pichette, A., & Madelmont, J. C. (2003). Antitumor activity of balsam fir oil: Production of reactive oxygen species induced by alpha-humulene as possible mechanism of action. *Planta medica*, 69(5), 402–407. https://doi.org/10.1055/S-2003-39695

[96] Sylvestre, M., Pichette, A., Longtin, A., Nagau, F., & Legault, J. (2006). Essential oil analysis and anticancer activity of leaf essential oil of Croton flavens L. from Guadeloupe. *Journal of Ethnopharmacology*, 103(1), 99–102. https://doi.org/10.1016/J.JEP.2005.07.011