



ORDU ÜNİVERSİTESİ
BİLİM ve TEKNOLOJİ
DERGİSİ

Ordu University
Journal of Science and Technology

Hakemli Elektronik Dergi

Aralık 2023 | Cilt: 13, Sayı: 2

ISSN: 2146-6440

e-ISSN: 2146-6459



ORDU ÜNİVERSİTESİ

BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ

CİLT 13, SAYI: 2 | ARALIK 2023

ORDU UNIVERSITY

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

VOLUME 13, ISSUE: 2 | DECEMBER 2023

"Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi" 2011 yılından bu yana, Türkçe veya İngilizce olarak hazırlanan çalışmaları açık erişimli yayınlayan bilimsel ve hakemli bir dergidir. Dergimiz, elektronik olarak yılda iki kez (Haziran ve Aralık) yayınlanmaktadır.

Dergimiz; Fen Bilimleri alanında ki Mühendislik, Temel Bilimler, Ziraat ve Fen-Matematik Eğitimi konularını kapsayan hem deneysel hem de kuramsal makalelere yer vermektedir.

Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, **TRDizin**, Index Copernicus, DRJI ve SOBIAD tarafından taranıp indexlenmektedir.

"Ordu University Journal of Science and Technology" is a scientific and peer-reviewed journal that has been publishing open access studies in Turkish or English since 2011. Our journal is published electronically twice a year (June and December).

Our journal includes both experimental and theoretical articles in the fields of Science, Engineering Sciences, Agriculture, and Science-Mathematics Education.

Ordu University Journal of Science and Technology currently indexed by **TRDizin**, Index Copernicus, DRJI, and SOBIAD

Makaleler "i-Thenticate" intihal incelemesinden geçmiştir.
Articles have passed the "i-Thenticate" plagiarism review.

Dergimiz, etik "Yayın Etiği Komitesi" COPE (Committee on Publication Ethics) ilkelerini benimsemektedir.

Our journal adopts the principles of COPE (Committee on Publication Ethics).



Creative Commons Atıf-GayriTicari 4.0 Uluslararası Lisansı (CC BY-NC 4.0)
Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

SAHİBİ

Ordu Üniversitesi Adına
Dr. Öğr. Üyesi. Mithat AKGÜN (Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü)

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi. Mithat AKGÜN

EDİTÖR YARDIMCISI

Doç. Dr. Elvan ÜSTÜN

YABANCI DİL EDİTÖRÜ

Öğr. Gör. Dr. Selin YURDAKUL

MİZANPAJ EDİTÖRÜ

Dr. Öğr. Üyesi. Necati TAŞKIN

ALAN EDİTÖRLERİ

Prof. Dr. Şevket Metin KARA
Prof. Dr. Kürşat KORKMAZ
Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ
Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK

Prof. Dr. İmdat İŞCAN
Prof. Dr. Sezai ALKAN
Doç. Dr. Mustafa AKTAŞ
Doç. Dr. Ahmet AYGÜN
Prof. Dr. Erhan SET
Prof. Dr. Tuğba ÖZBUCAK
Doç. Dr. Faruk AKYAZI
Doç. Dr. Burhan ÖZTÜRK

Doç. Dr. Mutlu SÖNMEZ ÇELEBİ
Doç. Dr. Fatih ÖNER

Doç. Dr. Ali MİROĞLU
Doç. Dr. Ömer ATABEYOĞLU
Doç. Dr. Erdem TÜRKELİ

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Remzi ÖZCAN

Dr. Öğr. Üyesi. Mithat AKGÜN
Dr. Öğr. Üyesi. Ergün YÜCESOY

Dr. Öğr. Üyesi. Kerem ERZURUMLU
Dr. Öğr. Üyesi. Elif ÇİL

Dr. Öğr. Üyesi. Sümeyye ŞAHİN

Dr. Öğr. Üyesi. Erdinç YÜCESOY

*Endüstri Bitkileri, Tıbbi ve Aromatik Bitkiler
Bitki Fizyolojisi, Bitki Besleme ve Toprak Verimliliği
Fiziksel Kimya
Kaynak Teknolojileri, Malzeme Tasarım ve Davranışları,
Üretim Teknolojileri, Metal Alaşımlar, Triboloji
Matematiksel Analiz
Kanatlı Hayvan Yetiştirme ve Islahı
Elektrik Makineleri ve Enerji Dönüşümü
Bahçe Bitkileri Yetiştirme ve Islahı
Matematiksel Analiz
Ekoloji
Entomoloji, Nematoloji
Bahçe Bitkileri Yetiştirme ve Islahı, Hasat Sonu
Teknolojisi ve Fizyolojisi, Meyve Yetiştirme ve Islahı
Kimya, Analitik Kimya, Elektrokimya
Tarla Bitkileri Yetiştirme ve Islahı, Tahıllar ve Yemeklik
Tane Baklagiller
Hidrobiyoloji
Mimarlık, Planlama, Tasarım
Betonarme Yapılar, Çelik Yapılar, Deprem Mühendisliği,
Rüzgâr, Yapı Dinamiği
Görüntü İşleme, Gömülü Sistemler, Sinyal İşleme,
Mekatronik Mühendisliği
Makine Mühendisliği, Gıda Bilimleri ve Mühendisliği
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği, Yapay Öğrenme,
Yapay Zekâ, İşaret İşleme
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği
Eğitim Bilimleri ve Öğretmen Yetiştirme, Mikrobiyoloji,
Bakteriyoloji
Gıda Bilimleri ve Mühendisliği, Gıda Bilimi, Gıda Kimyası,
Yağ Teknolojisi, Beslenme ve Diyetetik
Esnek Hesaplama, Olasılık Teorisi*





2023 ARALIK 13 (2) SAYISI HAKEM LİSTESİ

Prof. Dr. Şevki ADEM	<i>Çankırı Karatekin Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Tayfur KÜÇÜKÖMEROĞLU	<i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Kadir ERTÜRK	<i>Namık Kemal Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Zeki KARACA	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>
Prof. Dr. İbrahim ATMACA	<i>Akdeniz Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Yahya Erkan AKANSU	<i>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Engin ÖZGÖZ	<i>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Aysun PEKŞEN	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>
Prof. Dr. Beyhan KİBAR	<i>Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Nesimi ULUDAĞ	<i>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Sertaç TUHTA	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Abdullah ERGÜN	<i>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi</i>
Doç. Dr. Adnan UĞUR	<i>Ordu Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Barbaros DİNÇER	<i>Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi İsmail Oğuz ÖZDEMİR	<i>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ÖGÜR	<i>Selçuk Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal AKBULUT	<i>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Eray BOZYEL	<i>Dokuz Eylül Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nur BAYRAKTAR	<i>Ordu Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Veyis TURUT	<i>Batman Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Onur SALDIR	<i>Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Bahadır DEMİREL	<i>Erciyes Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin SAUK	<i>Ondokuz Mayıs Üniversitesi</i>
Dr. Öğr. Üyesi Yasin ALTIN	<i>Bursa Teknik Üniversitesi</i>
Öğr. Gör. Dr. Sümeyya SERİN	<i>İnönü Üniversitesi</i>
Öğr. Gör. Dr. Olgun KÖKSAL	<i>Samsun Üniversitesi</i>
Arş Gör. Dr. Erdinç Ulaş SAKA	<i>İstanbul Üniversitesi</i>
Arş Gör. Dr. Serdar ŞANLI	<i>Ordu Üniversitesi</i>

- 110-119 Investigation of Some Biological Activities of *Inula graveolens* (L.) Desf Species from Turkey
Türkiye'den Toplanan *Inula graveolens* (L.) Desf. Türünün Bazı Biyolojik Aktivitelerinin Araştırılması
Ramazan Mammadov, Bayram Kaya, İlayda Cansu Atıcı, Mehmet Özgür Atay
- 120-130 Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Borofen Üretimi ve Karakterizasyonu
Borophene Production and Characterization by Chemical Vapor Deposition Method
Erhan Özkan
- 131-145 Entomolojide Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı
Use of Artificial Neural Networks in Entomology
Yeter Küçüktopçu, İslam Saruhan, Celal Tuncer, İzzet Akça
- 146-153 Ordu ve Çevresinde Yayılış Gösteren *Satureja spicigera* (Lamiaceae) Türünün Anatomik Özellikleri
Anatomical Characteristics of *Satureja spicigera* (Lamiaceae) Species Distributed in Ordu and its Surroundings
Öznur Ergen Akçin, Didem Karadeniz
- 154-162 Determination of Ionization Energy Loss of Electron-Positron Pair in Multi-GeV Region
Elektron-Pozitron Çiftinin İyonlaşma Enerji Kaybının Çoklu-GeV Bölgesinde Belirlenmesi
Onur Buğra Kolcu
- 163-173 Solution of the Cauchy Problem in Fourier Series for a Linear RC Circuit with a Resistor and Two Capacitors
Bir Direnç ve İki Kapasitörlü Lineer Bir RC Devresi için Cauchy Probleminin Fourier Serisi Cinsinden Çözümü
Numan Derda Özkutlu, Hafız Alisoy, Gülizar Alisoy
- 174-192 Computational Insights in Drug-likeness and ADMT Properties of -dienes Resemble of Geranial
Geranial benzeri -dienlerin İlaç Benzerliği ve ADMT Özelliklerine İlişkin Hesaplamalı Analizler
Goncagül Serdaroğlu
- 193-202 Experimental Thermal Properties of Foam Mortars used Bentonite as Supplementary Cementitious Material
Çimento Katkı Malzemesi olarak Bentonit Kullanılan Köpük Harçların Termal Özellikleri
Yasemin Akgün
- 203-220 Solutions of Time Fractional Mathematical Model with Effective Techniques
Zaman Kesirli Matematiksel Modelin Etkili Tekniklerle Çözümü
Yusuf Gürefe, Yusuf Pandır, Tolga Aktürk
- 221-233 Material Determination of the Effects of Rotational Velocity on Energy Consumption, Cracking Efficiency and Kernel Hazelnut Quality in Centrifugal Hazelnut Cracker
Çimento Katkı Malzemesi olarak Bentonit Kullanılan Köpük Harçların Termal Özellikleri
Birkut Güler, Hasan Karaosmanoğlu

- 234-248 Endüstriyel Atık Suların Zirai Atıktan Türetilmiş Grafen Benzeri Malzemeler Kullanılarak Ardışık Elektrokimyasal, Kimyasal ve Fotokimyasal Yöntemlerle Arıtılması
Treatment of Industrial Wastewaters by Sequential Electrochemical, Chemical and Photochemical Methods Using Agricultural Waste Derived Graphene-like Materials
Burcu Palas, Gülin Ersöz, Süheyda Atalay
- 249-260 Farklı Tarımsal Atıkların *Pleurotus citrinopileatus* ve *Pleurotus ostreatus* Yetiştiriciliğinde Verim ve Kalite Üzerine Etkisi
The Effect of Different Agricultural Wastes on Yield and Quality in Cultivation of *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus ostreatus*
Ecem Kara, Gökhan Baktemur, Mustafa Kemal Soylu, Hatıra Taşkın
- 261-285 Düz Bir Levhaya Çarpan Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Dönmeli Jetlerde Isı Transferi Etkilerinin İncelenmesi
Investigation of Heat Transfer Effects in Unconfined and Confined Swirling Jets Impinging on a Flat Plate
Haluk Keleş, Yücel Özmen

Investigation of Some Biological Activities of *Inula graveolens* (L.) Desf Species from Turkey

Ramazan Mammadov¹ , Bayram Kaya¹ , İlayda Cansu Atıcı¹ , Mehmet Özgür Atay¹ 

¹Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Science, Molecular Biology and Genetics, Muğla

Geliş Tarihi / Received Date: 23.01.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 06.07.2023

Abstract

In this study, it was aimed to determine the phenolic and flavonoid content and different biological activities (antioxidant, enzyme inhibitor, anthelmintic) of the methanol extract of *Inula graveolens* (L.) Desf collected from Muğla (Turkey). As a result of the study, the total phenolic content was determined as 5.36 ± 0.32 mg GAE/g, and the total flavonoid amount was determined as 3.49 ± 0.05 mg QE/g extract equivalent. In the β -carotene/linoleic acid method, the extract showed lower activity than the standard BHA used. The extract was determined to be equivalent to $4.28 \pm 0.24/0.47 \pm 0.03$ mg TE/g extract in terms of copper and iron-reducing power capacity, respectively. Although the enzyme inhibitory activities of the extract increased with the increase in concentration, it was determined that it had lower activity than galantamine ($89.41 \pm 0.05\%$) and kojic acid ($73.93 \pm 0.10\%$) used as standard. Paralysis and death times of the extract at different concentrations (2.5, 5, 10, 20 mg/mL) on *Tubifex tubifex* worms were determined. It was determined that the extract at high concentrations (20 mg/mL) exhibited an activity near that of andazole (10 mg/mL) used as a standard. According to these results, *I. graveolens* can be considered a good resource for the pharmaceutical industry due to its activities.

Keywords: *Inula graveolens*, antioxidant, enzyme inhibitor, *Tubifex tubifex*

Türkiye'den Toplanan *Inula graveolens* (L.) Desf. Türünün Bazı Biyolojik Aktivitelerinin Araştırılması

Öz

Bu çalışmada Muğla'dan toplanan *Inula graveolens* (L.) Desf türünün metanol ekstraktının fenolik ve flavonoid miktarı ve farklı biyolojik aktivitelerinin (antioksidan, enzim inhibitör, antihelmint) belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda total fenolik miktarı $5,36 \pm 0,32$ mg GAE/g, total flavonoid miktarı ise $3,49 \pm 0,05$ mg QE/g ekstrakt eşdeğeri olarak belirlenmiştir. β -karoten/linoleik asit yönteminde ekstrakt standart olarak kullanılan BHA'ya göre daha düşük bir aktivite sergilemiştir. Ekstraktın bakır ve demir indirgeme gücü kapasitesi bakımından sırasıyla $4,28 \pm 0,24/0,47 \pm 0,03$ mg TE/g ekstrakt eşdeğeri olduğu belirlenmiştir. Ekstraktın enzim inhibitör aktiviteleri konsantrasyon artışına bağlı artsa da standart olarak kullanılan galantamin ($89.41 \pm 0.05\%$) ve kojik asite ($73.93 \pm 0.10\%$) göre daha düşük bir aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir. Farklı konsantrasyondaki ekstraktın (2.5, 5, 10, 20 mg/mL) *Tubifex tubifex* solucanları üzerindeki paralize ve ölüm süreleri belirlenmiştir. Yüksek konsantrasyonlardaki ekstraktın (20 mg/mL) standart olarak kullanılan andazole (10 mg/mL) yakın bir aktivite sergilediği belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre *I. graveolens* gösterdiği aktivitelerden dolayı ilaç endüstrisi için iyi bir kaynak olarak dikkate alınabilir.

Anahtar Kelimeler: *Inula graveolens*, antioksidan, enzim inhibitör, *Tubifex tubifex*

Introduction

Due to the chemical diversity of metabolites in plants, they are widely used as food raw materials, treatment of diseases, and reducing the negative effects of conditions such as stress and aging (Ekor, 2014; Petrovska, 2012). Secondary metabolites are bioactive components that are important for human health. Plant secondary metabolites are raw materials in high demand in many industries, including health and food. The production of secondary metabolites by plants depends on meteorological conditions, geographical location, and growing conditions, and many plants can only grow and mature in certain seasons (Çölgeçen, 2015). Based on their biosynthetic origins, they are divided into 3 main groups as alkaloids, terpenes and phenolics. Phenolic compounds are one of the groups with the highest number of members in the plant kingdom (Tring et al., 2020).

Free radicals are molecules with one or more unpaired electrons. Due to their unstable structure, they can cause damage by binding to lipids, nucleic acids, proteins, and organelles in the cell (Karabulut & Gülay, 2016). In healthy individuals, there is a balance between antioxidants and free radicals (Gökbulut & Şarer, 2011). Antioxidants provide protection against various diseases (diabetes, cancer, ischemic and neurodegenerative disorders) that may occur by inhibiting free radicals. Tocopherols, ascorbic acid, flavonoids, and phenolic compounds are the most important natural antioxidant groups. Phenolics, which are important plant components, could remove radicals due to the presence of hydroxyl groups in their structures (Karabulut & Gülay, 2016). Antioxidants obtained from natural products in drug production have fewer side effects than synthetic antioxidants. Therefore, the interest in the search for antioxidant substances from natural products has gained importance over time. In addition, natural compounds with enzyme inhibitor potential have gained importance in the pharmaceutical industry because they are used in the treatment of many diseases such as cancer, and metabolic, cardiovascular, and neurological disorders (Abdioğlu, 2019).

Plants provide a rich medicinal resource against anthelmintics and insecticides. Ailments caused by helminths are caused by parasitic gastroenteritis, infections caused by different kinds of stomach and intestinal worms. As a result, discomforts such as fatigue, loss of appetite, and decreased productivity occur. Since chemotherapy or an effective vaccine against helminths has not been developed, metabolites obtained from natural products are the only effective treatment method to treat and control helminth infections. Random use of synthetic anthelmintic drugs can lead to parasite resistance. Herbal medicines have been used since ancient times for the treatment of parasitic diseases in humans and may be valuable in preventing the development of resistance (Hossain, 2015).

Inula graveolens (L) Desf, which grows widely in the Mediterranean region and is known as stinking grass among the people, is in the family of Asteraceae (Gökbulut & Şarer, 2011). *I. graveolens* is an herb with small yellow to yellow/white flowers that smell of camphor. *I. graveolens*, a perennial shrubby plant, can grow up to one meter. It is a multi-branched, heavily scented, linear-lanceolate plant covered with small glandular hairs (Karan et al., 2018). Sellem et al. (2020) investigated the antioxidant, antioxidant enzyme inhibitory activity, total substance amount as well as antimicrobial activity of extracts obtained from five different solvents (Cyclohexane - Dichloromethane - Ethyl acetate - Acetone - Acetonitrile) from *Inula graveolens* species. They demonstrated different biological activities. They determined that the highest amount of substance in its content belongs to phenolics.

The aim of this study was to determine the total phenolic and flavonoid amounts of the aboveground methanol extract of *I. graveolens* species and to evaluate different biological activities such as antioxidant (β -carotene, CUPRAC, FRAP), enzyme inhibition (Acetylcholinesterase, Tyrosinase), and anthelmintic (*Tubifex tubifex*).

In this study, besides the determination of antioxidant (β -carotene, CUPRAC, FRAP), enzyme inhibitor (Acetylcholinesterase, Tyrosinase), and anthelmintic activities of the aerial methanol extract of *Inula graveolens* species, the determination of the substance (flavonoid, phenolic) was performed.

Materials and Methods

Plant Material and Extract Preparation

Inula graveolens species was collected from the Kavaklıdere district of Muğla (Turkey) in 2021. The collected plant samples were dried and cut into small pieces with a blender. The fragmented plant samples (20 g) were transferred to the Erlenmeyer flask and 100 mL of methanol was added to it. Afterward, the Erlenmeyer flask was kept in a shaking incubator at 50 °C for 6 hours, and after this process, it was filtered into the balloon jug with the help of blotting paper. The incubation process was repeated a second time with the addition of solvent. After the filtration process was completed, the filtered samples were taken to the rotary evaporator (Heindolph LABOROTA 4011) to remove the solvent. In order to remove the water in the samples, they were kept in a lyophilizer (Thermo Savant) at -54 °C for 10 hours. After the lyophilization process, the samples were stored at -20 °C until they would be used (Turan & Mammadov, 2018).

Quantitative Analysis of Extracts and Determination of Antioxidant Activity

The total phenolic content of the extracts was calculated as gallic acid (mg GAE/g) equivalent using the Folin-Ciocalteu method (Singleton & Rossi, 1965). The total flavonoid amount was calculated as quercetin equivalent (mg QE/g) by modifying the method of Aryal et al. (2019). The β -carotene/linoleic acid method for the determination of total antioxidant activity was performed according to the method of Amarowicz et al. (2004). The reducing power capacity of iron and copper was determined as Trolox equivalent (mg TE/g) according to the method of Benzie and Strain (1996), and Apak et al. (2004) respectively.

Enzyme Inhibitory Activity Methods

Acetylcholinesterase

125 μ L of DTNB (0.5 mM), 25 μ L of anticholinesterase (0.026 U/mL) was mixed onto 50 μ L of water-dissolved solution extract solution (1 mg/mL) and incubated for 15 minutes at room temperature. After incubation, 25 μ L of acetylthiocholine iodide substrate (1.5 mM) was added to initiate the reaction and incubated again for 10 minutes at room temperature. After incubation, absorbance measurement was performed at 405 nm. The same processes were performed in galantamine, which was used as a standard. By using absorbance values from all samples, % inhibitions were calculated with the help of the following formula (Ellman et al., 1961).

$$\% \text{ inhibitions} = [(A_c - A_s) / A_c] \times 100$$

A_c is the absorbance value of the control and A_s is the absorbance value of the extract.

Tyrosinase

After adding 40 μ L of water-dissolved extract solution, 120 μ L of phosphate buffer (20 mM pH: 6.8), and 20 μ L of tyrosinase (480 U/mL) enzyme solution, it was incubated at room temperature for 15 minutes. After incubation, the reaction was started by adding 20 μ L of L-DOPA (2.5 mM). Then, after incubation for 10 minutes at room temperature, absorbance values were measured at 492 nm. The same procedures were applied for kojic acid solutions as standard material. By using the absorbance values from all samples, the % inhibitions were calculated with the help of the following formula (Sharaf et al., 2014).

$$\% \text{ inhibitions} = [(A_c - A_s) / A_c] \times 100$$

A_c is the absorbance value of the control and A_s is the absorbance value of the extract.

Determination of Anthelmintic Activity

The anthelmintic activity of the plant extract was determined by Dash et al. (2002) method was modified. *Tubifex tubifex*, which is in the Annelida group, and is anatomically and physiologically similar to human intestinal worms, was used in the experiment. Aquarium worms such as *T. tubifex* are widely used for the initial evaluation of anthelmintic compounds in vitro due to their easy availability. *T. tubifex* was collected from the canals in the Köyceğiz district of Muğla. *T. tubifex* average size is around 1-2 cm. 20 ml solutions prepared at different concentrations (2.5, 5, 10, 20 mg/mL) by dissolving the plant extracts in distilled water were poured into Petri dishes. Later, 6 of these worms were placed inside. Albendazole (10 mg/mL) was used as the reference standard. Distilled water was used as a negative control. The time taken for paralysis and death was then noted in minutes. The mean duration of paralysis at which movement was lost or no movement could be observed was noted, except when the worms were vigorously swayed. The time of death of each worm was recorded after it was determined that the worms did not move when shaken or externally stimulated.

Statistical analysis

All assays were performed in 3 replicates. The mean \pm standard error was analyzed with Microsoft Excel. In studies conducted to determine free radical scavenging activity, the IC₅₀ value was calculated using the Minitab 16 statistical program.

Results and Discussion

The potential antioxidant activity of methanol extract obtained from *I. graveolens* species was determined by β -carotene/linoleic acid, FRAP, and CUPRAC methods (Table 1). It was determined that the extract (27.88 \pm 3.86%) exhibited a lower % inhibition than BHA (94.68 \pm 0.28%) used as a standard in the β -carotene/linoleic acid method. The copper and iron reducing power capacities of the extract were calculated as Trolox equivalent. It was determined that it was 4.28 \pm 0.24/0.47 \pm 0.03 mg TE/g extract equivalent, respectively. There is a positive correlation between the total antioxidant activities of the extract and its phenolic content. Phenolic substances can inhibit the harmful structures of free radicals with hydroxyl groups in their structures. Within the scope of the study, the total phenolic and flavonoid substance amounts of the extract were determined (Table 1). The total phenolic amount was determined as gallic acid equivalent, and the total flavonoid amount was determined as quercetin equivalent. It was found to be 5.36 \pm 0.32 mg GAE/g and 3.49 \pm 0.05 mg QE/g extract equivalent, respectively.

Table 1. The Total Amount of Secondary Metabolites and Antioxidant Activity of the Extract

Sample/Assay	β -carotone/ Linoleic Acid (%)	FRAP (mg TE/g)	CUPRAC (mg TE/g)	Total Phenolic (mg GAE/g)	Total Flavonoid (mg QE/g)
<i>I. graveolens</i>	27,88 \pm 3,86	0,47 \pm 0,03	4,28 \pm 0,24	5,36 \pm 0,32	3,49 \pm 0,05
BHA	94,68 \pm 0,28	-	-	-	-

Ceyhan et al. (2021), antioxidant activities of 11 *Inula* L. species, DPPH (58.99-188.22 mg TE/g), ABTS (90.51-220.97 mg TE/g), CUPRAC (169.88-460.53) mg TE/g, FRAP (81.57-237.99 mg TE/g), metal chelation (8.31-25.39 mg EDTA/g), Phosphomolybdenum (1.55-2.49 mmol TE/g) methods were investigated. They found that the extracts exhibited significant antioxidant capacity. In a study, they determined the total phenolic content as well as the DPPH and ABTS scavenging activities of *I. viscosa* species collected from Algeria. They determined that the scavenging activity was 14.1 \pm 1.3-24.2 \pm 1.0 μ g/mL in terms of IC₅₀ value. They revealed that the total phenolic amount was 299.1 \pm 34.5 mg GAE/g extract value (Brahmi-Chendouh et al., 2019). In another study on *I. viscosa*, DPPH free radical scavenging activity (157.72 \pm 6.45 μ M TE/g DW), oxygen radical absorbance capacity (4471.42 \pm 113.16 μ M TE/g DW), hydroxyl radical scavenging capacity (630.10 \pm 17.81 μ M) of ethanol extract TE/g DW and total phenolic content (285.77 \pm 3.68 mg GAE/g DW) were determined (Kheyar-Kraouche et al., 2018). Mohti et al. (2020) determined the antioxidant activity of the extracts obtained from the leaves and flower buds of *I. viscosa*, which they collected from Morocco, using different solvents and

methods. They determined that the highest scavenging activity was $54.24 \pm 0.21 \mu\text{g/mL}$ (IC_{50}) flower bud (Sox-EtOH) extract. In another study, Imouizzer, Sefrou and Taounate investigated the antioxidant activities and total substance content of the ethanol and ethyl acetate extracts of *I. viscosa* collected. They revealed that *I. viscosa* extracts have significant antioxidant activities. They found that the highest amount of phenolic was in the ethanol extract, while the amounts of flavonoids were equal in the extracts (Chahmi et al., 2015). Gökbulut et al. (2013) determined the potential antioxidant activity of water, methanol, and ethyl acetate extracts obtained from leaves, flowers, and roots of 3 different *Inula* L. species collected from different regions of Anatolia by DPPH and ABTS methods. The highest scavenging activity was found in *I. helenium* flower methanol ($0.14 \pm 0.06 \text{ mg/mL}$, IC_{50}) extract and flower water extract ($0.05 \pm 0.02 \text{ mg/mL}$, IC_{50}), respectively. In a study, DPPH free radical scavenging antioxidant activity and total phenolic content of *I. crithmoides* hexane, methylene chloride, and methanol extracts were determined. They revealed that the methanol extract has both the highest activity and the highest amount of phenolic substances (Bucchini et al., 2015). Albayrak et al. (2015) investigated the antioxidant activities (DPPH, Phosphomolybdenum, β -carotene/linoleic acid) and total phenolic contents of methanol, ethanol, water, and ethyl acetate extracts obtained from different taxa of *I. helenium*. Total phenolic amounts vary between 4.18 ± 0.0 - $102.91 \pm 0.6 \text{ mg GAE/g}$. They determined that *I. helenium* ssp. methanol extract exhibited the highest activity. Tredafilova et al. (2020) examined the antioxidant activities (DPPH) and phenolic amounts of six different *Inula* L. species collected from Bulgaria in a study they conducted. They found the highest activity ($69.41 \pm 0.55\%$) and phenolic substance content ($119.92 \pm 0.95 \text{ mg GAE/g}$) in *I. ensifolia* flower methanol extract. Ozkan et al. (2019) investigated the antioxidant activities (DPPH) and total substance amounts (Phenolic, Flavonoid) of water and methanol extracts obtained from *I. viscosa* species they collected from Manisa. They determined that the highest amount of phenolic ($107.0 \pm 0.0001 \text{ mg GAE/g}$) and flavonoid ($158.35 \pm 0.0002 \text{ mg CE/g}$) was in the methanol extract. The methanol extract (93.78 ± 0.0003) showed the highest activity in terms of DPPH free radical scavenging activity of the extracts at different concentrations. Asraoui et al. (2021) determined the antioxidant activity and total phenolic and flavonoid content of *I. viscosa* leaf extracts of methanol, ethyl acetate, and chloroform. The extracts showed gallic acid and catechin equivalence as high as $87.2 \pm 0.50 \text{ mg GAE/g}$ and $78.6 \pm 0.55 \text{ mg CE/g}$, respectively. They found that ethyl acetate extract exhibited higher antioxidant activity in DPPH ($0,6 \pm 0,03 \mu\text{g/mL}$; IC_{50}), ABTS ($8,6 \pm 0,08 \mu\text{g/mL}$), and FRAP ($634,8 \text{ mg} \pm 1,45 \text{ AAE/g}$) methods compared to methanol and chloroform.

The acetylcholinesterase and tyrosinase enzyme inhibitory activities of the extract were determined (Table 2, Table 3). In both studies, an increase in % inhibition is observed depending on the increase in concentration. It exhibited lower percent inhibition than galantamine ($89.41 \pm 0.05\%$) and kojic acid ($73.93 \pm 0.10\%$) used as standard.

Table 2. Acetylcholinesterase Enzyme Inhibitory Activity of the Extract (% inhibition)

Plant/Standard	0,025 mg/mL	0,05 mg/mL	0,01 mg/mL	0,2 mg/mL	$\text{IC}_{50}(\text{mg/ml})$
<i>I. graveolens</i>	-	13.01 ± 0.24	22.57 ± 0.62	37.83 ± 0.52	0.228 ± 0.002
Galantamine	73.09 ± 0.05	79.08 ± 0.47	84.76 ± 0.08	89.41 ± 0.05	-

Table 3. Tyrosinase Enzyme Inhibitory Activity of the Extract (% inhibition)

Plant/Standard	0,025 mg/mL	0,05 mg/mL	0,01 mg/mL	0,2 mg/mL	$\text{IC}_{50}(\text{mg/ml})$
<i>I. graveolens</i>	-	11.80 ± 0.12	21.04 ± 0.34	61.73 ± 0.05	0.172 ± 0.001
Kojic acid	45.52 ± 0.14	54.81 ± 0.17	61.73 ± 0.05	73.93 ± 0.10	0.037 ± 0.003

In a study, acetylcholinesterase (3.56 - 5.13 mg GALAE/g), butyrylcholinesterase (1.49 - 7.34 mg GALAE/g), tyrosinase (112.31 - 122.13 mg KAE/g), α -glucosidase (0.77 - 2.08 mmol) of 11 *Inula* L. species (ACAE/g) and α -amylase (0.73 - 0.90 mmol ACAE/g) were found to be active enzyme inhibitors (Ceyhan et al., 2021). In a study, acetylcholinesterase and tyrosinase enzyme inhibitory activities of 6 different *Inula* species were investigated. The highest acetylcholinesterase enzyme inhibitory activity was observed in *I. ensifolia* flower methanol (17.0%) extract. *I. bifrons* flower methanol (0.123 ± 0.000

mg/mL, IC₅₀) extract exhibited the highest tyrosinase enzyme inhibitory activity (Trendafilova et al., 2020). In a study, the enzyme inhibitory activities of α -glucosidase and α -amylase of leaf methanol, ethyl acetate, and chloroform extracts of *I. viscosa* species were investigated. Methanol extract showed the highest α -glucosidase (22.3 \pm 2.82 mg/mL, IC₅₀) and α -amylase (27%) enzyme inhibitory activity (Asraoui et al., 2021). In a study, acetylcholinesterase (38.5 mg/mL, IC₅₀), butyrylcholinesterase (34.65 mg/mL, IC₅₀), glutathione S-transferase (77.0 mg/mL, IC₅₀) and α -glucosidase (40.76 mg/mL, IC₅₀) enzyme inhibitory activities were determined (Bursal et al., 2021). Güçlü et al. (2022) determined that acetylcholinesterase (75.94 \pm 0.09%), butyrylcholinesterase (78.63 \pm 0.02%), α -glucosidase (53.26 \pm 0.12%), α -amylase (18.07 \pm 0.03%) and tyrosinase (59.21 \pm 0.08%) enzyme inhibitory activities of *I. auccheriana* ethanol (80%) ethanol extract. In a study, acetylcholinesterase, butyrylcholinesterase, and α -amylase enzyme inhibitory activities of *I. salicina* extracts prepared with different solvents were investigated. The highest α -amylase (0.290 \pm 0.001 mg/mL, IC₅₀) and acetylcholinesterase (0.577 \pm 0.012 mg/mL, IC₅₀) enzyme inhibitory activities were observed in ethyl acetate extract. They found that the highest butyrylcholinesterase enzyme inhibitory activity was in methanol (0.279 \pm 0.004 mg/mL, IC₅₀) extract (Yıldırım et al., 2022). Although the methanol extract exhibited lower inhibition than the standards in enzyme inhibitor assays, the results were moderate because it was tested at the same concentrations as the pure standard compounds.

The anthelmintic activity of the extract at different concentrations (2.5, 5, 10, 20 mg/mL) was determined by determining the duration of action (paralysis and death) on *Tubifex tubifex* helminths (Table 4). Depending on the increase in concentration, there was a decrease in the duration of paralysis and death. Concentrations of 10 mg/mL and 20 mg/mL exhibited anthelmintic activity near andazole used as a positive control.

Table 4. Anthelmintic Activity of *Inula Graveolens* Methanol Extract

	Concentration (mg/mL)	P (min)*	D (min)**
I. graveolens	2,5	18	32
	5	13	23
	10	7	12
	20	3	5
Pozitive Control***	10	4	10
Negative Control****	-	-	-

*P: Paralysis time for worms, **D: Death time for worms, *** Positive Control: Andazol®, ****Negative Control: Distilled water.

In a study, they investigated the anthelmintic activity (*Panagrellus redivivus*/Tubifex worms) of different concentrations (2, 2.5, 3 mg/mL) of methanol extract obtained from *Blumea lacera* species in the Asteraceae family. They found that the extract exhibited an anthelmintic activity close to levamisole, which is used as a standard (Haque et al., 2014). Das et al. (2011) investigated the anthelmintic activity of Tamarindus indica leaf, bark ethanol, and water extracts (*Pheretima posthuma*, *Tubifex tubifex*). Extracts from the bark showed activity close to the standard (Piperazine) in both worms. It was determined that the bark methanol extract at a concentration of 15 mg/mL (death time: 20.66 \pm 1.33) exhibited a higher anthelmintic activity than Piperazine (45.33 \pm 1.20). In a study, the anthelmintic activity (*Tubifex tubifex*) of *Hopea odorata* leaf methanol, ethanol, and water extracts was investigated. The methanol extract (20 mg/mL) exhibited an anthelmintic activity close to the standard Levamisole (1 mg/mL) (Hossain et al., 2015). Dey and Ghosh (2010) investigated the anthelmintic activity of *Amorphophallus paeoniifolius* methanol extract at different concentrations (25,50,100 mg/mL) on *Pheretima posthuma* and *Tubifex tubifex* in their study. The extract at a concentration of 100 mg/mL (time to death: 38.66 \pm 2.906) showed higher anthelmintic activity than Piperazine at a concentration of 10 mg/mL (time to die: 64 \pm 0.881). In a study, the anthelmintic (*Pheretima posthuma*, *Tubifex tubifex*) activity of different concentrations (25, 50, 100 mg/mL) of *Tragia involucrata* leaf methanol extract was investigated. It was observed that the death and paralysis

times were shortened due to the increase in concentration. They found that the paralysis time at the highest concentration was 19.33 minutes, and the dead time was 40.00 minutes.

Conclusion

Plants have always been used for medicinal purposes as well as for ethnobotanical use. Species found in the genus *Inula* L. have been very valuable in this respect. This study on *I. graveolens* shows us that the extracts of the species are at moderate levels in terms of phenolic component, although they do not have high activity. Although methanol extracts did not exhibit as high activity as the standards, data close to them were obtained in the studies conducted to determine the enzyme inhibitory activity on acetylcholinesterase and tyrosinase. The results obtained in the anthelmintic studies revealed that the lethality of the species is high. This may be due to the effect of glycoside saponins on the structure of the plant. All these revealed that *I. graveolens* is a species that can be evaluated pharmacologically in future studies, as it has antioxidant, enzyme inhibitor, and anthelmintic effects.

Acknowledgment

This study was supported by TUBITAK as 2209 A TUBITAK License project (Application number: 1919B012102904).

Author Contribution

Ramazan Mammadov, wrote the project and conducted and directed the studies. *Bayram Kaya*, contributed to all the works as the project coordinator. *İlayda Cansu Atıcı*, participated in the laboratory work. *Mehmet Özgür Atay*, made a direct contribution to the work and writing of the article. All authors have read and approved the article.

Ethics Statement

There are no ethical issues with the publication of this article.

Conflict of Interest

The authors state that there is no conflict of interest.

ORCID

Ramazan Mammadov  <https://orcid.org/0000-0003-2218-5336>

Bayram Kaya  <https://orcid.org/0000-0001-5089-8363>

İlayda Cansu Atıcı  <https://orcid.org/0000-0003-0511-3840>

Mehmet Özgür Atay  <https://orcid.org/0000-0002-3627-448X>

References


- Abdioğlu, D. M. (2019). *Bazı meşe gallerinin kolinesteraz, tirozinaz ve üreaz enzim inhibisyonu ile antioksidan aktivitesinin belirlenmesi* [Master's thesis]. Batman University.
- Albayrak, S., Korkmaz-Çınar, A. E., Paksoy, M. Y., & Aksoy, A. (2015). An investigation on antioxidant and antimicrobial activities of four *Inula helenium* L. taxa. *Iranian Journal of Science and Technology (Sciences)*, 39(4), 473-483. <http://doi.org/10.22099/IJSTS.2015.3398>
- Amarowicz, R., Pegg, R. B., Rahimi-Moghaddam, P., Barl, B., & Weil, J. A. (2004). Free-radical scavenging capacity and antioxidant activity of selected plant species from the Canadian prairies. *Food Chemistry*, 84(4), 551-562. [http://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00278-4](http://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00278-4)
- Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M. & Karademir, S. E. (2004). Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence

- of neocuproine: CUPRAC method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(26), 7970-7981. <https://doi.org/10.1021/jf048741x>
- Aryal, B., & Suárez, Y. (2019). Non-coding RNA regulation of endothelial and macrophage functions during atherosclerosis. *Vascular Pharmacology*, 114, 64-75. <https://doi.org/10.1016/j.vph.2018.03.001>
- Asraoui, F., Kounnoun, A., Cacciola, F., El Mansouri, F., Kabach, I., Oulad El Majdoub, Y., ... & Louajri, A. (2021). Phytochemical profile, antioxidant capacity, α -amylase, and α -glucosidase inhibitory potential of wild Moroccan inula viscosa (L.) Aiton leaves. *Molecules*, 26(11), 3134. <https://doi.org/10.3390/molecules26113134>
- Benzie, I. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Brahmi-Chendouh, N., Piccolella, S., Crescente, G., Pacifico, F., Boulekbache, L., Hamri-Zeghichi, S., ... & Pacifico, S. (2019). A nutraceutical extract from Inula viscosa leaves: UHPLC-HR-MS/MS-based polyphenol profile and antioxidant and cytotoxic activities. *Journal of food and drug analysis*, 27(3), 692-702. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.11.006>
- Bucchini, A., Ricci, D., Messina, F., Marcotullio, M. C., Curini, M., & Giamperi, L. (2015). Antioxidant and antifungal activity of different extracts obtained from aerial parts of Inula crithmoides L. *Natural Product Research*, 29(12), 1173-1176. <https://doi.org/10.1080/14786419.2014.983102>
- Bursal, E., Yılmaz, M. A., İzol, E., Türkan, F., Atalar, M. N., Murahari, M., ... & Ahmad, M. (2021). Enzyme inhibitory function and phytochemical profile of Inula discoidea using in vitro and in silico methods. *Biophysical Chemistry*, 277, 106629. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2021.106629>
- Ceylan, R., Zengin, G., Mahomoodally, M. F., Sinan, K. I., Ak, G., Jugreet, S., ... & Yılmaz, M. A. (2021). Enzyme inhibition and antioxidant functionality of eleven Inula species based on chemical components and chemometric insights. *Biochemical Systematics and Ecology*, 95, 104225. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2021.104225>
- Chahmi, N., Anissi, J., Jennan, S., Farah, A., Sendide, K., & El Hassouni, M. (2015). Antioxidant activities and total phenol content of Inula viscosa extract selected from three regions of Morocco. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 5(3), 228-233. [https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(15\)30010-1](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(15)30010-1)
- Çölgeçen, Ş, H. (2015). Bitki sekonder metabolitlerinin biyoreaktörlerde üretilmesi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 8(2), 09-29. <https://dergipark.org.tr/en/pub/derleme/issue/35095/389337>
- Das, S. S., Dey, M., & Ghosh, A. K. (2011). Determination of the anthelmintic activity of the leaf and bark extract of Tamarindus indica Linn. *Indian journal of pharmaceutical sciences*, 73(1), 104. <https://doi.org/10.4103/0250-474X.89768>
- Dash, G. K., Suresh, P., Kar, D. M., Ganpaty, S., & Panda, S. B. (2002). Evaluation of Evolvulus Alsinoides Linn for anthelmintic and antimicrobial activities. *Journal of Natural Remedies*, 2(2), 182-185. <https://doi.org/10.18311/jnr/2002/146>
- Dey, Y. N., & Ghosh, A. K., (2010). Evaluation of the anthelmintic activity of the methanolic extract of Amorphophallus paeoniifolius tuber. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 1(11), 117. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113340164>
- Ekor, M. (2014). The growing use of herbal medicines: issues relating to adverse reactions and challenges in monitoring safety. *Frontiers in Pharmacology*, 4, 177. <https://doi.org/10.3389/fphar.2013.00177>

- Ellman, G. L., Courtney, K. D., Andres Jr, V., & Featherstone, R. M. (1961). A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochemical Pharmacology*, 7(2), 88-95. [https://doi.org/10.1016/0006-2952\(61\)90145-9](https://doi.org/10.1016/0006-2952(61)90145-9)
- Gökbulut, A. Y., & Şarer, E. T. D. (2011). Türkiye’de yetişen bazı *Inula* L. Türleri üzerinde farmakognozik araştırmalar [Doctoral dissertation]. Ankara University.
- Gökbulut, A., Özhana, O., Satılmış, B., Batçioğlu, K., Günal, S., & Şarer, E. (2013). Antioxidant and antimicrobial activities, and phenolic compounds of selected *Inula* species from Turkey. *Natural Product Communications*, 8(4), 475-478. <https://doi.org/10.1177/1934578X1300800417>
- Güçlü, G., Ergül, M., Uçar E., Eruygur, N., Ataş M., & Akpulat, H. A. (2022). Anticancer, antioxidant, antimicrobial, and enzyme inhibitory activities Of *Inula Aucheriana*. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(5), 946-954. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.985837>
- Haque, M. A., Kamal, A. M., & Chowdhury, K. A. A. (2014). Phytochemical investigation and assessment of in vivo and in vitro pharmacological activities of *blumea lacera* (burm. f.) dc. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 8(3), 120-130. https://wjpr.s3.ap-south-1.amazonaws.com/article_issue/1425125643.pdf
- Hossain, M. M., Kabir, M. S. H., Chowdhury, T. A., Hasanat, A., & Chakrabarty, N. (2015). Anthelmintic effects of different extracts of *Hopea odorata* leaves on *Tubifex tubifex* worm using in vitro method and their condensed tannin content. *Journal of Pharmaceutical Research International*, 8(3), 1-7. <https://doi.org/10.9734/BJPR/2015/19064>
- Jallali, I., Zaouali, Y., Missaoui, I., Smeoui, A., Abdelly, C., & Ksouri, R. (2014). Variability of antioxidant and antibacterial effects of essential oils and acetonic extracts of two edible halophytes: *Crithmum maritimum* L. and *Inula crithmoides* L. *Food Chemistry*, 145, 1031-1038. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.034>
- Karabulut, H., & Gülay, M. Ş. (2016). Serbest radikaller. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(1), 50-59. <https://dergipark.org.tr/en/pub/maeusabed/issue/24655/260783>
- Karan, T., Yildiz, I., Aydın, A., & Erenler, R. (2018). Inhibition of various cancer cells proliferation of Bornyl acetate and essential oil from *Inula graveolens* (Linnaeus) Desf. *Records of Natural Products*, 12(3), 274-284. <https://doi.org/10.25135/rnp.30.17.09.057>
- Kheyar-Kraouche, N., da Silva, A. B., Serra, A. T., Bedjou, F., & Bronze, M. R. (2018). Characterization by liquid chromatography–mass spectrometry and antioxidant activity of an ethanolic extract of *Inula viscosa* leaves. *Journal Of Pharmaceutical And Biomedical Analysis*, 156, 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.04.047>
- Mohti, H., Taviano, M. F., Cacciola, F., Dugo, P., Mondello, L., Marino, A., ... & Miceli, N. (2020). *Inula viscosa* (L.) Aiton leaves and flower buds: Effect of extraction solvent/technique on their antioxidant ability, antimicrobial properties, and phenolic profile. *Natural Product Research*, 34(1), 46-52. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1569659>
- Ozkan, E., Karakas, F. P., Yildirim, A. B. B., Tas, I., Eker, I., Yavuz, M. Z., & Turker, A. U. (2019). Promising medicinal plant *Inula viscosa* L.: Antiproliferative, antioxidant, antibacterial, and phenolic profiles. *Progress in Nutrition*, 21(3), 652-661. <https://doi.org/10.23751/pn.v21i3.7186>
- Patil, B. S., Raut, I. D., Bhutkar, M. A., & Mohite, S. K. (2015). Evaluation of the anthelmintic activity of leaves of *Tragia involucrata* Linn. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 4(1), 155-159. <https://www.phytojournal.com/archives/2015/vol4issue1/PartC/4-1-35.1-804.pdf>
- Petrovska, B. B. (2012). Historical review of medicinal plants usage. *Pharmacognosy Reviews*, 6(11), 1-5. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.95849>

- Sellem, I., Chakchouk-Mtibaa, A., Zaghden, H., Smaoui, S., Ennouri, K., & Mellouli, L. (2020). Harvesting season-dependent variation in chemical composition and biological activities of the essential oil obtained from *Inula graveolens* (L.) grown in Chebba (Tunisia) salt marsh. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(3), 4835-4845. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.013>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810-853. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012>
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Tiring, G., Satar, S., & Özkaya, O. (2020). Sekonder metabolitler. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 35(1), 203-215. <https://dergipark.org.tr/en/pub/bursauludagziraat/issue/58016/721701>
- Trendafilova, A., Ivanova, V., Rangelov, M., Todorova, M., Ozek, G., Yur, S., ... & Topouzova-Hristova, T. (2020). Caffeoylquinic acids, cytotoxic, antioxidant, acetylcholinesterase, and tyrosinase enzyme inhibitory activities of six *Inula* species from Bulgaria. *Chemistry & Biodiversity*, 17(4), e2000051. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202000051>
- Turan, M., & Mammadov, R. (2018). Antioxidant, antimicrobial, cytotoxic, larvicidal, and anthelmintic activities and phenolic contents of *Cyclamen alpinum*. *Pharmacology & Pharmacy*, 9(4), 100-116. <https://doi.org/10.4236/pp.2018.94008>
- Yıldırım, A., Ali, Ş. E. N., Tuysuz, M., Tan, A. S. B., Şenkardeş, İ., & Bitiş, L. (2022). In vitro investigation of antimicrobial, enzyme inhibitory and free radical scavenging activities of *Inula salicina* L. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 6(3), 389-395. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2022.3.7>

Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Borofen Üretimi ve Karakterizasyonu

Erhan Özkan¹ 

¹Aryom İleri Teknolojik Ürünler, İzmir

Geliş Tarihi / Received Date: 29.03.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 10.07.2023

Öz

Grafenin sentezlenmesinin ardından iki boyutlu (2D) malzemeler hakkında çalışmalar devam etmiş ve bu çalışmalar neticesinde borofenin 2D sihirli bir süper ince malzeme olduğu keşfedilmiştir. Borofen üzerindeki çalışmaların çoğu halen teorik olarak devam etmekle birlikte çok az deneysel çalışma gözlenmiştir. Üstün özellikleri sebebiyle gelecekte bu malzemenin farklı teknolojilerde çokça karşımıza çıkacağı ön görülmektedir. Bu çalışmada elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bakır yüzeylerin kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile sentezlenmiş borofen ile kaplanmasına ait parametreler ve kaplamaların karakterizasyonuna etkileri araştırılmıştır. İnce bakır filmler altlık malzemesi olarak seçilmiş ve 950-1035 °C sıcaklık aralıklarında CVD yöntemi ile 1/1 gravimetrik oranda metalik bor ve boroksit toz karışımı, 50 mili Tor basınç ve 100 sccm hidrojen gazı altında borofen sentezi gerçekleştirilmiştir. Üretilen borofen ince filmlerin karakterizasyon çalışmasında Raman Spektrometresi'nden faydalanılmış ve 181 cm⁻¹ ile 1148 cm⁻¹deki karakteristik bantları gözlenmiştir. Sentezlenen ince film tabakaların yapı kontrollerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak nano yapı doğrulanmıştır. Kaplamaların elektriksel iletkenlikleri dört nokta prob tekniği ile test edilmiş, artan sıcaklık ile elektriksel direncin arttığı gözlenmiş ve 1035 °C'den sonra iletkenliğin tamamen ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda borofen film tabakalarının üretilmesi ve karakterizasyon çalışmaları için gerekli olan parametreler tanımlanarak kayıt altına alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: borofen, CVD, Raman, SEM

Borophene Production and Characterization by Chemical Vapor Deposition Method

Abstract

After the synthesis of graphene, studies on two-dimensional (2D) materials continued, and resulting that borophene is a magic 2D superfine material. While most of the study on borophene is still theoretical, and few experimental studies have been observed. In this study, the parameters of the copper coating surfaces, which are widely used in electronic applications, with borophene synthesized by chemical vapor deposition (CVD) method and the coatings' characterization were investigated. Thin copper films were chosen as the substrate material and borophene synthesis was carried out by CVD method with a 1/1 gravimetric ratio of metallic boron and boroxide powder mixture, 50 milliTor pressure and 100 sccm hydrogen gas at a temperature range of 950-1035 °C. Characteristic borophene bands at 181 cm⁻¹, and 1148 cm⁻¹ were observed by Raman Spectrometry. The nanostructure was confirmed by using Scanning Electron Microscopy (SEM). The electrical conductivity was tested with the four-point probe technique, and it was observed that the electrical resistance increased with increasing temperature, the conductivity completely disappeared at 1035 °C. As a result of the study, the parameters required for the production and characterization studies of borophene film layers were defined and recorded.

Keywords: borophene, CVD, Raman, SEM

Giriş

Malzemelerin özelliklerini iyileştirmek ve daha küçük hacimde daha yüksek performans elde etmek geçmişten günümüze gelen çalışmaların temelini oluşturmaktadır (Zhou vd., 2021). İki boyutlu (2D) malzemelerin sergiledikleri davranışlar daha detaylı araştırıldığında üstün entegrasyon potansiyelleri keşfedilmeye başlanmıştır. Şüphesiz ki son zamanlarda en çok rağbet gören malzemelerin başında grafen gelmektedir (Zhang vd., 2019). Grafenin gördüğü bu rağbetin sebepleri; güçlü, esnek, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik özelliklerini bünyesinde barındırmasıdır (Tai vd., 2015).

Grafenle başlayan 2D malzemelere olan ilginin artması ile bu alandaki bilimsel çalışmalara ağırlık verilmiş ve bu konudaki yatırımlar birçok kurum ve kuruluşun ana gündem maddesi haline gelmiştir (Tan vd., 2015). Günümüzde 2D malzemelerin farklı sektörlerde kullanımına ilişkin araştırmalar artan bir hızla devam etmektedir. İleri nesil elektrokimyasallar, sensörler, piller, transistörler, fotokatalizörler ve fotovoltajik teknolojideki gelişmeler 2D malzemeler için bir potansiyel oluşturmuştur (Mohan vd., 2018). Bu malzemeler detaylı olarak incelenmeye başlandığında; yüksek teorik yüzey alanı, son derece yüksek elektron hareketliliği ve termal iletkenlik ile karşılaşmıştır. Ayrıca çok katmanlı yüksek esneklik ve şeffaf özellikler göstermesi neticesinde bilim ve sanayi dallarında geniş bir ilgi kitlesiyle buluşmuştur (Wang vd., 2016).

DeneySEL olarak çeşitli 2B malzemeler üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir. Fosforen, germanen, g-C₃N₄, metal-organik çerçeveler (Wang vd., 2016), kovalent organik çerçeveler (Shukla vd., 2017), antimonen (Li vd., 2017), organik-inorganik hibrit perovskitler (Rana vd., 2020), molibden disülfid ultra ince nano tabakalar (Bergmann vd., 2002) ve silikon gibi iki boyutlu birçok malzeme bilim insanlarının gündemine hızlı bir şekilde giriş yapmış bulunmaktadır (Shahbazi vd., 2016).

2B malzemelerden borofen ise oldukça kritik bir öneme sahiptir (Xu vd., 2016). Xiamen Üniversitesi'nin 2015 yılında gerçekleştirdiği bildiriye, borofenin elektronik ve süperiletken sistemlerinde yaygın olarak kullanılması planlanan grafenin önüne geçecek bir malzeme olduğu tespit edilmiştir (Wang vd., 2019). Yapılan araştırmalar neticesinde borofenin, çelikten yaklaşık iki yüz kat daha mukavemetli olduğu ifade edilen grafenden bile daha mukavemetli ve esnek olduğu ön görülmüştür (Mannix vd., 2018).

Massachusetts Institute of Technology kendi web sayfasında borofenle ilgili araştırmayı "Üzgünüz grafen artık herkesi heyecanlandıran yeni mucizevi malzeme borofen" başlığı ile duyurmuş bulunmaktadır (Meng vd., 2017). Şüphesiz borofenin bu şekilde gündeme gelmesi ülkemiz açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye, dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olmasıyla bu konuda lider durumdadır. Ülkemize en yakın bor rezervine sahip ülkelerin maksimum rezervleri bile ancak %7 mertebelerindedir (Yiğitbaşıoğlu, 2004).

Bor hakkında bir diğer önemli konu ise süper iletken teknolojilerinde kritik bir öneme sahip olan sıvı helyum rezervlerinin 50 yıl sonra tükenecek olmasıdır (Li vd., 2019). Bu amaçla sıvı helyumun yerini alması beklenen hidrojen atomlarının depolanmasında bor elementi kritik bir öneme sahiptir (Peng vd., 2016). Kendi başına yanıcı bir element olan hidrojenin bor ile yaptığı bileşikler alev almaz özelliktedir. Bor, NaBO₂.2H₂O'dan NaBH₄ hidrolizi yoluyla hidrojenin çevreye zarar vermeden elde edilebilmesi ve hidrojenin sağlıklı bir şekilde depolanabilmesi avantajlarının yanında yakıt pilleri için büyük bir potansiyeldir (Zhou vd., 2010).

Borla üretilen ve stratejik bir malzeme olarak değerlendirilmesi planlanan borofen ile ilgili geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırmaların neticesinde teorik çalışmalara ağırlık verildiği ancak deneysel çalışmaların sınırlı sayıda olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma ile literatürde henüz karşılaşılmamış olan CVD ile borofen sentezinde parametrelerin elektriksel ve yapısal özelliklere etkisi detaylı olarak okuyuculara aktarılmıştır. Böylece aynı deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilen sentez çalışmalarında değişen parametrelere bağlı olarak meydana gelen değişime ait özgün bir çalışma literatüre kazandırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde CVD ile borofen sentezinin detayları anlatılmış, oluşacak hataları engellemek adına geliştirilen transfer baskı tekniğinden faydalanılarak borofen tabakalarının karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Raman spektrometresi yardımıyla borofen

tabakasının yapısal karakterizasyonu tespit edilmiş ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımıyla nano yapı analizleri yapılmıştır. Dört nokta prob tekniği ile elektriksel direnç ölçümleri gerçekleştirilmiş, parametre ve yapılaraya göre karşılaştırmanın detayları aktarılmıştır.

Materyal ve Yöntem

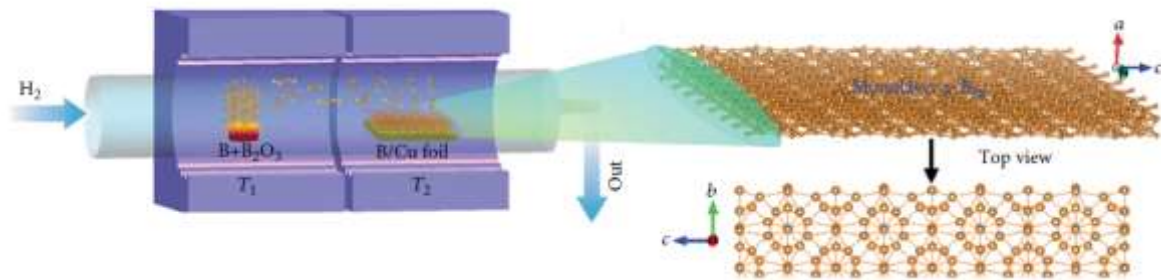
Borofen sentezi çalışmaları Protherm ASP 11/100/500 marka tüp fırının özellikleri iyileştirilerek CVD sistemine çevrilmesi ile gerçekleştirilmiştir. CVD sistemine ait görsel şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. CVD Sistemi

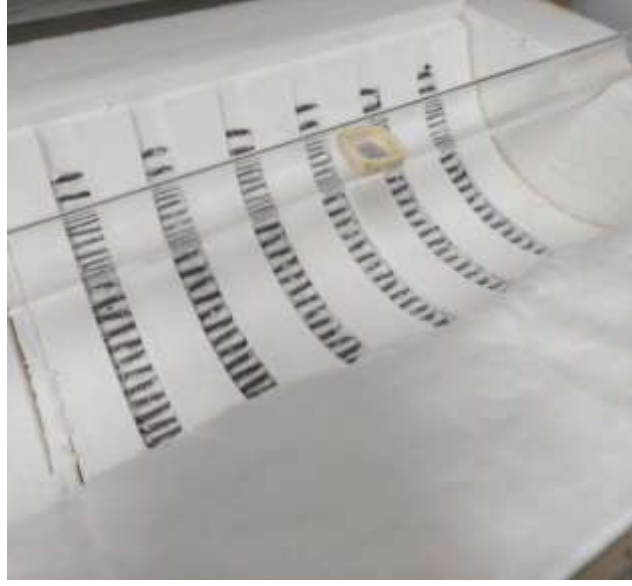
Bor kaynağı olarak metalik bor ve boroksit tozu, redüktif ortam için %99,9995 saflıkta hidrojen gazı (H_2), taşıyıcı gaz için saf argon gazı (Ar), 0,025 mm kalınlığında ve %99,8 saflığında bakır folyolar ise katalizör olarak kullanılmıştır.

İnce bakır levhalardan 5cmx5cm ebadında altlık malzemeler kesilmiştir. Bakır folyoların sentezleme öncesi yüzeylerinin temiz olması önem arz etmektedir. Folyolar üzerindeki borofen ince film kaplamalar; pürüzsüz, homojen ve kararlı yapıda olmalıdır. Bu amaçla bakır folyolar; aseton, izopropanol ve saf su ultrasonic banyolarından geçirilmiş ve ardından atmosferik ortamda azot gazı ile kurutulmuştur. Bu işlemin ardından bakır atıklar vakum odasına alınmıştır. Borofen sentezinin parametreleri için önceki grafen çalışmalarından, borofen optimizasyon derlemelerimden ve literatürde yer alan farklı çalışmalardan yararlanılmıştır. Bakır yüzeyinde oluşan oksitlerin temizlenmesi için 50 mTor'luk basınç ve 100 sccm (molar akış hızını ifade eden standard cubic centimeters per minute teriminin kısaltmasıdır) hidrojen gazı atmosferinde düzenek 1035 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Sistemin bu şartlar altında 1035 °C'ye ulaşması ve bakır yüzeyinde oluşan oksitlerin giderilme süresi 85 dakika olarak kaydedilmiştir. Şekil 2'de bu sentez için tasarlanmış hücrenin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2. Borofen Sentezi için Tasarlanmış İki Bölmeli CVD Sistem Akış Şeması (Xie, 2020).

100 mg B_2O_3 ve 100 mg metalik bor tartılarak küçük bir pota içerisinde sisteme yüklenmiştir. Şekil 3'te potanın sistemin içerisine yerleştirilmiş halleri gösterilmektedir.



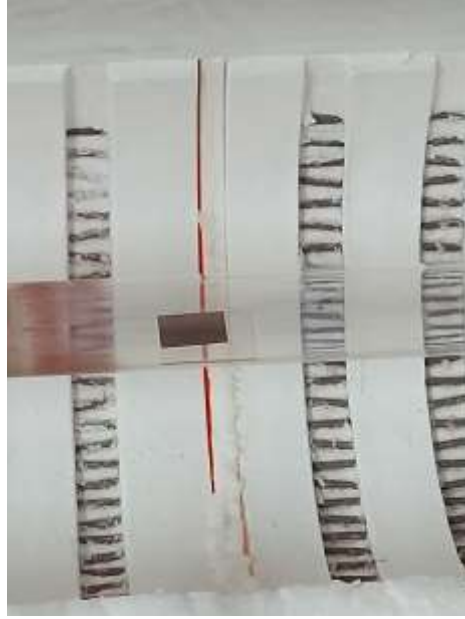
Şekil 3. Metalik Bor ve Boroksit Karışımının Sistem İçerisindeki Konumu

Fırının oda sıcaklığından $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar yükselmesi esnasında H_2 gazı akış yönünde önce pota sonra bakır folyo gelecek şekilde sisteme besleme gerçekleştirilmiştir. Burada amaç B_2O_3 'teki oksijenin H_2 ile indirgenerek saf bor elde edilmesini sağlamaktır. Şekil 4'te bakır folyo ve $B+B_2O_3$ karışımının yer aldığı potanın CVD sistemi içerisindeki yerleşimi gösterilmektedir.



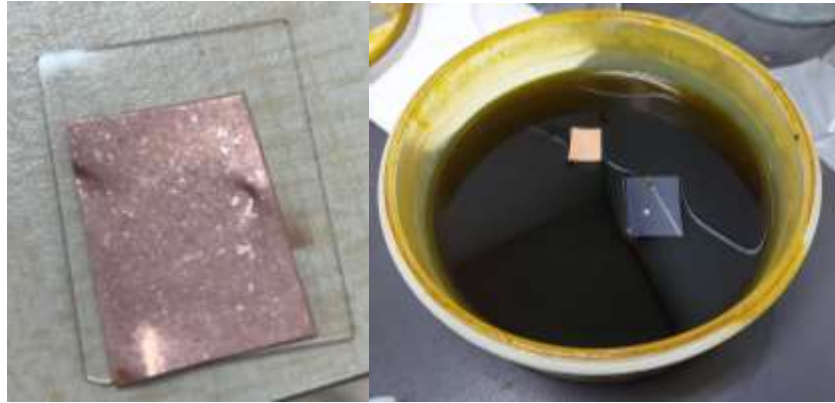
Şekil 4. CVD'de Borofen Sentezi

50 dakika sonunda sentezlenme işlemi sonuçlanmıştır. Şekil 5'te bakır folyonun sistem üzerindeki yerleşimi ve borofen sentezlenme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 5. Bakır Folyo Üzerinde Meydana Gelen Kaplamanın CVD Sistemindeki Yerleşimi

Bakır folyo üzerinde sentezlenen kaplamaların karakterizasyonu 532.08 nm dalga boylu Xplora Plus marka Raman spektrometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların yapı ve elektriksel özelliklerinin tespit edilebilmesi için altlık malzeme ve kaplamanın ayrılması aşamasına geçilmiştir. Altlık malzemelerden bakır üzerinde sentezlenen borofen katmanını ayırmak için transfer baskı yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemde CVD ile sentezlenen borofen filmlerin üzeri 1 µm kalınlığa sahip fotodirenç tabaka ile kaplanır. Daha sonra elastomerik bir malzeme olan PDMS (Poli dimetil siloksan) polimeri fotodirenç kaplı bakır folyo üzerine uygulanır. Bu aşama sonrasında 1M'lık $FeCl_3$ çözeltisi içerisinde bakır tabakası tamamen eritilir. Bakır tamamen eritildikten sonra PDMS altlık malzeme üzerinde ısıtılarak uygulanır. PDMS'in yüzey enerjisinin sıcaklık ile ters orantılı çalışması sebebiyle artan sıcaklık ile üzerindeki filmi altlık üzerinden kolaylıkla bırakır. Şekil 6'da borofen filminin altlıktan ayrışmasına ait görseller yer almaktadır.



Şekil 6. Borofen Tabakasının Bakır Altlıktan Ayrışması

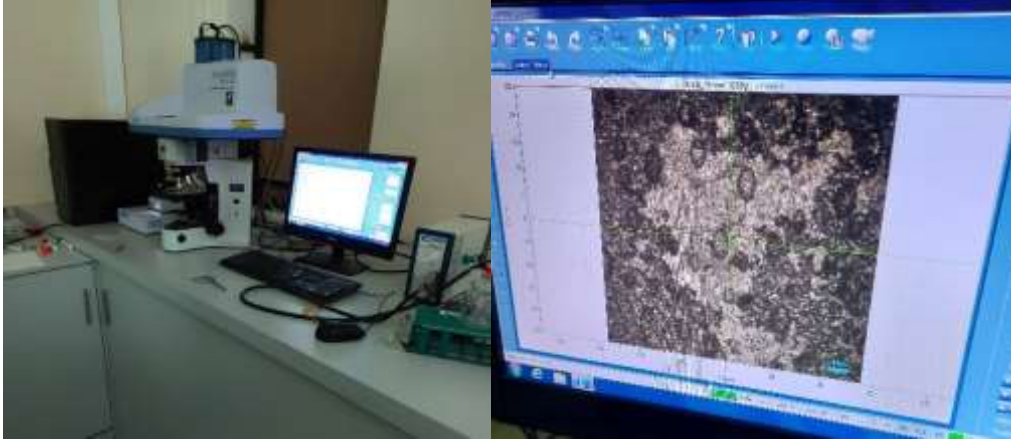
Bakır altıklarından ayrılan ve şeffaf bir fiziksel yapıda olan borofen sentezlerine ait yapı analizleri 500 nA prob akımı, 6Å çözünürlüğe sahip FESEM JEOL JSM 7900F cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların elektriksel iletkenlikleri ASTM D4935-10 standardına göre test edilmiştir. Rohde&Schwarz ZVL-Network analizörü ile elektromanyetik sinyal üreten ve geri dönüşün ölçüldüğü dört nokta prob testi gerçekleştirilmiştir.

Bulgular ve Tartışma

Bakır folyo üzerinde sentezlenen borofen ince film tabakalarının karakterizasyonu için aşağıda başlıklar halinde verilen analizler gerçekleştirilmiştir.

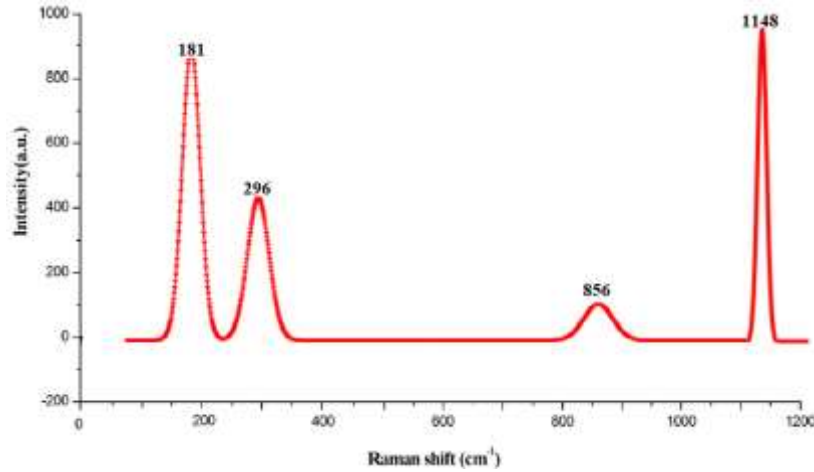
Spektroskopi Analizleri

Şekil 7’de, bakır üzerinde sentezlenen borofen numunesinin Raman Mikroskobu ile gerçekleştirilen görseli yer almaktadır. Bu testin ilk aşamasında kaplamada analize uygun olan yüzeyin tespiti gerçekleştirilir. Optik mikroskopta yapılan yüzey taramasının ardından uygun görünen noktada spektrometre analizi yapılır.



Şekil 7. Borofen Kaplamaların Raman Mikroskobu Görseli

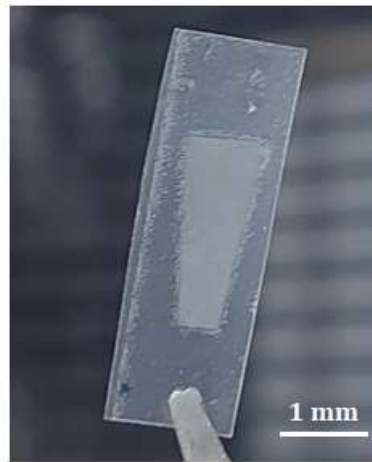
Şekil 8’de borofene ait Raman Saçılması gösterilmektedir. Bu spektrumda 4 adet pik ve 2 temel fonon modu bulunmaktadır. Bu fonon modları D_1 (181 cm^{-1}), $2D_1$ (296 cm^{-1}), D_2 (856 cm^{-1}) ve $2D_2$ (1148 cm^{-1}) olarak adlandırılmaktadır. Bu durum borofenin diğer 2D malzemelerden farklı bir konuma gelmesine sebep olan polimorfik özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır. 181 cm^{-1} ve 296 cm^{-1} pikleri β_{12} fazını temsil eder. β_{12} fazının oluşması neticesinde önce D_1 bandı oluşmaktadır. $2D_1$ bandı ise ikinci derece Raman Sinyali’ni göstermektedir. Bu sinyal oldukça yüksek momentuma sahip olan bölge sınırı fononlarına ait spektrumdur ve Raman Spektrumu olarak adlandırılır. Bu bandın aralığı borofen sentezinin başarılı bir şekilde yapıldığı, bandın şiddeti ve spektral genişliği ise büyütülen örnekteki tabaka sayısı ile ilgili bilgi vermektedir. D_1 piki ile $2D_1$ pikinin mukayesesinde, $2D_1$ pikine ait şiddetin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yapıdaki katlanmadan meydana gelmektedir. 856 cm^{-1} ve 1148 cm^{-1} ise D_2 ve $2D_2$ bantlarını temsil etmektedir ve X_3 borofen fazına aittir. Burada $2D_2$ piki, D_2 pikinden daha yüksektir, bu da çok fazlı borofen tabakasının bakır altlık üzerinde sentezlendiğinin bir göstergesidir. Parakhonskiy (2011) araştırmasında boronun Raman Spektrum analizinde birden çok pik gözlemiş ve bu piklerin α ve β boron fazlarına ait olduğunu belirtmiştir. Bu da polimorfik özelliğin temel bir göstergedir. 181 cm^{-1} , 296 cm^{-1} ve 856 cm^{-1} pikleri ise β_{12} ve X_3 boronu temsil etmekte ve yapıdaki bor atomlarının farklı fazlarda borofen oluşturma eğilimin ifade etmektedir. (Zhao vd., 2019).



Şekil 8. CVD Tekniği ile Bakır Altlık Üzerinde Sentezlenen Borofen Tabakasına ait Raman Spektrumu

Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

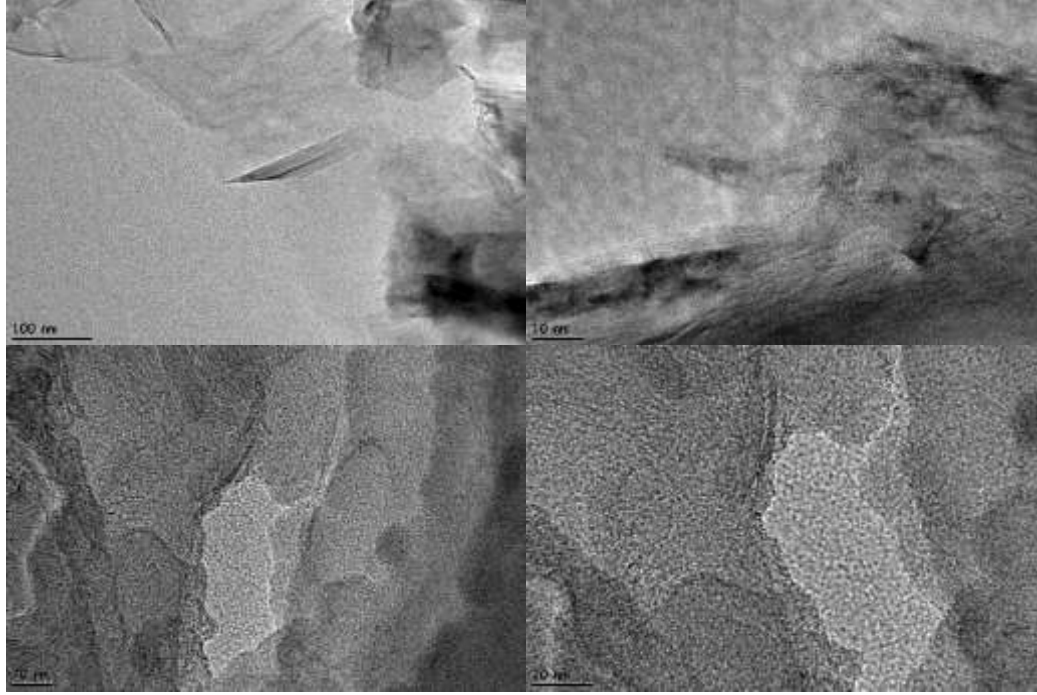
Sentezlenen borofen tabakalarının SEM analizleri için numune hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Bunun için kaplamalar bakır altlıklardan ayrılmış ve şeffaf hale getirilmiştir. Şekil 9'da borofen kaplamasının SEM öncesine ait hazırlık aşaması yer almaktadır.



Şekil 9. Tek Katmanlı Borofen SEM Numunesi

Borofen sentezlerine ait yapı analizi FESEM JEOL JSM 7900F cihazı ile gerçekleştirilmiş olup elde edilen nano yapı Şekil 10'da gösterilmiştir. Borofen tabakasının katlanmış kenar görüntüleri SEM'de net bir şekilde gözlenmiştir. Bu durum; oksijen içeren hidroksil organik bağların kalıntılarında kaynaklanmıştır. Xie (2020) gerçekleştirdiği çalışmada benzer kırışıklıkları gözlemiş ve bunun iki sebepten kaynaklandığını belirtmiştir. Birincisi; bakır altlıktan kaplamanın ayrılması esnasında borofen ile altlık malzeme arasında boşluk bulunması, ikincisi ise CVD'nin soğutma aşamasında meydana gelen termal genişleme farklarıdır. Deneysel çalışmalardan önce gerçekleştirilen literatür araştırmalarında bu riskin olabileceği göz önünde bulundurularak borofen ile altlık malzeme arasında boşluk kalmaması için transfer baskı tekniği kullanılarak boşluk oluşumu engellenmiştir. Yine aynı şekilde CVD'de sistem oda sıcaklığına gelinceye kadar argon gazı altında kontrollü soğutma gerçekleştirilerek termal genişleme farklarından kaynaklanan kırışıklıkların önüne geçilmiştir. Hidroksil bağlarından kaynaklanan kırışıklık ise CVD ile gerçekleştirilen kaplamalarda gözlenen normal bir durumdur (Wang, 2019). Bu aşamada nano borofen kümesi bakır altlık yüzeyinde Cu (111) düzleminde büyüme mekanizması ile sentezlenmiştir. Bu mekanizma, difüzyon ve hızlı soğuma aşamalarından oluşmaktadır. Parçalanmış bor atomları yüksek sıcaklıkta gerçekleşen tavlama aşamasında yığın halinde difüze olur, soğutma süresi boyunca bor atomları tekrar bakır yüzeyine çıkarak borofen filmini oluşturur. Bir başka ifadeyle bor

atomları Cu (111) düzlem yüzeyine çarpıp çökeler ve borofen tabakasını oluşturur. Bu oluşum Şekil 10'daki SEM yapı analizinde kademeli bir şekilde gözlenmektedir.



Şekil 10. Borofen Nano Yapısı

950 °C'den kademeli olarak sıcaklık ve çöktürme süreleri arttırılan numune yüzeylerinin fiziksel görüntüleri, iletkenlik durumları ve elektriksel direnç ölçümlerine ait veriler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Borofen Kaplamaların Fiziksel ve Elektriksel Özellikleri

No	Sıcaklık (°C)	Süre (Dk.)	Numune Yüzeyi	İletkenlik	Elektriksel Direnç(Ω /sq)
1	1035	60	Mat	Yok	2×10^6
2	1035	15	Mat	Yok	1×10^5
3	1035	5	Mat	Yok	200
4	1035	1,5	Mat	Var	2
5	1035	1	Mat	Var	1,8
6	1000	1	Mat	Var	1,4
7	985	1	Mat	Var	1,2
8	975	1	Mat	Var	1
9	960	1	Mat	Var	0,1
10	950	1	Mat	Var	0,2

Bu aşamada ince kaplamalar için tabaka direnci ölçüm modu seçilmiştir. Tabaka direncinin birimi Ω 'dur ancak uygulamada ince film kaplamaların alan bazında ele alınması sebebiyle genellikle Ω /sq veya Ω /□ kullanılmaktadır. Bu çalışmada borofen tabakalarının kare numuneleri ölçülmüş ve direnç değerinin sayısal karşılığı ele alınmıştır, bu sebeple birim olarak Ω /sq kullanımı tercih edilmiştir. 950 °C'de sentezlenen borofen filmlerde 0,2 Ω /sq gibi oldukça düşük bir öz direnç ölçülmüş ve iletken özellik göstermiştir. 1035 °C'ye kadar yapılan sentezlerin ölçümleri 2 Ω /sq öz dirençe sahipken CVD işlem süresinin artmasıyla öz direnç değeri de artış göstermiş olup 2×10^6 Ω /sq ölçülerek yalıtkan bir özellik sergilemiştir. Bunun sebebi, yüzeyde oluşan borofen tabakalarının aşırı difüzyonu sonrasında tane büyümesi ile altıgen borofen yapısını kaybedip iletken olmayan boroksit formuna dönüşmesidir. Şekil 11'de 1035 °C'de 60 dakika boyunca gerçekleştirilen senteze ait görüntü yer almaktadır. Yüzeydeki

borofen yapısının bozulmuş olduğu net bir şekilde tespit edilmiş olup gerçekleştirilen iletkenlik testinden de olumlu bir sonuç elde edilmemiştir.



Şekil 11. 1035 °C’de 60 Dakika Sentezlenen Borofen Yüzey Yapısı

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, CVD yöntemi ile borofen kaplamalar bakır altlıklar üzerinde başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Buna göre 950 °C’nin altındaki sıcaklıklarda borofen sentezi gözlenmemiş olup 1035 °C üzerinde ise borofenin iletkenlik ve homojen yüzey özelliğini kaybettiği tespit edilmiştir. Borofen tabakaların karakterizasyonunda Raman Spektroskopisi kullanılmış olup borofeni temsil eden 2 temel fonon modları 181 cm^{-1} ve 1148 cm^{-1} spektroskopide net bir şekilde gözlenmiştir. Elektron mikroskopunda gerçekleştirilen araştırmalar neticesinde nano yapıya sahip borofen tabakasının bakır altlık yüzeyindeki sentezlenmesine ait aşamalar tespit edilmiştir. Tabaka direnci ölçüm testleri neticesinde 950 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda sentezlenen numuneler oldukça güzel iletken özellik sergilerken 1035 °C’nin üzerinde ve 5 dakikayı aşan sentezlerde iletkenlik ortadan kalkmış ve heterojen bir yüzey elde edilmiştir.

Mevcut CVD sisteminin tek hazneli olması sebebiyle kuvars tüp sistem içerisinde hareket ettirmek suretiyle iki farklı sıcaklık alanı oluşturulmuştur. Aynı tüp içerisinde farklı iki alan oluşturabilecek kapasitedeki CVD sistemlerinin oluşturulması mümkündür. Bu çalışma ile CVD tekniği ile bakır folyo üzerinde farklı karakterde borofen kaplamaların elde edilebileceği tespit edilmiştir. Borofen sentez sıcaklığının 1035 °C’den 950 °C’ye düşürülmesi ile iletkenliğin arttığı tespit edilmiştir. Tüm yüzeyler mat olmakla birlikte farklı parametreler ile yüzey özelliklerinin geliştirilebileceği gözlenmiştir. Elde edilen verilerin yaygınlaştırılması ve CVD sisteminin geliştirilmesi ile Raman Spektrometresi’nde birden fazla D bandının gözlenmediği tek fazlı borofen tabakalarının sentezi mümkün olabilecektir. Ayrıca borofenin daha nitelikli özelliklerine ait çalışmaların ilerleyen zamanlarda geleceği bu özgün araştırma ile net bir şekilde ortaya konmuştur. Hegzagonal nano yapı görüntüleri için geçirimli elektron mikroskobu ile gerçekleştirilecek olan araştırmalar ile daha net yapı görsellerinin elde edilmesinin önü açılmıştır.

Tamamlanan bu çalışma ile farklı altlık malzemeler ve kaplama parametreleri kullanılarak borofenin yeni özelliklerinin tespit edilmesine ilişkin potansiyel araştırmaların temeli oluşturulmuştur. Özellikle altın altlıklar üzerine borofen sentezi hakkında yapılacak akademik çalışmalar plazmonik sensörlere yeni bir bakış açısı getirecektir. Bu makalenin öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde; borofenin birçok sektörün ihtiyaçlarına cevap verebilecek, erişimi ve üretilmesi kolay, ucuz bir hammadde haline dönüşmesinin çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşeceği tespit edilmiştir. Bunun sonucunda ülkemiz borofen üretiminde stratejik bir konuma gelecektir.

Yazar Katkısı

Bu makaleye ilişkin tüm çalışmalar *Erhan Özkan* tarafından yapılmıştır.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Makaleye ilişkin çıkar çatışması teşkil edebilecek herhangi bir durum söz konusu değildir.

ORCID





Erhan Özkan  <https://orcid.org/0000-0002-3849-6713>

Kaynaklar

- Bergmann, R. B., Berge, C., Rinke, T. J., Schmidt, J. ve Werner, J. H. (2002). Advances in monocrystalline thin film solar cells by layer transfer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 74(1-4), 213-218. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00070-3)
- Faghihnasiri, M., Jafari H., Ramazani A., Shabani, M., Estalaki, S. M. ve Larson, R. G. (2019). Nonlinear elastic behavior and anisotropic electronic properties of two-dimensional borophene. *Journal of Applied Physics*, 125(14), 145107. <https://doi.org/10.1063/1.5079932>
- Kootenaeei, A. S. ve Ansari G. (2016). B36 borophene as an electronic sensor for formaldehyde: Quantum chemical analysis. *Physics Letters A*, 380(34), 2664–2668. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.06.016>
- Li, D., Tang Q. Q., He J., Li B., Ding, G., Feng C., Zhou H. ve Zhang G. (2019). From two-to threedimensional van der waals layered structures of boron crystals: An ab initio study. *ACS Omega*, 4(5), 8015–8021. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00534>
- Li, L., Zhang H. ve Cheng X. (2017). The high hydrogen storage capacities of Li-decorated borophene. *Computational Materials Science*, 137, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.05.032>
- Mannix, A. J., Zhang Z., Guisinger N. P., Yakobson B. I. ve Hersam M. C. (2018). Borophene as a prototype for synthetic 2D materials development, *Nature Nanotechnology*, 13, 444–450. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0157-4>
- Meng, F., Chen X., Sun S. ve He J. (2017). Electronic and magnetic properties of pristine and hydrogenated borophene nanoribbons. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 91, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.04.014>
- Mohan, V. B., Lau, K. T. ve Hui, D. ve Bhattacharyya, D. (2018). Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. *Composites Part B: Engineering*, 142, 200–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.013>
- Parakhonskiy, G., Dubrovinskaia, N., Dubrovinsky, L., Mondal, S. ve van Smaalen, S. (2011). High pressure synthesis of single crystals of α -boron. *Journal of Crystal Growth*, 321, 162–166, <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.02.036>
- Peng, B., Zhang H., Shao, H., Xu, Y., Zhang, R. ve Zhu, H. (2016). The electronic, optical, and thermodynamic properties of borophene from first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry C*, 4, 3592–3598. <https://doi.org/10.1039/C6TC00115G>
- Rana, M., Luo B., Kaiser, M. R., Gentle, I. ve Knibbe, R. (2020). The role of functional materials to produce high areal capacity lithium sulfur battery. *Journal of Energy Chemistry*, 42, 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.06.015>

- Shukla, V., Wärnå, J., Jena N. K., Grigoriev, A. ve Ahuja, R. (2017). Toward the realization of 2D borophene based gas sensor. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(48), 26869–26876. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09552>
- Tai, G., Hu, T., Zhou, Y. Wang, X., Kong, J., Zeng, T., You, Y. ve Wang, Q. (2015). Synthesis of atomically thin boron films on copper foils. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(51), 15473–15477. <https://doi.org/10.1002/anie.201509285>
- Tan C., Cao X., Wu X. J., He, Q., Yang J., Zhang, X., Chen, J., Zhao W., Han, S. ve Nam, G. H. (2017). Recent advances in ultrathin two-dimensional nanomaterials. *Chemical reviews*, 117, 6225–6331. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00558>
- Wang, H. F., Li, Q. F., Gao, Y., Miao, F., Zhou, X. F. ve Wan, X. G. (2016). Strain effects on borophene: ideal strength, negative Poisson's ratio and phonon instability. *New Journal of Physics*, 18(7), 073016. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/7/073016>
- Wang, Z. Q., Lü, T. Y., Wang, H Q., Feng, Y. P. ve Zheng, J. C. (2019). Review of borophene and its potential applications. *Frontiers of Physics*, 14, 33403. <https://doi.org/10.1007/s11467-019-0884-5>
- Xie, Z., Meng, X., Li, X., Liang, W., Huang, W., Chen, K., ... ve Zhang, H. (2020). Two-dimensional borophene: Properties, fabrication, and promising applications. *Research*, 2020, 2624617, 1-23. <https://doi.org/10.34133/2020/2624617>
- Xu, L. C., Du, A. ve Kou, L. (2016). Hydrogenated borophene as a stable two-dimensional Dirac material with an ultrahigh Fermi velocity. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(39), 27284-27289. <https://doi.org/10.1039/C6CP05405F>
- Yiğitbaşıoğlu, H. (2004). Türkiye için önemli bir maden: Bor. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 13-25. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000046
- Zhang, C., He, Q., Chu, W. ve Zhao, Y. (2020). Transition metals doped borophene-graphene heterostructure for robust polysulfide anchoring: A first principle study. *Applied Surface Science*, 534(30), 147575. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147575>
- Zhang, Z., Mannix, A. J., Liu, X., Hu, Z., Guisinger, N. P., Hersam, M. C. Ve Yakobson, B. I. (2019). Near-equilibrium growth from borophene edges on silver. *Science advances*, 5(9), <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0246>
- Zhao, S., Wu, Y., Zhou, B. ve Liu, X. (2019). Synthesis of boron nanosheets in copper medium. *Scientific Reports*, 9(1), 17337. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53851-6>
- Zhou, H., Bhattacharya, T., Tran, D., Siew T. S. T. ve Khambadkone, A. M. (2010). Composite energy storage system involving battery and ultra-capacitor with dynamic energy management in micro grid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 923-930. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53851-6>
- Zhou, K., Otero-Mato, J. M., Hassan, F. E. H., Fahs, H., Vaezzadeh, M., López-Lago, E., Gallego, L. J. ve Varela, L. M. (2021). Tuning the hybrid borophene-/graphene-ionic liquid interface: Effect of metal cations on the electronic and photonic properties. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114759. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114759>

Entomolojide Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı

Yeter Küçüktopçu¹ , İslam Saruhan¹ , Celal Tuncer¹ , İzzet Akça¹ 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Samsun

Geliş Tarihi / Received Date: 20.04.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 05.10.2023

Öz

Son yıllarda, entomoloji alanında yapay sinir ağları (YSA) önemli bir araç haline gelmiş ve kullanımı hızla artmıştır. Entomologlar, YSA'nın sunduğu olanaklardan pek çok alanda yararlanmaktadır. YSA'nın kullanımı; böcek türlerinin tahmininden başlayarak, böcek popülasyonlarının takibine, zararlı böceklerin belirlenmesine ve böcek davranışlarının modellenmesine kadar çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır. Özellikle tarım alanlarında yapılan gözlemler ve ölçümler sonucunda elde edilen büyük veri kümelerinin hızlı ve hassas bir şekilde analiz edilmesi, böceklerle mücadele stratejilerinin geliştirilmesinde entomologlara önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu derleme, YSA'nın entomolojide kullanılabilir ve etkili bir araç olduğunu göstermekte ve YSA'nın gelecekteki uygulama potansiyeline genel bir bakış sunmaktadır. Ancak, YSA teknolojisinin geliştirilmesi ve uygulanması süreklilik arz eden bir çaba gerektirmektedir. YSA uygulamalarında eğitim sürecine özen gösterilmeli ve her yeni çalışmanın sinir ağı eğitimine katkı sağlayacağı unutulmamalıdır. Bu nedenle, entomologlar YSA'nın potansiyelini daha fazla keşfetmeye odaklanmalı ve bu yenilikçi yöntemi entomolojide daha geniş ölçekte kullanmaya yönelik çalışmalar yapmalıdır. Böylece; böceklerin doğası hakkında daha derin bilgilere ulaşmak, çevre dostu mücadele stratejileri geliştirmek, tarım alanlarında daha sürdürülebilir ve verimli üretim süreçleri geçirmek mümkün olacaktır. YSA'nın entomoloji alanında ilerlemesi, hem bilimsel araştırmalara hem de tarım sektörüne önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: entomoloji, yapay sinir ağları, tanımlama, sınıflandırma, izleme

Use of Artificial Neural Networks in Entomology

Abstract

In recent years, artificial neural networks (ANN) have become an important tool in entomology, and their use has rapidly increased. Entomologists are taking advantage of the possibilities offered by ANN in various fields. These applications range from predicting insect species and monitoring insect populations to identifying pests and modeling insect behavior. The ability to quickly and accurately analyze large datasets resulting from observations and measurements, especially in agriculture, provides a significant advantage for entomologists in developing insect control strategies. This review confirms that ANN is a valuable and effective tool in entomology and provides an overview of its potential future applications. However, the development and application of ANN technology require sustained effort. During ANN applications, attention should be given to the training process, and it's essential to acknowledge that each new study contributes to neural network training. As a result, entomologists should focus on exploring the potential of ANN further and work towards implementing this innovative method on a larger scale in entomology. By doing so, it will be possible to gain deeper insights into the nature of insects, develop environmentally-friendly control strategies, and establish more sustainable and efficient production processes in agricultural areas.

Keywords: entomology, artificial neural networks, identification, classification, monitoring

Giriş

Yunanca entomon (böcek) ve logos (bilim) kelimelerinden oluşan "entomoloji" böcekleri inceleyen bilim dalıdır (Entofito, 2023). Entomoloji, temelde Zooloji'nin bir alt dalı olsa da dünya üzerindeki hayvan türlerinin yüzde 80'inden fazlasını oluşturan böcekler, ekonomik açıdan önemli oldukları için ayrı bir bilim dalı olarak kabul edilir (Demirsoy, 2003). Böceklerin canlılar üzerindeki etkileri göz ardı edilemeyecek kadar önemli olduğundan, son yıllarda entomoloji alanındaki araştırmalar büyük bir artış göstermektedir. Bu çalışmalar arasında yapay zekâ uygulamalarının etkisi her geçen gün artmaktadır.

Yapay zekâ yöntemlerinden biri olan yapay sinir ağları (YSA), günümüzde çok popüler bir konu haline gelmiş ve çeşitli problemlerin çözümünde önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Özellikle bilimsel çalışmalarda ve ekonomik anlamda zararlı olan böceklerin mücadelesinde önemli bir belirleyici olan zararlıların tanımlaması ve popülasyon yoğunluğunun önceden tahmin edilmesinde YSA önemli bir yer tutmaktadır (Alhady vd., 2018; Cocu vd., 2005; Flórián vd., 2023; Shi vd., 2020).

Literatürde, Türkiye ve dünya genelinde entomoloji alanında YSA uygulamalarını ele alan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, entomoloji alanında YSA uygulamalarının sağladığı faydaları belirlemektir. Bu çalışma, alandaki teorik ve pratik bilgi birikimini artırmanın yanı sıra, uygulayıcılara bu konuda rehberlik etme ve literatürdeki önemli bir boşluğu doldurma açısından büyük bir öneme sahiptir.

Çalışma genel hatları ile dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın neden önemli olduğu ve ne amaçla yapıldığı kısaca açıklanmaktadır. İkinci bölümde; YSA'ya genel bir bakış sunulmakta, bu yöntemin nasıl çalıştığı ve temel işleyişinin ne olduğu hakkında bilgiler verilmektedir. Üçüncü bölümde, YSA'nın entomolojide hangi alanlarda kullanıldığı ve bu kullanımın nasıl etkili olduğu ele alınmaktadır. Son olarak, dördüncü bölümde yapılan çalışmanın ortaya koyduğu önemli sonuçlar özetlenmektedir.

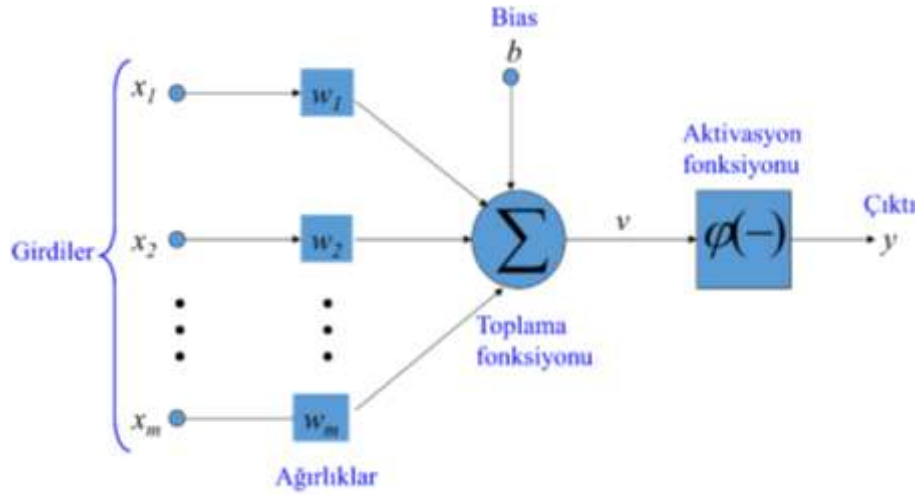
Yapay Sinir Ağları (YSA)

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi sonucu bilgisayarlar sadece karmaşık sayısal modelleri çözebilen araçlar olmanın ötesine geçmiş ve insana benzer düşünen, öğrenen ve öğrendiklerini uygulayabilen araçlar haline almıştır. Geçmiş yıllardan beri, insan beyninin düşünme, öğrenme ve olaylara tepki verme süreçleri üzerine yoğun araştırmalar yapılmıştır. YSA'da; insan beyninin biyolojik yapısından esinlenerek, öğrenme sürecinin matematiksel olarak modellenmesi sonucu ortaya çıkmıştır (Elmas, 2016).

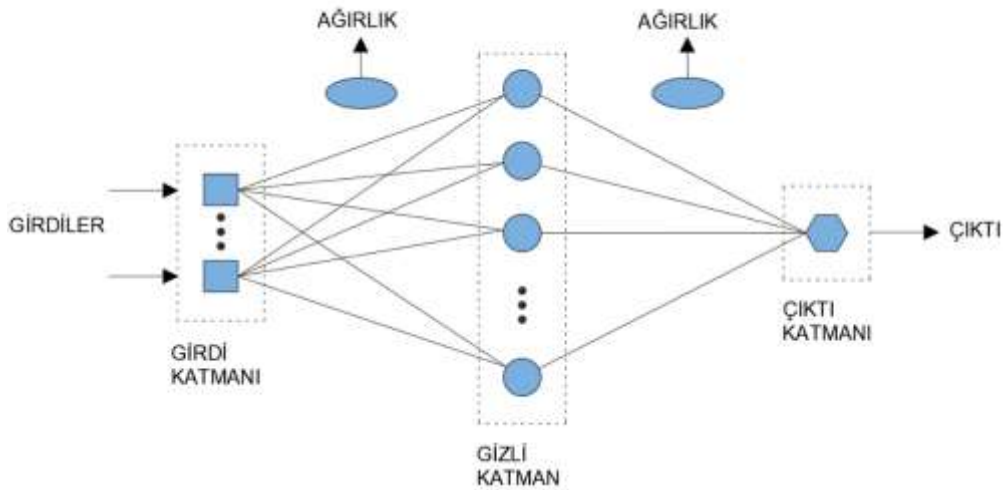
YSA'nın temel amacı, belirli bir girdi kümesine karşılık gelebilecek bir çıktı kümesini tahmin etmektir. Bu yeteneği kazanabilmesi için ağ, ilgili olayın örnekleri üzerinden öğrenme yaparak genelleme yapabilir. Bu genelleme sayesinde, benzer olaylara karşılık gelen çıktı kümesi belirlenir. Özellikle bilgilerin olmadığı ancak örneklerin bulunduğu durumlarda, etkili bir karar verme aracı ve hesaplama yöntemi olarak kullanılabilir (Çakır, 2018).

YSA, basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini simüle etmek için tasarlanırlar ve simüle edilen nöronları (sinir hücreleri) içerirler. Yapay sinir hücrelerinde de aynı biyolojik sinir hücrelerinde olduğu gibi giriş sinyallerini aldıkları, bu sinyalleri toplayıp işledikleri ve çıktılarını ilettikleri bölümleri bulunmaktadır (Hassoun, 1995; Öztemel, 2006).

Bir yapay sinir hücresi temel olarak; girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olmak üzere Şekil 1'de gösterildiği gibi beş kısımdan meydana gelmektedir (Haykin, 2010). Yapay sinir hücrelerinin birbirine bağlanmasıyla YSA oluşmaktadır. YSA'da genel olarak girdi katmanı, ara (gizli) katman ve çıktı katmanı olmak üzere 3 katman bulunmaktadır (Şekil 2). Girdi katmanı, giriş verilerinin alındığı katmandır. Ara katman, giriş katmanından aldığı verileri kullanıp aktivasyon fonksiyonu ile işleyip çıktı katmanına aktarmaktadır. Çıktı katmanı ise çıkış değerlerinin alındığı katmandır (Haykin, 1998).



Şekil1. Yapay Sinir Hücresinin Genel Yapısı



Şekil2. Örnek Yapay Sinir Ağ Yapısı

Entomolojide YSA'nın Kullanımı

Böcek taksonomisinde YSA'nın kullanılabilmesi için her şeyden önce, dikkatlice oluşturulmuş ve doğrulanmış bir veri tabanına ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir veri tabanında öncelikle, karakterler girdi olarak alınmalı ve türler arasındaki ilişkiyi bulmak için bir model tasarlanmalıdır. Bundan sonraki aşamaya öğrenme veya eğitim denilmektedir. Verilerin eğitilmesi sırasında; çıktılar, eğitim setindeki girdiler olarak verilen hedef değerler ile karşılaştırılmalıdır. Bilinmeyen türlerin tanımlanması için YSA'da eğitilerek doğrulanmış modeller kullanılabilir. Yapılmış çalışmalar en az 9 türün YSA'da eğitilmesi şartıyla tanımlamanın oldukça doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir (Vanhara vd., 2010). YSA'da farklı öğrenme yöntemleri olmasına rağmen, genellikle geri yayılım algoritması kullanılmaktadır. Veri tabanının güvenilirliği ve tür tanımlamanın doğruluğu çapraz doğrulama (Cross Validation) yöntemiyle kontrol edilmelidir (Vanhara vd., 2010).

Tür tanımlama ile ilgili YSA Uygulamaları

Böceklerin çeşitliliği ve aynı türün familyaları arasındaki benzerlikler nedeniyle, entomologlar ve taksonomistler için böcekleri tanımlamak ve sınıflandırmak her zaman zorlu bir görev olmuştur.

Literatürde, bu zorlukların üstesinden gelmek için birçok çalışma yapılmıştır ve böcekleri tanımlamak için YSA gibi otomatik yöntemler önerilmiştir (Fedor vd., 2008; Kaya vd., 2015; Shi vd., 2020).

Do vd. (1999), dişi cinsel organının dönüştürülmüş dijital görüntülerini kullanarak Lycosidae familyasından altı örümcek türünü tanımlamak için YSA'yı başarıyla uygulamışlardır. Moore (1991), *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) ve *Aedes triseriatus* (Say, 1823) (Diptera: Culicidae) dişi ve erkeklerinin üzerinde yaptığı çalışma sonucunda kelebek kanat çırpma sıklığına dayanan fonksiyon ile doğru türü ve cinsiyeti tanımlamak için YSA'yı kullanarak %84 başarı sağlamıştır. Marcondes ve Borges (2000), YSA ve bir morfometrik karakter seti kullanarak *Lutzomyia intermedia* (Lutz ve Neiva, 1912) (Diptera: Psychodidae, Phlebotominae) erkeklerini güvenilir bir şekilde ayırt etmeyi başarmışlar ve böylece YSA'nın Diptera'daki ilk uygulamasını kullanmışlardır. YSA ayrıca biyoakustik verilerin işlenmesinde de kullanılmıştır. Örneğin Chesmore (2004), 4 farklı Orthoptera türünün ses kayıtlarını YSA'da kullanarak türlerin otomatik olarak tanımlanmasını sağlamıştır. Vaňhara vd. (2007) yaptıkları çalışmada, bir parazitoid olan Tachinidae (Diptera) familyasından seçilen *Tachina* Meigen cinsinin üç türü [*Tachina fera* (Linnaeus, 1761), *Tachina magnicornis* (Zetterstedt, 1844), *Tachina nupta* (Rondani, 1859) (Diptera: Tachinidae)] ve *Ectophasia* Townsend cinsinin iki türünün [*Ectophasia crassipennis* (Fabricius, 1794) ve *Ectophasia oblonga* (Robineau-Desvoidy, 1830) (Diptera: Tachinidae)] sınıflandırılması için YSA'yı kullanmışlardır. Sınıflandırmada farklı kanat damarlarının uzunluğu veya bunların parçaları, anten segmentlerinin genişliği ve cinsiyetleri girdi olarak alınmıştır. Elde edilen modelin tahmin yeteneğinin eğitim setindeki örneklerin sayısına bağlı olarak %88 ile %100 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Yapılan bir diğer çalışmada, 18 yaygın Avrupa Thysanoptera türünün otomatik olarak tanımlanması için YSA modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 18 türün hem erkek hem de dişilerinde %97 oranında doğru tanımlama sağlanmıştır (Fedor vd., 2008). Fedor vd. (2009) ekonomik açıdan önemli 101 Avrupa thrips (Thysanoptera) türünün hem erkek hem de dişi olan 3000'den fazla örneğinin kafa, klavus, kanat, ovipositor uzunluğu ve genişliği gibi esas olarak kantitatif morfometrik karakterleri göz önüne alınarak zararlıının otomatik olarak tanımlanmasını sağlamak için YSA modeli kullanmışlar ve sonuç olarak zararlı böcekleri izlemede ve teşhis etmede YSA'nın kullanılabilir olduğunu bulmuşlardır. Wang vd. (2012), takım düzeyinde teşhis için dünya çapında yaygın olan 9 takım ve alt takımların böcek görüntülerine odaklanarak yeni bir tanımlama sistemi tasarlamışlardır. YSA kullanılarak yapılan testler sonucunda sistemin %93 oranında doğruluk gösterdiğini belirtmişlerdir. Kang vd. 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada; kelebek şeklinin sınır piksellerinden hesaplanan dal uzunluğu benzerliği entropisine dayanarak 7 farklı kelebek türünün 268 örneğinden alınan kanat görüntülerinin veri setlerini YSA'da kullanılmışlar ve YSA ile elde edilen modelin kelebek türlerini tanımlamak için yüksek bir doğruluk seviyesi (%86'dan fazla) gösterdiği belirtmişlerdir. Kang vd. (2014) yapmış oldukları çalışmada ise, 15 kelebek türünde 150 örneğin resimleri kullanılmışlar ve deneysel sonuçlarla dal uzunluğu benzerliği entropisi kavramının kelebekleri şekil türlerine göre karakterize etmek için güçlü bir araç olabileceğini göstermişlerdir. Aynı zamanda; Lee ve Kang (2016), kelebeklerde tür tanımlamada sorun oluşturan görüş açısı probleminin üstesinden gelerek kelebek türlerini otomatik olarak tanımlayabilmek için dal uzunluğu entropisine dayanan bu yeni şekil tanıma yöntemini geliştirmeye çalışmışlardır. Savaş tanklarını tanımak ve insan yüzlerini farklı duygularla karakterize etmek için başarıyla kullanılan bu yöntem, tek bir düğümden ve onun dallarından oluşmuş olan basit bir dallanma ağından meydana gelmiştir. Kaya ve Kayci (2014) yaptıkları çalışmada, kelebek türlerinin tanımlanmasında YSA ve görüntü işleme tekniklerinden yararlanmışlardır. Kelebeklerin doku ve renk özellikleri kullanarak elde edilen model tür tanımlamada %92.85 oranında doğru sonuç vermiştir. Bu bulgular, doku ve renk özelliklerinin kelebek türlerinin tanımlanmasında yararlı olabileceğini göstermiştir. Kaya vd. (2015) yaptıkları çalışmada, YSA'yı kullanarak 5 farklı kelebek türünü %98 oranında büyük bir başarı ile otomatik olarak tanımlamayı ve sınıflandırmayı başarmışlardır. Lorenz vd. (2015) yaptıkları çalışmada kanat şekli karakterlerine dayanan Anopheles, Aedes ve Culex cinsinin 17 türünün tanımlanması ve sınıflandırılmasında YSA'yı kullanmışlardır. YSA kullanılarak yapılan sınıflandırmanın, geleneksel yöntemlerle yapılan sınıflandırmalardan daha iyi sonuçlar (%85.70-%100) verdiğini belirlemişlerdir. Bu bulgular kanat damarlarının türe özgü olduğu ve bu nedenle taksonomik anahtarlara dâhil edilmesi gerektiği hipotezini de desteklemiştir. Alhady vd. (2018) yapmış oldukları

çalışmada *Ideopsis vulgaris* (Butler, 1874) ve *Hypolimnas bolina* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Nymphalidae) kelebek türünün kanatlarındaki desenleri kullanarak YSA'da tür tanımlama yapmayı hedeflemişler ve yapmış oldukları çalışma neticesinde *I. vulgaris* ve *H. bolina* türleri için sırasıyla %90 ve %100 başarı elde etmişlerdir.

Sıtma, Zika, Dang humması, Chagas ve Chikungunya gibi hastalıklar; insan sağlığına yönelik en önemli tehditler arasında yer alan vektör kaynaklı hastalıklardır (Nauen, 2007; Sinkins ve Gould, 2006). Bu tür hastalıkların riskini tahmin etmek ve hastalıkları kontrol etmek amacıyla stratejiler geliştirmek için önemli bir unsur olan eklembacaklı vektör türlerinin tanımlanması önem arz etmektedir (Mukundarajan vd., 2017). Vektör kaynaklı hastalıklarla ilişkili sivrisineklerin tanımlanması için yapay zekâ yöntemleri kullanılmıştır. Örneğin; Sanchez-Ortiz vd. (2017), cep telefonu ile aldıkları *Aedes* sivrisinek larvalarının görüntülerini kullanarak YSA yöntemiyle larvaların tür tanımlanması işlemini %100 başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, örneklem büyüklüğü çok küçük olmasına rağmen YSA'nın, sivrisineklerin tür sınıflandırması için kullanılabilceği gösterilmektedir.

Sıtmaya karşı mücadelede vektör kontrol programları stratejik bir önceliktir. Sıtma bulaşma sürücülerini karakterize etmek için entomolojik araçlar sınırlıdır ve bu araçların tarlada kullanılması oldukça zordur. Sıtmaya neden olan en önemli vektörün sivrisinek olduğu bilinmektedir. Bazı araştırmacılar, sivrisineklerin moleküler tanımlaması işleminin yavaş ve pahalı olmasından dolayı bu süreci otomatikleştirmek için yapay zekâ kullanmışlardır. Bu araştırmacılar; yapmış oldukları çalışmada, çektikleri böceklerin fotoğraf özelliklerinin değerlendirilip eşleştirildiği veri setlerini makine öğrenme algoritmasında kullanarak *Aedes aegypti* L.'nin moleküler tanımlanmasını %90 başarıyla gerçekleştirmişlerdir (De Los Reyes vd., 2016). Ouyang vd. (2015) yapmış oldukları çalışmada, üç ayrı sivrisinek türünün cinsiyetini, cinsini ve türünü sınıflandırmak için YSA'yı kullanmışlar ve yapmış oldukları çalışma neticesinde %85 oranında başarı elde etmişlerdir. Bir diğer araştırmacılar ise *Anopheles stephensi* Liston, 1901 (Diptera: Culicidae) sivrisinek türünün tanımlanması için YSA'yı kullanmışlar ve %78 oranında başarı elde etmişlerdir (Nabet vd., 2020).

Araştırmacılar, 7 milyon insanın Chagas hastalığının semptomlarını gösterdiğini ve 75 milyondan fazla insanın dünya çapında bu hastalığın enfeksiyon riskini taşıdığını belirtmişlerdir (WHO 2023). Chagas hastalığının vektör böceklerinden biri olan Triatominae türlerinin derin sinir ağı yöntemiyle otomatik olarak doğru tanımlanabiliyor olması, tehlikeli hastalıklarda umut vaat eden potansiyel bir çözüm olarak yapay zekâ uygulamalarının kullanılabilineceğini göstermektedir. Khalighifar vd. (2019), 12 Meksika triatomin türleri için 405 ve 39 Brezilya triatomin (Hemiptera: Reduviidae) türleri için 1.584 dijital görüntüden faydalanarak otomatik bir tür tanımlama sistemi geliştirmeye çalışmışlar ve sonuç olarak; tüm Meksika ve Brezilya türlerinde sırasıyla %83.0 ve %86.7 oranında başarı elde etmişlerdir.

Yapay zeka uygulamaları sivrisinek tuzak tasarımında da oldukça önemli bir yere sahiptir (da Silva Motta vd., 2018). Örneğin; araştırmacılar tarafından geliştirilen akıllı tuzaklar, zararlı böcekleri kendine çekebilme ve hedef olmayan böcekleri ise serbest bırakabilmektedir. Ayrıca; hedeflenen sivrisineklerin türlerinin tanımlanması, sivrisineklerin davranışlarının anlaşılması, zararlıların tuzaklara yakalanma tarihi ve saatinin tahmin edilmesi, hedef olmayan böcek popülasyonunun yoğunluğunun tahmin edilmesi gibi önemli işlemler kolaylıkla yapılabilmektedir (da Silva Motta vd., 2018). Akıllı sivrisinek tuzaklarının tasarlanması için; bir lazer algılayıcı ve ses analiz teknikleri kullanılarak elde edilmiş olan veriler, yapay zekânın alt ana dalı olan makine öğrenme algoritmalarında işlenmiştir. Yapılan işlemler sonucunda, akıllı sivrisinek tuzaklarını kullanarak makine öğrenme algoritmaları ile böceklerin tanımlanmasında %98 başarı elde edilmiştir (Silva vd., 2013).

Ayop ve Chesmore (2013) yapmış oldukları çalışmada renkli görüntüler ve geometrik ölçümler kullanarak uğur böceği türlerinin [*Harmonia axyridis* (Pallas, 1773) (Coleoptera: Coccinellidae)] tanımlanmasını kolaylaştırmak istemişler ve yapmış oldukları deneysel sonuçlar neticesinde tür tanımlama aşamasında benzer renkli beneklere sahip taksonların %75'ten fazla eşleşme sağladığını ortaya koymuşlardır.

Bauch ve Rath (2004) yapmış oldukları çalışmada, *Bemisia tabaci* (Gennadius, 1889) ve *Trialeurodes vaporariorum* Westwood, 1856 (Hemiptera: Aleyrodidae)'un tanımlanması için zararlıların şekil ve renk özelliklerini kullanarak YSA'da %85 başarı elde etmişlerdir. Espinoza vd. (2016) yapmış oldukları çalışmada, seralarda ergin evresindeki beyazsinek [*Bemisia tabaci* (G.)] ve thrips [*Frankliniella occidentalis* Pergande, 1895 (Thysanoptera: Thripidae)]'in tespiti ve izlenmesi için görüntü işleme algoritması ve YSA'nın kombinasyonuna dayalı yeni bir yaklaşım kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda beyazsinekler ve thripsler için sırasıyla %95 ve %92 oranında başarı elde edilmiştir.

Depolanan tahıl böceklerinin tespiti ve tanımlanması, ürünlerin güvenliğini sağlamak için önemlidir. Shi vd. (2020) yaptıkları çalışmada sekiz yaygın depolanmış tahıl böceğinin tespiti ve sınıflandırılmasında yapay zekâ uygulamalarını kullanmışlar ve yaptıkları çalışmada yapay zekânın tür tanımlamada başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Popovic vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada belirli bir alandaki *Merodon avidus* (Rossi, 1790) ve *Merodon moenium* (Wiedemann, 1822) (Diptera, Syrphidae) sinek türlerini tanımlamak amacıyla YSA'yı başarılı bir şekilde kullanmışlardır.

Sınıflandırma ile İlgili YSA Uygulamaları

Bagnères vd. (1998), YSA ve PCA (Principal Component Analysis, Temel Bileşenler Analizi) yöntemini kullanarak üç Avrupa termit türü [*Reticuliterm grassei*, *R. santonensis* (Feytaud) ve *R. banyulensis* Clément, 1978 (Isoptera: Rhinotermitidae)] ve bir Kuzey Amerika termit türünden [(*R. flavipes*) (Kollar, 1837) (Isoptera: Rhinotermitidae)] toplanan hidrokarbon verilerine dayanarak her bir böceğin sınıf ayrımını modellemeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, kütiküler hidrokarbonların nispi oranlarındaki küçük farkları içeren kimyasal bir farklılığın, böcekler arasında ayırt edici bir özellik olduğu hipotezini desteklemişlerdir. Aynı zamanda bu çalışmada, kimyasal haberleşmede kullanılan doğal feromonların sınıflandırılmasında YSA'ya iyi bir araç olabileceği ve PCA analizlerinin aksine, sınıflar arasında tanıya izin verebileceğini belirtmişlerdir. Samanta vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada, çayda zararlı böcek türlerini (yaprak biti, farklı akar türleri, *Helopeltis* cinsi sivrisinek türü, kırmızı örümcek ve thrips) sınıflandırmak için YSA'yı kullanmışlar ve başarı oranını %100 olarak bulmuşlardır. Butcher vd. (2013), belirli hidrokarbon verilerini kullanarak YSA ile adli acidan önemli olan *Lucilia sericata* (Meigen, 1826)'nın her bir larva dönemini %89 başarıyla otomatik bir şekilde sınıflandırmışlardır. Moore vd. (2016), YSA'yı kullanarak larvalarda mevcut olan kütiküler hidrokarbonların larva dönemlerinin sınıflandırılmasında önemli olup olmadığını araştırmışlar ve araştırmacılar, çalışmada adli olarak önemli iki *Calliphora* (Diptera: Calliphoridae) türünün [*Calliphora vicina* Robineau-Desvoidy, 1830 ve *C. vomitoria* (Linnaeus, 1758)] larva yaşlarını belirlemek için YSA'yı başarıyla kullanmışlardır. Araştırmacılar, bu çalışmada YSA'daki sonuçların genç larvalardan olgunlaşan larvaya kadar meydana gelen önemli kimyasal değişiklikleri başarıyla gösterdiğini belirtmişlerdir. Moore vd. (2017), İngiltere'de yaygın olarak bulunan adli türde üç önemli *Calliphora* türleri [*L. sericata* (Meigen, 1826), *Calliphora vicina* (Robineau-Desvoidy, 1830) ve *C. vomitoria* (Linnaeus, 1758)]'nın kütiküler hidrokarbonları (CHC) inceleyerek ve YSA'yı kullanarak ergin sineklerde yaş tahmini yapmaya çalışmışlar ve aynı zamanda iki *Calliphora* türü için 1, 5, 10, 20 ve 30 günlük aralıklarla ve *L. sericata* M. için ise 10. güne kadar ergin dönemlerinde zamana bağlı kimyasal değişimlerin olup olmadığını tespit etmeye çalışmışlardır. Kütiküler hidrokarbonların sineklerin yaşam döngülerinin gelişimi boyunca stabil olduğu ve hidrokarbon profillerinin türe özgü olduğu bilindiği için böcekleri teşhiste hidrokarbonların güvenilir bir yaş göstergesi olma potansiyeline sahip olduğu bu çalışma sonucunda belirlemişlerdir. Tan vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada Sakarya ilindeki ayva (*Cydonia oblonga* Mill.) (Rosales: Rosaceae) ekiliş alanlarından elde edilen farklı bitki paraziti nematod türlerinin dişi bireylerine ait olan tek ve çift ovarilerin doğru şekilde sınıflandırılması amacıyla YSA'yı kullanmışlardır. Araştırmacılar sırasıyla, 2016 Temmuz ve 2017 Temmuz'da topraktan alınan toplam 109 ve 121 adet dişi nematod üzerinde yürüttükleri çalışma sonucunda yüksek başarı elde edilmiştir.

Bilgisayarlı zekâ teknikleri ile ilgili gelişmeler, görüntü işlemeye dayalı yeni sınıflandırma yöntemlerinin uygulanmasını kolaylaştırmıştır. Adli entomolojideki böceklerin incelenmesi, adli bilimler için belirli

kararların alınmasında çok önemlidir. Hamam böceklerinin teşhisi, adli entomolojide büyük öneme sahiptir. Luquin vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada Meksika'nın farklı alanlarında yaygın olan ve adli entomoloji vakalarında önemli olan üç hamamböceği türünün [*Blattella germanica* (Linnaeus, 1767) (Blattodea: Ectobiidae), *Periplaneta americana* (Linnaeus, 1758) (Blattodea: Blattidae) ve *Arenivaga* sp. (Rehn, 1903) (Blattodea, Corydiidae)] doğru sınıflandırılması için doku, renk ve şekil gibi pronotum görüntülerini YSA modelleme çalışmasında kullanarak %96.26 oranında yüksek bir başarı elde etmişlerdir.

Popülasyon İzleme ile İlgili YSA Uygulamaları

Ürünlerde zarar yapan böceklerin belirlenmesi ve popülasyon dalgalanmalarının izlenmesi zararlı yönetim sistemlerinde önemli bir husustur. Yang vd. (2009) yaptıkları çalışmada pirinçte zararlı olan *Scirpophaga incertula*'nın oluşumu ile meteorolojik faktörler arasındaki ilişkiyi bulmak ve daha sonra, zararlının popülasyon oluşumu hakkındaki tarihsel verileri analiz etmek için YSA'yı kullanarak tahmin modeli oluşturmuşlardır. Yeni model; 2006, 2007 ve 2008 yıllarında *Scirpophaga incertula* (Walker, 1863) (Lepidoptera: Pyralidae) popülasyonunun oluşumunu başarıyla tahmin edebilmiştir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, böcek popülasyonu ile meteorolojik faktörler arasında önemli bir ilişki olduğu kesin olarak ortaya konulmuştur.

Çirjak vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada elma bahçesinde zararlı olan *Leucoptera malifoliella* (O. Costa, 1836) (Lepidoptera: Lyonetiidae)'nın popülasyonunu izlemek amacıyla kameralı iki izleme cihazından alınan 400 fotoğrafı YSA'yı eğitmek için kullanmışlar ve modelin doğruluğunu %98 olarak belirlemişlerdir.

Popülasyon Yoğunluğunu Tahmin Etme ile İlgili YSA Uygulamaları

Böcek popülasyonlarının izlenmesi, doğru koruma zamanlaması ve gereksiz böcek ilacı kullanımının önlenmesi ile haşere kontrolünü optimize etmek için çok önemlidir. Chon vd. (2000), Kuzeydoğu Asya'daki çam ağaçlarında ciddi bir orman haşeresi olan bir gal sineği türünün [*Thecodiplosis japonensis* Uchida et Inouye (Diptera: Cecidomyiidae)] popülasyonunun dinamik verilerini tahmin etmede YSA algoritmasının başarı sağladığını bildirmişlerdir. Cocu vd. (2005), YSA'yı kullanarak önemli bir zararlı olan *Myzus persicae* (Sulzer, 1776) (Hemiptera: Aphididae)'nin fenolojisi ve yıllık popülasyonunun üzerinde zararlının yoğun olduğu coğrafi bölge, iklim ve arazi kullanım faktörlerinin etki derecelerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışma, yaprak biti veri tabanı özelliklerini ve mevcut arazi kullanım veri setlerini hesaba katan dört mekansal ölçeğe odaklanmıştır. Sonuç olarak araştırmacılar; iklim, arazi kullanımı ve coğrafi konumun yıllık yaprak biti sayıları ve fenoloji modellerinin belirlenmesinde rol oynadığı hipotezini desteklemiş ve YSA'ların en büyük iki çalışma alanı için; örneğin, Avrupa ve Kuzey Batı Avrupa veri tabanı kapsamı için alternatif bir modelleme yaklaşımı olarak kullanılacağını saptamışlardır. Bianconi vd. (2010a) yapmış oldukları çalışmada, *Chrysomya megacephala* (F.) (Diptera: Calliphoridae) ergin popülasyonlarının tahmininde böceğin başlangıçtaki larva yoğunluğu (larva sayısı), mevcut gıda miktarı ve olgunlaşmamış larva dönemlerin süresi dikkate alınarak 3 farklı YSA yönteminin (Çok Katlı Algılayıcı, Radyal Temel Fonksiyon ve Adaptif Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi) klasik bir istatistiksel yöntem (çoklu doğrusal regresyon) göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Tonnang vd. (2010), yapmış oldukları çalışmada Lahana Yaprak Güvesi'nin [*Plutella xylostella* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Plutellidae)] ve bu güvenin parazitoidi olan *Diadegma semiclausum* (Hellén, 1949) (Hymenoptera: Ichneumonidae)'nın popülasyon yoğunluğunu YSA kullanarak tahmin etmeye çalışmışlar ve yapmış oldukları çalışmanın sonucunda YSA modelinin Lahana Yaprak Güvesi ($R^2=0.81$, $P<0.00036$) ve bu güvenin doğal düşmanı ($R^2=0.85$, $P<0.00013$) için tatmin edici sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Çalışmada araştırmacılar, böcek popülasyonlarının yoğunluklarını tahmin etmek, böceklerin doğal düşmanlarını izlemek ve tahmin etmek için YSA'nın kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda bu çalışmada doğal düşmanların nispi etkinliğini değerlendirmek ve arttırıcı biyolojik kontrol stratejilerini araştırmak için YSA'nın başarılı bir şekilde kullanılabileceği araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Saruhan vd. 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, *Aphis fabae* (Scopoli, 1763) (Hemiptera: Aphididae)'nin ergin ve nimf dönemlerini tahmin etmek için üç morfolojik

karakteri (arka tibia, anten ve vücut uzunluğu) göz önüne alarak YSA'yı kullanılmışlar ve çalışma sonucunda YSA performansını larva dönemlerinin tahmini için başarılı bulmuşlardır. Shabaninejad vd. 2017 yılında yapmış olduğu çalışmada İran'da bir salatalık alanındaki İki Noktalı Kırmızı Örümcek [*Tetranychus urticae* C. L. Koch, 1836 (Acari: Tetranychidae)] yoğunluğunun tahmini için YSA ve coğrafi istatistikleri karşılaştırmış ve YSA yönteminin %98 başarı ile diğer istatistiksel yöntemlerden daha fazla etkili olduğunu belirlemişlerdir. Hakimitabar vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, Ascidae familyasının (Acari: Mesostigmata) 137 ayrı noktadaki popülasyon tahminini belirlemek amacıyla YSA'yı başarılı bir şekilde kullanmışlardır. Mohamadi vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada YSA'yı kullanarak *Coccinella septempunctata* (Linnaeus, 1758) (Col.: Coccinellidae) popülasyonunun arazide tahmin edilmesi amaçlanmış ve çalışma sonucunda %98 oranında başarı elde edilmiştir. Case vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada istilacı bir hastalık vektörü olan *Aedes albopictus* (Skuse, 1894) (Diptera: Culicidae) zararlısının belirli bir bölgedeki popülasyon yoğunluğunu yapay zeka kullanarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada insansız hava araçları (İHA)'ndan alınan görüntüler kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda %80 oranında başarı elde edilerek İHA görüntüleme ve ağ analizinin kombinasyon şeklindeki kullanımına vurgu yapılmıştır. Kinney vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada *A. aegypti* L. sivrisinek türünün Chikungunya, Zika ve Dang humması gibi bulaşıcı hastalıklara sebebiyet verdiğini; ve böylece bu sivrisinek türünün her yıl milyonlarca insanı kötü etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar hastalık riskini değerlendirmek amacıyla bu sivrisinek vektörünün popülasyon yoğunluğunu bilmek gerektiğini belirtmişler ve yapmış oldukları çalışma sonucunda YSA modelleri sayesinde oldukça başarı elde etmişlerdir. Damos vd. (2021), yapmış oldukları çalışma *Culex* (Linnaeus, 1758) (Diptera: Culicidae) türlerinin erginlerinin doğrusal olmayan popülasyon dinamikleri hakkında fikir edinebilmek için YSA'ya dayalı basit yumuşak hesaplama tekniklerini kullanmışlar ve bu hesaplama tekniklerinin *Culex* sp'nin tahmini için başarı sağladığını belirtmişlerdir. Naeim Amini vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, örtü altı sera koşullarında önemli bir zararlı olan Sera Beyazsinek [*Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae)] zararlısının popülasyon yoğunluğunu tahmin etmek amacıyla YSA'yı kullanarak oldukça başarı elde etmişlerdir. Cletus vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada sivrisinek popülasyon tahminini yapmak amacıyla yapay zeka modelini kullanmışlardır. Yapılan çalışmada yapay zeka modeli araştırma için benimsenen hava durumu verileri (maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, bağıl nem ve yağış) olmak üzere dört girdi özelliğini içermekte olup, yapılan uygulama sonucunda; araştırmacılar, yapay zeka modelinin zararlısının popülasyon yoğunluk tahmininde %96.67 oranında doğruluk oranı gösterdiğini ve YSA modelinin sıcak yarı kurak bir iklim bölgesinde sivrisinek yaygınlığını tahmin etmede etkili bir araç olduğunu belirtmişlerdir. Narava vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada, *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Noctuidae: Lepidoptera) zararlısının ergin popülasyon tahminini yapmak amacıyla YSA'yı kullanmışlar ve %80 oranında başarı elde etmişlerdir. Flórián vd. (2023), yapmış oldukları çalışmada altı güve türünün [*Agrotis segetum* (Denis & Schiffermüller, 1775) (Lepidoptera: Noctuidae), *Autographa gamma* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Noctuidae), *Helicoverpa armigera* H., *Cameraria ohridella* (Deschka & Dimić, 1986) (Lepidoptera: Gracillariidae), *Grapholita funebrana* (Treitschke, 1835) ve *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae)] günlük ve aylık uçuşlarını YSA ile tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada, YSA'nın doğruluğu her zaman %60'ın üzerinde bulunmuştur. Küçük vücut ölçülerine sahip zararlı türlerine kıyasla daha büyük vücut ölçülerine sahip zararlı türlerinde bu oran %90'a kadar ulaşmış ve tespit doğruluğu ortalama olarak %84 ila %92 arasında değişim göstermiştir.

Entomolojinin Farklı Konularında YSA Uygulamaları ile Tahmin Yürütme

Starrett vd. (1998), YSA kullanarak golf sahasındaki 50 cm çim kaplı topraktan geçen pestisit yüzdesini tahmin ederek çim alanlarına uygulanan pestisitlerin atılımını doğru bir şekilde öngören bir bilgisayar modeli geliştirmişler ve bu modelin çoklu regresyon denklemi tahminine kıyasla daha az hataya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Von Zuben vd. (2000), yapmış oldukları çalışmada *C. megacephala* (F.) zararlısını etkili şekilde kontrol etmek amacıyla zararlı ile ilgili yumurtlama oranı, ergin çıkışı ve larva gelişimi gibi bilgilerin öğrenilmesi gerektiğini belirtmişler ve bilgilere YSA kullanarak başarı ile ulaştıklarını belirtmişlerdir. Lankin vd. (2001), Yeni Zelanda'daki tahıl yaprak biti [*Rhopalosiphum padi*

(Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Aphididae)] göç tarihini ve boyutunu tahmin edebilen bir model elde etmek için 20 yıllık iklim ve yaprak biti göç verilerini kullanarak YSA oluşturmuşlardır. YSA modeli, yaprak biti göçlerinin seviyesini ve zamanlamasını %95 oranında başarıyla tahmin edebilmiştir. Watts ve Worner (2008), yapmış oldukları çalışmada iklim değişkenlerinin zararlı böcek türlerinin oluşumuna göreceli önemini belirlemede YSA'yı çalışmışlar ve sonuç olarak YSA'nın belirli bir coğrafi bölgedeki zararlı böcek türlerinin oluşumunu doğru bir şekilde tahmin etmeyi öğrenebildiğini bildirmişlerdir. Howe vd. (2007), yapmış oldukları çalışmada yaygın bir kelebek türünün vücut sıcaklığını ve aktivitesini hava durumuna göre modelleyerek böceklerin vücut sıcaklığını ve aktivitesini tahmin etmek için sinir ağlarının kullanmanın başarı sağladığını belirtmişlerdir. Zhang vd. (2008), *Spodoptera litura* (Fabricius, 1775) (Lepidoptera: Noctuidae) larvalarının gıda alımının sıcaklık-zamana bağlı ilişkilerinin simülasyonunda YSA algoritmasının geleneksel modellere kıyasla daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Bianconi vd. (2010b), adli bilimde önemli bir sinek türü olan *C. megacephala* (F.)'nin larva yoğunluğu, mevcut gıda miktarı ve pupa büyüklüğü ile ilgili mevcut verileri kullanarak sineğin pupa ağırlığını doğru tahmin edebilmek için YSA'yı başarılı bir şekilde kullanmışlar ve YSA modelinin geleneksel istatistiksel modele kıyasla (çoklu regresyon) daha doğru performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Saruhan (2012), böceklerin farklı larva dönemleri ve cinsiyetleri arasındaki farkı ayırt etmek için böcek vücudunun farklı kısımlarının morfometrik çalışmalarının kullanılabilirliğini düşünmüş ve bu konu üzerinde araştırma yapmıştır. Araştırmacı, çalışmada vücut uzunluğu ve protoraks genişliği kullanılarak *Palomena prasina* (Linnaeus, 1761) (Hemiptera: Pentatomidae)'nin larva dönemleri ve cinsiyetlerinin ayrımı için tahmin modeli geliştirmeyi ve tahmin edilen larva dönemleri ve cinsiyetler için yazılım geliştirmeyi amaçlamaktadır. YSA'da oluşturulan modellemenin bireysel larva dönemlerini ve cinsiyeti tahmin etmek için yüksek doğruluk derecesinde yararlı olabileceği sonucuna varmıştır. Carmo vd. (2020), yapmış oldukları çalışmada tropikal bölgelerde sebze zararlılarının önemli bir avcısı olan *Blaptostethus pallelescens* Poppius (Heteroptera: Anthocoridae) yaşam döngü aşamalarının doğru tanımlanması amacıyla üç morfometrik ölçü (kafa genişliği, vücut genişliği ve vücut uzunluğu) kullanarak YSA'yı eğitmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda YSA yönteminin klasik yöntemlerle elde edilemeyecek kadar başarı gösterdiği belirlenmiştir. Altay ve Özgen (2021) yapmış oldukları bir çalışmada dünya çapında geniş bir yayılışa sahip olan depolanmış ürün zararlısı *Tribolium confusum* Jacquelin du Val, 1863 (Coleoptera: Tenebrionidae) zararlısının üzerinde odun ve fındık sirke uygulaması yaparak bu uygulamaların zararlı üzerindeki böcek öldürücü etkisini üç farklı yapay zekâ yöntemi ile belirtmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda YSA zararlı üzerindeki LD₅₀ değerini tahmin etmede oldukça başarı sağlamıştır. Latif vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada YSA kullanarak pirinç mahsullerine zarar veren haşere saldırılarının derecesini tahmin eden bir tahmin sistemi önerilmiş ve uygulama sonucunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Bu derleme YSA'nın entomoloji alanında uygulanabilir bir yöntem olduğunu ve etkili sonuçlar elde edildiğini göstermek amacıyla yapılmıştır. Günümüzde teknolojinin giderek daha yoğun kullanıldığı göz önüne alındığında, entomoloji alanında da geleneksel yöntemlerin dışında yeni yaklaşımların kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Entomolojide yeni bir yöntem olarak kullanılan YSA uygulamaları; böcek türleri tahmini, böcek popülasyonları takibi, böcek zararlılarını belirleme, böcek davranışlarının modellenmesi, böcek ekolojisi ve ekonomik önemlerinin analizi gibi konularında kullanılarak entomologlara yardım sağlamaktadır. Ayrıca YSA, böceklerin biyolojik ve ekolojik süreçlerini daha iyi anlamak, böcek türlerini hızlı ve doğru bir şekilde tahmin etmek, böcek zararlılarına karşı etkili mücadele stratejileri geliştirmek ve entomolojik araştırmalarda veri analizini optimize etmek gibi faydalar sağlamaktadır. YSA uygulamaları entomoloji alanında kullanıldıkça, böceklerin biyolojisi, ekolojisi ve ekonomik önemleri gibi konularda daha ayrıntılı bilgiler elde edilmesine ve böceklerle ilgili daha etkili yönetim stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca YSA uygulamalarının bir eğitim süreci olduğunu göz önünde bulundurulmalı ve her yeni çalışmanın sinir ağı eğitimine katkı sağlayacağı unutulmamalıdır. Bu amaçla YSA ve benzeri teknolojik uygulamaların ülkemizde hızla

yaygınlaştırılması ve bu uygulamaların zararlı yönetim sistemlerinin belirlenmesinde etkili bir araç olarak kullanılmasının zararlı mücadelesine faydalı olacağı kanaatindeyiz.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleyi birlikte yazdı, okudu ve onayladı.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

ORCID

Yeter Küçüktopçu  <https://orcid.org/0000-0002-2104-5764>

İslam Saruhan  <https://orcid.org/0000-0003-0229-9627>

Celal Tuncer  <https://orcid.org/0000-0002-9014-8003>

İzzet Akça  <https://orcid.org/0000-0001-9617-8820>

Kaynaklar

- Alhady, S. S. N. ve Kai, X. Y. (2018). Butterfly species recognition using artificial neural network. In Hassan, M. (eds), *Intelligent Manufacturing & Mechatronics. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 449-457). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8788-2_40
- Altay, O. ve Özgen, I. (2021). Predicting the LD50 values of two different vinegars whose insecticidal effect was determined by the spraying method against *Tribolium confusum* Jacquelin du val (Coleoptera: Tenebrionidae) using different artificial neural network models. *Zoological and Entomological Letters*, 1(2), 39-47. <https://www.zoologicaljournal.com/article/16/1-2-4-122.pdf>
- Ayob, M. Z. ve Chesmore, E. D. (2013). Probabilistic Neural Network for the Automated Identification of the Harlequin Ladybird (*Harmonia Axyridis*). In Ramanna, S., Lingras, P., Sombattheera, C., Krishna, A. (eds), *Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence* (pp. 25-35). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-44949-9_3
- Bagnères, A. G., Rivière, G. ve Clément, J. L. (1998). Artificial neural network modeling of caste odor discrimination based on cuticular hydrocarbons in termites. *Chemoecology*, 8(4), 201-209. <https://doi.org/10.1007/s000490050026>
- Bauch, C. ve Rath, T. (2004). Prototype of a vision based system for measurements of white fly infestation. In *International Conference on Sustainable Greenhouse Systems-Greensys 2004* (pp. 773-780). ISHS Acta Horticulturae 691. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.95>
- Bianconi, A., Von Zuben, C. J., de Souza Serapião, A. B. ve Govone, J. S. (2010a). The use of artificial neural networks in analyzing the nutritional ecology of *Chrysomya megacephala* (F.) (Diptera: Calliphoridae), compared with a statistical model. *Australian Journal of Entomology*, 49(3), 201-212. <https://doi.org/10.1111/j.1440-6055.2010.00754.x>
- Bianconi, A., Zuben, C. J. V., Serapião, A. B. D. S. ve Govone, J. S. (2010b). Artificial neural networks: A novel approach to analysing the nutritional ecology of a blowfly species, *Chrysomya megacephala*. *Journal of Insect Science*, 10(1), 58. <https://doi.org/10.1673/031.010.5801>

- Butcher, J. B., Moore, H. E., Day, C. R., Adam, C. D. ve Drijfhout, F. P. (2013). Artificial neural network analysis of hydrocarbon profiles for the aging of *Lucilia sericata* for post mortem interval estimation. *Forensic Science International*, 232(1-3), 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.06.018>
- Carmo, D. D. G., Farias, E. D. S., Costa, T. L., Queiroz, E. A., Nascimento, M. ve Picanço, M. C. (2020). Instar determination of *Blaptostethus pallescens* (Hemiptera: Anthocoridae) using artificial neural networks. *Annals of the Entomological Society of America*, 113(1), 50-54. <https://doi.org/10.1093/aesa/saz059>
- Case, E., Shragai, T., Harrington, L., Ren, Y., Morreale, S. ve Erickson, D. (2020). Evaluation of unmanned aerial vehicles and neural networks for integrated mosquito management of *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Medical Entomology*, 57(5), 1588-1595. <https://doi.org/10.1093/jme/tjaa078>
- Chesmore, D. (2004). Automated bioacoustic identification of species. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(2), 436-440. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652004000200037>
- Chon, T. S., Park, Y. S., Kim, J. M., Lee, B. Y., Chung, Y. J. ve Kim, Y. (2000). Use of an artificial neural network to predict population dynamics of the Forest-Pest pine needle gall midge (Diptera: Cecidomyiida). *Environmental Entomology*, 29(6), 1208-1215. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-29.6.1208>
- Čirjak, D., Aleksi, I., Miklečić, I., Antolković, A. M., Vrtodušić, R., Viduka, A., ... ve Pajač Živković, I. (2022). Monitoring system for *Leucoptera malifoliella* (O. Costa, 1836) and its damage based on artificial neural networks. *Agriculture*, 13(1), 67. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010067>
- Cletus, F., Baha, B. Y. ve Sarjiyus, O. (2022, November). Prediction of mosquito prevalence in a warm semi-arid climate using artificial neural network (ANN). In *2022 5th Information Technology for Education and Development (ITED)* (s. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITED56637.2022.10051442>
- Cocu, N., Harrington, R., Rounsevell, M. D. A., Worner, S. P., Hulle, M. ve Examine Project Participants. (2005). Geographical location, climate, and land use influences on the phenology and numbers of the aphid, *Myzus persicae*, in Europe. *Journal of Biogeography*, 32(4), 615-632. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01190.x>
- Çakır, F. S. (2018). *Yapay Sinir Ağları Matlab Kodları ve Matlab Toolbox Çözümleri*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Da Silva Motta, D., Badaró, R., Santos, A. ve Kirchner, F. (2018). Use of artificial intelligence on the control of vector-borne diseases. In *Vectors and Vector-Borne Zoonotic Diseases. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81671>
- Damos, P., Tuells, J. ve Caballero, P. (2021). Soft computing of a medically important arthropod vector with autoregressive recurrent and focused time delay artificial neural networks. *Insects*, 12(6), 503. <https://doi.org/10.3390/insects12060503>
- De Los Reyes, A. M. M., Reyes, A. C. A., Torres, J. L., Padilla, D. A. ve Villaverde, J. (2016). Detection of *Aedes Aegypti* mosquito by digital image processing techniques and support vector machine. In *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)* (pp. 2342-2345). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848448>
- Demirsoy, A. (2003). Yaşamın Temel Kuralları, Omurgasızlar/Böcekler, Entomoloji. (2. Baskı, 2. Cilt, s. 119-122). Meteksan Matbaacılık.
- Do, M. T., Harp, J. M. ve Norris, K. C. (1999). A test of a pattern recognition system for identification of spiders. *Bulletin of Entomological Research*, 89(3), 217-224.

<https://doi.org/10.1017/S0007485399000334>

Elmas, Ç. (2016). Yapay Zekâ Uygulamaları: Yapay Sinir Ağı, Bulanık Mantık, Sinirsel Bulanık Mantık, Genetik Algoritma. Seçkin Yayıncılık.

Entofito (2023). Entomoloji nedir? <https://www.entofito.com/> adresinden 20 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.

Espinoza, K., Valera, D. L., Torres, J. A., López, A. ve Molina-Aiz, F. D. (2016). Combination of image processing and artificial neural networks as a novel approach for the identification of *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* on sticky traps in greenhouse agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.008>

Fedor, P., Malenovský, I., Vaňhara, J., Sierka, W. ve Havel, J. (2008). Thrips (Thysanoptera) identification using artificial neural networks. *Bulletin of Entomological Research*, 98(5), 437-447. <https://doi.org/10.1017/S0007485308005750>

Fedor, P., Vaňhara, J., Havel, J., Malenovský, I. ve Spellerberg, I. (2009). Artificial intelligence in pest insect monitoring. *Systematic Entomology*, 34(2), 398-400. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113.2008.00461.x>

Flórián, N., Jósvei, J. K., Tóth, Z., Gergócs, V., Sipőcz, L., Tóth, M. ve Dombos, M. (2023). Automatic Detection of Moths (Lepidoptera) with a Funnel Trap Prototype. *Insects*, 14(4), 381. <https://doi.org/10.3390/insects14040381>

Hakimitabar, M., Shabaninejad, A. R., Saboori, A. ve Shams, M. H. (2017). Evaluation of Artificial Neural Network for determining distribution pattern of ascid family (Acari: Mesostigmata) in Damghan. *Journal of Entomological Society of Iran*, 37(3), 361-368. <https://doi.org/10.22117/JESI.2017.116045.1149>

Hassoun, M. H. (1995). *Fundamentals of Artificial Neural Networks*. MIT press.

Haykin, S. (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall PTR.

Haykin, S. (2010). *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson.

Howe, P. D., Bryant, S. R. ve Shreeve, T. G. (2007). Predicting body temperature and activity of adult *Polyommatus icarus* using neural network models under current and projected climate scenarios. *Oecologia*, 153, 857-869. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0782-3>

Kang, S. H., Cho, J. H. ve Lee, S. H. (2014). Identification of butterfly based on their shapes when viewed from different angles using an artificial neural network. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 17(2), 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2013.12.004>

Kang, S. H., Song, S. H. ve Lee, S. H. (2012). Identification of butterfly species with a single neural network system. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 15(3), 431-435. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2012.03.006>

Kaya, Y. ve Kayci, L. (2014). Application of artificial neural network for automatic detection of butterfly species using color and texture features. *The visual computer*, 30(1), 71-79. <https://doi.org/10.1007/s00371-013-0782-8>

Kaya, Y., Kayci, L. ve Uyar, M. (2015). Automatic identification of butterfly species based on local binary patterns and artificial neural network. *Applied Soft Computing*, 28, 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.046>

Khalighifar, A., Komp, E., Ramsey, J. M., Gurgel-Gonçalves, R. ve Peterson, A. T. (2019). Deep learning algorithms improve automated identification of chagas disease vectors. *Journal of Medical Entomology*, 56(5), 1404-1410. <https://doi.org/10.1093/jme/tjz065>

- Kinney, A. C., Current, S. ve Lega, J. (2021). Aedes-AI: Neural network models of mosquito abundance. *PLoS Computational Biology*, 17(11), e1009467. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009467>
- Lankin, G., Worner, S., Samarasinghe, S. ve Teulon, D. (2001). Can artificial Neural Network Systems be used for forecasting aphid flight patterns. *New Zealand Plant Protection*, 54, 188–192. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2001.54.3720>
- Latif, M. S., Kazmi, R., Khan, N., Majeed, R., Ikram, S. ve Ali-Shahid, M. M. (2022). Pest prediction in rice using IoT and feed forward neural network. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, 16(1), 133-152. <https://doi.org/10.3837/tiis.2022.01.008>
- Lee, S. H. ve Kang, S. H. (2016). Performance enhancement of the branch length similarity entropy descriptor for shape recognition by introducing critical points. *Journal of the Korean Physical Society*, 69(7), 1254-1262. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.1254>
- Lorenz, C., Ferraudo, A. S. ve Suesdek, L. (2015). Artificial Neural Network applied as a methodology of mosquito species identification. *Acta tropica*, 152, 165-169. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.09.011>
- Luquin, M. F. H., Santacruz, E. V., Morales, R. A. L., Vázquez, C. N. ve Zúñiga, M. G. (2017). Development of intelligent tools for recognizing cockroaches in the forensic entomology context. In *2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys)* (pp. 1117-1121). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IntelliSys.2017.8324269>
- Marcondes, C. B. ve Borges, P. S. (2000). Distinction of males of the *Lutzomyia intermedia* (Lutz ve Neiva, 1912) species complex by ratios between dimensions and by an artificial neural network (Diptera: Psychodidae, Phlebotominae). *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 95(5), 685-688. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762000000500012>
- Mohamadi, R., Nejad, A. R. S., Alich, M. ve Nejad, M. R. S. (2018). Evaluation of GMDH artificial neural network model to predict the spatial distribution of *Coccinella septempunctata* (Col.: Coccinellidae) in the alfalfa farm of Bajgah, Shiraz. *Journal of Entomological Society of Iran*, 38(3), 275-287. <https://doi.org/10.22117/jesi.2018.116187.1154>
- Moore, A. (1991). Artificial neural network trained to identify mosquitoes in flight. *Journal of insect behavior*, 4(3), 391-396. <https://doi.org/10.1007/BF01048285>
- Moore, H. E., Butcher, J. B., Adam, C. D., Day, C. R. ve Drijfhout, F. P. (2016). Age estimation of Calliphora (Diptera: Calliphoridae) larvae using cuticular hydrocarbon analysis and artificial neural networks. *Forensic Science International*, 268, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.09.012>
- Moore, H. E., Butcher, J. B., Day, C. R. ve Drijfhout, F. P. (2017). Adult fly age estimations using cuticular hydrocarbons and Artificial Neural Networks in forensically important Calliphoridae species. *Forensic Science International*, 280, 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.10.001>
- Mukundarajan, H., Hol, F. J. H., Castillo, E. A., Newby, C. ve Prakash, M. (2017). Using mobile phones as acoustic sensors for high-throughput mosquito surveillance. *Elife*, 6, e27854. <https://doi.org/10.7554/eLife.27854>
- Nabet, C., Chaline, A., Franetich, J. F., Brossas, J. Y., Shahmirian, N., Silvie, O., ... ve Piarroux, R. (2020). Prediction of malaria transmission drivers in Anopheles mosquitoes using artificial intelligence coupled to MALDI-TOF mass spectrometry. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68272-z>

- Naeim Amini, S., Golizadeh, A., Tafaghodinia, B., Razmjou, J., Abbasipour, H. ve Shaabaninejad, A. (2021). Evaluation of artificial neural network MLP optimized with genetic algorithm in estimating and predicting RO and rm of greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) according to some characteristics of host plants under greenhouse conditions. *Journal of Entomological Society of Iran*, 41(1), 55-72.
<https://doi.org/10.22117/JESI.2021.354385.1415>
- Narava, R., Kumar, S. R., Jaba, J., Kumar, A., Rao, R., Rao, S., Mishra, S. P. ve Kukanur, V. (2022). Development of Temporal Model for Forecasting of *Helicoverpa armigera* (Noctuidae: Lepidoptera) Using Arima and Artificial Neural Networks. *Journal of Insect Science*, 22(3), 2.
<https://doi.org/10.1093/jisesa/ieac019>
- Nauen, R. (2007). Insecticide resistance in disease vectors of public health importance. *Pest Management Science*, 63(7), 628-633. <https://doi.org/10.1002/ps.1406>
- Ouyang, T. H., Yang, E. C., Jiang, J. A. ve Lin, T. T. (2015). Mosquito vector monitoring system based on optical wingbeat classification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 47-55.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.021>
- Öztemel, E. (2006). *Yapay Sinir Ağları* (2. Baskı). Papatya Yayıncılık.
- Popovic, D. (2020). Taxonomic identification of hoverfly specimens using neural network and gradient boosting machine techniques. *Computational Ecology and Software*, 10(3), 105-116.
<https://www.proquest.com/scholarly-journals/taxonomic-identification-hoverfly-specimens-using/docview/2756779299/se-2>
- Samanta, R. K. ve Ghosh, I. (2012). Tea insect pests classification based on artificial neural networks. *International Journal of Computer Engineering Science*, 2(6), 336.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2a6b390610ff9cbc17c4cc00b05c2ce62e3b5352>
- Sanchez-Ortiz A, Fierro-Radilla A, Arista-Jalife A, Cedillo-Hernandez M, Nakano-Miyatake M, Robles-Camarillo D. ve Cuatrecasas-Jiménez V. (2017). Mosquito larva classification method based on convolutional neural networks. In *2017 International Conference on Electronics, Communications, and Computers (CONIELECOMP)* (s. 1-6). <https://doi.org/10.1109/CONIELECOMP.2017.7891835>
- Saruhan, I. (2012). Discrimination of the *Palomena prasina* L.(Heteroptera: Pentatomidae) nymph stages and sex using some morphological parameters by the multiple regression analysis. *African Journal of Biotechnology*, 11(9), 2365-2370. <https://doi.org/10.5897/AJB11.3338>
- Saruhan, I., Senyer, N., Ayvaz, T., Kayhan, G., Ergun, E., Odabas, M. S. ve Akca, İ. (2015). The estimation of adult and nymph stages of *aphis fabae* (Hemiptera: Aphididae) using artificial neural network. *Entomological News*, 125(1), 12-20. <https://doi.org/10.3157/021.125.0104>
- Shabaninejad, A., Tafaghodinia, B. ve Zandi-Sohani, N. (2017). Evaluation of geostatistical method and hybrid Artificial Neural Network with imperialist competitive algorithm for predicting distribution pattern of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) in cucumber field of Behbahan, Iran. *Persian Journal of Acarology*, 6(4). <https://doi.org/10.22073/pja.v6i4.30295>
- Shi, Z., Dang, H., Liu, Z. ve Zhou, X. (2020). Detection and identification of stored-grain insects using deep learning: A more effective neural network. *IEEE Access*, 8, 163703-163714.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3021830>
- Silva, D. F., De Souza, V. M., Batista, G. E., Keogh, E. ve Ellis, D. P. (2013). Applying machine learning and audio analysis techniques to insect recognition in intelligent traps. In *2013 12th International Conference on Machine Learning and Applications*, (s. 99-104). IEEE.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6784594>

- Sinkins, S. P. ve Gould, F. (2006). Gene drive systems for insect disease vectors. *Nature Reviews Genetics*, 7(6), 427. <https://doi.org/10.1038/nrg1870>
- Starrett, S. K., Starrett, S. K., Najjar, Y., Adams, G. ve Hill, J. (1998). Modeling pesticide leaching from golf courses using artificial neural networks. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(19-20), 3093-3106. <https://doi.org/10.1080/00103629809370178>
- Tan, A. N., Aylin, T. A. N. ve Susurluk, H. (2022). First application of two distinguishment techniques: Using Linear Discriminate Function method and Artificial Neural Networks approach according to the ovary types for some plant parasitic nematodes. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 26(1), 1-14. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1025087>
- Tonnang, H. E., Nedorezov, L. V., Owino, J. O., Ochanda, H. ve Löhr, B. (2010). Host–parasitoid population density prediction using artificial neural networks: diamondback moth and its natural enemies. *Agricultural and Forest Entomology*, 12(3), 233-242. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2009.00466.x>
- Vanhara, J., Havel, J. ve Fedor, P. (2010). Artificial neural networks (ANN) in entomology. https://www.researchgate.net/publication/295253809_Artificial_Neural_Networks_ANN_in_entomology adresinden 20 Nisan 2023 tarihinde alınmıştır.
- Vaňhara, J., Muráriková, N., Malenovský, I. ve Havel, J. (2007). Artificial neural networks for fly identification: A case study from the genera *Tachina* and *Ectophasia* (Diptera, Tachinidae). *Biologia*, 62(4), 462-469. <https://doi.org/10.2478/s11756-007-0089-1>
- Von Zuben, C. J., Stangenhuis, G. ve Godoy, W. A. C. (2000). Larval competition in *Chrysomya megacephala* (F.)(Diptera: Calliphoridae): effects of different levels of larval aggregation on estimates of weight, fecundity and reproductive investment. *Revista Brasileira de Biologia*, 60, 195-203. <https://doi.org/10.1590/S0034-71082000000200002>
- Wang, J., Lin, C., Ji, L. ve Liang, A. (2012). A new automatic identification system of insect images at the order level. *Knowledge-Based Systems*, 33, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.03.014>
- Watts, M. J. ve Worner, S. P. (2008). Using artificial neural networks to determine the relative contribution of abiotic factors influencing the establishment of insect pest species. *Ecological Informatics*, 3(1), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2007.06.004>

Ordu ve Çevresinde Yayılış Gösteren *Satureja spicigera* (Lamiaceae) Türünün Anatomik Özellikleri

Öznur Ergen Akçin¹ , Didem Karadeniz² 

¹Ordu Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Ordu

²Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Moleküler Biyoloji ve Genetik ABD, Ordu

Geliş Tarihi / Received Date: 05.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 28.09.2023

Öz

Bu çalışmada Ordu ve çevresinde doğal yayılış gösteren Lamiaceae familyasına ait *Satureja spicigera* türü anatomik özellikleri açısından ayrıntılı şekilde incelenmiştir. *S. spicigera* türünün bazı toprak altı ve toprak üstü organlarından kesitler alınarak yapıları incelenmiştir. Bitkinin gövdesi dört köşelidir ve köşelerinde 5-6 sıralı kollenkima hücre tabakası bulunmaktadır. Türün gövde ve yapraklarında salgı ve örtü tüyleri bulunmaktadır. Salgı tüyleri kapitat ve peltat tiptedir. Yaprak tipi ekvifasyal ve amfistomatik tiptedir. Stomalar anizositik ve parazitik tiptedir. Yaprığın adaksiyal yüzeyi için stoma indeksi 17.73, abaksiyal yüzeyi için 16.06 olarak belirlenmiştir. Stoma indeks oranı 1.04'tür.

Anahtar Kelimeler: Lamiaceae, *Satureja spicigera*, anatomi, tüy yapısı.

Anatomical Characteristics of *Satureja spicigera* (Lamiaceae) Species Distributed in Ordu and its Surroundings

Abstract

In this study, the species *Satureja spicigera* belonging to the family Lamiaceae, which is naturally distributed in Ordu and its surroundings, was anatomically analyzed. *S. spicigera* species was examined by taking sections from some above and below ground organs. The stem is quadrangular with 5-6 rows of collenchyma cells at the corners. The stems and leaves of the species have glandular and eglandular hairs. Glandular hairs are capitate and peltate types. Leaf type is equifacial and amphistomatic. Stomata are anisocytic and parasitic. The stomatal index for the adaxial surface of the leaf is 17.73 and 16.06 for the abaxial surface. The stomatal index ratio is 1.04.

Keywords: Lamiaceae, *Satureja spicigera*, anatomy, hair structure.

Giriş

Satureja L. Lamiaceae familyasına ait çok yıllık otsu bir cinstir. Cinsin dünyada yaklaşık 50 türü bulunmaktadır. Türkiye’de bulunan 15 *Satureja* türünün 5 tanesi endemiktir. Endemizm oranı % 33,3’tür (Öztekin, 2012). Türkiye’nin hemen hemen her bölgesinde bu cinsin üyelerine rastlanabilmektedir (Sadıkoğlu, 2005). *Satureja* türleri, halk arasında; yaygın olarak Kekik, Sivri kekik, Kılıç kekik olarak bilinmekle beraber, Keklik otu, Sater, Kara kekik, Çatlı, Süpürge kekiği, Çibriska, Çubriza, Trabzon kekiği ve Arı kekiği gibi yöresel isimler ile de adlandırılmaktadır. *Satureja spicigera* (K. Koch.) Boiss. türü ise ‘çorba kekiği’ veya ‘Trabzon kekiği’ olarak bilinmektedir (Baytop, 1994). Tür koyu yeşil yapraklı, beyaz renk çiçekli bitkilerdir. Türkiye’de en çok *S. cuneifolia* Ten., *S. wiedemanniana* (Lalem.) Velen, *S. montana* L., *S. hortensis* L., *S. cilicica* P. H. Davis, *S. spicigera* ve *S. thymbra* L. türlerinin doğadan toplanarak ticareti yapılmaktadır (Satıl vd., 2002; Bozdemir, 2019). *S. spicigera* türü tıbbi ve aromatik özelliğe sahiptir. Halk arasında kas ağrıları, bulaşıcı hastalıklar ve ishal gibi çeşitli hastalıkların tedavisinde etkilidirler (Baytop, 1999).

Lamiaceae familyasında salgı tüylerinin morfolojisi ve varlığı önemlidir. Bu özellikler alt familya kategorisinde ayırt edici özellik olarak kullanılmaktadır (Ascensao vd., 1995; Baran, 2011). Türkiye’de bulunan *Satureja* türlerinin morfolojik benzerliklerinden dolayı sınıflandırmalarında belirsizlik bulunmaktadır. Bazı *Satureja* türlerinin anatomileri üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca *S. spicigera* türünde dahil olduğu 15 *Satureja* türünün yaprak anatomisi incelenmiştir (Satıl vd., 2002; Satıl vd., 2003; Satıl ve Kaya, 2007). İncelediğimiz türün kök, gövde anatomisi üzerine yapılmış bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Bu araştırmada *Satureja spicigera* türünün ayrıntılı olarak anatomik yapısını incelemek ve diğer türlerle aralarındaki benzerlik ve farklılıkları belirlemek amaçlanmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Satureja spicigera türüne ait örnekler 2022 yılı Eylül ayında Ordu ili Perşembe ilçesinden toplanmıştır. Araziden toplanan örneklerin bir kısmı herbaryum materyali haline getirilmiştir. Bitki örneklerinin bir kısmı da anatomik incelemeler için %70’lik alkol çözeltisine konulmuştur. Örnek tayini Flora of Turkey’e göre yapılmıştır (Mill, 1982).

Yöntem

Anatomik çalışmalar için bitkinin toprak altı ve toprak üstü (kök, gövde ve yaprak) kısımlarından el ile enine ve yüzeyel kesitler alınmıştır. Alınan kesitler safranin/fast green (1:9) ile boyama işleminden geçirilmiş ve preparatlar haline getirilmiştir. Kesitlerde incelenen hücrelerin boyutları NIS Elements Imaging Software 3.00 SP5 programı kullanılarak ölçülmüştür. Türün anatomik kesitlerinin fotoğrafları Nikon FDX-35 marka mikroskop ile çekilmiştir. Yaprakların alt ve üst yüzeylerinde birim alandaki (200X200 µm²) stoma indeksi ve stoma indeks oranı hesaplanmıştır (Meidner ve Mansfield, 1968).

Bulgular

S. spicigera türünün kök, gövde ve yaprak yüzeyleri anatomik olarak incelenmiştir. Kök enine kesitlerinde en dışta koruyucu doku olarak periderma yer alır. Periderma tabakasının altında 6-7 sıralı parankimatik hücrelerden ve çok sıralı floem hücrelerinden oluşmuş korteks tabakası bulunmaktadır. Parankima hücreleri 17.71±6.41 x 13.22±3.89 µm ebatlarında düzenli dizilmiş hücreler şeklindedir. Floem ve ksilem hücreleri arasında kambiyum tabakası bulunmaktadır. Trake elemanları ortalama 26.33±7.2 µm çapındaki hücrelerden oluşmuştur. İletim demetlerinde belirgin şekilde 1-2 sıra öz ışınları mevcuttur. Öz bölgesi ortalama 56.54±10.64 µm çapındaki yuvarlak-köşeli parankimatik hücrelerden oluşmaktadır.

S. spicigera türünün gövdesi dört köşelidir. Gövde tek sıralı ortalama 19.82±3.29 x 13.38±2.70 µm ebatlarındaki epiderma hücreleri ile çevrelenmiştir. Gövdenin köşelerinde 5-6 sıralı, kenarlarda ise 1-2

sıralı ortalama $19.06 \pm 3.86 \times 14.54 \pm 3.37 \mu\text{m}$ büyüklüğündeki hücrelerden oluşan kollenkima tabakası bulunmaktadır. Korteks parankiması hücreleri çok hücreli kloroplastlı ve kloroplastsız, ortalama $33.08 \pm 7.65 \times 19.29 \pm 5.12 \mu\text{m}$ boyutlarındaki oval hücrelerden oluşmaktadır. Endoderma hücreleri belirgin olup $42.71 \pm 19.99 \times 22.92 \pm 10.31 \mu\text{m}$ büyüklüğünde dikdörtgen hücrelerden oluşmaktadır. Floem ve ksilem arasındaki kambiyum çok belirgin değildir. Ksilem, düzenli sıralanmış çok sayıda büyük trake ve bunların arasındaki küçük trakeidlerden oluşmaktadır. Trake elemanları ortalama $16.93 \pm 8.43 \mu\text{m}$ ebatlarındaki hücrelerden oluşmaktadır. Öz bölgesi ortalama $66.71 \pm 15.77 \mu\text{m}$ boyutlarındaki yuvarlak-köşeli parankimatik hücrelerden oluşmaktadır. Merkezde geniş bir öz kısmı yer almaktadır. Ayrıca gövde yüzeyinde iki ve çok hücreli örtü ve salgı tüyleri bulunmaktadır.

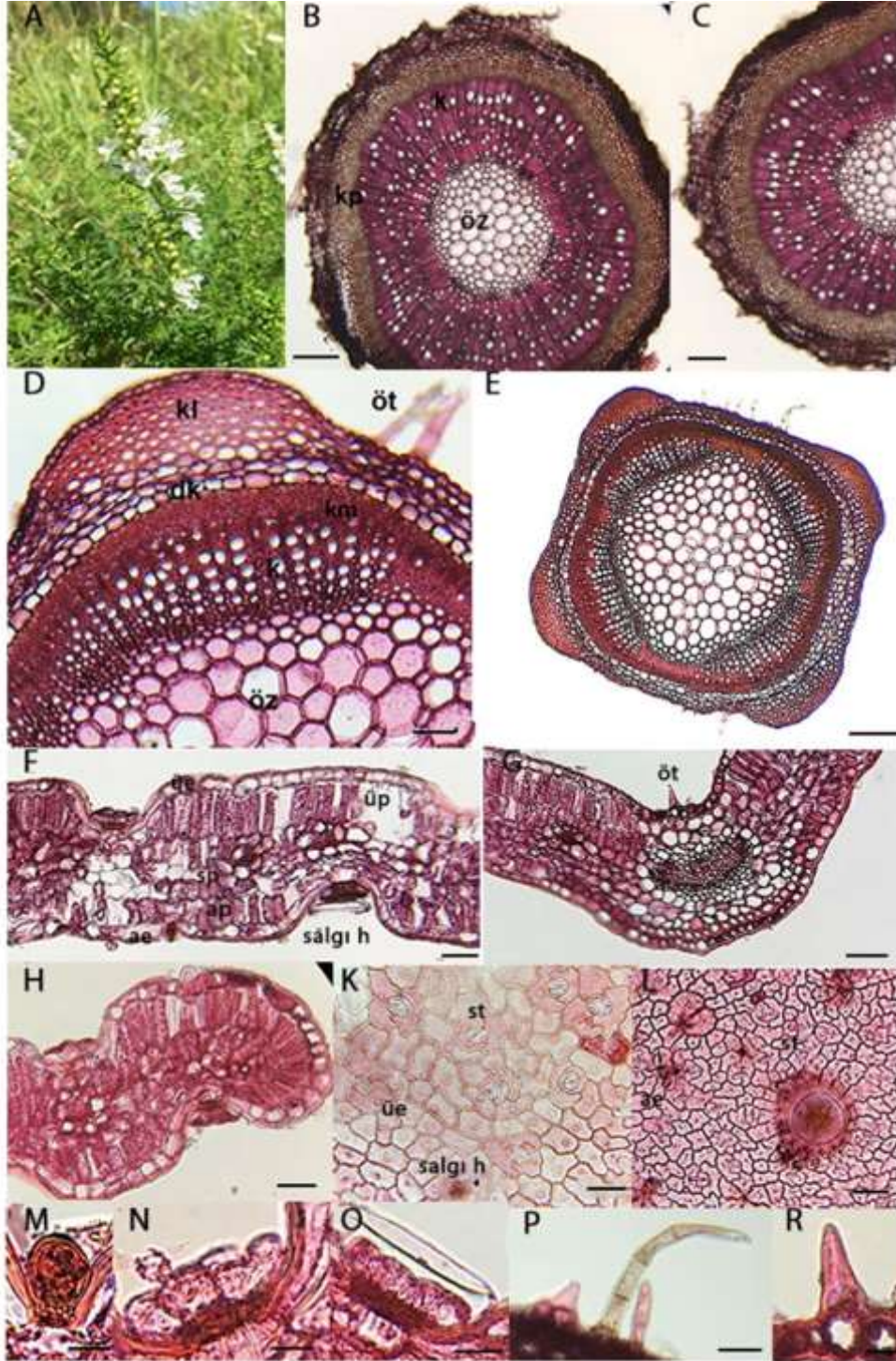
S. spicigera türünde yaprakların her iki yüzeyinde tek sıralı epiderma hücreleri ile bulunmaktadır. Üst epidermis hücreleri ortalama $21.17 \pm 6.13 \times 15.04 \pm 3.89 \mu\text{m}$ ebatlarındadır. Alt epidermis hücreleri ise ortalama $22.62 \pm 8.82 \times 15.25 \pm 6.42 \mu\text{m}$ ebatlarındadır. Yaprak tipi ekvifasiyal tiptedir. Her iki tarafta palizat parankiması ortada ise sünger parankiması bulunmaktadır. Üst palizat parankiması ortalama $16.5 \pm 2.28 \times 63.64 \pm 5.12 \mu\text{m}$, alt palizat parankiması ortalama $18.22 \pm 4.57 \times 43.40 \pm 9.59 \mu\text{m}$ ebatlarındadır. Sünger parankiması $29.91 \pm 7.46 \mu\text{m}$ ebatlarındadır. Yaprığın üst ve alt yüzeyinde bol miktarda kapitat ve peltat salgı tüyleri ile az miktarda örtü tüyü bulunmaktadır. Yaprığın ortasında bulunan büyük vasküler demeti incelediğimizde ksilem bölgesinin floem bölgesine göre daha fazla bir alanı kapladığı ve adaksiyal yüzeye tarafında olduğu görülmektedir. Ksilem elemanları ortalama $6.11 \pm 0.75 \mu\text{m}$ çapındadır. *S. spicigera* bitkisinin yapraklarının her iki yüzeyinde epidermis hücreleri dalgalı çeperlidir. Bitkinin yapraklarında hem adaksiyal hem de abaksiyal yüzeyde stomalar bulunmaktadır. Stomalar diasitik ve anizositik tiptedir. Adaksiyal taraftaki stomalar daha yuvarlak şekillidir. Yaprığın adaksiyal yüzeyi için stoma indeksi 17.73, abaksiyal yüzeyi için 16.06'dır. Stoma indeks oranı 1.04'tür. Türe ait anatomik ölçümler Tablo 1 ve Tablo 2'de, anatomik şekiller ise Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. *Satureja spicigera* Taksonunun Bazı Anatomik Ölçümleri

		Ortalama ± SH	
		En / Çap (µm)	Boy (µm)
Kök	Korteks Parankiması	17.71± 6.41	13.22±3.89
	Ksilem	26.33±7.2	-
	Öz Parankima Hücresi	56.54±10.65	-
Gövde	Epiderma Hücresi	19.82± 3.29	13.38±2.70
	Korteks Parankiması	33.08±7.65	19.29±5.12
	Ksilem	19.93±8.43	-
	Öz Parankima Hücresi	66.71±15.77	-
	Köşe Kollenkima	19.06±3.36	14.54±3.37
	Endodermis	42.71±19.99	22.92±10.31
Yaprak	Üst Epidermis	21.17± 6.13	15.04±3.
	Üst Palizat Parankiması	16.5±2.28	63.64±5.12
	Sünger Parankiması	24.91±7.46	-
	Alt Palizat Parankiması	18.22±4.57	43.40±9.59
	Alt Epidermis	22.62±8.82	15.25±6.42
	Ksilem	6.11±0.75	-

Tablo 2. *Satureja spicigera* Taksonunun Yapraklarının Adaksiyal ve Abaksiyal Yüzeylerinin Stoma ve Epiderma Özellikleri

	Yaprak Adaksiyal Yüzey	Yaprak Abaksiyal Yüzey
	Ortalama± SH	Ortalama± SH
Stoma Hücre Sayısı (200x200µm ²)	46	42
Epiderma Hücre Sayısı (200x200µm ²)	232	211
Stoma Hücreleri En (µm)	15.05±1.52	15.46±3.29
Stoma Hücreleri Boy (µm)	19.62±4.49	23.58±3.99
Stoma İndeksi	17.3	16.6
Stoma İndeks Oranı	1.04	



Şekil 1. *Satureja spicigera* Taksonunun Anatomik Şekilleri

A: *Satureja spicigera* genel görünüş, B-C: *S. spicigera* kök (enine kesit), D-E: *S. spicigera* gövde (enine kesit), F-H: *S. spicigera* yaprak (enine kesit), K-L: yaprak yüzeysel kesit, M: Kapitül salgı tüyü, N-O: Peltat salgı tüyleri, P-R: Örtü tüyleri, dk: demet kını, kl: köşe kollenkiması, kp: korteks parankiması, f: floem, k: ksilem, e: epidermis, öz: öz bölgesi, öt: örtü tüyü, km: kambiyum, üe: üst epiderma, ae: alt epidermis, üp: üst palizat parankiması, ap: alt palizat parankiması, sp: sünger parankiması, st: stoma Bar (B, D, F, H, M, P):100 µm, (C, G, K, L, R): 50 µm, (N, O): 20 µm

Tartışma

Satureja cinsine ait *Satureja spicigera* türünün kök, gövde ve yapraklarının anatomik özellikleri ayrıntılı şekilde incelenmiştir. *S. spicigera* türünde kök sekonder olarak kalınlaşmıştır. Kökün en dış kısmında koruyucu doku olarak periderma tabakası bulunmaktadır. Lamiaceae familyasına ait örnekler de sekonder kalınlaşma yapan kök yapısına rastlanabilir. *Marrubium trachyticum* Boiss. (Aytaş Akçin ve Camili, 2018), *Sideritis ozturkii* Aytaş & Aksoy (Demirelma vd., 2018), *Salvia tomentosa* Mill. (Kaplan ve Altundağ Çakır, 2020), taksonlarının da sekonder kök yapısına sahip olduğu bildirilmiştir. Türün gövdesi 4 köşeli olup tek sıralı epidermis tabakası ile çevrilmiştir. Gövdenin köşelerinde 5-6 sıralı kollenkima hücreleri bulunmaktadır. Köşelerde bulunan kollenkima hücre sırası türlere göre değişiklik göstermektedir. *Satureja parnassica* subsp. *sipylea* P.H.Davis taksonunda köşelerde 4-6 sıralı kollenkima bulunmaktadır (Satıl vd., 2002). İncelediğimiz türde gövdede ksilem düzenli sıralanmış çok sayıda, oval büyük trake ve bunların arasındaki küçük trakeid hücrelerinden oluşmaktadır ve öz ışınları tek sıralıdır. *S. parnassica* subsp. *sipylea* taksonunun da benzer özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir (Satıl vd., 2002). Lamiaceae familyasında özellikle yapraklardaki iletim demetlerinin sklerankimatik hücrelerin bulunup bulunmamasına göre iki tipe ayrıldığı bildirilmiştir. *S. coerulea* Janka, *S. wiedemanniana* ve *S. khuzestanica* türlerinde sklerenkima hücrelerinin olduğu bildirilmiştir (Malmir vd., 2014; Satıl ve Kaya, 2007). *S. spicigera* türünde ise iletim demetlerinde sklerankimatik hücrelere rastlanılmamıştır. Türkiye'deki *Satureja* türlerinde tüy özelliklerinin, yaprak orta damar, mezofil ve iletim demeti yapılarının faydalı karakterler olduğunu belirtilmiştir (Satıl vd., 2003). İncelediğimiz *S. spicigera* türünde yaprak tipi ekvifasiyal tiptedir. *Satureja* türlerinde yaprakların ekvifasiyal ve dorsiventral tipte olabileceği bildirilmiştir. *S. parnassica* subsp. *sipylea*, *S. khuzestanica* taksonlarında yaprak tipi ekvifasiyal, *S. spicigera* ve *S. subspicata* Bartl. ex. Vis. türlerinde ise dorsiventral olarak belirlenmiştir (Malmir vd., 2014; Redzic vd., 2006; Satıl vd., 2002).

Lamiaceae familyasında yapılan çalışmalarda çok sayıda örtü, peltat ve kapitat salgı tüylerine rastlanmıştır. İncelediğimiz türde yaprakların her iki yüzeyinde bol miktarda tek ve çok hücreli peltat ve kapitat salgı tüyleri ile az miktarda örtü tüyü bulunmaktadır (Fahn, 2000). *Satureja* türlerinin örtü ve salgı tüylerine sahip olduğunu ve salgı tüylerinin de kapitat ve peltat tipte olduğunu bildirmiştir. *S. thymbra*, *S. amani*, *S. boissieri*, *S. aintabensis* ve *S. khuzestanica* türlerinde yoğun peltat tüylerin bulunduğu belirtilmiştir. Peltat tüylerde baş hücreleri çok hücrelidir. Bazı *Satureja* türlerinde 12-16 baş hücresi olduğu bildirilmiştir (Malmir vd., 2014; Satıl ve Kaya, 2007). Bu sayı türlere göre de değişiklik göstermektedir. Kendi çalışmamızda ise baş hücresi 4-8 olarak belirlenmiştir. *S. montana* türünde örtü tüyleri tek hücreli, *S. cuneifolia* türünde ise örtü tüylerinin uzun ve 4 hücreli olduğu belirtilmiştir (Satıl ve Kaya, 2007). Çalıştığımız türde ise tek, 2-4 hücreli örtü tüyleri bulunmaktadır.

Satureja türlerinde genellikle stomalar yaprakların her iki yüzeyinde bulunmaktadır. Bununla beraber hipostomatik yapraklara sahip olan türlerde vardır (Husain vd., 1990; Açar ve Satıl, 2019). Lamiaceae familyasına ait bitkilerde genellikle diasitik tip stomalar bulunduğu belirtilmiştir (Açar ve Satıl, 2019; Akçin vd., 2022; Gürdal vd., 2019). İncelediğimiz *S. spicigera* türünde yaprakların üst ve alt yüzeyinde diasitik ve anizositik tip stomalar bulunduğu belirlenmiştir. Üst yüzeyde stoma yoğunluğu alt yüzeye göre daha fazladır. *S. parnassica* subsp. *sipylea* türünde stomalar diasitik tiptedir ve stoma indeks oranı 1.04 olarak bulunmuştur (Satıl vd., 2002). *S. khuzestanica* Lamzad. türünde stoma indeksinin üst yaprakta 13.54 olduğu tespit edilmiştir (Satıl ve Kaya, 2007). *S. spicigera* türünde ise stoma indeksi üst yüzey için 17.3, alt yüzey için 16.6 olarak bulunmuştur.

Sonuç ve Öneriler

S. spicigera türünün kök, gövde, yaprak yüzeylerinin anatomik özellikleri ve tüy yapıları belirlenerek türün daha ayrıntılı şekilde incelenmesi sağlanmıştır. Türün diğer *Satureja* türleri ile gösterdikleri benzerlik ve farklılıklar ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bol miktarda salgı tüyü içerdiğini belirlediğimiz *S. spicigera* türünün eterik yağlar ve diğer biyokimyasal maddeler açısından incelenmesi önerilmektedir. *Satureja* türlerinin ayrıntılı anatomik ve mikromorfolojik olarak incelenmesi sınıflandırmalarındaki belirsizliği gidermede yardımcı olacaktır.

Yazar Katkısı

Öznur Ergen Akçin, makalenin planlanmasını, sürecin takip edilmesini, mikroskop çekimlerinin yapılmasını ve verilerin değerlendirilmesini gerçekleştirdi. Didem Karadeniz, arazi çalışmasını, mikroskop çekimlerinin yapılmasını, ölçüm ve fotoğraflandırma aşamalarını gerçekleştirdi. Yazarlar makaleyi birlikte yazdı, okudu ve onayladı.


Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

ORCID

Öznur Ergen Akçin  <https://orcid.org/0000-0002-6875-6045>


Didem Karadeniz  <https://orcid.org/0000-0002-7367-5880>

Kaynaklar

- Açar, M. ve Satıl, F. (2019). Distantes R. Bhattacharjee (Stachys L./Lamiaceae) altseksiyonu taksonları üzerinde karşılaştırmalı anatomik ve mikromorfolojik çalışmalar. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22, 282-295. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.562089>
- Akçin, Ö. Öztürk, Ş. ve Türk, S. (2022). Doğu Karadeniz Bölgesinde yayılış gösteren endemik *Lamium microphyllum* Boiss. türünün anatomik ve mikromorfolojik özellikleri. *Akademik Ziraat Dergisi*, 11(1), 179-188. <https://doi.org/10.29278/azd.971726>
- Ascensao, L., Marques, N. ve Pais, M.S. (1995). Glandular trichomes on vegetative and reproductive organs of *Leonotis leonurus* (Lamiaceae). *Annals of Botany*, 75(6), 619-626. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1067>
- Aytaş Akçin, T. ve Camili, B. (2018). Micromorphological and Anatomical Characters of the Turkish Endemic *Marrubium trachyticum* Boiss. (Lamiaceae). *Trakya University Journal of Natural Sciences*, 19(1), 77-83. <https://doi.org/10.23902/trkjinat.373647>
- Baran, P. ve Özdemir, C. (2011). Morphological, anatomical and cytological investigation on endemic *Lamium moschatum* var. *rhodium*. *Biologia*, 66(3), 439-447. <https://doi.org/10.2478/s11756-011-0036-z>
- Baytop, T. (1994). *Türkçe Bitki Adları Sözlüğü*. Türk Dil Kurumu Yayınları.
- Baytop, T. (1999). *Türkiye’de Bitkilerle Tedavi Geçmişte ve Bugün*. Nobel Tıp Kitapevleri.
- Bozdemir, Ç. (2019). Türkiye’de yetişen kekik türleri, ekonomik önemi ve kullanım alanları. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 29(3), 583-592. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.511777>
- Demirelma, H. , Güzey Kırıcı, Ü. ve Çıtak, B. Y. (2018). Türkiye’den *Sideritis ozturkii* Aytaş & Aksoy ve *Sideritis rubriflora* Hub.- Mor. Lamiaceae üzerine anatomik bir araştırma. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, 11(3), 153-158. <https://dergipark.org.tr/en/pub/biodicon/issue/55721/761923>
- Fahn, A. (2000). Structure and function of secretory cells. In D. L. Hallahan ve J. C. Gray (Eds.), *Advances in botanical research. Incorporating advances in plant pathology* (pp. 37-75) içinde. Academic Press. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2296\(00\)31006-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2296(00)31006-0)

- Gürdal, B., Yeşil, Y., Akalın, E. ve Tan, N. (2019). Anatomical features of *Salvia potentillifolia* Boiss. & Heldr. ex Benth. and *Salvia nydeggeri* Hub.-Mor. (Lamiaceae). *İstanbul J Pharm*, 49(3), 186-190. <https://doi.org/10.26650/IstanbulJPharm.2019.19068>
- Husain, S. Z., Marin, P. D., Silic, C., Qaiser, M. ve Petcovic B. 1990. A micromorphological study of some representative genera in the tribe *Saturejeae* (Lamiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 103, 59–80. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1990.tb00174.x>
- Kaplan, F. ve Altundağ Çakır, E. (2020). Sakarya İli Çevresinde Yetişen Bazı *Salvia* L. Taksonlarının Anatomik Özellikleri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1258-1278. <https://doi.org/10.29130/dubited.637472>
- Malmir, M., Serrano, R., Gohari, A. ve Silva, O. (2014). Characterization of *Satureja khuzestanica* leaf as herbal medicine. *Microscopy and Microanalysis*, 20(5), 1425-35. <https://doi:10.1017/S1431927614013026>
- Meidner, H. ve Mansfield, T. A. (1968). *Physiology of stomata*. McGraw-Hill Publication.
- Mill, R. R. (1982). *Lamium*. P. H. Davis (Ed.), *Flora of Turkey and the East Aegean Islands* içinde. Edinburgh Univ. Press.
- Özer, H. ve Danalou, R. (2022). Farklı Orijinli Sater (*Satureja hortensis* L.) Genotiplerinin Erzurum koşullarında tarımsal performanslarının belirlenmesi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(2), 301-315. <https://doi.org/10.20479/bursauludagziraat.1060890>
- Öztekin, M. (2012). *Satureja*. A. Güner, S. Aslan, T. Ekim, M. Vural ve M. T. Babaç (Ed.), *Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)* içinde. Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını.
- Redzic, S., Tuka, M. ve Pajevic, A. (2006). Research into microscopic structure and essential oils of endemic medicinal plant species *Satureja subspicata* Bartl. Ex Vis. (Lamiaceae). *Bosn J Basic Med Sci.*, 6(2), 25-31. <https://doi.org/10.17305%2Fbjbms.2006.3169>
- Sadikoğlu, N. (2005). *Kekik olarak kullanılan türler üzerinde farmasötik botanik araştırmalar*. [Yayınlanmamış doktora tezi]. İstanbul Üniversitesi.
- Satıl, F., Dirmenci, T. ve Tümen, G., (2002). *Türkiye'deki Satureja L. türlerinin ticareti ve doğadaki durumu-ı* [Sözlü sunum]. 14. Bitkisel İlaç Hammaddeleri Toplantısı, Eskişehir, Türkiye.
- Satıl, F., Değirmenci, T. ve Tümen, G. (2003). Morphological, anatomical and chorologic studies on *Satureja coerulea* Janka. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8, 47-55. <https://dergipark.org.tr/en/pub/yyufbed/issue/54385/739555>
- Satıl, F. ve Kaya, A. (2007). Leaf anatomy and hairs of Turkish *Satureja* L. (Lamiaceae), *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 49(1), 67-76. <https://dSPACE.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/8097>

Determination of Ionization Energy Loss of Electron-Positron Pair in Multi-GeV Region

Onur Buğra Kolcu¹ 

¹Istinye University, Department of Basic Sciences, Istanbul

Geliş Tarihi / Received Date: 06.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 05.10.2023

Abstract

The suppression of ionization energy loss owing to the Chudakov effect is discussed using the opening angles of the electron-positron pairs from the GEANT4 simulation package. The expected Borsellino and Olsen angles for photon energies between 1-178 GeV were presented and compared with the simulated opening angles. The simulated opening angles of the electron-positron pair are mostly compatible with the Borsellino angle for energies below 30 GeV. The ionization-suppression effect was reproduced using known theoretical approaches and compared with the corresponding simulated results. The results showed that the GEANT4 simulation package is suitable for adopting the Chudakov effect in a simulation environment, with a dataset that provides theory-experiment consistency.

Keywords: pair production, ionization energy loss, Chudakov effect, King-Perkins-Chudakov effect

Elektron-Pozitron Çiftinin İyonlaşma Enerji Kaybının Çoklu-GeV Bölgesinde Belirlenmesi

Öz

Chudakov etkisi nedeniyle iyonlaşma enerji kaybının bastırılması, GEANT4 simülasyon paketinden elde edilen elektron-pozitron çiftlerinin açılma açıları kullanılarak tartışılmıştır. 1-178 GeV arasındaki foton enerjileri için beklenen Borsellino ve Olsen açıları gösterilmiş ve simüle edilen açılma açıları ile karşılaştırılmıştır. Elektron-pozitron çiftinin benzetimi yapılan açılma açıları, 30 GeV'in altındaki enerjiler için Borsellino açısı ile çoğunlukla uyumludur. İyonizasyon-bastırma etkisi bilinen teorik yaklaşımlar kullanılarak yeniden üretilmiş ve ilgili simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, GEANT4 simülasyon paketinin teori-deneysel tutarlılığı sağlayan bir veri seti ile Chudakov etkisini simülasyon ortamına uyarlamak için uygun olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: çift oluşumu, iyonizasyonla enerji kaybı, Chudakov etkisi, King-Perkins-Chudakov etkisi

Introduction

The ionization energy loss of the electron-positron produced by pair production is expected to reach twice the ionization loss of a single electron. However, when the electron-positron pair's transverse separation is too small around the production point, the ionization energy loss in a substance decreases, as the oppositely charged particles affect each other's electric field (Trofymenko & Shul'ga, 2015). That is, suppression of ionization occurs due to the interference of electromagnetic fields of electron-positron pairs (Iwadare, 1958). This is called the Chudakov or King-Perkins-Chudakov effect (Chudakov, 1955; Perkins, 1955) and has been extensively studied both theoretically and experimentally (Berestetskii, 1957; Burkhardt, 1958; Mito, 1957; Wolter, 1956; Yekutieli, 1957; Zieliński, 1985), with more detailed theoretical studies published over the last two decades (Shul'ga & Trofymenko, 2014; Trofymenko & Shul'ga 2017; Trofymenko, 2020; Thomsen & Uggerhøj, 2011; Trofymenko & Shul'ga, 2013). Cosmic ray experiments have been performed to observe the Chudakov effect, but these experiments offer limited statistics and are unable to control the beam energy (Iwadare, 1958; Perkins, 1955; Wolter, 1956). Also, an accelerator-based experiment was performed to directly measure the Chudakov effect with photon beam energy in the range of 1-178 GeV (Virkus, et al., 2008). In this experiment, 20 μm thick gold targets were placed at different distances from the CCD detector, and ionization suppression was measured with the most probable energy loss ratios (Virkus, et al., 2008). The results of this experiment show the effect is significantly stronger than expected such that the mechanism of suppression of ionization requires further investigation.

More recently, Trofymenko determined the struggling function for the most probable value of the pair ionization loss, which includes the Chudakov effect (Trofymenko, 2023). The theoretical results of this study can be used to adopt the Chudakov effect in the simulation packages used for high energy physics experiments such as GEANT4 (Agostinelli, et al., 2003).

In this study, a simplified version of the CERN NA63 experiment (Virkus, et al., 2008) was constructed using the GEANT4 simulation package to obtain the electron-positron pair opening angles, and the results were used to evaluate the ionization energy loss according to theoretical approaches. The simulations are used to reproduce the expected theoretical results and to show that the simulation package is suitable for adopting ionization loss suppression for future studies.

Material and Methods

Method for Calculating Ionization Suppression

The Chudakov effect is valid when the electron and positron are close to each other which are produced by highly energetic photons and the opening angle of the pair is too small. According to the Borsellino formula, the opening angle of the pair is $\vartheta \simeq 4m_e / E_\gamma$ (m_e is the electron mass and E_γ is the photon energy) where e^- and e^+ have approximately the same energies (Borsellino, 1953). When the distance is known between the detector and the target where the pair production takes place, the opening angle can be determined and the transverse distance (s) of the $e^- - e^+$ pair relative to each other can be found. Since the suppression of ionization occurs due to the interference of electromagnetic fields of the pair in the restricted transverse distance, the distance between the $e^- - e^+$ pair is the key point to determine the suppression ratio as can be seen in the equations 1, and 2.

Relative ionization loss of the pair (R) is defined by the Chudakov as

$$R = \frac{\ln(s/r_{min})}{\ln(r_{max}/r_{min})} \quad (1)$$

$r_{min} = \lambda_c$ Compton wavelength ($\lambda_c = \hbar/m_e c$), $r_{max} = c/\omega_p$, and the equation is valid for $s = \vartheta x \leq 0.6r_{max}$, where x is the distance from pair production vertex, ϑ is the opening angle of the pair and ω_p is the plasma frequency of substance (Chudakov, 1955; Thomsen & Uggerhøj, 2011).

The energy loss of the pair also defined by Berestetskii and Geshkenbain with

$$\frac{dE_{\pm}}{dt} = 2 \frac{\alpha \hbar \omega_p^2}{\beta} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{2m_e c^2 T_{cut}}}{\hbar \omega_p} \right) - K_0 \left(\frac{s \omega_p}{\beta c} \right) \right] \quad (2)$$

where $T_{cut} = 10^5$ eV for $16 \mu\text{m}$ Si, the first term is responsible for restricted energy loss of the pair, and the second is the interference term (Berestetskii & Geshkenbain, 1957; Zieliński, 1985). Second kind with the order zero modified Bessel function is given with K_0 .

According to equations 1 and 2, the theoretical curves are determined using the Borsellino angles corresponding to the gamma energy. Also, the pair opening angle suggested by Olsen ($\vartheta \approx 3.2m_e/E_{\gamma}$) is taken into account; and intersection regions of the results for relative ionization loss are specified for Borsellino and Olsen angles (Borsellino, 1953; Olsen, 1963).

Monte Carlo Simulations

GEANT4 simulation toolkit allows for the simulation of the passage of particles through matter, including gamma interactions such as photoelectric effect, Compton scattering, and pair production (Geant4 Collaboration, 2023). The default "Physics List" constructor (G4EmStandardPhysics) was selected for the simulations. In the selected physics constructor, the polar angle is defined with respect to the incoming photon, the azimuthal angle is generated isotropically, and the momenta of the pair is coplanar with the photon (Geant4 Collaboration, 2023).

To determine the ionization suppression with equation 1 and 2, the transverse distance between the electron-positron pair must be calculated. The opening angle was used to determine the transverse distance for each photon energy and was obtained using the GEANT4 simulation package version 10.07.p03.

The experiment to measure the Chudakov effect in the accelerator environment used an electron beam; after generating the photons in the target, the electrons were deflected under a uniform magnetic field (Virkus, et al., 2008). The generated photons interact with the $20 \mu\text{m}$ Au targets and the ionization energy loss of the generated pairs is measured with the $16 \mu\text{m}$ CCD detector (for more details of the experimental setup see Virkus, et al., 2008). Au target is used in front of the CCD detector to increase the probability of pair production since the probability of pair production in Au is approximately 35 times higher than Si (Thomsen & Uggerhøj, 2011). To simplify this experimental setup in the simulation, the monoenergetic photon beam was used and its energy was adjusted in accordance with the energies in (Virkus, et al., 2008), thus simulating a simpler experimental setup. The setup includes gold targets (Au1, Au2) to which photons are directed and detectors (Det-1, Det-2) to determine the corresponding information of the generated $e^- - e^+$ pairs. The thickness of the targets (Au) was set to $20 \mu\text{m}$ and the thickness of the detectors (Si) was $16 \mu\text{m}$. A schematic representation of the simulation setup is shown in Figure 1.

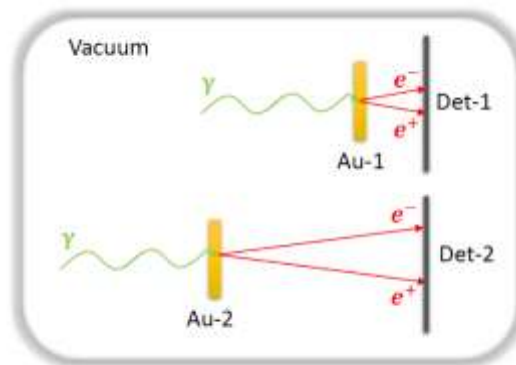


Figure 1. Schematic Representation of Simulation Setup

The drawing is not to scale.

The polar angle between the electron-positron pairs was obtained using the directions of the produced pairs. The photon beam moves along the Z-axis perpendicular to the X and Y-axes; the angles of the secondary particles with respect to the Z-axis are defined as

$$\theta_{(x,y)_i} = \frac{P_{(x,y)_i}}{\sqrt{P_{x_i}^2 + P_{y_i}^2 + P_{z_i}^2}} \quad (3)$$

where $P_{(x,y,z)_i}$ are the momentum directions of the electron-positron pairs.

The Borsellino angles were found numerically by assuming that the energies of the pairs were close to each other. In order to determine the angle between the produced pairs with a similar approach, 5% of half of the photon energy was chosen as the energy window and the opening angle was determined with events satisfying this condition. At least 10^6 events were produced for each selected photon energy and the average opening angle was determined for the pairs. The statistical error of the opening angle was found by repeating the simulations at least three times. The transverse distance of the $e^- - e^+$ pair to each other at the detectors was determined using the opening angle of the pairs and the known distances between the targets and detectors. The horizontal distance between the center of the Au-1 and Au-2 targets to the detectors Det-1 and Det-2 are $16 \mu m$ and $116 \mu m$ respectively.

Results and Discussions

The expected Borsellino and Olsen angles corresponding to the energies between 1-178 GeV are given in Figure 2. The energy points (1.21, 3.71, 11.8, 37.2, and 114 GeV) in the accelerator-based experiment (Virkus, et al., 2008) are considered to adjust the photon source energy in the simulation and the corresponding angles for these energies are given in Figure 2. The simulation results indicate that the opening angles are mostly compatible with the Borsellino angle for the energy region below 30 GeV. In the high energy region, the Borsellino and Olsen angles are approximately the same and the angles from the simulation are compatible with the expected results.

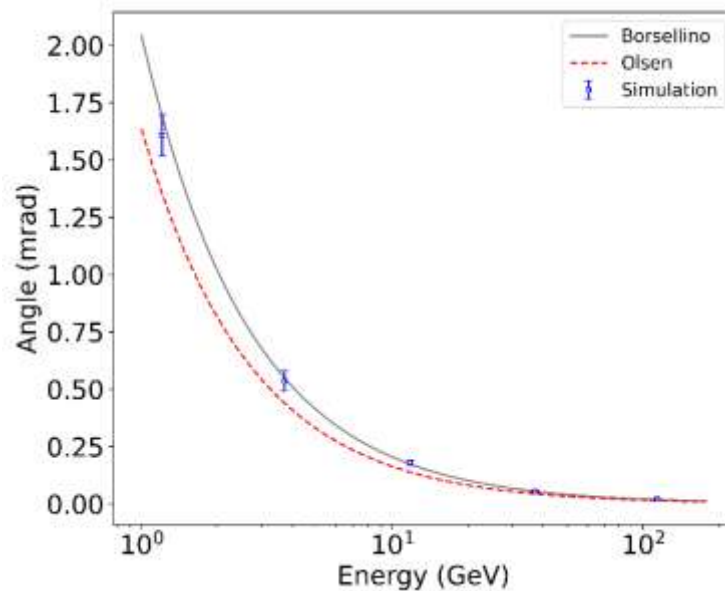


Figure 2. Pair Opening Angles for Gamma Energies between 1-178 GeV

The solid line represents the Borsellino angle, the dashed line Olsen angle, and the points are the simulation results.

To compute the reduction ratio of ionization energy loss in the detectors, the opening angles of the pairs corresponding to the photon beam energy were used in equations 1 and 2. Also, the expected Borsellino and Olsen angles were used to compare the results. The reduction ratio of the ionization

energy loss was defined as the expected ionization energy loss in the detector for the pairs originating from the close (Au1) and far (Au2) targets. The distances of Au1 and Au2 centers to the Det-1 and Det-2 are $16 \mu\text{m}$ and $116 \mu\text{m}$, respectively. Thus, the transverse distance s_1 between pairs produced in Au1 is smaller than the transverse distance of the pair s_2 generated in the second target when they arrived at the detectors. The ionization suppression effect is stronger for the pairs produced in Au1 while the ionization is almost unaffected for the pairs coming from the far ($116 \mu\text{m}$) target. Thus, the reduction of ionization energy loss (the relative ionization suppression (R)) can be calculated with the ratio of expected ionization energy loss of the pairs for s_1 and s_2 distances. The ratios of the ionization suppression are given in Figure 3.

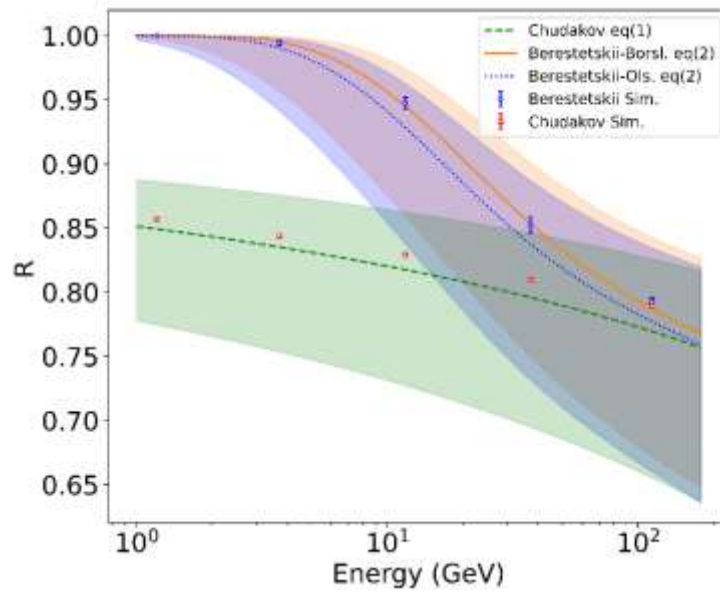


Figure 3. The Ratios of the Ionization Suppression

Relative ionization suppression (R) determined from the Chudakov (dashed) and Berestetskii-Geshkenbain (solid) equations with Borsellino angles, Berestetskii-Geshkenbain (dotted) equation with Olsen angles, Chudakov (open squares) and Berestetskii-Geshkenbain (open circles) equations with simulation angles. The color of the regions is the same as the color of the drawn equations.

In Figure 3, the colored plots represent regions determined with horizontal distances of $d_1 = 16 \pm 10 \mu\text{m}$ and $d_2 = 116 \pm 10 \mu\text{m}$, considering that gamma conversion occurs inside the $20 \mu\text{m}$ gold target. The ionization suppression effect derived from the simulation results are compatible with the results expected for the Berestetskii and Geshkenbain approach. The points derived from the equation 1 differ slightly from the Chudakov approach but are within the expected range. As can be seen in Figure 3, the theories of the Berestetskii-Geshkenbain and Chudakov are quite different below 10 GeV. Also, experimental results show a stronger ionization suppression below 10 GeV than theoretically expected, and the experimental results are mostly consistent with the theory of Chudakov (Thomsen & Uggerhøj, 2011). However, the theoretical expectations are almost the same for the high-energy regions above 100 GeV. The possible ionization suppression ratios determined by applying the simulation results to the theory are also compatible above 100 GeV.

In the accelerator-based experiment designed to directly measure the Chudakov effect, the most probable value of the pair ionization loss is used to determine the relative energy deposition of the pairs (Virkus, et al., 2008). GEANT4 simulation package is suitable for determining the energy loss of the particles in the medium without Chudakov effect. However, the expected relative energy deposition of the pairs can be used to derive the energy loss distribution of the pairs. Recently, Trofymenko proposed the struggling function for the most probable value of the pair ionization loss, which includes the effect of ionization suppression (Trofymenko, 2023). It is stated that the most probable value of the ionization loss of $e^- - e^+$ pairs can be written as

$$E_{MP}(s) = \eta \left[\ln \frac{2m_e \eta}{\left(\frac{\hbar \omega_p}{\beta C}\right)^2} - 2K_0 \left(\frac{\omega_p s}{\beta C}\right) + 0.2 \right] \quad (4)$$

like the equation 2, where $\eta/x \approx 0.0356 \text{ keV}/\mu\text{m}$ for Si detector (Trofymenko, 2023). This expression fit in the struggling function given in (Trofymenko, 2023) and can be used to determine the relative suppression. Thus, the ratio of the most probable energy loss (MPEL) of the pairs can be written as $E_{MP}(s_1)/E_{MP}(s_2)$. Equation 4 is used to numerically calculate the most probable energy deposition of the pairs in detectors and adopted to the simulated energy deposition to configure the suppressed ionization loss distribution indirectly. The relative suppression ratios for energies between 1-178 GeV are given in Figure 4.

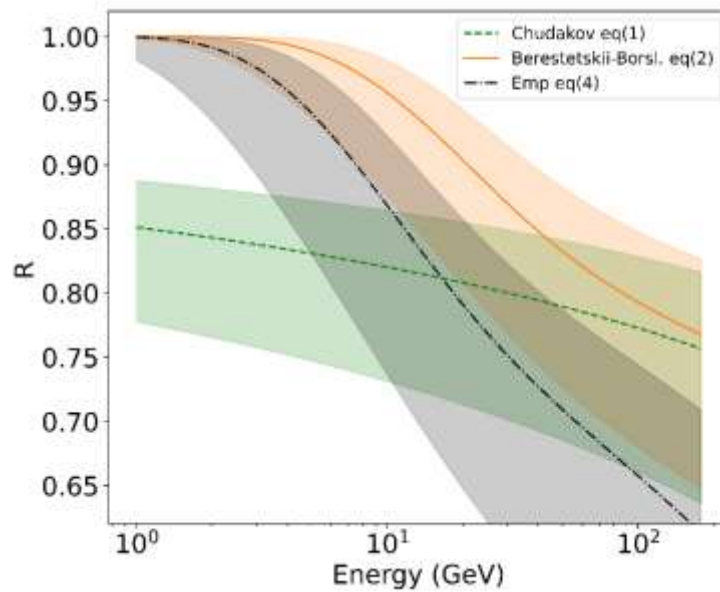


Figure 4. The Relative Suppression Ratios for Energies between 1-178 GeV

Relative ionization suppression (R) for equations (4) (dash-dot), (1) (dashed), and (2) (solid). The color of the regions is the same as the color of the drawn equations.

Although equation 4 mostly coincides with the experimental data (Virkus, et al., 2008) at the high energy region, the difference between curves below 10 GeV is still present. However, the R values can be used to simulate the expected energy deposition distributions for the energies below 40 GeV where $E_{MP}(s_2)$ is almost constant (Trofymenko, 2023). The expected distributions with ionization suppression were determined by applying the R values to the energy depositions of the pairs formed by photon sources with 11.8 and 37.2 GeV energies and are given in Figure 5.

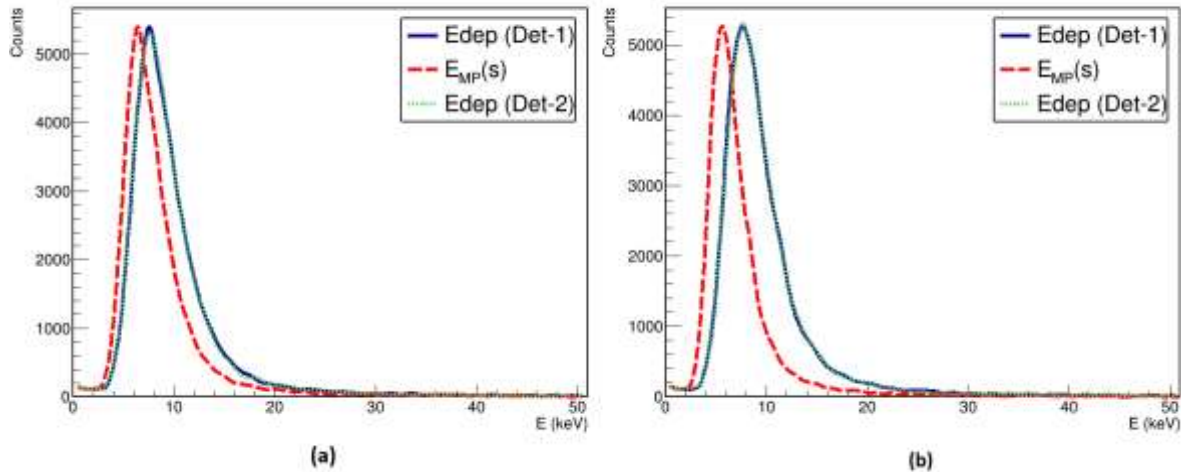


Figure 5. The Energy Depositions of the Pairs Formed by Photon Sources with 11.8 and 37.2 GeV Energies

Expected energy depositions the $e^- - e^+$ pairs for 11.8 GeV (a) and 37.2 GeV (b) photon beams. Red dashed lines represent the expected energy deposition with ionization suppression according to equation 4.

In Figure 5, the most probable value of the energy deposition with ionization suppression (red dashed lines) is specified by fitting the Landau distribution. The MPEL values are 6.58 ± 0.01 and 5.57 ± 0.02 for the given distributions (a) and (b) respectively. The MPEL for the pairs produced by 1.21 GeV photons is approximately the same with the energy deposition without ionization suppression as expected.

Conclusions

This is the first study to indirectly determine the Chudakov effect using the GEANT4 simulation package. The simplified demonstration of the accelerator-based experiment designed for observation of the Chudakov effect was simulated using the GEANT4 simulation package. Simulation results show that the opening angles are mostly in agreement with the Borsellino angle for the energy region below 30 GeV. Above 30 GeV, the Borsellino and Olsen angles are approximately the same and in agreement with the simulated opening angle. Also, the ionization suppression was derived using the simulated opening angles and the results were found to be in agreement with the reproduced literature results. These results show that the GEANT4 software package is suitable for adapting the Chudakov effect to the simulation environment. However, to complete adaptation of the ionization suppression mechanism to any of the simulation environments needs more experimental work, especially below the 10 GeV region. To eliminate the discrepancies between theoretical approaches, an experiment is needed in which the Chudakov effect is observed with high statistics and in a wide energy range. Finally, to adapt the Chudakov effect to the simulation environment, it is necessary to overcome the discrepancies between the theoretical approaches and thus provide consistent theory-experiment results.

Ethics

There are no ethical issues related to the publication of this article.

Conflict of Interest

The author state that there is no conflict of interest.

ORCID




Onur Buğra Kolcu  <https://orcid.org/0000-0002-9177-1286>

References

- Agostinelli, S., et al., (2003). Geant4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8)
- Berestetskii V. B., & Geshkenbain B. V. (1957). Ionizational slowing down of high-energy electron positron pairs. *Sov. Phys. JETP*, 4(609). <https://www.osti.gov/biblio/4350183>
- Borsellino, A. (1953). Momentum transfer and angle of divergence of pairs produced by photons. *The Physical Review*, 89(5), 1023–1025. <https://doi.org/10.1103/physrev.89.1023>
- Burkhardt, G. H. (1958). The suppression effect in ionization by fast electron pairs. *Il Nuovo Cimento*, 9(3), 375–399. <https://doi.org/10.1007/bf02725095>
- Chudakov, A. E. (1955). On an ionization effect associated with observation of electron-positron pairs at very high energy. *Izv. Akad. Nauk. USSR, Ser. Fiz.*, 19(651).
- Iwadare, J. (1958). Suppression effect of the ionization produced by electron-positron pairs of extremely high energy. *The Philosophical Magazine*, 3(31), 680–691. <https://doi.org/10.1080/14786435808237003>
- Geant4 Collaboration (2023). GEANT4 Physics Reference Manual (version: 10.07). Retrieved March 15, 2023 from <http://geant4.cern.ch>
- Mito, I., & Ezawa, H. (1957). Ionization loss near the origin of an electron pair of very high energy. *Progress of Theoretical Physics*, 18(4), 437–447. <https://doi.org/10.1143/ptp.18.437>
- Olsen, H. (1963). Opening angles of electron-positron pairs. *The Physical Review*, 131(1), 406–415. <https://doi.org/10.1103/physrev.131.406>
- Perkins, D. H. (1955). Ionization at the origin of electron Pairs, and the lifetime of the neutral pion. *The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 46(381), 1146–1148. <https://doi.org/10.1080/14786441008521131>
- Shul'ga, N. F., & Trofymenko, S. V. (2014). Anti-Chudakov effect in high-energy electron–positron pair ionization loss in thin target. *Physics Letters. A*, 378(4), 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2013.11.026>
- Thomsen, H. D., & Uggerhøj, U. I. (2011). Measurements and theories of the King–Perkins–Chudakov effect. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section B, Beam Interactions with Materials and Atoms*, 269(17), 1919–1924. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.05.019>
- Trofymenko, S. V., & Shul'ga, N. F. (2013). On ionization energy losses of high-energy electron–positron pair in thin targets. *Physics Letters. A*, 377(37), 2265–2269. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2013.06.044>
- Trofymenko, S. V., & Shul'ga, N. F. (2015). The influence of non-parallelism of electron and positron velocities upon high-energy e+e– pair ionization loss in thin plate. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section B, Beam Interactions with Materials and Atoms*, 355, 140–143. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.02.041>
- Trofymenko, S. V., & Shul'ga, N. F. (2017). Anomalous ionization loss of high-energy e+e– pairs in thin targets. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section B, Beam Interactions with Materials and Atoms*, 402, 44–48. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.017>
- Trofymenko, S. V., & Shul'ga, N. F. (2020). Energy loss by relativistic electron ensembles due to coherent excitation and ionization of atoms. *Physical Review Accelerators and Beams*, 23(8), 084501. <https://doi.org/10.1103/physrevaccelbeams.23.084501>

- Trofymenko, S. V. (2023). Chudakov effect for the most probable value of high-energy electron-positron pair ionization loss in thin targets. *The European Physical Journal. C, Particles and Fields*, 83(1). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11181-y>
- Virkus, T., Thomsen, H. D., Uggerhøj, E., Uggerhøj, U. I., Ballestrero, S., Sona, P., Mangiarotti, A., Ketel, T. J., Dizdar, A., Kartal, S., Pagliarone, C., & CERN NA63 Collaboration. (2008). Direct measurement of the Chudakov effect. *Physical Review Letters*, 100(16), 164802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.164802>
- Wolter, W. & Miesowich, M. (1956). Ionization at the origin of an electron pair of very high energy. *Nuovo Cimento*, 4(648). <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02745390.pdf>
- Yekutieli, G. (1957). Ionization at the origin of high energy electron positron pairs. *Il Nuovo Cimento*, 5(6), 1381–1387. <https://doi.org/10.1007/bf02856030>
- Zieliński, I. P. (1985). On the possibility of the electronic measurement of the King-Perkins-Chudakov effect for electron pairs using a multilayer silicon detector. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 238(2–3), 562–563. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(85\)90502-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(85)90502-9)

Solution of the Cauchy Problem in Fourier Series for a Linear RC Circuit with a Resistor and Two Capacitors

Numan Derda Özkutlu¹ , Hafız Aliso² , Gülizar Aliso³ 

¹Ordu University, Vocation School of Technical Sciences, Electronics and Automation, Ordu

²Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Engineering, Electronics and Telecommunication, Tekirdağ

³Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Arts and Sciences, Mathematics, Tekirdağ

Geliş Tarihi / Received Date: 10.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 14.09.2023

Abstract

As it is known, solutions obtained in terms of Fourier series are widely used for more detailed analysis of mathematical models defined for different engineering problems. In this study, for the mathematical analysis of transient events in active RC based linear electronic circuits, the Cauchy problem is defined and solved in terms of Fourier series. For this reason, first of all, the mathematical model needed for the mathematical definition of the investigated problem was created. Based on the defined mathematical model, a quadratic differential equation for the linear RC electric circuit is obtained and the voltage and current changes are analysed for simple special cases using the Fourier series. As a result, mathematical modelling of transient processes occurring in linear RC circuits and mathematical problems defined as the Cauchy problem for such circuits have been solved analytically. It is thought that the results of the research will contribute theoretically and practically to the solution of the problems that arise in the study and design automation of different electronic circuits containing nonlinear circuit elements.

Keywords: electronics, differential equations, Fourier series, mathematical model, RC circuit

Bir Direnç ve İki Kapasitörlü Lineer Bir RC Devresi için Cauchy Probleminin Fourier Serisi Cinsinden Çözümü

Öz

Bilindiği üzere, değişik mühendislik problemleri için tanımlanan matematiksel modellerin daha ayrıntılı analizi için Fourier serisi cinsinden elde edilen çözümler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, aktif RC tabanlı lineer elektronik devrelerde gerçekleşen transient olayların matematiksel analizi için Cauchy problemi tanımlanmış ve Fourier serisi cinsinden çözülmüştür. Bu nedenle öncelikle, incelenen problemin matematiksel tanımı için ihtiyaç duyulan matematiksel model oluşturulmuştur. Tanımlanan matematiksel modele dayalı olarak lineer RC elektrik devresi için ikinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilmiş ve Fourier serisi kullanılarak basit özel durumlar için gerilim ve akım değişimleri analiz edilmiştir. Sonuç olarak, lineer RC devrelerinde gerçekleşen geçici süreçlerin matematiksel modellenmesi ile bu tür devreler için Cauchy problemi biçiminde tanımlanmış matematiksel problemler analitik çözülmüştür. Elde edilen araştırma sonuçlarının, doğrusal olmayan devre elemanları içeren değişik elektronik devrelerin çalışma ve tasarım otomasyonunda ortaya çıkan problemlerin çözümüne teorik ve pratik katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: elektronik, diferansiyel denklemler, Fourier serileri, matematiksel model, RC devre

Introduction

In today's conditions, the production of information transmission systems, computers and other electronic equipment has become one of the priority areas of scientific research. Electrical signals whose physical magnitude is current or voltage are used in information transmission systems. At the same time, information transfer tools include highly complex electronic circuits (Chua & NG, 1979; Rabiner, 1971; Sun & Fidler, 1997). For this reason, the quality requirements of the designed electronic devices are increasing and every device developed must provide the necessary accuracy (Bruton, 1980; Chua & Lin, 1975; Manthe et al., 2003; Sanchez-Lopez et al., 2011; Soliman & Saad, 2010). Apart from these, it is known that the calculations encountered in the design of electronic circuits have a very complex structure. This situation has made it necessary not to use modern computational facilities. Also, circuit-based methods of prototyping have proven to be ineffective, making it impossible to study integrated circuits that are traditionally assembled from discrete elements (Yerzhan & Langheinrich, 1985). Thus, the complexity and responsibility of the electronic circuits being developed made it necessary to abandon the old traditional methods (Dumitriu et al., 2007; Sanchez-Lopez, 2013; Sanchez-Lopez et al., 2011).

Electrical circuits may consist of simple or complex systems for a specific purpose. The basic laws that can solve these systems using old traditional methods are also the same. Therefore, the qualitative theory of dynamical systems should provide the basis for a more accurate necessary approach (Teor, 1984). From this point of view, computerized analysis of transient processes occurring in electrical circuits has become quite common. Therefore, it is necessary to determine the mathematical models needed for the transient processes in line with the targeted problems. It should be known that the mathematical model of the problem depends on its physical formulation, symbolic analysis and the properties of the circuit elements. At this point, symbolic analysis is a powerful tool that can model the behaviour of a circuit with symbolic parameters. At the same time, symbolic expressions not only give a better idea of the behaviour of the circuit, but can also be used in synthesis and optimization procedures (Sanchez-Lopez, 2011). In this modelling, the mathematical models of the processes occurring in various linear RC circuits are examined and the analytical solution of the transient processes is calculated.

In the transient occurring in a linear RC circuit containing two capacitors and a resistor, the changes in the determined component of the solution at the initial moment are determined. Thus, the mathematical definition of the problem was made with the help of mathematical modelling method. Special cases were also determined by analysing the solution obtained from the mathematical model. As a result, an analytical solution is found by obtaining mathematical models of transient processes in a linear electronic circuit.

Material and Method

Transition Processes in Linear Circuits

In electrical circuits, during various interactions that lead to a change in their mode of operation, i.e., under the action of various kinds of switching equipment, for example, switches for turning on or off the source or receiver of energy, when the circuit breaks, etc., transient processes occur. Among these effects, an important role is played by harmonic oscillations, which are widely used for the transmission of signals and electrical energy. The study of the mode of harmonic oscillations is also important in those cases when non-harmonic effects are considered and expansions of the function describing the effect signal into Fourier series are used.

The physical reason for the occurrence of transient processes in circuits is the presence of inductive and capacitive elements in them in the corresponding equivalent circuits. This is explained by the fact that the energy of the magnetic and electric fields formed on the components during the transition process in the circuit cannot suddenly change. It is known that for the analysis and design of electronic circuits, it is necessary to develop a mathematical model of the possible processes that

may occur in these circuits. Therefore, the temporal process in a linear circuit is described by linear differential equations. In most cases, there is a mathematical problem associated with the Cauchy problem for a system of ordinary differential equations. For this reason, various analytical methods are used to solve constant parameter linear differential equations. These methods are used to calculate transient processes occurring in electrical circuits. The most common of these methods is the classical method, which has a physical nature and is used to calculate simple circuits. At the same time, the operator method and the Fourier integral method are used to simplify the computation of complex circuits. The purpose of this work is to implement the Fourier integral method for the equivalent electrical circuit shown in Figure 1, when the source is a complex function.

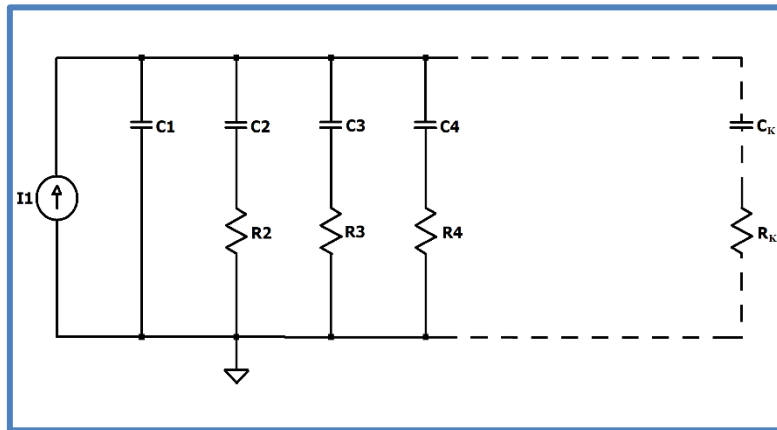


Figure 1. Linear RC Circuit with n Capacitors

The processes occurring in electronic circuits can be described using mathematical relationships between the fundamental parameters of the circuit. These parameters are mainly currents, voltages and properties of circuit elements. It is also known that these equations are arranged according to Kirchhoff's laws. The number of these equations depends on the number of energy storage elements of the electric and magnetic fields in the circuit under consideration. In this work, capacitors act as a storage device for electrical energy. Starting from the laws of Kirchhoff and commutation (second commutation law $V_C(0^-) = V_C(0^+)$) to construct the circuit's state equations, the following well-known formulas can be written for the electrical circuit under consideration (Figure 1):

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} = \sum_{k=2}^n \frac{V_{C_k} - V_{C_1}}{R_k} + i(t) \\ C_j \frac{dV_{C_j}}{dt} = \frac{V_{C_1} - V_{C_j}}{R_j}, \quad j = 2, 3, \dots, n \\ i_k = C_k \cdot \frac{dV_{C_k}}{dt}, \quad k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

$$V_{C_k}(t)|_{t=0} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Thus, the Cauchy problem for differential equations (1) with initial conditions (2) compiled for this scheme in the general formulation can be formulated as follows:

Let a system of n differential equations with n sought-for functions in normal form (1) and a system of initial conditions (2) be given,

- i. If the point $M_0(t_0, x_{10}, \dots, x_{n0})$ is $(n + 1)$ - inside the dimensional domain of variables $\Omega(t, x_1, \dots, x_n)$ in which $\lim_{M \rightarrow M_0} f(M) = f(M_0)$, then there exists a particular solution of system (1) that satisfies the conditions (2)

- ii. If, in addition, in this region $\Omega(t, x_1, \dots, x_n)$ the functions f_i - have continuous partial derivatives $(f_i)'_{x_j}(M)$, ($i, j = 1, 2, \dots, n$) then this particular solution is unique.

For simplicity, the described Cauchy problem is primarily solved a linear RC circuit with two capacitors. For this special case, the solution of the system of linear equations defined by (1), satisfying the initial condition defined by (2), can be written in terms of circuit parameters and source $i(t)$ function as follows:

$$V_{C_2}(t) = \frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t f(x) e^{-\left(\frac{C_1+C_2}{R_2 C_1 C_2}\right)x} dx = \frac{1}{\tau_2} \int_0^t f(x) e^{-\alpha x} dx \quad (3a)$$

$$V_{C_1}(t) = V_{C_2}(t) + \left[f(t) e^{-\left(\frac{C_1+C_2}{R_2 C_1 C_2}\right)t} \right] = V_{C_2}(t) + [f(t) e^{-\alpha t}] \quad (3b)$$

Here,

$$f(t) = \frac{1}{C_1} \int_0^t i(x) e^{\left(\frac{C_1+C_2}{R_2 C_1 C_2}\right)x} dx = \frac{1}{C_1} \int_0^t i(x) e^{\alpha x} dx \quad (4)$$

In these formulas, the notation $\alpha = \frac{C_1+C_2}{R_2 C_1 C_2} = \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_1}$ is made, and τ_1 and τ_2 represent the time constants of the capacitors C_1 and C_2 in the circuit. As it can be seen, the solution of the Cauchy problem defined for the investigated special case depends on the source function $i(t)$.

If all discontinuity points of the function $i(t)$ are discontinuity points of the first kind and have no more than a finite number of local extrema on the segment $[0, T]$, then the Dirichlet conditions are satisfied. Therefore, according to the Dirichlet theorem, $i(t)$ can be expanded into a Fourier series (Ionkin, 1976; Polyanin, 2006).

$$i(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) \right) \quad (5)$$

The coefficients a_0 , a_k and b_k contained in this expression are determined by using the formulas in (6), respectively.

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) dt \\ a_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(k\omega t) dt \\ b_k = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(k\omega t) dt \end{cases} \quad (6)$$

In subsequent calculations, it is necessary to know the integral values obtained as a result of rearrangement of expression (4) by considering expression (5).

$$f(t) = \frac{1}{C_1} \left[A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \right] \quad (7)$$

Here,

$$A_0 = \frac{a_0}{2} \int_0^t e^{\alpha x} dx = \frac{a_0(e^{\alpha t} - 1)}{2\alpha} \quad (8a)$$

$$A_k = a_k \int_0^t e^{\alpha x} \cos(k\omega x) dx = \frac{a_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} \{e^{\alpha t} [\alpha \cos(k\omega t) + k\omega \sin(k\omega t)] - \alpha\} \quad (8b)$$

$$B_k = b_k \int_0^t e^{\alpha x} \sin(k\omega x) dx = \frac{b_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} \{e^{\alpha t} [\alpha \sin(k\omega t) - k\omega \cos(k\omega t)] + k\omega\} \quad (8c)$$

Thus, we can determine the desired functions $V_{C_1}(t)$ and $V_{C_2}(t)$. To do this, we first need to calculate the integral using the expression (8a-8c):

$$V_{C_2}(t) = \frac{1}{\tau_2 C_1} \int_0^t e^{-\alpha x} \left[A_0(x) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k(x) + B_k(x) \right] dx \quad (9)$$

Substituting these formulas in equation (9) and calculating the integrals, we obtain the function $V_{C_2}(t)$ in the following form.

$$V_{C_2}(t) = \frac{1}{\tau_2 C_1} \left\{ \frac{a_0}{2\alpha} \left(t + \frac{(e^{-\alpha t} - 1)}{\alpha} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} \left[\frac{\alpha}{k\omega} \sin(k\omega t) - \cos(k\omega t) + e^{-\alpha t} + 1 \right] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} \left[\frac{\alpha}{k\omega} (1 - \cos(k\omega t)) - \sin(k\omega t) + \frac{k\omega}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right] \right\} \quad (10)$$

Then, using the $V_{C_2}(t)$ function we determined, the $V_{C_1}(t)$ function is determined as follows, starting from the expression (3b):

$$\begin{aligned} V_{C_1}(t) &= V_{C_2}(t) + R_2 C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} \\ &= V_{C_2} \\ &+ \frac{1}{C_1} \left\{ \frac{a_0}{2\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right. \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} [\alpha \cos(k\omega t) - k\omega \sin(k\omega t) - \alpha e^{-\alpha t}] \\ &\left. + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} [\alpha \sin(k\omega t) - k\omega \cos(k\omega t) + k\omega e^{-\alpha t}] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

Thus, the expressions (10) and (11) that allow to determine the desired functions $V_{C_1}(t)$ and $V_{C_2}(t)$ depending on the $i(t)$ function were determined with the help of the Fourier series. In the next step, $i_1(t)$ and $i_2(t)$ functions, which define the change of currents in the circuit depending on time t , are determined. For this purpose, the following formulas are used.

$$\begin{cases} i_2(t) = C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} \\ i_1(t) = i(t) - C_2 \frac{dV_{C_2}}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

As can be seen, after determining the first derivative of the $V_{C_2}(t)$ function, we obtain the following equation to determine the $i_2(t)$ function.

$$i_2(t) = \frac{1}{R_2 C_1} \left\{ \frac{a_0}{2\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} [\alpha \cos(k\omega t) - k\omega \sin(k\omega t) - \alpha e^{-\alpha t}] \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_k}{\alpha^2 + (k\omega)^2} [\alpha \sin(k\omega t) - k\omega \cos(k\omega t) + k\omega e^{-\alpha t}] \right\} \quad (13)$$

Thus, by substituting the determined expression (13) in the second equation in the expression (12), the $i_1(t)$ function is also determined.

As a result, the solution of the Cauchy problem for the above-defined two-capacitor linear RC electric circuit is performed in terms of Fourier series, and formulas that allow determining the functions $V_{C_1}(t)$, $V_{C_2}(t)$, $i_1(t)$ and $i_2(t)$ are derived.

Along with these operations, it is necessary to take into account special cases when the current source function $i(t)$ acting at the input of the circuit has certain types. In practice, the following two cases often occur.

Special Case where Current Is a Periodic Function

Let the current $i(t)$ be variable and use the following periodic function to define it:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (14)$$

where A is the amplitude and ω is the angular frequency. This periodic function is written in the formulas $V_{C_1}(t)$ and $V_{C_2}(t)$ obtained in fourier terms.

$$\int_0^t e^{\alpha x} \sin(\omega x) dx = \frac{e^{\alpha t}}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha \sin(\omega t) + \omega(1 - \cos(\omega t))] \quad (15)$$

Also, the functions $V_{C_1}(t)$ and $V_{C_2}(t)$ are restated considering equation (15).

$$V_{C_2}(t) = \frac{I_m}{R_2 C_2 C_1 (\alpha^2 + \omega^2)} \left[\frac{\omega}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) - \sin(\omega t) + \frac{\alpha}{\omega} (1 - \cos(\omega t)) \right] \quad (16)$$

$$V_{C_1}(t) = V_{C_2}(t) + \frac{I_m \alpha}{C_1 (\alpha^2 + \omega^2)} \left[\sin(\omega t) - \frac{\omega}{\alpha} (e^{-\alpha t} - \cos(\omega t)) \right] \quad (17)$$

In addition to these expressions, new expressions of $i_1(t)$ and $i_2(t)$ functions are determined using these formulas.

$$i_2(t) = \frac{I_m \alpha}{R_2 C_2 C_1 (\alpha^2 + \omega^2)} \left[\sin(\omega t) + \frac{\omega}{\alpha} [e^{-\alpha t} - \cos(\omega t)] \right] \quad (18)$$

$$i_1(t) = i(t) - i_2(t) \quad (19)$$

The obtained analytical solution of the mathematical problem defined for the case under study makes it possible to perform a numerical analysis for various values of the parameters describing a particular electrical circuit.

Analysis of the results corresponding to the problem solving;

For the examined electrical circuit, the results of the numerical calculation are given for the values of the parameters ($C_1 = 5\mu F$, $C_2 = 2,5\mu F$; $R = 10k\Omega$; $f = 150Hz$) included in the circuit. For this case, $I_m = 1A$; $i(t) = \sin(\omega t) = \sin(2\pi f t)$

$$V_{C_2}(t) \cong 1.41 \cdot 10^2 \left[1 - e^{-60t} - \frac{1}{5\pi} \sin(300\pi t) + \frac{1}{25\pi^2} (1 - \cos(300\pi t)) \right] \quad (20a)$$

$$V_{C_1}(t) \cong V_{C_2}(t) + 13.47[\sin(300\pi t) + 5\pi(\cos(300\pi t) - e^{-60t})] \quad (20b)$$

$$i_2(t) \cong 5.387 \cdot 10^2 [\sin(300\pi t) + 5\pi(e^{-60t} - \cos(300\pi t))] \quad (20c)$$

$$i_1(t) \cong \sin(300\pi t) - i_2(t) \quad (20d)$$

Calculations are performed using a step of $h = 0.001$ for a time interval of $0 < t < 0.15$. Based on these expressions, the voltage variation graphs on the capacitors C_1 and C_2 are given in Figure 2.

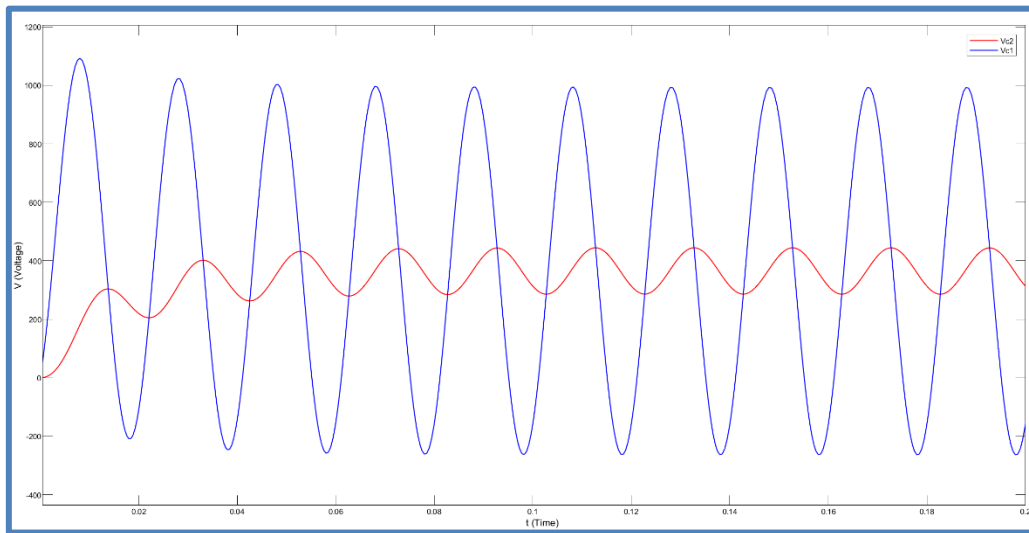


Figure 2. The Variation of Voltage Value $V_{C_1}(t)$ and $V_{C_2}(t)$ on Capacitors C_1 and C_2 When $i(t) = I_m \cdot \sin\omega t$

Accordingly, the variation of currents $i_1(t)$ and $i_2(t)$ with respect to time is given in Figure 3.

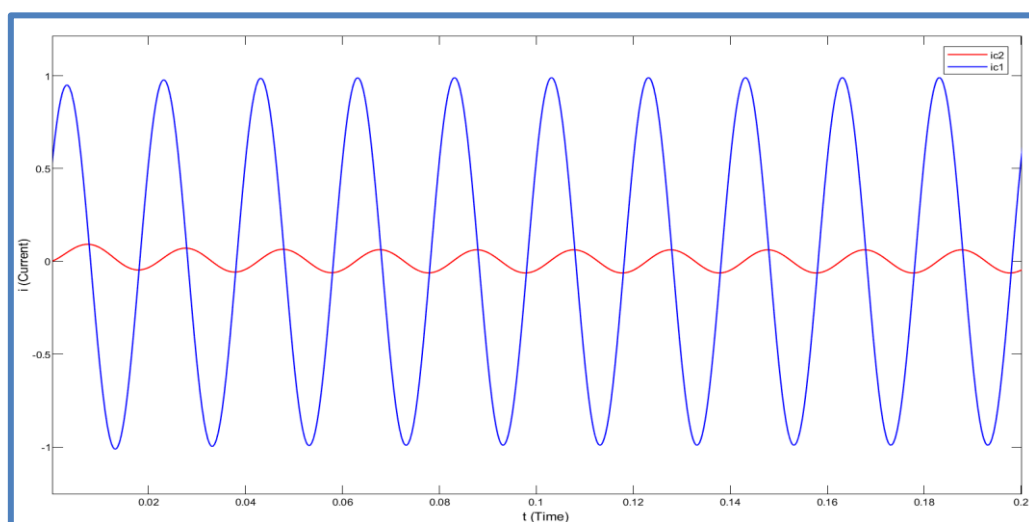


Figure 3. The Variation of Current Value $i_1(t)$ and $i_2(t)$ When $i(t) = I_m \sin\omega t$

Special Case Where Current is a Unit Step Function

In this case, it is accepted that the current $i(t)$ is a signal in the form of a unit step applied to the circuit and is the cause of the transient event in the electrical circuit under consideration.

$$i(t) = \begin{cases} I_m & \text{if } 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0 & \text{if } \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (21)$$

Extending this $i(t)$ function to a Fourier series gives the following expression.

$$i(t) = \frac{I_m}{2} + \frac{2I_m}{\pi} \left(\frac{\sin \omega t}{1} + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \frac{\sin(5\omega t)}{5} + \dots \right) \quad (22)$$

The coefficients of this series (22) are determined from the formulas:

$$a_0 = I_m ; a_k = 0 ; b_k = \frac{I_m}{k\pi} [1 - (-1)^k], \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (23)$$

In this particular case, the desired functions are obtained as follows.

$$V_{C_2}(t) = \frac{1}{\tau_2 C_2} + \left\{ \frac{I_m}{2\alpha} \left(t + \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} - \frac{1}{\alpha} \right) + \frac{I_m T^2 \alpha}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]}{k[(2k\pi)^2 + (\alpha T)^2]} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - \frac{1}{\alpha} \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) + \frac{2k\pi}{\alpha^2 T} (1 - e^{-\alpha t}) \right] \right\} \quad (24a)$$

$$V_{C_1}(t) = V_{C_2}(t) + \frac{1}{C_1} + \left\{ \frac{I_m}{2\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{I_m T^2 \alpha}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]}{k[(2k\pi)^2 + (\alpha T)^2]} \left[\sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - \frac{2k\pi}{\alpha T} \left(\cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - e^{-\alpha t} \right) \right] \right\} \quad (24b)$$

$$i_2(t) = \frac{C_2}{\tau_2 C_1} + \left\{ \frac{I_m}{2\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{I_m T^2 \alpha}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]}{k[(2k\pi)^2 + (\alpha T)^2]} \left[\frac{2\pi k}{T} \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - \frac{2k\pi}{\alpha T} \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) + \frac{2k\pi}{\alpha T} (e^{-\alpha t}) \right] \right\} \quad (24c)$$

$$\begin{aligned}
i_1(t) = & \frac{I_m}{2} + \frac{2I_m}{\pi} \left(\frac{\sin(\omega t)}{1} + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \frac{\sin(5\omega t)}{5} \right) - \frac{C_2}{\tau_2 C_1} \\
& + \left\{ \frac{I_m}{2\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right. \\
& + \frac{I_m T^2 \alpha}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]}{k[(2\pi k)^2 + (\alpha T)^2]} \left[\frac{2\pi k}{T} \sin\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) - \frac{2k\pi}{\alpha T} \cos\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) \right. \\
& \left. \left. + \frac{2k\pi}{\alpha T} (e^{-\alpha t}) \right] \right\} \quad (24d)
\end{aligned}$$

The solutions obtained determine the state of the circuit in transient mode. In order to determine the steady state, the values of the sought functions at $t \rightarrow \infty$ must be determined.

For example, for the current $i_2(t)$:

$$\begin{aligned}
\lim_{t \rightarrow \infty} i_2(t) = & \frac{C_2}{C_1 \tau_2} \left\{ \frac{I_m}{2\alpha} (1 - \exp(-\alpha t)) \right. \\
& + \frac{I_m T^2 \alpha}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]}{k[(2\pi k)^2 + (\alpha T)^2]} \left[\left(\sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - \frac{2\pi k}{T\alpha} \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) \right) \right] \left. \right\} \\
= & \frac{C_2}{C_1 \tau_2} \left\{ \frac{I_m}{2\alpha} \right. \\
& + \frac{\alpha I_m T^2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k]}{k[(2\pi k)^2 + (\alpha T)^2]} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi k}{\alpha T}\right)^2} \sin\left(\frac{2\pi k t}{T} - \varphi_k\right) \left. \right\} \quad (25)
\end{aligned}$$

Here, $\varphi_k = \arctg\left(\frac{2\pi k}{\alpha T}\right)$. In the settled regime, it will be $i_2(t) = i_2^0(t)$.

$$i_2^0(t) = \frac{C_2}{C_1 \tau_2} \left[\frac{A}{2\alpha} + \frac{AT}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^k] \sin\left(\frac{2\pi k t}{T} - \varphi_k\right)}{k[\sqrt{(2\pi k)^2 + (\alpha T)^2}]} \right] \quad (26)$$

$$i_1^0(t) = \frac{A}{2} \left(1 - \frac{C_2}{C_1 \tau_2} \right) + \frac{A}{\pi} \left[\sum_{k=1}^{\infty} \left(2 \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) - \frac{\sin\left(\frac{2\pi k t}{T} - \varphi_k\right)}{\sqrt{(2\pi k)^2 + (\alpha T)^2}} \right) \right] \quad (27)$$

Conclusion

For active RC-based linear electric circuits, two capacitor circuits were examined and mathematical models obtained from the initial equations were found. It has been determined that these mathematical models meet all the requirements of Cauchy problems using Ohm and Kirchhoff's law.

After the circuit equations were defined, solutions of differential equations were realized with certain notations. Since these equations are used in a circuit with two capacitors, they are rearranged as a second order differential equation and an intrinsic solution is obtained. It has been found that if this self-solution gives us a function $i(t)$ it allows us to construct the current and voltage equations on the capacitors depending on the current.

In order to better analyse the complex electronic circuits, the Fourier series expansions are calculated with the Cauchy problems together with the Dirichlet conditions depending on the $i(t)$ function. These calculations allowed to find the voltage equations on the capacitors. Along with the voltage equations, the current equations on the capacitor depending on t time are also found.

The special cases that are frequently encountered in practice, namely the special case where the current is periodic, and the special case where the current is a unit step, were analysed and determined. Special cases made it possible to solve for various parameters of circuits. In addition, numerical analysis of accepted transients on a circuit is also done.

Author Contribution

Numan Derda Özkutlu, Hafız Alisoy and Gülizar Alisoy, performed the experimental process. *Numan Derda Özkutlu and Hafız Alisoy*, performed literature review, data collection, and theoretical analysis. *Hafız Alisoy*, performed supervision. The authors read and approved the article.

Ethic

There are no ethical issues with the publication of this article.

Conflict of Interest

The authors state that there is no conflict of interest.

ORCID

Numan Derda Özkutlu  <https://orcid.org/0000-0002-9540-3165>

Hafız Alisoy  <https://orcid.org/0000-0003-4374-9559>

Gülizar Alisoy  <https://orcid.org/0000-0003-2114-6669>

References

- Bruton, L. T. (1980). *RC active circuits theory and design*. Praentice-Hell, Inc.
- Chua, L. O., & Ng, C. Y. (1979). Frequency domain analysis of nonlinear systems: General theory. *IEE Journal on Electronic Circuits and Systems*, 3(4), 165-185. <https://doi.org/10.1049/ij-ecs.1979.0030>
- Chua, L. O., & Lin, P.-M. (1975). *Computer-aided analysis of electronic circuits: Algorithms and computational techniques*. Prentice-Hall.
- Dumitriu, L., Iordache, M., & Voicu, N. (2007, August). Symbolic hybrid analysis of nonlinear analog circuits. In *2007 18th European Conference on Circuit Theory and Design* (pp. 970-973). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECCTD.2007.4529760>
- Ionkin P. A. (1976). *Fundamentals of linear circuit theory*. McGraw-Hill Education.
- Manthe A., Li Z., Shi C. J. R., & Mayaram K. (2003). Symbolic analysis of nonlinear analog circuits. In *Proceedings of the 40th annual Design Automation Conference* (pp. 542-545). <https://doi.org/10.1145/775832.775969>
- Polyanin, A. D., & Manzhirov, A. V. (2006). *Handbook of mathematics for engineers and scientists*. CRC Press.
- Rabiner, L. (1971). Techniques for designing finite-duration impulse-response digital filters. *IEEE transactions on communication technology*, 19(2), 188-195. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1971.1090625>

- Sánchez-López, C., Fernández, F. V., Tlelo-Cuautle, E., & Tan, S. X. D. (2011). Pathological element-based active device models and their application to symbolic analysis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 58(6), 1382-1395. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2010.2097696>
- Sanchez-Lopez, C. (2013). Pathological equivalents of fully-differential active devices for symbolic nodal analysis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60(3), 603-615. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2244271>
- Soliman, A. M., & Saad, R. A. (2010). The voltage mirror–current mirror pair as a universal element. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 38(8), 787-795. <https://doi.org/10.1002/CTA.596>
- Sun, Y., & Fidler, J. K. (1997). Component value ranges of tunable impedance matching networks in RF communications systems. *IEEE Conference Publication*, 2(441), 185-189. <https://doi.org/10.1049/cp:19970786>
- Teor C. (1984). Translated from teoreticheskaya matematicheskaya fizika. PN Lebedev Physics Institute, *USSR Academy of Sciences*, 60 (9), 395-403. <https://doi.org/10.1049/cp:19970786>
- Troster, G., & Langheinrich, W. (1985). An optimal design of active distributed RC networks for the MOS technology. In *Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe* (pp. 1431-1434). <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/789083.1022876>
- Yerzhan, A. A., & Zauytbek, K. (2015). An approach to the problem solving of sensitivity determining of electronic circuitry. *International Journal of Management, Information Technology and Engineering*, 3(9), 83-94. <https://paper.researchbib.com/view/paper/51700>

Computational Insights in Drug-likeness and ADMT Properties of -dienes Resemble of Geranial

Goncagül Serdaroğlu¹ 

¹Sivas Cumhuriyet University, Mathematics and Science Education, Sivas

Geliş Tarihi / Received Date: 31.05.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 13.06.2023

Abstract

This research aims to analyze the drug development potential of geranial, a naturally occurring compound known for its medicinal properties, through in-depth ADMT (Absorption, Distribution, Metabolism, and Toxicity) profiling and Density Functional Theory (DFT) calculations, at B3LYP/6-311G** level and basis set. The optimized and confirmed structures of the data set were used for further computations. The FMO "Frontier Molecular Orbital" energies and MEP "Molecular Electrostatic Potential" were considered to elucidate the possible reactivity features and regions of the molecules, respectively. Concurrently, DFT calculations helped to elucidate the compound's electronic properties and structural stability, further affirming its suitability for drug development. These findings emphasize the potential of compounds structurally related to geranial in the pharmaceutical field and underline the necessity of similar evaluations for novel drug candidates, ensuring safety and efficacy while mitigating potential risks to human health and the environment.

Keywords: geranial, ADMT study, DFT computations

Geranial benzeri -dienlerin İlaç Benzerliği ve ADMT Özelliklerine İlişkin Hesaplama Analizler

Öz

Bu araştırma, tıbbi özellikleriyle bilinen, doğal olarak oluşan bir bileşik olan geranialin (sardunya) ilaç geliştirme potansiyelini, derinlemesine ADMT (Absorpsiyon, Dağıtım, Metabolizma ve Toksikite) profili oluşturma ve B3LYP/6-311G** fonksiyon ve temel setinde, Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) hesaplamaları yoluyla analiz etmeyi amaçlamaktadır. Veri setinin optimize edilmiş ve onaylanmış yapıları daha sonraki hesaplamalar için kullanıldı. FMO "Frontier Molecular Orbital" enerjileri ve MEP "Moleküler Elektrostatik Potansiyel" sırasıyla moleküllerin olası reaktivite özelliklerini ve bölgelerini aydınlatarak şekilde değerlendirildi. Ayrıca, DFT hesaplamaları bileşiğin elektronik özelliklerinin ve yapısal stabilitesinin aydınlatılmasına yardımcı oldu ve ilaç geliştirmeye uygunluğunu doğruladı. Bu bulgular, farmasötik alanda geranial ile yapısal olarak ilişkili bileşiklerin potansiyelini vurgulamakta ve insan sağlığına ve çevreye yönelik potansiyel riskleri azaltırken güvenlik ve etkinliği sağlayan yeni ilaç adayları için benzer değerlendirmelerin gerekliliğinin altını çizmektedir.

Anahtar Kelimeler: geranial, ADMT çalışması, DFT hesaplamaları

Introduction

Geranial, also known as citral, is a naturally occurring organic compound found in various essential oils, including lemongrass, lemon, and orange (Gaonkar et al., 2016; Wohlmuth et al., 2006). Geranial-based molecules, derivatives, and analogs have garnered significant attention due to their unique chemical properties and diverse applications, particularly in the field of medicine. Furthermore, it is a volatile aldehyde with a distinct citrus aroma and is widely used in the fragrance and flavor industries (Burdock et al., 2009) as well as food additives (Ruiz et al., 2008; Sharmeen et al., 2021). Its characteristic citrus scent provides a fresh and invigorating experience, contributing to its widespread use in various consumer products. Additionally, geranial possesses antimicrobial (Viktorová et al., 2020), antifungal (Ju et al., 2020), and insecticidal (Oyedeji et al., 2020; Plata-Rueda et al., 2020) properties, making it an effective natural preservative and repellent.

In recent years, the medicinal importance of geranial and its derivatives has been extensively studied and researchers have discovered a range of potential therapeutic applications for these molecules (Bailly 2020, Li et al., 2015; Zeng et al., 2023). In this respect, Studies have shown that geranial exhibits significant anticancer activity by inducing apoptosis (programmed cell death) in cancer cells, inhibiting tumor growth, and suppressing metastasis (Balusamy et al., 2020; Samarghandian et al., 2014; Silva et al., 2021). Its cytotoxic effects on cancer cells have made it a promising candidate for the development of novel chemotherapeutic agents. Moreover, geranial-based molecules have demonstrated potent anti-inflammatory and analgesic properties, which have been found to inhibit the production of inflammatory mediators and reduce pain in various experimental models (Adorjan et al., 2010; Bouyahya et al., 2022; Ortiz et al., 2010). These findings suggest that geranial and its derivatives hold promise for the development of new anti-inflammatory drugs and pain management strategies. Furthermore, geranial has shown antimicrobial activity against a wide spectrum of bacteria, fungi, and parasites. It exhibits inhibitory effects against several pathogenic organisms, including *Staphylococcus aureus*, *Candida albicans*, and *Plasmodium falciparum*, the parasite responsible for malaria (Oladeji et al., 2020; Sharma et al., 2023; Tchoumboungang et al., 2005). The antimicrobial potential of geranial-based molecules has led to their investigation as alternative agents for the treatment of infectious diseases, particularly those caused by drug-resistant microorganisms.

In light of the diverse properties and medicinal importance of geranial-based molecules, this paper aims to provide an overview of their main characteristics and therapeutic potential. For this aim, we performed the DFT computations based on the B3LYP hybrid function using the 6-311G** basis set to determine and evaluation of the electronic structure underlying the reactivity tendency. Also, the ADMT features of the compounds have been used to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness, and toxicity possibility in addition to the water solubility and lipophilicity to discuss the challenges and prospects for developing geranial-based molecules as pharmaceutical agents. By gaining a deeper understanding of the main properties and medicinal significance of geranial and its derivatives, we hope to pave the way for further research and development in this promising field. The potential applications of geranial-based molecules in various therapeutic areas make them an intriguing subject for exploration and hold the potential to make a significant impact on human health.

Computational Methods

DFT Study

The G09W (Frisch et al., 2013) and GaussView 6.0.16 (Dennington et al., 2016) packages were used for all DFT computations at the B3LYP (Becke 1993; Lee et al., 1988) /6-311G** (Raghavachari et al., 1980; McLean et al., 1980) level of theory maintaining default (Kudin et al., 2002; Li et al., 2006) settings and for demonstrating the optimized structures and FMO plots, respectively.

As known well, the thermodynamic quantities have been assessed depending on the principles of quantum statistics (Hill 1962; McQuarrie 1973). In this way, the Q "partition function" is crucial in

determining thermodynamic properties through specific equations defined below. In such asymmetric top systems, the vibrational degree of freedom equals $3N-6$, because the molecular system allows for movement (three degrees) and rotation (three degrees) along three distinct axes. Thus, it is crucial to be aware that the differences in the quantities of thermodynamic properties for all asymmetric top molecules stem from the vibrational movements, as the contributions from translational and rotational movements are akin due to specific physical constants. The vibrational partition function is formulated as below, and its contribution to thermodynamic properties is essential in assessing chemical properties (Herzberg 1964; Hill 1962; McQuarrie 1973; Serdaroglu & Durmaz 2010).

$$Q = Q_{trans.} \times Q_{rot.} \times Q_{vib.} \times Q_{elec.}$$

$$Q_{vib.} = \prod_{j=1}^{3N-6} \frac{e^{-\theta_{v,j}/2T}}{\left(1 - e^{-\frac{\theta_{v,j}}{T}}\right)}$$

Here, $E_{vib.}$ "vibrational thermal energy", $S_{vib.}$ "vibrational entropy", and $C_{vib.}$ "vibrational heat capacity" are calculated by the following equations (Herzberg 1964; Hill 1962; McQuarrie 1973).

$$E_{vib.} = Nk \sum_{j=1}^{3N-6} \left(\frac{\theta_{v,j}}{2} + \frac{\theta_{v,j} e^{-\theta_{v,j}/T}}{\left(1 - e^{-\frac{\theta_{v,j}}{T}}\right)} \right)$$

$$S_{vib.} = Nk \sum_{j=1}^{3N-6} \left[\frac{\theta_{v,j}/T}{\left(e^{\theta_{v,j}/T} - 1\right)} - \ln\left(1 - e^{-\theta_{v,j}/T}\right) \right]$$

$$C_{vib.} = Nk \sum_{j=1}^{3N-6} \left[\left(\frac{\theta_{v,j}}{T}\right)^2 \frac{e^{\theta_{v,j}/T}}{\left(e^{\theta_{v,j}/T} - 1\right)^2} \right]$$

The terms disclose as $\theta_{v,j} = \frac{h\nu_j}{k}$ "the vibrational temperature", $h \rightarrow$ "Planck constant", $k \rightarrow$ "Boltzmann constant", and $\nu_j \rightarrow$ " j^{th} fundamental frequency".

Koopmans' theorem defined the I "ionization energy" and A "electron affinity" (Koopmans 1934) depending on the energies of the frontier molecular orbital. From the I and A values, the global reactivity values can be calculated by the following equations.

$$I = -E_{\text{HOMO}}$$

$$A = -E_{\text{LUMO}}$$

$$\chi = -\left(\frac{I+A}{2}\right)$$

$$\eta = \frac{I-A}{2}$$

$$\omega = \frac{\mu^2}{2\eta}$$

$$\Delta N_{max} = \frac{I+A}{2(I-A)}$$

$$\omega^+ \approx (I+3A)^2/(16(I-A))$$

$$\omega^- \approx (3I+A)^2/(16(I-A))$$

$$\Delta\varepsilon_{back-donation} = -\frac{\eta}{4}$$

Here, the symbols show that $\chi \rightarrow$ "electronic chemical potential" $\eta \rightarrow$ "global hardness", $\omega \rightarrow$ "electrophilicity", $\Delta N_{max} \rightarrow$ "the maximum charge transfer capability index" (Janak 1978; Parr et al., 1983; Parr et al., 1999; Pearson 1986; Perdew et al., 1982; Perdew et al., 1983), ω^- "the electrodonating power" and ω^+ "the electroaccepting power" (Gazquez et al., 2007), and $\Delta\varepsilon_{back-donat}$ "back-donation energy" (Gomez et al., 2006).

Lipophilicity and Water Solubility Features

The lipophilicity indices were ascertained utilizing five methodologies, which were ILOGP (Daina et al., 2014), XLOGP3 (Cheng et al., 2007), WLOGP (Wildman et al., 1999), MLOGP (Lipinski et al., 2001), and SILICOS-IT (Silicos-it) utilized through the execution of SwissADME (Daina et al., 2017). It is well acknowledged that the lipophilicity parameter (Log P), founded on the concentration of a distinct neutral molecular system in octanol (Co) and water (Cw), is defined as follows.

$$\text{Log } P_{o/w} = \text{Log } \frac{C_o}{C_w}$$

The water solubility (Log S) was also calculated by using different approaches defined by Delaney (Delaney et al., 2004) and Ali et al. (Ali et al., 2012). Accordingly, the approach ESOL "Estimated SOLubility" defined by Delaney (Delaney et al., 2004) is given depending on the molecular features, which are "Molecular weight, MWT", "Rotatable bonds, RB", "Aromatic proportion, AP" as follows

$$\text{Log } S_w = 0.16 - 0.63 \text{ clogP} - 0.0062 \text{ MWT} + 0.066 \text{ RB} - 0.74 \text{ AP (ESOL)}$$

On the other hand, the benchmark study performed by Ali et al. (Ali et al., 2012) revealed that water solubility depends on the phenolic parameters remarkable which are the number of the aromatic -OH group(s), in addition to the melting point and TPSA, as follows.

$$\text{logS} = -1.0239 \text{ logP} - 0.0148 \text{ TPSA} - 0.0058 (\text{m.p. (C)} - 25) + 0.3295 \text{ aroOHdel} + 0.5337 \text{ (ALI)}$$

Absorption, Distribution, Metabolism, Druglikeness, and Toxicity Study

The drug-likeness features of the data set were considered on the basis of Lipinski (Lipinski et al., 2001), Ghose (Ghose et al., 1999), Veber (Veber et al., 2002), Egan (Egan et al., 2000), and Muegge (Muegge et al., 2001) rules. Also, the Abbott score (Martin, 2005) for bioavailability investigations of data set scores was used via SwissADME (Daina et al., 2017) tools. The adsorption, distribution characteristics, metabolism, and possible toxicity features of the data set were determined by ADMETLab 2.0 (ADMETlab 2.0).

Result and Discussion

Molecule Geometry and Thermochemical Properties

The thermochemical and physical properties are critical as these aspects govern the fundamental physical and chemical characteristics of matter, influencing phenomena from routine chemical reactions to advanced processes in the pharmaceutical design, material science, and environmental chemistry (Serdaroğlu 2017; Serdaroğlu 2011a; Serdaroğlu 2011b). The calculated quantities of the studied compounds (Fig. 1) were presented in Table 1.

The dipole moment and polarizability of the compounds D1-D5 were determined as D2(4.837)> D1(3.060)> D5(1.477)> D3(1.389)> D4(0.330) and D5(134.850)> D4(130.332)> D1(122.071)> D2(118.499)> D3(108.089), respectively. Here, the $-C\equiv N$ group substitution on the -diene bone made an increase in the dipole moment due to the lone pair electrons of nitrogen. Furthermore, the ΔE , ΔH , and ΔG quantities of the compounds were predicted as the following orders of D5 (-580.336463)< D1 (-541.050353)< D4 (-522.256208)< D2 (-444.708110)< D3(-427.673040), D5 (-

580.319444)< D1 (-541.035022)< D4 (-522.239504)< D2 (-444.693855)< D3 (-427.659033), and D5 (-580.382097)< D1 (-541.093717)< D4 (-522.301559)< D2 (-444.749447)< D3 (-427.713702), respectively. The $\Delta E_{\text{ther.}}$ (kcal/mol) was calculated as D4 (182.305)> D5 (178.519)> D1 (160.225)> D3 (152.395)> D2 (149.172), which the main contribution to each of them stemming from the vibrational freedom degrees. Subsequently, the $C_{v\text{vib.}}$ (cal/molK) of the compounds were found to be D5 (50.591)> D4 (49.311)> D1 (45.387)> D2 (41.368)> D3 (40.303). The S and S_{vib} (cal/molK) were predicted as D5 (131.864)> D4 (130.606)> D1 (123.534)> D2 (117.002)> D3 (115.060) and D5(58.182)> D4 (57.347)> D1 (50.678)> D2 (45.080)> D3 (43.896), respectively. Accordingly, these observations, facilitated by precise calculations and predictions, reveal the influence of molecular modifications such as the $-C\equiv N$ or $-OCH_3$ substitution on the $-diene$ bone. Subsequently, the results would be hoped to ultimately aid in predicting and manipulating the compounds' behaviors for specific applications such as smart material design and therapeutic purposes.

Table 1. The Calculated Physiochemical Values at B3LYP/6-311G** Level

	D1	D2	D3	D4	D5
DM (debye)	3.060	4.837	1.389	0.330	1.477
α (au)	122.071	118.499	108.089	130.332	134.850
ΔE (au)	-541.050353	-444.708110	-427.673040	-522.256208	-580.336463
ΔH (au)	-541.035022	-444.693855	-427.659033	-522.239504	-580.319444
ΔG (au)	-541.093717	-444.749447	-427.713702	-522.301559	-580.382097
$\Delta E_{\text{thermal}}$ (kcal/mol)	160.225	149.172	152.395	182.305	178.519
$\Delta E_{\text{vib.}}$ (kcal/mol)	158.447	147.395	150.618	180.527	176.742
C_v (cal/molK)	51.348	47.330	46.265	55.273	56.553
$C_{v\text{vib.}}$ (cal/molK)	45.387	41.368	40.303	49.311	50.591
S (cal/molK)	123.534	117.002	115.060	130.606	131.864
S_{vib} (cal/molK)	50.678	45.080	43.896	57.347	58.182

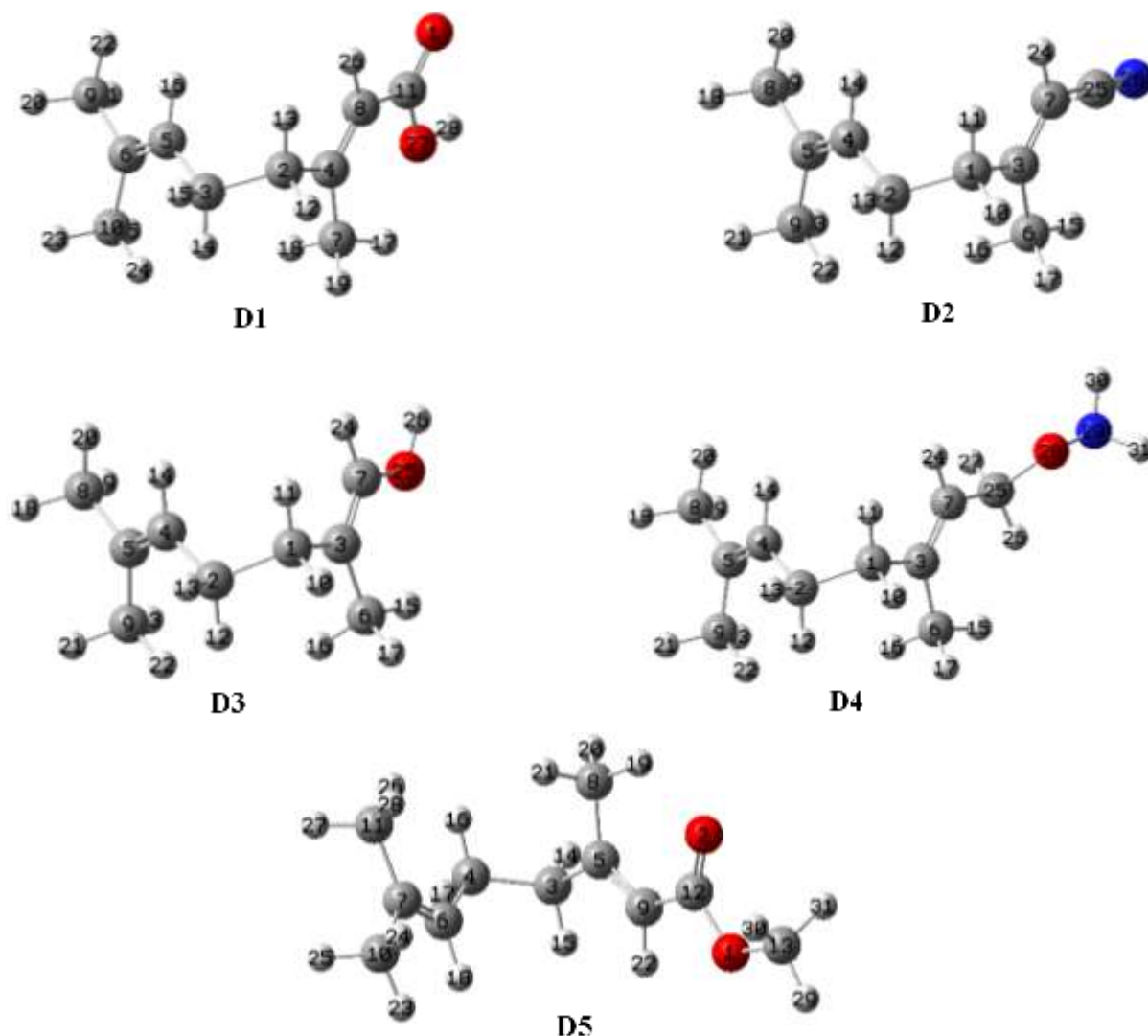


Figure 1. The Optimized Structures of the Studied-dienes

Lipophilicity and Water Solubility Features

In the realm of drug discovery and development, two key factors are fat-solubility (lipophilicity) and the water-solubility of organic compounds. Lipophilicity greatly affects a drug's absorption, distribution, metabolism, and excretion (Lin et al., 1997), with highly lipophilic drugs possessing the potential for toxicity due to their accumulation in the body's fatty tissues (Jackson et al., 2017). On the other hand, water solubility plays a significant role in drug formulation, delivery, and bioavailability, with challenges arising for drugs with either too high or too low water solubility. Both lipophilicity and water-solubility have a bearing on drug-drug interactions and chemical stability, impacting drug efficacy, safety, and overall applicability (Carpenter et al., 1997).

From Table 2, the Log Po/w (iLOGP) indices were calculated as D5 (3.05) > D4 (2.81) > D2 (2.63) > D3 (2.55) > D1 (2.13), whereas lipophilicity depended on the XLOGP3 approach was determined as D5 (3.42) > D4 (3.35) > D2 (3.29) > D3 (3.21) > D1 (3.09). On the other hand, the WLOGP and MLOGP approaches revealed that the following changes in the lipophilicity predicted in D2 (3.20) > D3 (3.19) > D5 (2.85) > D1 (2.76) > D4 (2.57) and D5 (2.67) > D2 (2.49) > D4 (2.47) > D1 (2.38) > D3 (2.28), respectively. The Log Po/w showed some different order depending on the approach used to predict the indices. The order of average Log Po/w of the compounds was determined as D5 (2.91) > D2 (2.82) > D3 (2.63) > D1 (2.58) > D4 (2.47). The varying Log Po/w values determined by different

methods (iLOGP, XLOGP3, WLOGP, MLOGP) underscore the critical role of lipophilicity in the behavior and potential interactions of compounds D1-D5.

For all approaches, the compounds D1-D5 were found to be soluble in the water. Namely, the solubility (mg/mL) $\times 10^{-1}$ values of the compounds D1-D5 depend on the ESOL were determined as follows D1 (4.57) > D3 (4.10) > D4 (3.62) > D2 (3.42) > D5 (2.92), whereas solubility (mg/mL) $\times 10^{-2}$ was calculated as D3 (6.91) > D2 (5.12) > D1 (4.84) > D5 (4.06) > D4 (2.89) based on the Ali approach. On the other hand, the solubility score obtained from SILICOS-IT was changed in the order of D1 (6.73) > D3 (5.22) > D4 (2.62) > D5 (1.42) > D2 (1.19). Despite the varying indices calculated by different predictive methods, it is clear that all compounds would be soluble in the water.

Table 2. Physicochemical Properties, Lipophilicity, and Water Solubility Characteristics

	D1	D2	D3	D4	D5
Physicochemical properties					
Name	(E)-3,7-dimethylocta-2,6-dienoic acid	(E)-3,7-dimethylhepta-2,6-dienitrile	(E)-2,6-dimethylhepta-1,5-dien-1-ol	O-(3,7-dimethylocta-2,6-dien-1-yl)hydroxylamine	methyl (E)-3,7-dimethylocta-2,6-dienoate
Formula	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	C ₁₀ H ₁₅ N	C ₉ H ₁₆ O	C ₁₀ H ₁₉ NO	C ₁₁ H ₁₈ O ₂
Molecular weight (g/mol)	168.23	149.23	140.22	169.26	182.26
Num. heavy atoms	12	11	10	12	13
Num. arom. heavy atoms	0	0	0	0	0
Fraction Csp ³	0.50	0.50	0.56	0.60	0.55
Num. rotatable bonds	4	3	3	5	5
Num. H-bond acceptors	2	1	1	2	2
Num. H-bond donors	1	0	1	1	0
Molar Refractivity	51.01	48.98	46.00	53.03	55.33
TPSA (Å ²)	37.30	23.79	20.23	35.25	26.30
Lipophilicity					
Log P _{o/w} (iLOGP)	2.13	2.63	2.55	2.81	3.05
Log P _{o/w} (XLOGP3)	3.09	3.29	3.21	3.35	3.42
Log P _{o/w} (WLOGP)	2.76	3.20	3.19	2.57	2.85
Log P _{o/w} (MLOGP)	2.38	2.49	2.28	2.47	2.67
Log P _{o/w} (SILICOS-IT)	1.96	2.47	1.91	1.72	2.54
Consensus Log P _{o/w}	2.47	2.82	2.63	2.58	2.91
Water Solubility					
Log S (ESOL)	-2.57	-2.64	-2.53	-2.67	-2.79
Solubility (mg/mL)x10 ⁻¹	4.57	3.42	4.10	3.62	2.92
Class	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble
Log S (Ali)	-3.54	-3.46	-3.31	-3.77	-3.65
Solubility (mg/mL)x10 ⁻²	4.84	5.12	6.91	2.89	4.06
Class	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble
Log S (SILICOS-IT)	-1.40	-2.10	-1.43	-1.81	-2.11
Solubility (mg/mL)	6.73	1.19	5.22	2.62	1.42
Class	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble	Soluble

*TPSA "topological polar surface Area" was calculated based on polar fragments that contributed to the polar surface.

Absorption, Distribution, Metabolism, Druglikeness, and Bioavailability Study

In the domain of pharmaceutical research, parameters such as absorption, distribution, metabolism, bioavailability, and drug-likeness are fundamental. From this perspective, we determined these key parameters to evaluate their significance in the landscape of drug discovery and design and presented Table 3.

From Table 3, all compounds were found to be promising structures in view of Caco-2 Pe, MDCK Pe., Pgp-inh., Pgp-subs., and HIA. Namely, the Caco-2 Pe. indices of the compounds were determined higher than the optimal value (-5.15) in the following order of D3 (-5.071) < D1 (-4.789) < D4 (-4.475) < D2 (-4.32) < D5 (-4.299). Also, MDCK Pe. ($\times 10^{-5}$) cm/s indices implied that all compounds would show high passive permeability by the order of D4 (3.4) > D2=D3 (2.5) > D5 (2.3) > D1 (1.3). The Pgp-inh. and Pgp-subs. indexes of the compounds were determined in the ranks of 0.000-0.016 and 0.005-0.101, respectively. In addition, the HIA values of the compounds D1-D5 were estimated in the range of 0.003-0.009. For all compounds, the $F_{30\%}$ scores give the green alarm predicted in the range of 0.006-0.074. The $F_{20\%}$ values of the compounds D1, D2, D4, and D5 were estimated in the range of 0.023-0.135, while it for D3 was found to be 0.738 by a red alarm.

Except for D4 (81.33%), the other compounds presented high PPB % scores which were greater than 90% and which implied that there could be a lower therapeutic feature. For all compounds, VD scores were calculated in the region of the optimal limits (0.04-20L/kg). However, the BBB Pen. values of D1 and D5 were estimated at 0.194 and 0.157, while this indice for D2-D4 were determined at 0.962, 0.724, and 0.974, respectively. Also, Fig. 2 supported the BBB Pen. the capability of all compounds because they would be placed in the yolk region of the BOILED-EGG. The fractional unbound form in the plasma for D2 would be at a low level (4.750%), while D4 (22.81) could be said that a high level in plasma as unbound. The other compounds as unbound would be in the plasma at a medium level (5~20%). In addition, the metabolism scores of the compounds implied that all compounds might have been suitable structures for both substrate and inhibitor against the different lines of the P450s. The calculated ADM scores, as these crucially influence a compound's therapeutic efficacy and its interaction with metabolic enzymes like P450s, thereby playing a pivotal role in the design and/or modification of potential drugs.

Table 3. Absorption, Distribution, and Metabolism Scores

	D1	D2	D3	D4	D5
<i>Absorption</i>					
Caco-2 Pe.	-4.789	-4.32	-5.071	-4.475	-4.299
MDCK Pe. ($\times 10^{-5}$) cm/s	1.3	2.5	2.5	3.4	2.3
Pgp-inh.	0.001	0.002	0.0	0.016	0.003
Pgp-subs.	0.022	0.005	0.011	0.101	0.011
HIA	0.006	0.003	0.005	0.009	0.005
$F_{20\%}$	0.135	0.023	0.738	0.034	0.08
$F_{30\%}$	0.051	0.007	0.026	0.006	0.074
<i>Distribution</i>					
PPB %	95.10	96.67	94.00	81.33	97.52
VD (L/kg)	0.554	2.892	4.807	1.437	2.696
BBB Pen.	0.194	0.962	0.724	0.974	0.157
Fu %	13.47	4.750	11.95	22.81	10.12
<i>Metabolism</i>					
CYP1A2 inh.	0.088	0.974	0.214	0.760	0.922
CYP1A2 subs.	0.190	0.849	0.574	0.424	0.655
CYP2C19 inh.	0.028	0.952	0.028	0.237	0.593
CYP2C19 subs.	0.078	0.831	0.831	0.539	0.869
CYP2C9 inh.	0.123	0.559	0.019	0.072	0.466
CYP2C9 subs.	0.832	0.948	0.956	0.789	0.889
CYP2D6 inh.	0.342	0.150	0.053	0.054	0.055
CYP2D6 subs.	0.180	0.453	0.683	0.476	0.246
CYP3A4 inh.	0.016	0.139	0.009	0.034	0.065
CYP3A4 subs.	0.097	0.280	0.122	0.216	0.243

* Permeability, Pe; Penetration, Pen, Inhibitor, Inh; Substrate, subs. MDCK, Madin-Darby canine kidney; HIA, Human Intestinal Absorption; PPB, Plasma Protein Binding; VD, Volume Distribution; BBB, Blood-Brain Barrier Penetration; Fu, fraction unbound in plasma; hERG, human ether-a-go-go related gene; H-HT, Human Hepatotoxicity; DILI, Drug-Induced Liver Injury; FDAMDD, FDA Maximum (Recommended) Daily Dose.

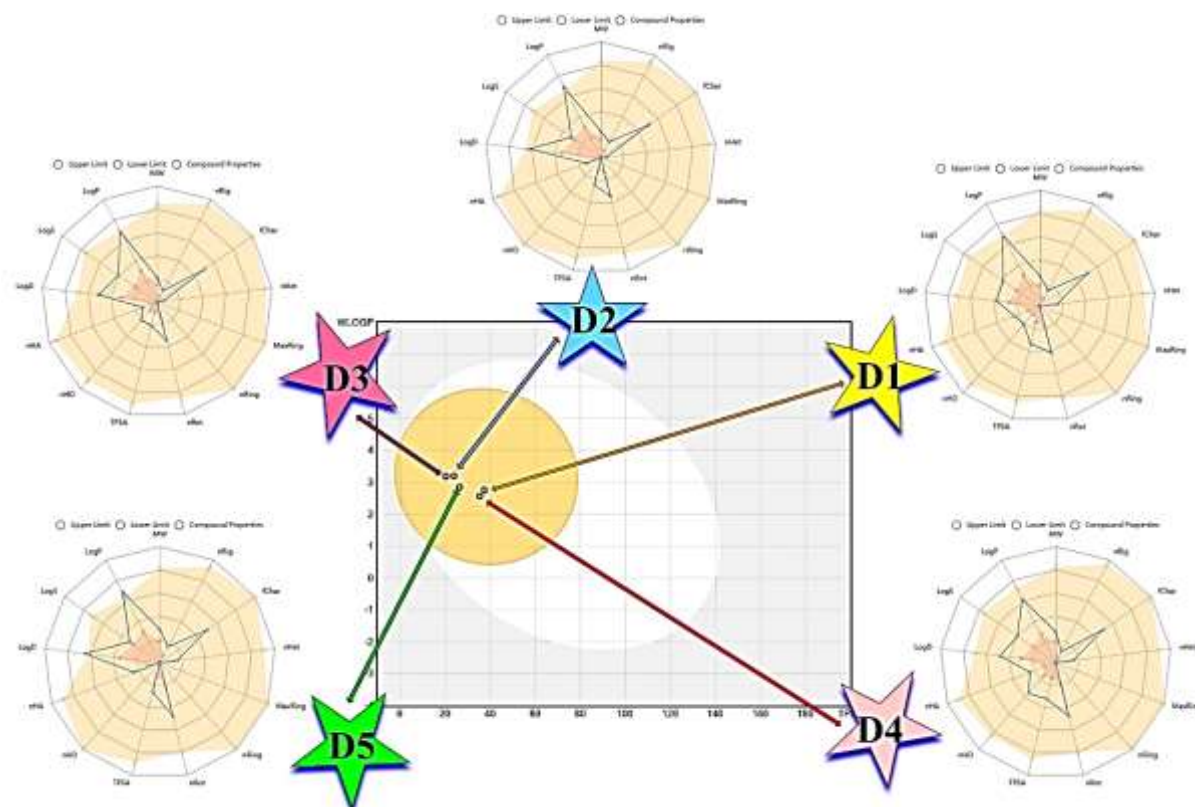


Figure 2. BOILED-Egg Model and Pharmacokinetic Radar Graphs

Toxicity Study

One of the goals of drug discovery and development is to find therapeutic agents that are safe, effective, and improve patient outcomes. In this regard, it also involves a rigorous toxicity assessment of potential drug candidates and an evaluation of their 'drug-likeness'. The computational tools are used to anticipate toxicity scores, including medical and environmental risks, and identify favorable pharmacokinetic and pharmacodynamic properties. Here, the calculated toxicity results were presented in Table 4.

In terms of the hERG Blockers, DILI, AMES, Rat Oral Acute, and FDAMDD, there would be a low (or no) toxic effect possibility for all compounds. On the other hand, the H-HT scores revealed that all compounds could be toxic due to the higher toxicity index values predicted in the range of 0.839-0.898. Except for the D3 (0.317) at a medium level, the other compounds would have also presented an adverse effect in terms of eye Irritation. The D1 (0.892), D2 (0.910), and D4 (0.849) would have been a higher toxic possibility for eye corrosion, whereas D3 (0.017) and D5 (0.700) could be caused to low and medium level toxic effect, respectively. The D1 (0.817), D4 (0.926), and D5 (0.921) could be adversely in terms of skin sensitivity, whereas this possibility for the compounds D2 (0.520) and D3 (0.433) was determined at a medium level. The carcinogenicity indices revealed that D4 (0.107) and D5 (0.237) could have a low severe effect, while D1 (0.327) and D2 (0.422) could have medium-level toxicity. The D2 (0.920) would-be toxic at a high level in terms of the respiratory, D5 could be moderate level toxic, and the others probably could have a low toxic effect.

In view of the environment, the BCF scores of all compounds were determined lower than the threshold value ($\log BCF < 3.3$) (McGeer et al., 2003; Nendza et al., 2010). The IGC50, LC50FM, and LC50DM values were determined in the ranks of 2.327-3.429, 3.469-5.735, and 4.465-6.040, respectively. In the view of the Tox21 pathway, the D1 would be toxic at a moderate level for NR-ER (0.350) and a high level toxic for SR-HSE (0.719), fortunately, there would be no toxic effect for the

others. The D2 could display a harmful effect in terms of the NR-ER-LBD (0.479) only. The D3 (0.628) and D4 (0.531) would be harmful to SR-HSE at a medium size. On the other hand, the D5 would be adverse at a high level to SR-HSE (0.739) and might be toxic for NR-ER-LBD (0.352) at medium size. From the results gathered in this study, we hope this work will underline the importance of toxicity assessment in future research and development efforts, facilitating the creation of safer, more efficacious therapeutic agents and contributing to the mitigation of potential risks to both human health and the environment.

Table 4. Toxicity Values

	D1	D2	D3	D4	D5
Medicinal					
hERG Blockers	0.007	0.020	0.066	0.016	0.014
H-HT	0.868	0.895	0.839	0.898	0.873
DILI	0.244	0.056	0.031	0.027	0.059
AMES Tox.	0.006	0.049	0.003	0.044	0.008
Rat Oral Acute Tox.	0.028	0.038	0.018	0.019	0.017
FDAMDD	0.027	0.053	0.208	0.226	0.049
Skin Sens.	0.817	0.520	0.433	0.926	0.921
Carcinogenicity	0.327	0.422	0.752	0.107	0.237
Eye Corrosion	0.892	0.910	0.017	0.849	0.700
Eye Irritation	0.988	0.989	0.317	0.981	0.959
Respiratory Tox.	0.218	0.920	0.145	0.147	0.303
Environmental					
BCF	0.390	0.998	0.191	2.677	0.828
IGC ₅₀	2.811	2.743	2.327	3.429	2.871
LC ₅₀ FM	3.554	4.073	3.469	5.735	4.195
LC ₅₀ DM	4.465	5.395	5.331	6.040	5.671
Tox21 Pathway					
NR-AR	0.010	0.014	0.009	0.004	0.008
NR-AR-LBD	0.004	0.005	0.003	0.003	0.005
NR-AhR	0.009	0.005	0.019	0.025	0.006
NR-Aromatase	0.006	0.011	0.004	0.009	0.011
NR-ER	0.350	0.077	0.095	0.061	0.078
NR-ER-LBD	0.143	0.479	0.010	0.010	0.352
NR-PPAR-gamma	0.005	0.011	0.003	0.003	0.006
SR-ARE	0.243	0.069	0.028	0.225	0.181
SR-ATAD5	0.005	0.006	0.005	0.006	0.009
SR-HSE	0.719	0.189	0.628	0.531	0.739
SR-MMP	0.024	0.013	0.016	0.033	0.010
SR-p53	0.011	0.050	0.007	0.034	0.020

*The abbreviations are defined as: *Tox*, Toxicity; *sens*, Sensitization; *BCF*, the unit of bioconcentration factors, *IGC₅₀*, *LC₅₀FM*, and *LC₅₀DM* is given in $-\text{Log}_{10}[(\text{mg/L})/(1000 \times \text{MW})]$.

FMO (Frontier Molecular Orbital) Analysis and MEP (Molecular Electrostatic Potential)

For a long time, the FMO analysis and MEP graphs are powerful theoretical tools used in the field of computational chemistry to study the electronic structure and reactivity of molecules (Erdoğan 2021; Hsissou et al., 2021; Serin 2023; Serin 2022; Serin et al., 2022;), providing insights into their chemical properties and interactions.

From Table 5, the order of the H (-I) and L (-A) (eV) of the compounds was calculated as D3 (-5.715) > D4 (-6.381) > D5 (-6.524) > D1 (-6.583) > D2 (-6.731) and D3 (0.634) > D4 (0.338) > D5 (-1.087) > D1 (-1.213) = D2 (-1.213), respectively. Accordingly, the global reactivity indices obtained from these values were changed in the following orders.

ΔE (L-H) (eV): D4 (6.719) > D3 (6.349) > D2 (5.518) > D5 (5.438) > D1 (5.370)

μ (eV): D3 (-2.540) > D4 (-3.022) > D5 (-3.806) > D1 (-3.898) > D2 (-3.972)

η (eV): D4 (3.359) > D3 (3.174) > D2 (2.759) > D5 (2.719) > D2 (2.685)

ω (eV): D2 (0.105) > D1 (0.104) > D5 (0.098) > D4 (0.050) > D3 (0.037)

ω^+ (au): D1 (0.045) = D2 (0.045) > D5 (0.040) > D4 (0.010) > D3 (0.005)

ω^- (au): D2 (0.191) > D1 (0.188) > D5 (0.180) > D4 (0.121) > D3 (0.099)

ΔN_{\max} (eV): D1 (1.452) > D2 (1.440) > D5 (1.400) > D4 (0.899) > D3 (0.800)

ΔE_{back} (eV): D1 (-0.671) > D5 (-0.680) > D2 (-0.690) > D3 (-0.794) > D4 (-0.840)

From obtained results, the D4 would tend to interact with the external molecular system more than the intramolecular interactions due to its highest ΔE value, and vice versa for D1. Considering the μ (eV) values, D2 could be more stable and D3 would be less stable structure. Furthermore, D4 was predicted the hardest molecule and D2 was found to softer one among the compounds. Concerning the electrophilicity feature, D2 could be said to present a more electrophilic character and D3 would have a less electrophilic character. The electrodonating power of all compounds would predominate on the electroaccepting potency. Moreover, D1 would have a higher charge transfer capability among the compounds and also it would gain more stability by way of the back donation. From Fig. 3, D1 and D5 would present similar HOMO densities, which were towards the dimethyl terminals of each molecule, whereas their LUMO would expand towards terminals -COO. For D2, the HOMO would be expanded over the surface except for the methyl group that was neighbor to the -CN group whereas the LUMO density would be distributed towards the half part where the -CN group substituted. The HOMO for D3 could be localized over the half part of the molecule toward the -OH terminal, whereas the LUMO would separate partially towards the -OH terminal and mainly localized on the remaining part. For D4, the HOMO would also have expanded toward -ONH₂, whereas the LUMO would also distribute mainly over -ONH₂ and slightly on the remaining part of the compound. Also, the surround of the O atom of the -C=O group for both D1 and D5 was covered by red color ($V < 0$), which was a marker of the electron-rich region as a function of the electrostatic potential on the total density surface. The blue color for both D1 and D3 molecules would be appeared on the H atom of the -OH group, as expected. Moreover, the red color for D2 would be placed around the N atom of the -CN group. For the D4 molecule, the red color appeared on the central region of the compound whereas the moderate blue color covered the Hs of the -NH₂ group.

Table 5. The Quantum Chemical Reactivity Values

	D1	D2	D3	D4	D5
H (-I) (eV)	-6.583	-6.731	-5.715	-6.381	-6.524
L (-A) (eV)	-1.213	-1.213	0.634	0.338	-1.087
ΔE (L-H) (eV)	5.370	5.518	6.349	6.719	5.438
μ (eV)	-3.898	-3.972	-2.540	-3.022	-3.806
η (eV)	2.685	2.759	3.174	3.359	2.719
ω (eV)	0.104	0.105	0.037	0.050	0.098
ω^+ (au)	0.045	0.045	0.005	0.010	0.040
ω^- (au)	0.188	0.191	0.099	0.121	0.180
ΔN_{\max} (eV)	1.452	1.440	0.800	0.899	1.400
ΔE_{back} (eV)	-0.671	-0.690	-0.794	-0.840	-0.680

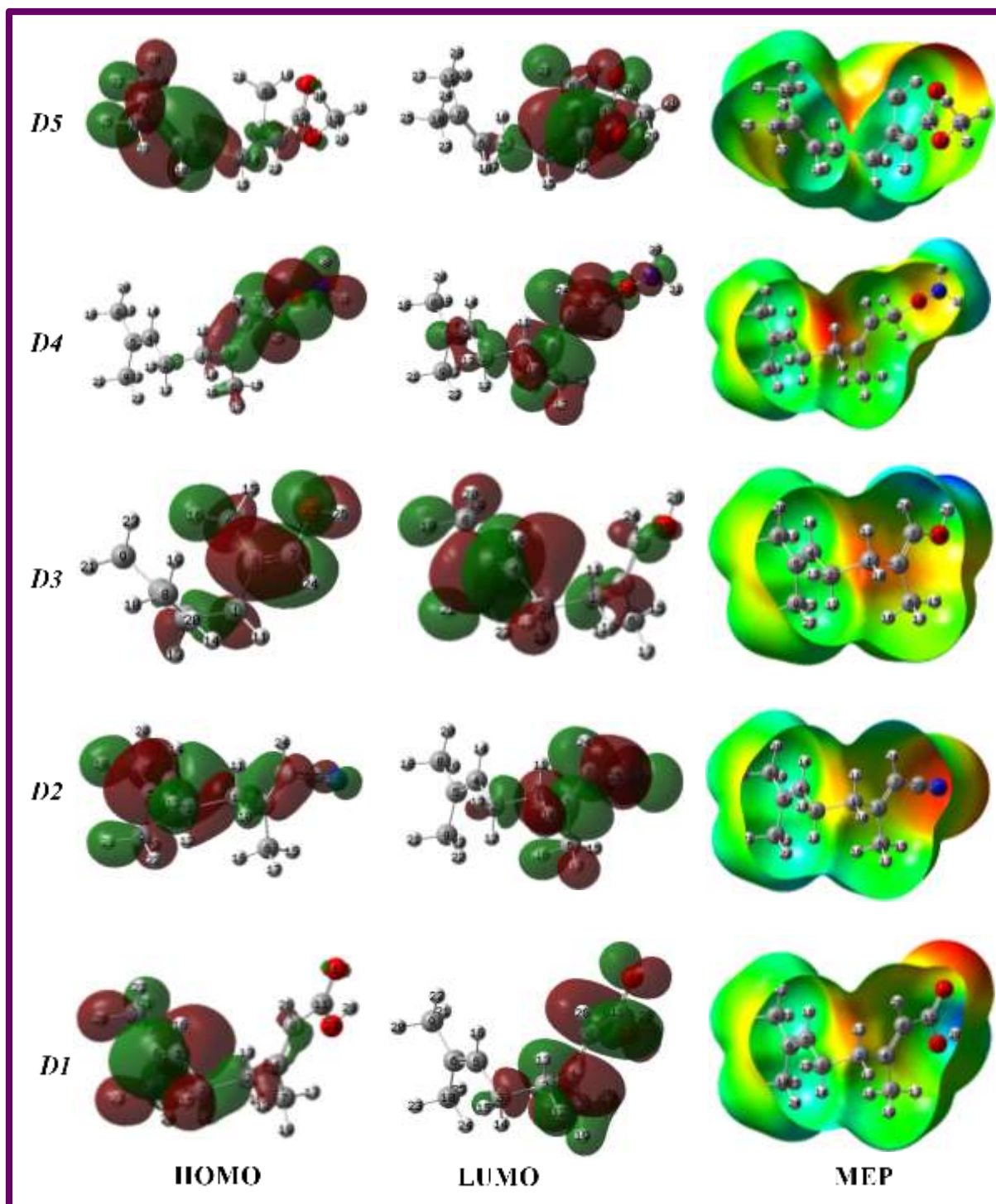


Figure 3. HOMO& LUMO (isoval:0.02), and MEP (isoval:0.0004) Plots

Conclusions

In this study, extensive computational investigations were conducted to assess the ADMT (absorption, distribution, metabolism, and toxicity) properties of the -diene derivatives. After optimizing and confirming the structures, various properties such as lipophilicity, water solubility, drug-likeness, and bioavailability were evaluated. Additionally, the potential toxicity from medicinal and environmental perspectives was considered. Structural factors influencing these properties were determined through FMO and MEP analyses as well as the global reactivity parameters. From FMO analyses, D4 was determined to have the highest ΔE value and thereby it would prefer to interact

with the external molecular systems more than the others. Furthermore, D1 would have a higher charge transfer capability among the compounds and also it would gain more stability by way of the back donation. The compounds exhibited promising structures concerning Caco-2 Pe, MDCK Pe, Pgp-inh, Pgp-subs, and HIA. All compounds showed low or no toxicity in hERG Blockers, DILI, AMES, Rat Oral Acute, and FDAMDD assessments. However, they exhibited potential toxicity based on the H-HT scores, with higher toxicity index values ranging from 0.839 to 0.898. Eye irritation was expected for all compounds except D3, while D1, D2, and D4 had a higher likelihood of causing eye corrosion. D1, D4, and D5 showed adverse effects on skin sensitivity. Carcinogenicity indices indicated varying levels of toxicity. Some compounds had high respiratory toxicity, while others had low or moderate toxic effects. In terms of environmental impact, all compounds had BCF scores below the threshold value. In the Tox21 pathway, some compounds exhibited moderate to high toxicity for specific targets, while others had no toxic effects. Obtained results of this investigation will be hoped to provide valuable insights into the relationship between ADME, toxicity, and electronic structure in the exploration, development, and improvement of future drug agents.

Acknowledgments

All calculations have been carried out at TUBITAK ULAKBIM, High Performance and Grid Computing Center (TR-Grid e-Infrastructure). The author thanks to Scientific Research Projects Department of Cumhuriyet University (Project No: EĞT-2023-098)

Author Contribution

Goncagül Serdaroğlu, performed all quantum chemical and ADMET computations, data analyses, supervising, writing, and editing.

Ethic

There are no ethical issues with the publication of this article.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

ORCID

Goncagül Serdaroğlu  <https://orcid.org/0000-0001-7649-9168>

References

- Adorjan, B., & Buchbauer, G. (2010). Biological properties of essential oils: An updated review. *Flavour and Fragrance Journal*, 25(6), 407-426. [4https://doi.org/10.1002/ffj.2024](https://doi.org/10.1002/ffj.2024)
- Ali, J., Camilleri, P., Brown, M. B., Hutt, A. J., & Kirton, S. B. (2012). In silico prediction of aqueous solubility using simple QSPR models: The importance of phenol and phenol-like moieties. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 52, 2950–2957. <https://doi.org/10.1021/ci300447c>
- Bailly, C. (2020). Targets and pathways involved in the antitumor activity of citral and its stereoisomers. *European Journal of Pharmacology*, 871, 172945. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2020.172945>
- Balusamy, S. R., Perumalsamy, H., Veerappan, K., Huq, M. A., Rajeshkumar, S., Lakshmi, T., & Kim, Y. J. (2020). Citral induced apoptosis through modulation of key genes involved in fatty acid biosynthesis in human prostate cancer cells: In silico and in vitro study. *BioMed Research International*, 2020, 6040727. <https://doi.org/10.1155/2020/6040727>
- Becke, A. D. (1993). A new mixing of Hartree–Fock and local density-functional theories. *Journal of Chemical Physics*, 98, 1372-1377. <https://doi.org/10.1063/1.464304>

- Bouyahya, A., Guaouguaou, F. E., El Omari, N., El Menyiy, N., Balahbib, A., El-Shazly, M., & Bakri, Y. (2022). Anti-inflammatory and analgesic properties of Moroccan medicinal plants: Phytochemistry, in vitro and in vivo investigations, mechanism insights, clinical evidences and perspectives. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 12(1), 35-57. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2021.07.004>
- Burdock, G. A., & Carabin, I. G. (2009). Safety assessment of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil as a food ingredient. *Food and Chemical Toxicology*, 47(6), 1202-1209. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.11.006>
- Carpenter, J. F., Pikal, M. J., Chang, B. S., & Randolph, T. W. (1997). Rational design of stable lyophilized protein formulations: Theory and practice. *In Pharmaceutical Biotechnology*, 9, 189-227. <https://doi.org/10.1023/A:1012180707283>
- Cheng, T., Zhao, Y., Li, X., Lin, F., Xu, Y., Zhang, X., Li, Y., & Wang, R. (2007). Computation of octanol-water partition coefficients by guiding an additive model with knowledge. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 47(6), 2140-2148. <https://doi.org/10.1021/ci700257y>
- Daina, A., Michielin, O., & Zoete, V. (2014). iLOGP: A simple, robust, and efficient description of n-octanol/water partition coefficient for drug design using the GB/SA approach. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54(12), 3284-3301. <https://doi.org/10.1021/ci500467k>
- Daina, A., Michielin, O., & Zoete, V. (2017). SwissADME: A free web tool to evaluate pharmacokinetics, druglikeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific Reports*, 7, 42717. <https://doi.org/10.1038/srep42717>
- Delaney, J. S. (2004). ESOL: Estimating aqueous solubility directly from molecular structure. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 44, 1000-1005. <https://doi.org/10.1021/ci034243x>
- Dennington, R., Keith, T. A., & Millam, J. M. (2016). *GaussView, version 6.0.16*. Semichem Inc Shawnee Mission KS.
- Egan, W. J., Merz, K. M., Jr., & Baldwin, J. J. (2000). Prediction of drug absorption using multivariate statistics. *Journal of Medicinal Chemistry*, 43, 3867-3877. <https://doi.org/10.1021/jm000292e>
- Erdogan, M., & Serdaroglu, G. (2021). New Hybrid (E)-4-((pyren-1-ylmethylene)amino)-N-(thiazol-2-yl)benzenesulfonamide as a potential drug candidate: Spectroscopy, TD-DFT, NBO, FMO, and MEP studies. *Chemistry Select*, 6, 9369-9381. <https://doi.org/10.1002/slct.202102602>
- Frisch, M. J., Trucks, G. W., Schlegel, H. B., Scuseria, G. E., Robb, M. A., Cheeseman, J. R., Scalmani, G., Barone, V., Mennucci, B., Petersson, G. A., Nakatsuji, H., Caricato, M., Li, X., Hratchian, H. P., Izmaylov, A. F., Bloino, J., Zheng, G., Sonnenberg, J. L., Hada, M., Ehara, ... Fox, D. J. (2013). *Gaussian 09W, Revision D.01*. Gaussian Inc.
- Gaonkar, R., Yallappa, S., Dhananjayac, B. L., & Hegde, G. (2016). Development and validation of reverse phase high-performance liquid chromatography for citral analysis from essential oils. *Journal of Chromatography B*, 1036-1037, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2016.10.001>
- Gazquez, J. L., Cedillo, A., & Vela, A. (2007). Electrodonating and Electroaccepting Powers. *Journal of Physical Chemistry A*, 111(10), 1966-1970. <https://doi.org/10.1021/jp065459f>
- Ghose, A. K., Viswanadhan, V. N., & Wendoloski, J. J. (1999). A knowledge-based approach in designing combinatorial or medicinal chemistry libraries for drug discovery. 1. A qualitative and quantitative characterization of known drug databases. *Journal of Combinatorial Chemistry*, 1, 55-68. <https://doi.org/10.1021/cc9800071>

- Gomez, B., Likhanova, N. V., Domínguez-Aguilar, M. A., Martínez-Palou, R., Vela, A., & Gazquez, J. L. (2006). Quantum chemical study of the inhibitive properties of 2-Pyridyl-Azoles. *Journal of Physical Chemistry B*, 110(18), 8928-8934. <https://doi.org/10.1021/jp057143y>
- Herzberg, G. (1964). *Molecular spectra and molecular structure III* (1st ed.). D. Van Nostrand Company Inc.
- Hill, T. L. (1962). *An introduction to statistical thermodynamics*. Addison-Wesley Publishing.
- Hsissou, R., Benhiba, F., Echihi, S., Benzidia, B., Cherrouf, S., Haldhar, R., Alvi, P. A., Kaya, S., Serdaroglu, G., & Zarrouk, A. (2021). Performance of curing epoxy resin as potential anticorrosive coating for carbon steel in 3.5% NaCl medium: Combining experimental and computational approaches. *Chemical Physics Letters*, 783, 139081. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139081>
- Jackson, E., Shoemaker, R., Larian, N., & Cassis, L. (2017). Adipose tissue as a site of toxin accumulation. *Comprehensive Physiology*, 7(4), 1085–1135. <https://doi.org/10.1002/cphy.c160038>
- Janak, J. F. (1978). Proof that $\partial E/\partial n_i = \epsilon_i$ in density-functional theory. *Physical Review B*, 18(12), 7165-7168. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.18.7165>
- Ju, J., Xie, Y., Yu, H., Guo, Y., Cheng, Y., Qian, H., & Yao, W. (2020). Analysis of the synergistic antifungal mechanism of eugenol and citral. *LWT*, 123, 109128. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109128>
- Koopmans, T. (1934). Über die zuordnung von wellenfunktionen und eigenwertenzu den einzelnen elektronen eines atoms. *Physica*, 1, 104-113. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(34\)90011-2](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(34)90011-2)
- Kudin, K. N., Scuseria, G. E., & Cancès, E. (2002). A black-box self-consistent field convergence algorithm: One step closer. *Journal of Chemical Physics*, 116(19), 8255-8261. <https://doi.org/10.1063/1.1470195>
- Lee, C., Yang, W., & Parr, R. G. (1988). Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density. *Physical Review B*, 37, 785-789. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.785>
- Li, R. Y., Wu, X. M., Yin, X. H., Long, Y. H., & Li, M. (2015). Naturally produced citral can significantly inhibit normal physiology and induce cytotoxicity on *Magnaporthe grisea*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 118, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.10.015>
- Li, X., & Frisch, M. J. (2006). Energy-represented DIIS within a hybrid geometry optimization method. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2(3), 835-839. <https://doi.org/10.1021/ct050275a>
- Lin, J. H., & Lu, A. Y. (1997). Role of Pharmacokinetics and Metabolism in Drug Discovery and Development. *Pharmacological Reviews*, 49(4), 403-449. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9443165>
- Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., & Feeney, P. J. (2001). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 46, 3–26. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(00\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(00)00129-0)
- Martin, Y. C. (2005). A bioavailability score. *Journal of Medicinal Chemistry*, 48, 3164-3170. <https://doi.org/10.1021/jm0492002>
- McGeer, J. C., Brix, K. V., Skeaff, J. M., DeForest, D. K., Brigham, S. I., Adams, W. J., & Green, A. (2003). Inverse relationship between bioconcentration factor and exposure concentration for metals: implications for hazard assessment of metals in the aquatic environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(5), 1017-1037. <https://doi.org/10.1002/etc.5620220509>

- McLean, A. D., & Chandler, G. S. (1980). Contracted Gaussian-basis sets for molecular calculations. 1. 2nd row atoms, Z=11-18. *Journal of Chemical Physics*, 72(9), 5639-5648. <https://doi.org/10.1063/1.438980>
- McQuarrie, D. A. (1973). *Statistical thermodynamics*. Harper & Row Publishers.
- Muegge, I., Heald, S. L., & Brittelli, D. (2001). Simple selection criteria for drug-like chemical matter. *Journal of Medicinal Chemistry*, 44(12), 1841–1846. <https://doi.org/10.1021/jm015507e>
- Nendza, M., & Müller, M. (2010). Screening for low aquatic bioaccumulation. 1. Lipinski's 'Rule of 5' and molecular size. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 21(5-6), 495-512. <https://doi.org/10.1080/1062936X.2010.502295>
- Oladeji, O. S., Oluyori, A. P., Bankole, D. T., & Afolabi, T. Y. (2020). Natural products as sources of antimalarial drugs: Ethnobotanical and ethnopharmacological studies. *BioMed Research International*, 2020, 7076139. <https://doi.org/10.1155/2020/7076139>
- Ortiz, M. I., González-García, M. P., Ponce-Monter, H. A., Castañeda-Hernández, G., & Aguilar-Robles, P. (2010). Synergistic effect of the interaction between naproxen and citral on inflammation in rats. *Phytomedicine*, 18(1), 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2010.05.009>
- Oyediji, A. O., Okunowo, W. O., Osuntoki, A. A., Olabode, T. B., & Ayo-folorunso, F. (2020). Insecticidal and biochemical activity of essential oil from Citrus sinensis peel and constituents on Callosobruchus maculatus and Sitophilus zeamais. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 168, 104643. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104643>
- Parr, R. G., & Pearson, R. G. (1983). Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity. *Journal of the American Chemical Society*, 105, 7512-7516. <https://doi.org/10.1021/ja00364a005>
- Parr, R. G., Szentpaly, L. V., & Liu, S. (1999). Electrophilicity index. *Journal of the American Chemical Society*, 121, 1922-1924. <https://doi.org/10.1021/ja983494x>
- Pearson, R. G. (1986). Absolute electronegativity and hardness correlated with molecular orbital theory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 83, 8440-8441. <https://doi.org/10.1073/pnas.83.22.8440>
- Perdew, J. P., & Levy, M. (1983). Physical content of the exact Kohn-Sham orbital energies: Band gaps and derivative discontinuities. *Physical Review Letters*, 51(20), 1884-1887. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.51.1884>
- Perdew, J. P., Parr, R. G., Levy, M., & Balduz, J. L. (1982). Density-functional theory for fractional particle number: Derivative discontinuities of the energy. *Physical Review Letters*, 49(23), 1691-1694. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1691>
- Plata-Rueda, A., Martínez, L. C., da Silva Rolim, G., Pereira Coelho, R., Henrique Santos, M., de Souza Tavares, W., Cola Zanuncio, J., & Serrão, J. E. (2020). Insecticidal and repellent activities of Cymbopogon citratus (Poaceae) essential oil and its terpenoids (citral and geranyl acetate) against Ulomoides dermestoides. *Crop Protection*, 137, 105299. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105299>
- Raghavachari, K., Binkley, J. S., Seeger, R., & Pople, J. A. (1980). Self-Consistent Molecular Orbital Methods. 20. Basis set for correlated wave-functions. *Journal of Chemical Physics*, 72(1), 650-654. <https://doi.org/10.1063/1.438955>
- Ruiz Perez-Cacho, P., & Rouseff, R. (2008). Processing and storage effects on orange juice aroma: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 9785-9796. <https://doi.org/10.1021/jf801244j>

- Samarghandian, S., Shoshtari, M. E., Sargolzaei, J., Hossinimoghadam, H., & Azad Farahzad, J. (2014). Anti-tumor activity of safranal against neuroblastoma cells. *Pharmacognosy Magazine*, 10(Suppl 2), S419-S424. <https://doi.org/10.4103/0973-1296.133296>
- Serdaroğlu, G. (2011). A DFT study of determination of the reactive sites of the acetylcholine and its agonists: In the gas phase and dielectric medium. *International Journal of Quantum Chemistry*, 111(10) 2464-2475. <https://doi.org/10.1002/qua.22512>
- Serdaroğlu, G. (2011). DFT and Ab initio computational study on the reactivity sites of the GABA and its agonists, such as CACA, TACA, DABA, and muscimol: In the gas phase and dielectric media. *International Journal of Quantum Chemistry*, 111(14), 3938-3948. <https://doi.org/10.1002/qua.22809>
- Serdaroglu, G., & Durmaz, S. (2010). DFT and statistical mechanics entropy calculations of diatomic and polyatomic molecules. *Indian Journal of Chemistry*, 49, 861-866. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/9918>
- Serdaroğlu, G., & Ortiz, J. V. (2017). Ab initio calculations on some antiepileptic drugs such as phenytoin, phenobarbital, ethosuximide and carbamazepine. *Structural Chemistry*, 28(4), 957-964. <https://doi.org/10.1007/s11224-016-0898-3>
- Serin, S. (2022). DFT-based computations on some structurally related N-substituted piperazine. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99, 100766. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100766>
- Serin, S. (2023). A comprehensive DFT study on organosilicon-derived fungicide flusilazole and its germanium analogue: A computational approach to Si/Ge bioisosterism. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.100939>
- Serin, S., Kaya, G., & Utku, T. (2022). Insights into solvent effects on molecular properties, physicochemical parameters, and NLO behavior of brinzolamide, a bioactive sulfonamide: A computational study. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99, 100738. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100738>
- Sharma, A. D., & Kaur, I. (2023). Targeting penicillin binding proteins (PBPs) by using bioactive geranial from essential oil of *Cymbopogon pendulus* against gram-positive and gram-negative bacteria: Molecular docking and experimental approach. *Bulgarian Chemical Communications*, 55(1), 40-47. http://www.bcc.bas.bg/BCC_Volumes/Volume_55_Number_1_2023/bcc-55-1-2023.pdf#page=38
- Sharmeen, J. B., Mahomoodally, F. M., Zengin, G., & Maggi, F. (2021). Essential oils as natural sources of fragrance compounds for cosmetics and cosmeceuticals. *Molecules*, 26, 666. <https://doi.org/10.3390/molecules26030666>
- Silva, B. I. M., Nascimento, E. A., Silva, C. J., et al. (2021). Anticancer activity of monoterpenes: A systematic review. *Molecular Biology Reports*, 48, 5775-5785. <https://doi.org/10.1007/s11033-021-06578-5>
- Tchoumboungang, F., Amvam Zollo, P. H., Dagne, E., & Mekonnen, Y. (2005). In vivo antimalarial activity of essential oils from *Cymbopogon citratus* and *Ocimum gratissimum* on mice infected with *Plasmodium berghei*. *Planta Medica*, 71(1), 20-23. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837745>
- Veber, D. F., Johnson, S. R., Cheng, H.-Y., Smith, B. R., Ward, K. W., & Kopple, K. D. (2002). Molecular properties that influence the oral bioavailability of drug candidates. *Journal of Medicinal Chemistry*, 45, 2615-2623. <https://doi.org/10.1021/jm020017n>
- Viktorová, J., Stupák, M., Rehořová, K., Dobiasová, S., Hoang, L., Hajšlová, J., Van Thanh, T., Van Tri, L., Van Tuan, N., & Rum, T. (2020). Lemon grass essential oil does not modulate cancer cells multidrug resistance by citral—its dominant and strongly antimicrobial compound. *Foods*, 9, 585. <https://doi.org/10.3390/foods9050585>

- Wildman, S. A., & Crippen, G. M. (1999). Prediction of physicochemical parameters by atomic contributions. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 39, 868-873. <https://doi.org/10.1021/ci990307l>
- Wohlmuth, H., Smith, M. K., Brooks, L. O., Myers, S. P., & Leach, D. N. (2006). Essential oil composition of diploid and tetraploid clones of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) grown in Australia. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(4), 1414–1419. <https://doi.org/10.1021/jf0521799>
- Zeng, R., Zou, X., Huang, C., Si, H., Song, J., Zhang, J., Luo, H., Wang, Z., Wang, P., Fan, G., Rao, X., Liao, S., & Chen, S. (2023). Novel design of citral-thiourea derivatives for enhancing antifungal potential against *Colletotrichum gloeosporioides*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(7), 3173-3183. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c07851>

Thermal Properties of Foam Mortars used Bentonite as Supplementary Cementitious Material

Yasemin Akgün¹ 

¹Ordu University, Technical Sciences Vocational School, Department of Construction Technologies, Ordu

Geliş Tarihi / Received Date: 23.06.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 29.08.2023

Abstract

The construction sector has an important role in solving of energy shortage and global warming problems. Therefore, innovative studies focused on building materials are among the priority topics. Foam concrete is one of them. However, foam concrete needs to be improved through the components of the final product in terms of efficiency and sustainability. In this study, it has thought that it could be improve the thermal performances of foam concretes due to blended cement used bentonite with high thermal performance. On the other hand, thanks to the use of blended cements, reduction in CO₂ emissions and more economical cement production would be achieved. The aim of the study is to examining physical, mechanical and thermal properties of foam mortars used bentonite as supplementary cementitious material (SCM). For this aim, it is carried out tests on foam mortars produced with blended cements at replacement ratios determined as 0, 5, 10, 15 wt.% of Portland cement. The results were discussed comparatively among produced series. According to the obtained experimental data, the strength and thermal properties of foam mortars could be developed due to blended cements produced with bentonite additive up to 15% replacement ratio.

Keywords: bentonite, supplementary cementitious material, foam mortar, thermal property

Çimento Katkı Malzemesi olarak Bentonit Kullanılan Köpük Harçların Termal Özellikleri

Öz

İnşaat sektörü, enerji kısıtlılığı ve küresel ısınma problemlerinin çözümünde önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, yapı malzemelerine odaklı yenilikçi çalışmalar öncelikli konular arasında yer almaktadır. Köpük beton bunlardan biridir. Ancak, köpük beton verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından nihai ürün bileşenleri aracılığıyla iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ısı performansını yüksek bentonit katkılı çimento kullanılmasıyla köpük betonların ısı performanslarının iyileştirebileceği düşünülmüştür. Diğer taraftan, katkılı çimento kullanımı sayesinde CO₂ emisyonlarında azalma ve daha ekonomik çimento üretimi sağlanabilecektir. Bu çalışmanın amacı, çimento katkı malzemesi (ÇKM) olarak bentonit kullanılan köpük harçların fiziksel, mekanik ve ısı özelliklerinin incelenmesidir. Bu amaçla, Portland çimentosunun ağırlıkça 0, 5, 10, 15 olarak belirlenen ikame oranlarında katkılı çimentolarla üretilen köpük harçlar üzerinde testler yapılmıştır. Sonuçlar deney serileri arasında karşılaştırmalı olarak tartışıldı. Elde edilen deneysel verilere göre %15'e kadar bentonit katkısı ile üretilen katkılı çimentolar sayesinde köpük harçların dayanım ve ısı özellikleri geliştirilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: bentonit, çimento katkı malzemesi, köpük harç, termal özellik

Introduction

The energy consumed during the construction and operation of buildings corresponds to 36% of the global energy consumption. (Santamouris et al., 2021). Moreover, according to the 2020 report of the United Nations Environment Program, the building and construction sector is responsible from 39% of the processes related to CO₂ emissions in 2018. (United Nations Environment Programme, 2020). As seen from these numerical values, these sectors have primary responsibilities in solving problems such as high energy consumption and greenhouse gas emissions. Also, world population prospect reports predict that the world population may increase by up to 11 billion people by 2050 (United Nations, 2019). And, it is expected that energy and global warming problems will increase gradually due to the overpopulation increase. Energy commonly used in buildings is heat energy (Li et al., 2020). Therefore, studies on heat storage and thermal insulation of building materials have become widespread. Foam concrete is a suitable material for these studies. Foam concrete are in the light-weight concrete class. Air voids are trapped inside of mixture by using foaming agent during the production of foam concrete (Chica & Alzate, 2019). So, thermal insulation ability of foam concretes improves due to low density and an increasing in the porous structure occur with obtained air voids. Foam concretes could be produced at different density ranges depending on foam content in design (300-1600 kg/m³). The usage areas of foam concrete is determined by density ranges. Low density prefers for insulation applications. (Gambhir, 2011). Also, foam concretes have positive properties such as low consumption of aggregate, satisfying compressive strength, high freeze-thawing, fire resistance, thermal insulation and heat storage capacity (Gencel et al., 2021; Gencel et al., 2022; Jitchaiyaphum et al., 2013; Raj et al., 2019; Raj et al., 2020; Xie et al., 2019; Zhao et al., 2015). On the other hand, cement is produced with overintense energy consumption. And, production processes of its have undesired CO₂ emissions. The use of mineral additive in cement production is one of the solution keys to these issues. Thus, strength and durability of building materials produced with blended cement also improves. (Bayraktar et al., 2021; Gong et al., 2019; Krishna et al., 2021; Yang et al., 2020). Calcined bentonite is a mineral additive that has pozzolanic activity (Khandelwal et al., 2022; Liu et al., 2020; Maske et al., 2021). Also, it is a good heat storage materials (Gencel et al., 2022; Sarı & Alkan, 2014). The heat energy storage studies on building materials increases gradually due to being a simplistic and effective method. The main aim of the heat storage method is to be storing by transfer on the material of the extreme and unusable heat in the medium. And the later, the stored heat is given back to the medium as heat needed (Hassan et al., 2022). This method is used as passive heating applications in the energy efficient building designs such as optimization of indoor air comfort conditions or supplementary heat to HVAC systems (Dincer & Rosen, 2010). In the technical literature, there are many studies on thermal insulation of foam concrete with or without mineral additives such as in the author's previous work (Akgün, 2022; Gencel et al., 2022; Jhatial et al., 2020; Liu et al., 2021) But, the studies on the heat storage capacity of foam concrete are limited (Chen et al., 2023; Huang et al., 2017; Sarı, 2016).

This study aims determining physical, mechanical and thermal properties, obtaining data, increasing using efficiency, reducing costs and CO₂ emissions in terms of foam concretes productions. For these aims, the replacement ratios of bentonite for blended cement production were determined as 0, 5, 10 and 15 wt.% of cement weight. The plates and standard cubic foam mortar samples were produced with bentonite blended cements. And, it is carried out density, water absorption, pozzolanic activity, compressive strength, macrostructure investigations, heat storage and insulation tests on produced samples. Some of the results of the author's previous study (Akgün, 2022) were used in present study for the aim of comparison of thermal properties.

Materials and Methods

In the mixture, it was used CEM I 42.5 R type of Portland Cement (PC) in accordance with EN 197-1 (CEN, 2012). The some properties of PC are shown in Table 1. Bentonite (B) was used as supplementary cementitious material (SCM) replaced with Portland cement (PC). Bentonite was

provided from Ordu/Fatsa region of Türkiye. Bentonite is a natural pozzolan in the volcanic tuff character. Bentonite is referred as Micronize MCIAGA-M06 in market. Grit content at 200 μm sieve size of its is maximum 1%. And, the chemical formula of bentonite is $\text{NaCaAlMg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})_6\text{n.H}_2\text{O}$. It is a clay mineral. It swells when meets wet. But if it is calcined at appropriate temperature. It does not swell and also occurs pozzolanic activity. So, in the study, bentonite was used by calcined at 900°C . Therefore, it was also determined strength activity index (SAI) that uses to measure the pozzolanic activity of a cementitious material for bentonite. If this index value exceeds 75% value at 28-days, the pozzolan is considered as active according to ASTM C618-22 (ASTM Standard, 2023). Also, the sum of the silica, aluminum and iron oxide chemical contents of bentonite is 84.2% (conformity criteria required for pozzolanic activity is $>75\%$). The properties of bentonite are given in Table 2. In the production of foam mortars, CEN Standard sand in accordance with EN 196-1 (CEN, 2016) was used. It was used foaming agent that is obtained by the hydrolysis of animal proteins in protein-based and liquid form. The foam component obtained by the foaming agent does not react with other components in the mixture. It only allows the formation of bubbles in which air is stored. The density of foaming agent is $1.09 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$. The water used at mixtures does not contain organic substances, harmful minerals or salts. The plates at dimensions of $20 \times 60 \times 150 \text{ mm}$ for thermal performance tests and standard cubes at $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ dimensions for strength tests were used. The compressive strengths of standard cube samples were determined by uniaxial compression test. A view from the production stages of the test series is given in Figure 1. The label information of test series is given in Table 3. Mix design of foam mortar for 1 m^3 is given in Table 4. The production samples were in accordance with EN 196-1. The spread and mini-slump of produced foam mortar are in the ranges of 140-150mm and 20-25mm, respectively. The foam mortar samples were in molds for 2 days at $23 \pm 2^\circ\text{C}$. After they were taken out of their molds, they were kept in air for 1 day, in water for 4 days and finally in air for 21 days. Samples were 28 days age at the time of the experiment.

Macro structure investigations on the samples were carried out with ground forms of hardened foam mortars. A view from the SEM examinations of the foamed mortars in ground form is given in Figure 2. The macrostructure photos of foam mortar samples was determined by Scanning Electron Microscopy (SEM) in The Central Research Laboratory of Ordu University. The heat storage and insulation properties tests were carried out in the Laboratory of Dicle University. The thermal properties tests carried out according to EN ISO 8990 (CEN, 1989) and EN ISO 6946 (CEN, 2017). The device used the hot-wire method according to DIN 5104628 (DIN, 1976) and EN 993-15 (CEN, 2006). Thermal properties examined in the study are thermal conductivity (λ), specific heat (c_p), thermal diffusion (α) and volumetric specific heat capacity (C). These were measured from tests carried out on foam mortar plates. Lower thermal conductivity means better insulation. Lower thermal diffusivity means better sorption of heat energy. The higher specific heat and volumetric specific heat capacity indicate the better heat storage ability of material (Incropera et al., 2007).

Table 1. The Properties of Portland Cement

Physical and Mechanical		Chemical Components	Mass (%)
Density (g/cm^3)	3.11	SiO_2	19.68
Initial Setting (min.)	162	Al_2O_3	5.37
Final Setting (min.)	268	Fe_2O_3	3.36
Volume Expansion (mm)	1.00	CaO	62.57
Blaine (cm^2/g)	3313	MgO	0.96
Strength of 7 days, MPa	41.30	SO_3	2.70
Strength of 28 days, MPa	48.70	LOI	4.14

Table 2. The Properties of Bentonite

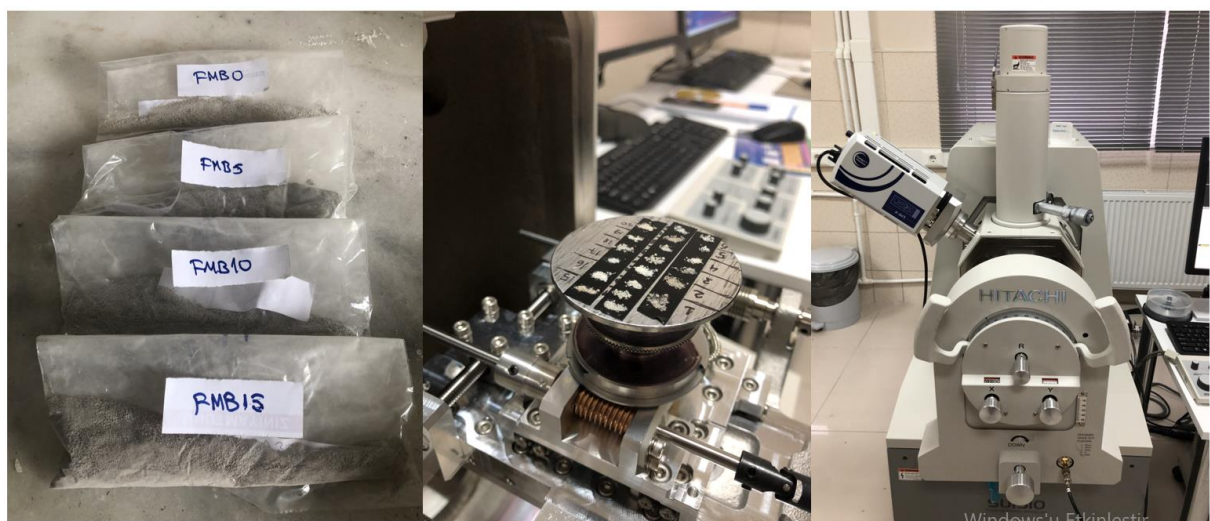
Contents	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	Density (g/cm ³)
Mass (%)	67.5	15.6	1.1	0.12	2.3	3.8	1.0	1.1	7.4	2.58

Table 3. The Label Information of Test Series

Replacement ratios (%)	0	5	10	15
Labels of Test Series	FMB0	FMB5	FMB10	FMB15

Table 4. Mix Design of Foam Mortars for 1m³

Materials (kg/m ³)	FMB0	FMB5	FMB10	FMB15
Portland Cement	500	475	450	425
Bentonite	0	25	50	75
CEN Sand	500	500	500	500
Foaming Agent	4	4	4	4
Water (for mix)	200	200	200	200
Water (for activation the foaming agent)	120	120	120	120

**Figure 1.** A View from the Production Stages of the Test Series**Figure 2.** A View from the SEM Examinations of Foam Mortars in Ground Form

Results and Discussions

In the study, bentonite that has pozzolanic activity and thermal performance was used as supplementary cementitious material (SCM) in foam mortar mixtures for building applications. SEM images of some test samples are shown in Figures 3-4. In macrostructure photos of samples determined by Scanning Electron Microscopy (SEM), closed pores could be clearly seen from samples with bentonite as opposed to foam mortar samples without bentonite. Saturated and dry densities, water absorption, compressive strength, strength activity index (for pozzolanic activity) and thermal properties of samples are given in Tables 5-6 and in Figures 5-7. The densities of foam mortar samples decreased with the increase of replacement ratios. Because density of Portland cement is higher as 20.54% than that of bentonite. The compressive strengths of FMB5, FMB10 and FMB15 series were lower than that of the FMB0 series. The lowest compressive strength of foam mortar samples is 1.94 MPa. This value complies (>1.5 MPa) with TS EN 13655 (TSI, 2015). But, it is thought that the later ages strengths of samples with bentonite additive will show an upward tendency. This situation could be attributed to expectation that bentonite will be form additional bindings by reacting with the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ occurred in later ages (Liu et al., 2020; Khandelwal et al., 2022; Trumer et al., 2019; Kaya & Yazicioğlu, 2015). Strength activity indexes of all foam mortars are from 94.22 to 86.22% at 28 days age. The SAI above 75% is referred to the presence of the pozzolanic reaction. According to seen, the strength activity index results conform to the ASTM Standard C618. The water absorption phenomenon is closely related to capillar porosity. If the capillar porosity increase, water absorption increases. Thus, the compressive strength decreases. The finely ground pozzolans occur also a filler effect in foam mortar. The capillar porosities and sum of pore volumes of foam mortars with bentonite blended cements are less than those of foam mortars with Portland cements (Jitchaiyaphum et al., 2013). The thermal conductivity of series with bentonite (FMB15) were 22.76% lower than that of series with PC (FMB0). This decreasing could be referred with low density of bentonite. As seen, thermal insulation improved with bentonite mineral additive. The heat storage properties (cp and C) in a dry state of samples increased with the increase of bentonite content. The cp and C values of FMB15 series were 20.51% and 11.76% higher than those of FMB0 series, respectively. These increasing values refers better heat storage capacity. The thermal diffusivity values decreased up to 30.79% with the increasing of bentonite content. This decreasing tendency of thermal diffusivity means better sorption of heat energy.

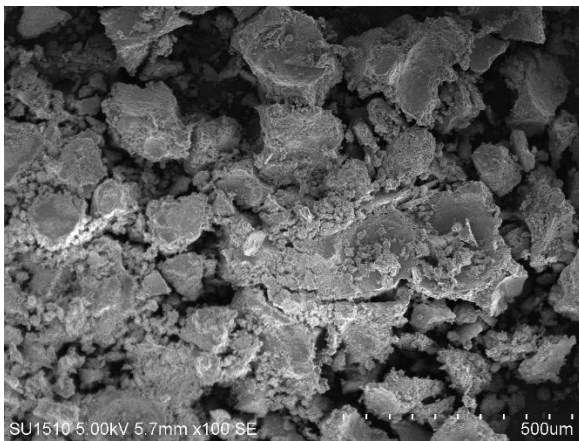


Figure 3. The Pore Surface of FMB0

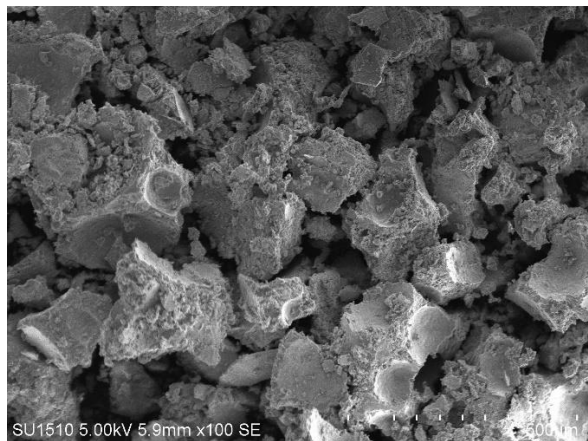


Figure 4. The Pore Surface of FMB15

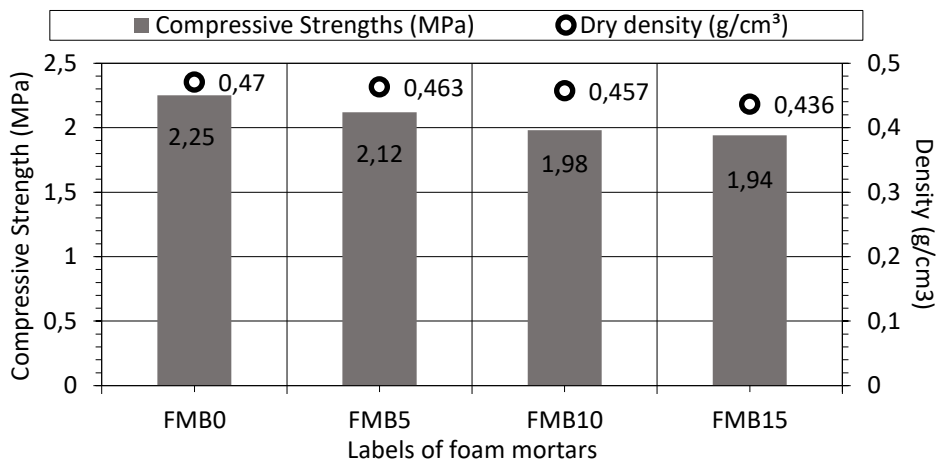
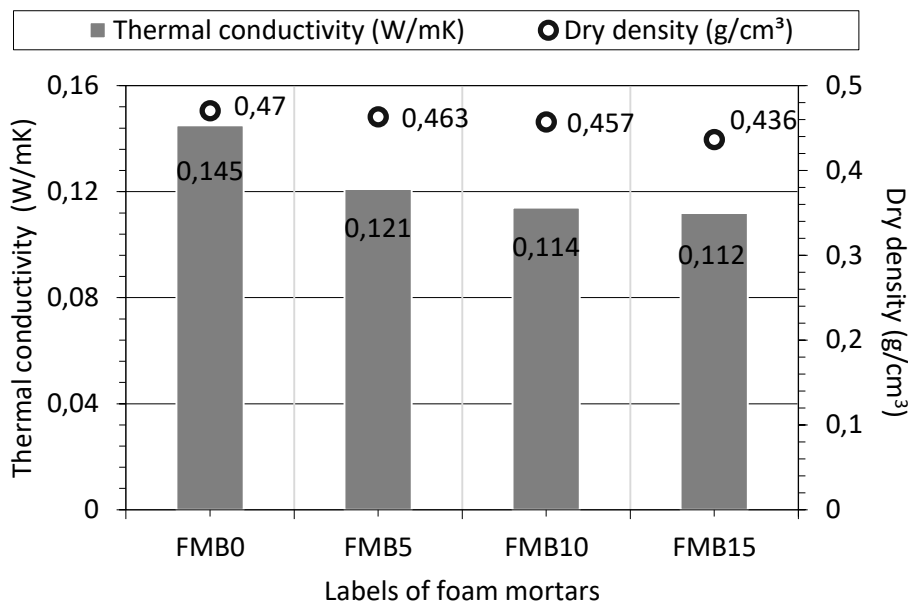
Table 5. Density, Water Absorption, Strength and SAI Values of Samples

Foam Mortars	$\rho_{\text{saturated}}^*$ (kg/m ³)	ρ_{kuru}^* (kg/m ³)	Water Absorption (%)	Strength (MPa)*	SAI (%)
FMB0	551.12	470.24	38.57	2.25	100.00
FMB5	538.28	463.18	36.45	2.12	94.22
FMB10	529.11	457.52	37.83	1.98	88.00
FMB15	514.39	436.71	39.01	1.94	86.22

*the author's previous study (Akgün, 2022)

Table 6. Heat Storage and Thermal Insulation Capacities in a Dry State of Samples

Mortars	ρ_{kuru} kg/m ³	$c_p \cdot 10^{-6}$ J/kg.K	$C \cdot 10^6$ J/m ³ .K	λ_{dry} W/mK	$\alpha \cdot 10^{-6}$ m ² /s	Temperature °C
FMB0	470.24	903.21	0.425	0.145	0.341	23.73
FMB5	463.18	1012.64	0.469	0.121	0.258	25.45
FMB10	457.52	1032.82	0.473	0.114	0.241	23.52
FMB15	436.71	1088.43	0.475	0.112	0.236	24.97

**Figure 5.** Dry Density and Compressive Strength of Foam Mortars**Figure 6.** Dry Density and Thermal Conductivity of Foam Mortars (Akgün, 2022)

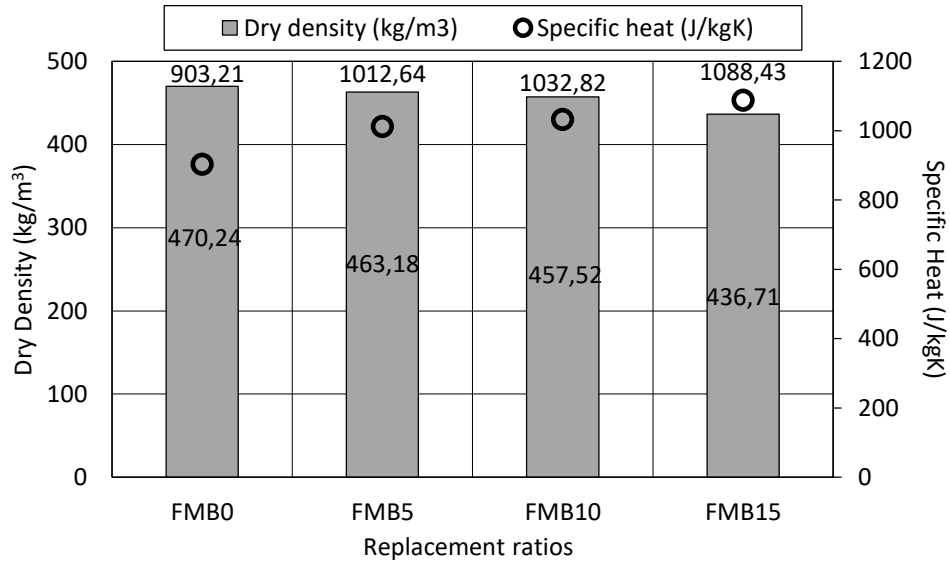


Figure 7. Dry Density and Specific Heat of Foam Mortars

Conclusions and Recommendations

Based on obtained data from tests some results are given:

The compressive strengths of foam mortars produced with blended cements used bentonite as SCM decreased with the increase of replacement ratios of bentonite. But these decreases are at acceptable level up to 15%.

The heat storage capacities and thermal insulation ability of foam mortars produced with bentonite blended cements were improved.

According to the investigations in this study in terms of heat storage capacity, thermal insulation ability and satisfactory strength values, the foam mortars produced with bentonite blended cements could be used with up to 15% replacement ratio in buildings with a holistic design approach such as energy saving, economic and environment friendly.

In future studies, it should be investigated durability and later age strengths on foam concretes produced with different bentonite types.

Acknowledgment

The author would like to thanks to BENTAŞ Bentonite Company that was supplied bentonite, Mining Engineering Laboratory of Dicle University, Central Research Laboratory of Ordu University.

Ethic

There are no ethical issues with the publication of this article.

Conflict of Interest

The author state that there is no conflict of interest.

ORCID

Yasemin Akgün  <https://orcid.org/0000-0002-4178-5233>



References

- Akgün, Y. (2022, May 20-22). *Thermal insulation performances of foamed mortars containing bentonite blended cements* [Oral presentation]. Sixth International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES-2022), Ordu, Türkiye.
- ASTM Standard (2023). *Standard specification for coal ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0618-23>
- Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Gencil, O., Benli, A., & Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foam concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*, 288, 123128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123128>
- Chen, Y., Wang, W., & Fang, G. (2023). Thermal performance of lauric acid/bentonite/carbon nanofiber composite phase-change materials for heat storage. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07964-9>
- Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, 200, 637-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>
- CEN (2012). *EN 197-1 Cement Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements*. European Committee for Standardization.
- CEN (2016). *EN 196-1 Methods of testing cement—Part 1: Determination of strength*. European Committee for Standardization.
- CEN (1989). *EN ISO 8990 Thermal insulation—Determination of steady-state thermal transmission properties-Calibrated and guarded hot box*. European Committee for Standardization.
- CEN (2017). *EN ISO 6946 Building components and building elements-Thermal resistance and thermal transmittance-Calculation methods*. European Committee for Standardization.
- CEN (2006). *EN 993-15 Methods of test for dense shaped refractory products – determination of thermal conductivity by the hot-wire (parallel) method*. European Committee for Standardization.
- Çamcı, O., Küçükuysal, C., Güngör, C., & Tecer, H. (2022). Long-term thermal loading study on the dehydration behavior of Ca-bentonites of Ünye (Ordu, NE Turkey). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(3), 2073-2082. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10647-z>
- DIN (1976). *DIN 51046: Testing of ceramic materials; determination of thermal conductivity up to 1600°C according to the hot wire method, thermal conductivity up to 2 WK-1m-1*. DIN.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2010). *Thermal energy storage systems and applications* (2nd). John Wiley & Sons.
- Gambhir, M.L. (2011). *Nehajamval, building materials, products, properties & systems*. Tata Mcgraw Hill Education Private Limited.
- Gencil, O., Bilir, T., Bademler, Z., & Ozbakkaloglu, T. (2022). A detailed review on foam concrete composites: Ingredients, properties, and microstructure. *Applied Sciences*, 12(11), 5752. <https://doi.org/10.3390/app12115752>
- Gencil, O., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Martinez-Barrera, G., Brostow, W., ... & Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, 294, 123607. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123607>

- Gencil, O., Nodehi, M., Hekimoğlu, G., Ustaoglu, A., Sarı, A., Kaplan, G., ... & Ozbakkaloglu, T. (2022). Foam concrete produced with recycled concrete powder and phase change materials. *Sustainability*, 14(12), 7458. <https://doi.org/10.3390/su14127458>
- Gencil, O., Ustaoglu, A., Benli, A., Hekimoğlu, G., Sarı, A., Erdogmus, E., ... & Bayraktar, O. Y. (2022). Investigation of physico-mechanical, thermal properties and solar thermoregulation performance of shape-stable attapulgit based composite phase change material in foam concrete. *Solar Energy*, 236, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.042>
- Gong, J., & Zhang, W. (2019). The effects of pozzolanic powder on foam concrete pore structure and frost resistance. *Construction and Building Materials*, 208, 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.021>
- Hassan, F., Jamil, F., Hussain, A., Ali, H. M., Janjua, M. M., Khushnood, S., ... & Li, C. (2022). Recent advancements in latent heat phase change materials and their applications for thermal energy storage and buildings: A state of the art review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101646. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101646>
- Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (2017). Preparation, characterization and thermal properties of fatty acid eutectics/bentonite/expanded graphite composites as novel form-stable thermal energy storage materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 166, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.026>
- Incropera, F. P., De Witt, D. P., Bergman, T.L. & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Wiley.
- Jhatial, A. A., Goh, W. I., Mohamad, N., Rind, T. A., & Sandhu, A. R. (2020). Development of thermal insulating lightweight foam concrete reinforced with polypropylene fibres. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 4067-4076. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04382-0>
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2013). Cellular lightweight concrete containing high-calcium fly ash and natural zeolite. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20, 462-471. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0752-1>
- Kaya, T., & Yazicioğlu, S. (2015). Kalsine bentonit katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık etkisi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 150-160. <https://doi.org/10.17798/beufen.46634>
- Khandelwal, S., & Rhee, K. Y. (2022). Evaluation of pozzolanic activity, heterogeneous nucleation, and microstructure of cement composites with modified bentonite clays. *Construction and Building Materials*, 323, 126617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126617>
- Krishna, A. S., Siempu, R., & Kumar, G. S. (2021). Study on the fresh and hardened properties of foam concrete incorporating fly ash. *Materials Today: Proceedings*, 46(17), 8639-8644. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.599>
- Li, B., You, L., Zheng, M., Wang, Y., & Wang, Z. (2020). Energy consumption pattern and indoor thermal environment of residential building in rural China. *Energy and Built Environment*, 1(3), 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.04.004>
- Liu, M., Hu, Y., Lai, Z., Yan, T., He, X., Wu, J., ... & Lv, S. (2020). Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241, 118015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015>
- Liu, P., Gong, Y. F., Tian, G. H., & Miao, Z. K. (2021). Preparation and experimental study on the thermal characteristics of lightweight prefabricated nano-silica aerogel foam concrete wallboards. *Construction and Building Materials*, 272, 121895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121895>

- Maske, M. M., Patil, N .K., & Katdare, A. D. (2021). Review of application of plain and calcined bentonite as a cement blending material in concrete and mortar. *Psychology and Education*, 58(1), 5873-5878. <http://dx.doi.org/10.17762/pae.v58i1.3666>
- Raj, A., Sathyan, D., & Mini, K. M. (2019). Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 221, 787-799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>
- Raj, B., Sathyan, D., Madhavan, M. K., & Raj, A. (2020). Mechanical and durability properties of hybrid fiber reinforced foam concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118373>
- Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
- Sarı, A., Alkan, C., Biçer, A., & Bilgin, C. (2014). Latent heat energy storage characteristics of building composites of bentonite clay and pumice sand with different organic PCMs. *International journal of energy research*, 38(11), 1478-1491. <https://doi.org/10.1002/er.3185>
- Sarı, A. (2016). Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials. *Energy Conversion and Management*, 117, 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.078>
- Trümer, A., Ludwig, H. M., Schellhorn, M., & Diedel, R. (2019). Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete. *Applied Clay Science*, 168, 36-42. <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2018.10.015>
- TSI (2015). *Specification for masonry units - Foam concrete masonry units*. Turkish Standard Institute, TS EN 13655.
- United Nations Environment Programme (2020). 2020 *Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission*. Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Global Status Report. Retrieved February 1, 2023 from www.iea.org
- United Nations (2019). *Department of economic and social affairs*. World population prospects 2019.
- Xie, Y., Li, J., Lu, Z., Jiang, J., & Niu, Y. (2019). Preparation and properties of ultra-lightweight EPS concrete based on pre-saturated bentonite. *Construction and Building Materials*, 195, 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.091>
- Yang, D., Liu, M., & Ma, Z. (2020). Properties of the foam concrete containing waste brick powder derived from construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, 32, 101509. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101509>
- Zhao, X., Lim, S. K., Tan, C. S., Li, B., Ling, T. C., Huang, R., & Wang, Q. (2015). Properties of foam mortar prepared with granulated blast-furnace slag. *Materials*, 8(2), 462-473. <https://doi.org/10.3390/ma8020462>

Solutions of Time Fractional Mathematical Model with Effective Techniques

Yusuf Güreffe¹ , Yusuf Pandır² , Tolga Aktürk³ 

¹Mersin University, Faculty of Science, Mathematics, Mersin

²Bozok University, Faculty of Science, Mathematics, Yozgat

³Ordu University, Faculty of Education, Mathematics and Science Education, Ordu

Geliş Tarihi / Received Date: 08.07.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 24.10.2023

Abstract

In this article, the time-fractional Clannish Random Walker's parabolic equation solutions of the traveling wave, a nonlinear partial differential equation, are analyzed using the Modified Exponential Function Model (MEFM) and the General Kudryashov Model (GKM). The solution functions of the mathematical model were obtained by a mathematical programme using two effective methods. The program was used to draw 2D and 3D contours that simulate the behaviour of this nonlinear mathematical model under appropriate parameters.

Keywords: the time fractional Clannish Random Walker's parabolic equation, modified exponential function method, generalized Kudryashov method

Zaman Kesirli Matematiksel Modelin Etkili Tekniklerle Çözümü

Öz

Bu makalede, doğrusal olmayan bir kısmi diferansiyel denklem olan Zaman Kesirli Clannish Random Walker'ın Parabolik Denklemi hareketli dalga çözümleri, Geliştirilmiş Üstel Fonksiyon Metodu (GÜFM) ve Genelleştirilmiş Kudryashov Metodu (GKM) kullanılarak analiz edilmektedir. Bu şekilde, matematiksel modelin çözüm fonksiyonları, iki etkili yöntem yardımıyla matematiksel bir program aracılığıyla elde edilmiştir. Doğrusal olmayan bu matematiksel modelin davranışını simüle eden iki boyutlu, üç boyutlu kontur grafikleri program yardımıyla uygun parametreler altında çizilmiştir.

Anahtar Kelimeler: zaman kesirli Clannish Random Walker'ın parabolik denklemi, geliştirilmiş üstel fonksiyon metodu, genelleştirilmiş Kudryashov metodu

Introduction

Nonlinear partial differential equations (NPDEs) serve as mathematical models that find applications in various fields of engineering and healthcare. For instance, they have been employed in electronic engineering to describe phenomena such as the tension in water pipes (Ergün & Amirov, 2022; Ergun 2020a; Ergun, 2020b) and in healthcare to model the progression of events like the Covid-19 pandemic. These examples demonstrate the wide-ranging utility of these nonlinear mathematical models in explaining phenomena across different aspects of life. As a result, researchers have developed various methods and techniques to obtain solutions for these critical equation models. Some of these methods include the Bernoulli sub-equation method (Baskonus et al., 2015; Zheng, 2014; Zhou, 2014), the G'/G method (Ebadi & Biswas, 2011; Kudryashov, 2010; Zayed & Gepreel, 2009), the (m+1/G')-Expansion method (Bulut et al., 2021), the sine-Gordon method (Akbar et al., 2021; Yel et al., 2017), and the extended trial equation method (Ekici et al., 2017a; Ekici et al., 2017b). One such mathematical model worth noting is the time-fractional Clannish Random Walker's Parabolic (CRWP) equation, which exhibits particular behaviors and characteristics (Siddique et al., 2022).

$$D_t^\beta u + su_x + quu_x + ru_{xx} = 0. \quad (1)$$

β , the beta derivative order of the above mathematical model, is in the range $\beta \in (0,1]$.

The article follows the following template from this section onwards: In the subsequent section following the introduction, we delve into the definition and properties of the fractional derivative within the mathematical model under investigation. Following this, we provide a comprehensive exposition of the Modified Exponential Function Method (MEFM) and the Generalized Kudryashov Method (GKM), both of which will be employed to derive the traveling wave solutions for the nonlinear mathematical model. The solution functions of the nonlinear fractional mathematical model are subsequently acquired by applying these methods, and the concluding section consolidates all the results and commentary presented within this article.

Analysis of Beta Derivative

Definition: The definition of the beta derivative is given below (Ghanbari, 2019),

$$D_x^\beta \{f(x)\} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f\left(x + \varepsilon \left(x + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{1-\beta}\right) - f(x)}{\varepsilon}, \quad \beta \in (0,1]. \quad (2)$$

The most important factor in choosing the mathematical model that is the subject of this article is the ability to use the properties of the beta derivative rule. Accordingly, the properties of the beta derivative are as follows:

$$i) \quad D_x^\beta \{a g(x) + b h(x)\} = a D_x^\beta \{g(x)\} + b D_x^\beta \{h(x)\}, \quad \forall a, b \in R. \quad (3)$$

$$ii) \quad D_x^\beta \{g(x)h(x)\} = h(x) D_x^\beta \{g(x)\} + g(x) D_x^\beta \{h(x)\}. \quad (4)$$

$$iii) \quad D_x^\beta \left\{ \frac{g(x)}{h(x)} \right\} = \frac{h(x) D_x^\beta \{g(x)\} - g(x) D_x^\beta \{h(x)\}}{h^2(x)}, \quad h(x) \neq 0. \quad (5)$$

Method

The Modified Exponential Function Method: Analyzing Its Processing Steps for Effective Application

In this section, we will provide information about the Modified Exponential Function Method (MEFM). We will discuss both the solution function of the mathematical model investigated in this study and the general form of the nonlinear partial differential equation based on the derivatives of this function. Here they are: Solution function of the mathematical model investigated in this study. General form of the nonlinear partial differential equation derived from the derivatives of this function.

$$P(u, D_t^\beta u, u_x, u_{xx}, uu_x, \dots) = 0. \quad (6)$$

We introduce the following travelling transform based on the beta derivative variables in the nonlinear mathematical model to simplify the nonlinear partial differential equation shown in the figure above, which has multiple derivative variables, into a single variable.

$$U(x, t) = U(\xi), \quad \xi = x - \frac{c}{\beta} \left(t + \frac{1}{\Gamma[\beta]} \right). \quad (7)$$

The derivative terms required in equation (6) are obtained from the traveling wave transform in equation (7) and then substituted to derive the general form of the following nonlinear ordinary differential equation,

$$N(U, U^2, U', U'', \dots) = 0. \quad (8)$$

The assumed solution function that is expected to yield the nonlinear mathematical model discussed in the paper is as follows:

$$U(\xi) = \frac{\sum_{j=0}^n A_j [e^{-\mathcal{G}(\xi)}]^j}{\sum_{i=0}^m B_i [e^{-\mathcal{G}(\xi)}]^i} = \frac{A_0 + A_1 e^{-\mathcal{G}} + \dots + A_n e^{-n\mathcal{G}}}{B_0 + B_1 e^{-\mathcal{G}} + \dots + B_m e^{-m\mathcal{G}}}, \quad (9)$$

where $A_j, B_i, (0 \leq j \leq n, 0 \leq i \leq m)$ are any constants. The derivative terms required in equation (8) are obtained and substituted in equation (9). However, while obtaining these derivative terms, the derivatives of the \mathcal{G} function in the powers of the exponential functions in equation (8) are needed. Therefore, the following equation is used,

$$\mathcal{G}'(\xi) = e^{-\mathcal{G}(\xi)} + \mu e^{\mathcal{G}(\xi)} + \lambda. \quad (10)$$

Equation (10) is integrated according to ξ . In this order, the following states are obtained according to the values of λ and μ in the equation (He, 2006):

Family 1: $\mu \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu > 0$,

$$\mathcal{G}(\xi) = \ln\left(\frac{-\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}}{2\mu} \tanh\left(\frac{\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}}{2}(\xi + E)\right) - \frac{\lambda}{2\mu}\right). \quad (11)$$

Family 2: $\mu \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu < 0$,

$$\mathcal{G}(\xi) = \ln\left(\frac{\sqrt{-\lambda^2 + 4\mu}}{2\mu} \tan\left(\frac{\sqrt{-\lambda^2 + 4\mu}}{2}(\xi + E)\right) - \frac{\lambda}{2\mu}\right). \quad (12)$$

Family 3: $\mu = 0$, $\lambda \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu > 0$,

$$\mathcal{G}(\xi) = -\ln\left(\frac{\lambda}{e^{\lambda(\xi+E)} - 1}\right). \quad (13)$$

Family 4: $\mu \neq 0$, $\lambda \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu = 0$,

$$\mathcal{G}(\xi) = \ln\left(-\frac{2\lambda(\xi+E)+4}{\lambda^2(\xi+E)}\right). \quad (14)$$

Family 5: $\mu = 0$, $\lambda = 0$ and $\lambda^2 - 4\mu = 0$,

$$\mathcal{G}(\xi) = \ln(\xi + E), \quad (15)$$

where E , λ , μ are coefficients.

According to the conditions obtained above, the \mathcal{G} in powers of exponential functions are found in the solution function considered as assumption (8). Another crucial step is to define the boundaries of the solution function. This is accomplished by establishing a relationship between the boundary terms, which involves balancing the highest order derivative term and the highest order nonlinear term within the nonlinear ordinary differential equation. Subsequently, arbitrary values are assigned to these parameters to delineate the boundaries of the solution function (Equation 8). Following this, the solution function is conjectured, and the requisite derivative terms within the nonlinear ordinary differential equation are then substituted. When this equation is arranged in terms of powers of $e^{\mathcal{G}(\xi)}$, a system of algebraic equations is obtained. Following this procedure, we ascertain the coefficients associated with the solution function (8). Ultimately, we verify that the solution function, resulting from all these operations, satisfies the nonlinear ordinary differential equation (NODE) first, and subsequently, the nonlinear partial differential equation. We also generate graphical representations of the solution function with the assistance of specialized software.

Analyzing the Generalized Kudryashov Method for Solving Nonlinear Differential Equations

In this article, we will conduct a detailed analysis of the Generalized Kudryashov Method (GKM), which is another approach for obtaining solution functions of nonlinear mathematical models. To a certain extent, the procedures of these methods share similarities. Similar to the previously described method, the general form of the nonlinear partial differential equation under investigation in this paper is as follows:

$$P(u, D_t^\beta u, u_x, u_{xx}, uu_x, \dots) = 0. \quad (16)$$

In order to simplify the solution of this nonlinear partial differential equation (NPDE), we employ the following traveling wave transform to reduce the number of derivative variables to a single variable:

$$U(x, t) = U(\xi), \quad \xi = x - \frac{c}{\beta} \left(t + \frac{1}{\Gamma[\beta]} \right). \quad (17)$$

By applying the nonlinear mathematical model to this traveling wave transformation, the general form of the univariate nonlinear ordinary differential equation depending on ξ is obtained,

$$N(U, U^2, U', U'', \dots) = 0. \quad (18)$$

In this method, similar to the previously described approach, we assume the solution function, which is expected to satisfy both the nonlinear ordinary differential equation (NODE) and the nonlinear partial differential equation (NPDE), as follows:

$$U(\xi) = \frac{\sum_{j=0}^n a_j [Q]^j}{\sum_{i=0}^m b_i [Q]^i} = \frac{a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 + \dots + a_n Q^n}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2 + \dots + b_m Q^m}, \quad (19)$$

where $a_j, b_i, (0 \leq j \leq n, 0 \leq i \leq m)$ are any constants. Using the solution function (19), the derivative terms required in the nonlinear ordinary differential equation are arranged. In the meantime, the derivatives of the Q function also appear. Therefore, this term, which is one of the components of the solution function, is treated as follows (Kaplan, 2021):

$$Q' = Q^2 - Q. \quad (20)$$

After determining the Q in the solution function, we start the process of bounding the solution function. It does so through the application of the balancing principle in the context of nonlinear ordinary differential equation. This principle involves balancing the term that contains the derivative of the highest order and the term of the highest order within the equation. Through the assignment of appropriate values to these parameters, we determine the bounds of the solution function. The nonlinear ordinary differential equation is then solved by substituting the solution function and its derivatives. This equation is organized according to the powers of Q , and a system of algebraic equations consisting of the coefficients in the solution function is obtained. The coefficients obtained from the solution of this system are then applied to the solution function. A subsequent process of verification is carried out to ensure that this solution function satisfies first the nonlinear ordinary differential equation (NODE) and then the nonlinear partial differential equation (NPDE). In addition, graphical representations illustrating the behaviour of the NPDE are generated using the program.

Application

Solutions of Nonlinear Mathematical Model with Modified Exponential Function Method (MEFM)

In this part of the paper, to obtain the solution functions of the time-fractional clannish random walker parabolic equation and to determine the graphs according to the appropriate parameters, the modified exponential function method introduced in detail above is used. First, the following nonlinear ordinary differential equation model of equation (1) is obtained when the derivative terms in the nonlinear mathematical model (1) are obtained from equation (7) and replaced:

$$2(s-c)U + qU^2 + 2rU' = 0. \quad (21)$$

By balancing the highest order derivative term U' and the highest order nonlinear term U^2 in equation (21), the following relation is obtained.

$$2n - 2m = n - m + 1 \Rightarrow n = m + 1. \quad (22)$$

By means of relation (22), the boundaries of the solution function assumed to satisfy the nonlinear partial differential equation will be determined. In this process, $n = 2$ is obtained for $m = 1$, taking into account the technological possibilities studied. Then, the model accepted as the solution function is obtained as follows:

$$U(\xi) = \frac{A_0 + A_1 e^{-\xi} + A_2 e^{-2\xi}}{B_0 + B_1 e^{-\xi}}. \quad (23)$$

In equation (21), all necessary function models are obtained from equation (22) and substituted. The resulting equation is then organized according to $e^{\mathcal{G}}$ to obtain the algebraic system of equations consisting of coefficients.

Case 1.

$$A_0 = 0, A_1 = \frac{1}{2}(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 4\mu})A_2, B_0 = 0, B_1 = \frac{qA_2}{2r}, c = s - r\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \tag{24}$$

The preferred coefficients for this case are substituted in equation (23). Then, the selected cases of the \mathcal{G} function under the following conditions are substituted into the solution function and the mathematical model that satisfies the nonlinear partial differential equation is obtained.

Family 1: $\mu \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu > 0$

$$U_{1,1}(x,t) = \frac{r(\lambda(-\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\mu}) + 4\mu) \left(-1 + \tanh \left[\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} (E + \xi) \right] \right)}{q \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \tanh \left[\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} (E + \xi) \right] \right)}, \tag{25}$$

where, $\xi = x - \frac{c}{\beta} \left(t + \frac{1}{\Gamma[\beta]} \right)$.

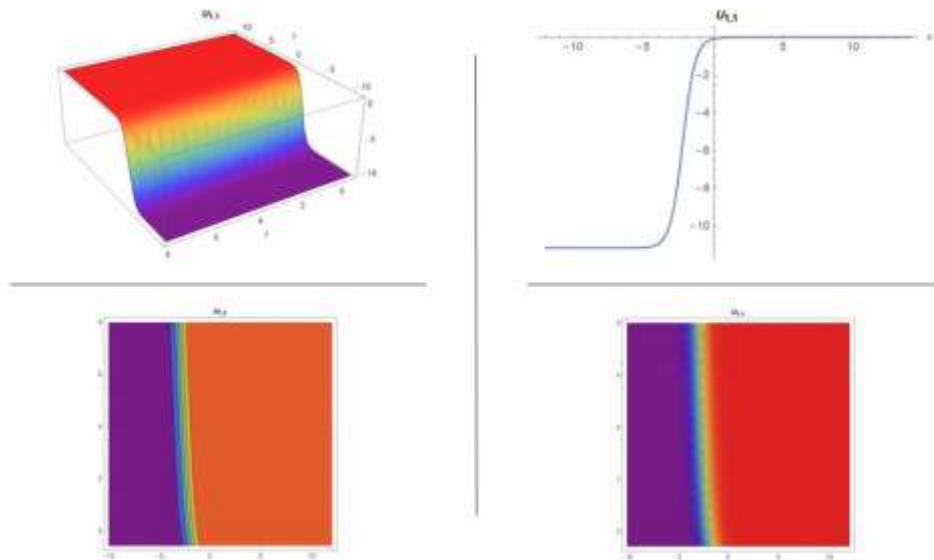


Figure 1. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (25) as a Function of the Parameters $\lambda = 3, \mu = 1, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0.190983, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = -0.239017, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 2: If, $\mu \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu < 0$

$$U_{1,2}(x,t) = \frac{r \left(\lambda^2 - \lambda \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} - 4\mu + \left(\sqrt{-(\lambda^2 - 4\mu)^2} - \lambda \sqrt{-\lambda^2 + 4\mu} \right) \tan[\omega] \right)}{q \left(\lambda - \sqrt{-\lambda^2 + 4\mu} \tan[\omega] \right)}, \tag{26}$$

where, $\omega = \frac{1}{2} \sqrt{-\lambda^2 + 4\mu(E + \xi)}$.

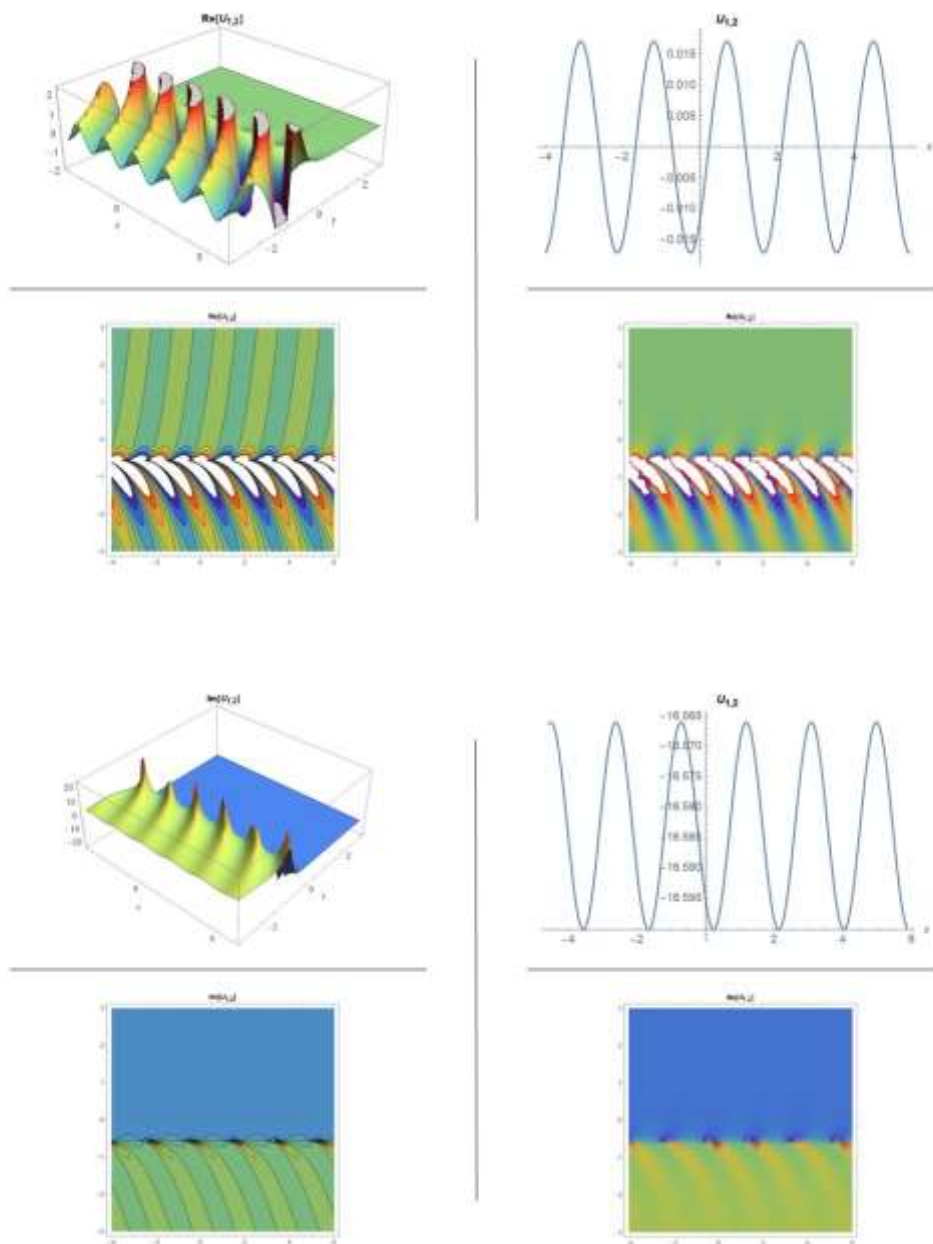


Figure 2. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (26) as a Function of the Parameters $\lambda = 1, \mu = 3, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0.25 - 0.829156i, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.32 - 0.829156i, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 3: $\mu = 0, \lambda \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu > 0$

$$U_{1,3}(x,t) = \frac{r \left(-\sqrt{\lambda^2} + \lambda \coth \left[\frac{1}{2} \lambda (E + \xi) \right] \right)}{q}. \tag{27}$$

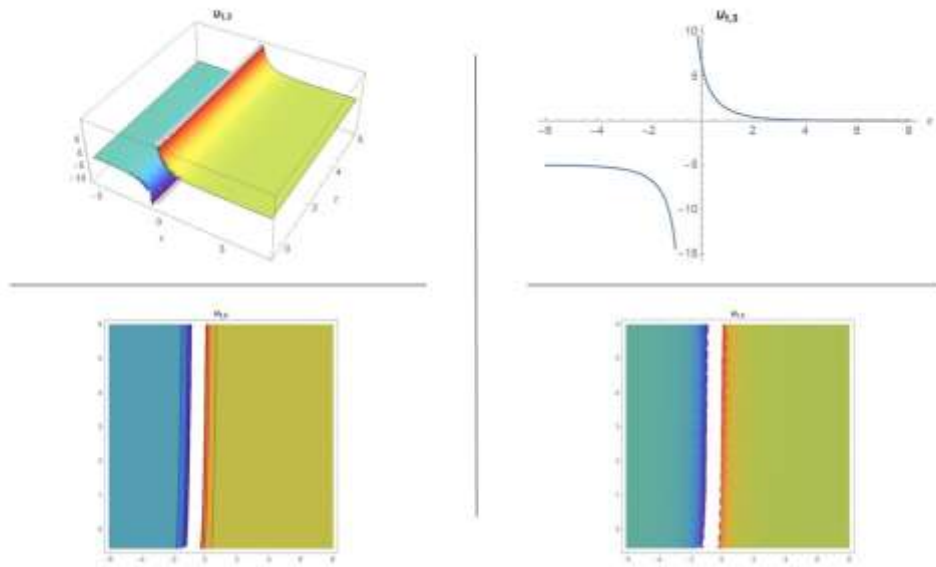


Figure 3. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (27) as a Function of the Parameters $\lambda = 1, \mu = 0, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.07, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 4: When, $\mu \neq 0, \lambda \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu = 0$

$$U_{1,4}(x, t) = \frac{r \left(-\sqrt{\lambda^2 - 4\mu} + \frac{2\lambda}{2 + \lambda(E + \xi)} \right)}{q} \tag{28}$$

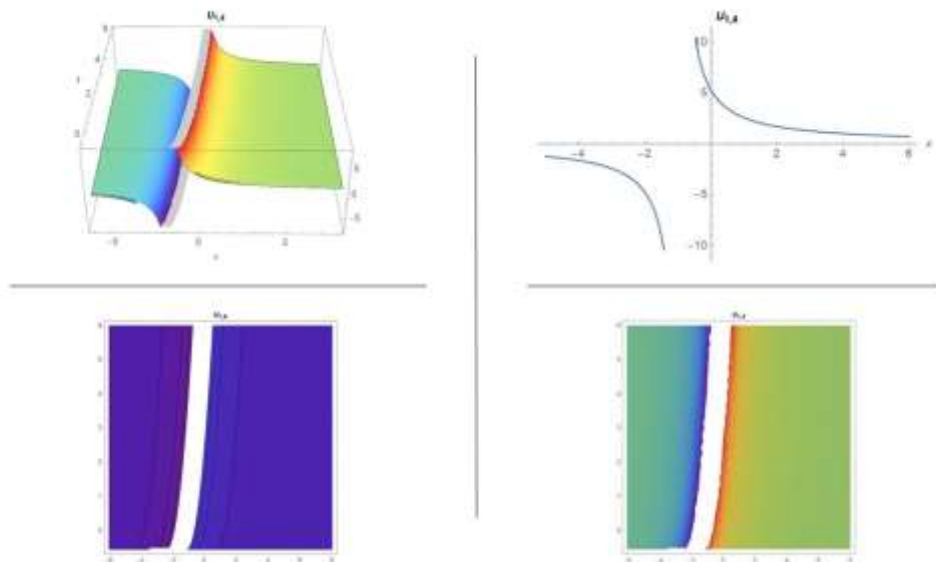


Figure 4. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (28) as a Function of the Parameters $\lambda = 2, \mu = 1, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0.5, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.32, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 5: $\mu = 0, \lambda = 0$ and $\lambda^2 - 4\mu = 0$

$$U_{1,5}(x,t) = \frac{2r}{q(E + \xi)}. \tag{29}$$

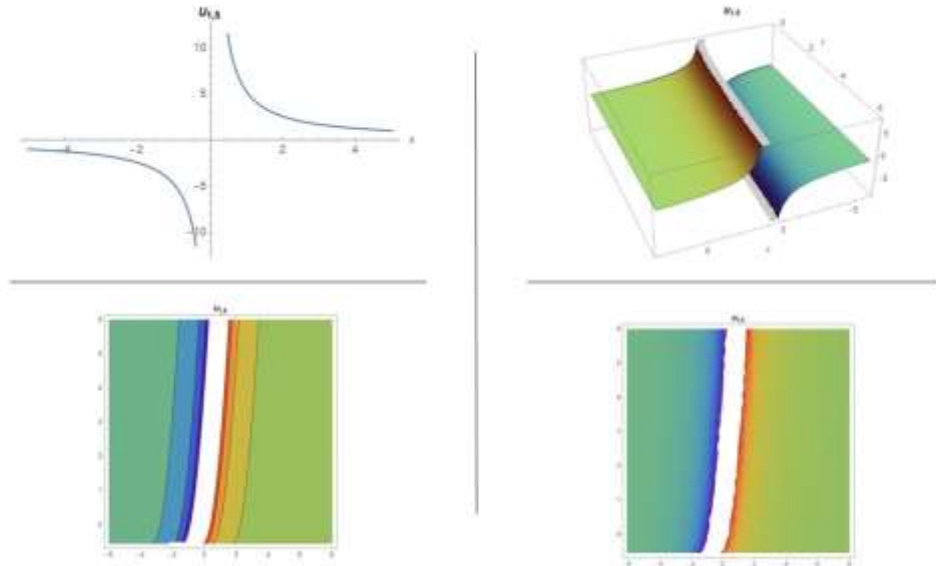


Figure 5. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (29) as a Function of the Parameters $\lambda = 0, \mu = 0, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.32, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Case 2.

$$A_0 = 0, A_1 = \frac{1}{2}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\mu})A_2, B_0 = 0, B_1 = \frac{qA_2}{2r}, c = s + r\sqrt{\lambda^2 - 4\mu}. \tag{30}$$

The processes of obtaining the solution functions of the nonlinear mathematical model according to the second of the coefficient states get by solving the algebraic equation system are as follows.

Family 1: $\mu \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu > 0$

$$U_{2,1}(x,t) = \frac{r(\lambda(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\mu}) - 4\mu) \left(1 + \tanh \left[\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} (E + \xi) \right] \right)}{q \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \tanh \left[\frac{1}{2} \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} (E + \xi) \right] \right)}, \tag{31}$$

where, $\xi = x - \frac{c}{\beta} \left(t + \frac{1}{\Gamma[\beta]} \right)$.

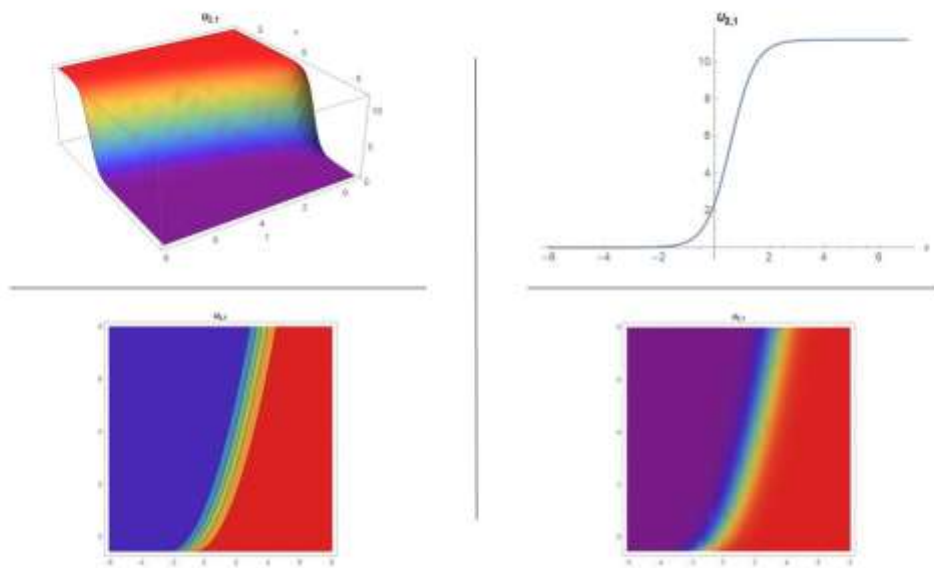


Figure 6. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (31) as a Function of the Parameters $\lambda = 3, \mu = 1, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 1.30902, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.879017, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 2: $\mu \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu < 0$

$$U_{2,2}(x,t) = \frac{r \left(\lambda \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 4\mu} \right) - 4\mu - \left(\sqrt{-(\lambda^2 - 4\mu)^2} + \lambda \sqrt{-\lambda^2 + 4\mu} \right) \tan[\omega] \right)}{q \left(\lambda - \sqrt{-\lambda^2 + 4\mu} \tan[\omega] \right)}, \quad (32)$$

where, $\omega = \frac{1}{2} \sqrt{-\lambda^2 + 4\mu} (E + \xi)$.

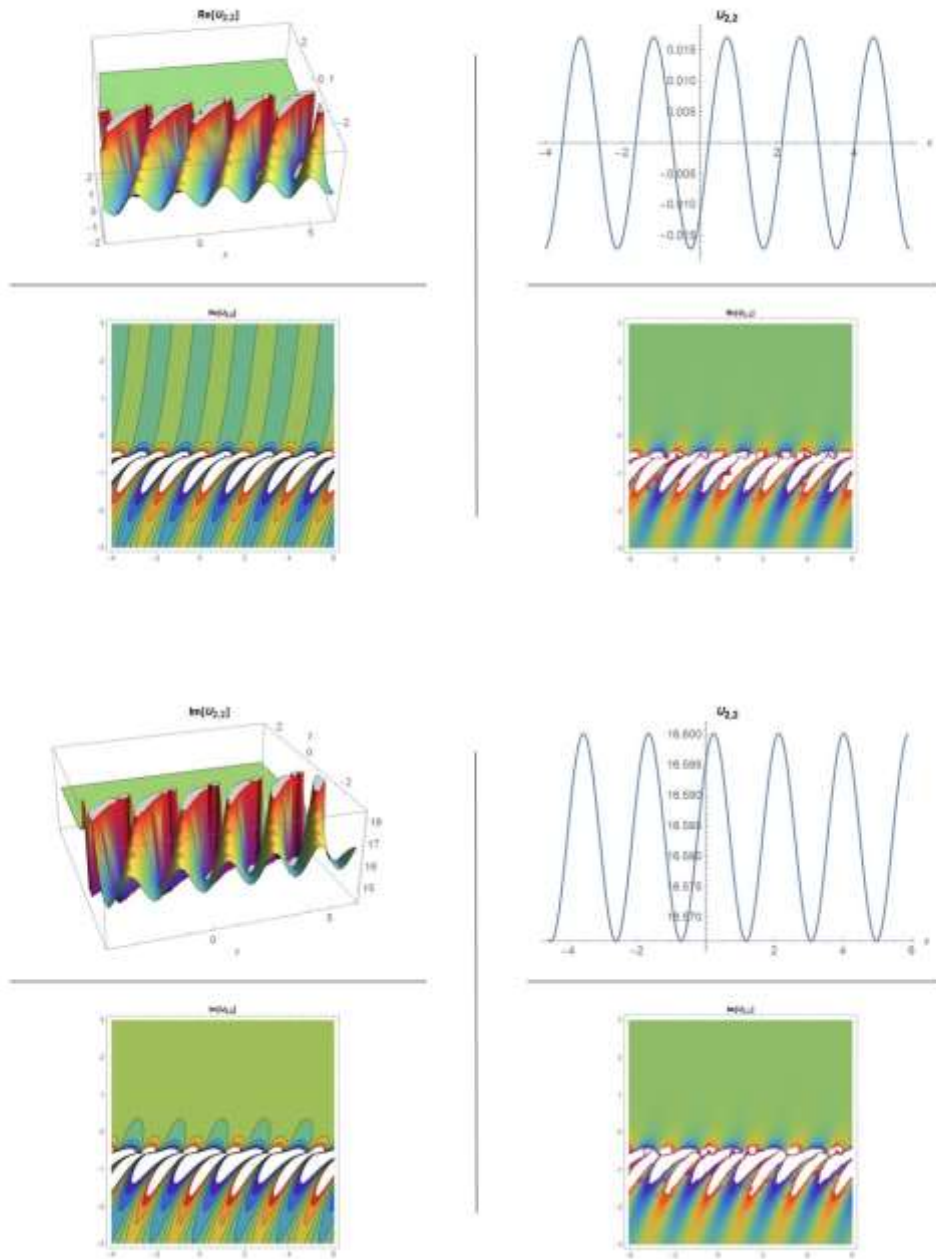


Figure 7. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (32) as a Function of the Parameters $\lambda = 1, \mu = 3, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0.25 + 0.829156i, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.32 + 0.829156i, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 3: $\mu = 0, \lambda \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu > 0$

$$U_{2,3}(x,t) = \frac{r \left(\sqrt{\lambda^2 + \lambda \coth \left[\frac{1}{2} \lambda (E + \xi) \right]} \right)}{q} \tag{33}$$

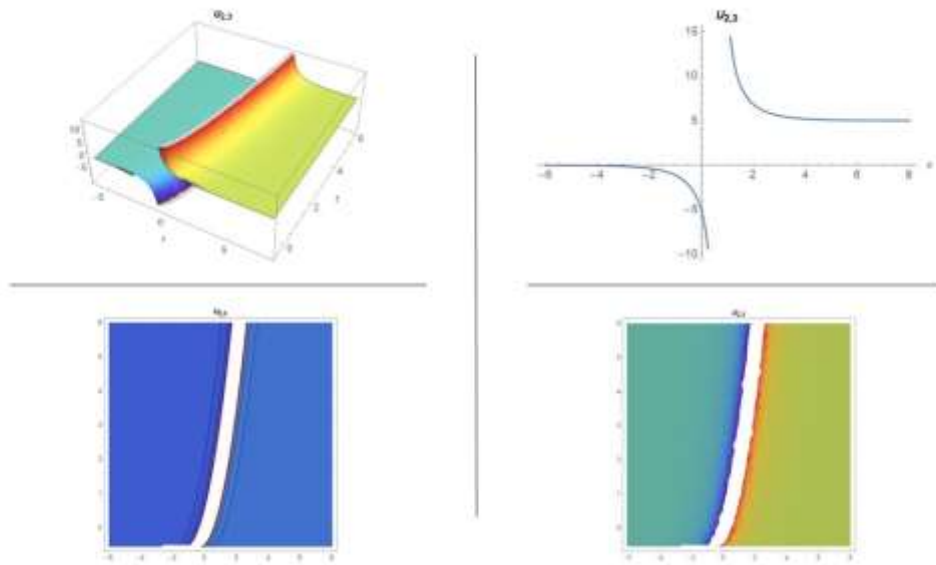


Figure 8. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (33) as a Function of the Parameters $\lambda = 1, \mu = 0, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0.5, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.57, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 4: $\mu \neq 0, \lambda \neq 0$ and $\lambda^2 - 4\mu = 0$,

$$U_{2,4}(x,t) = \frac{r \left(\sqrt{\lambda^2 - 4\mu} + \frac{2\lambda}{2 + \lambda(E + \xi)} \right)}{q} \tag{34}$$

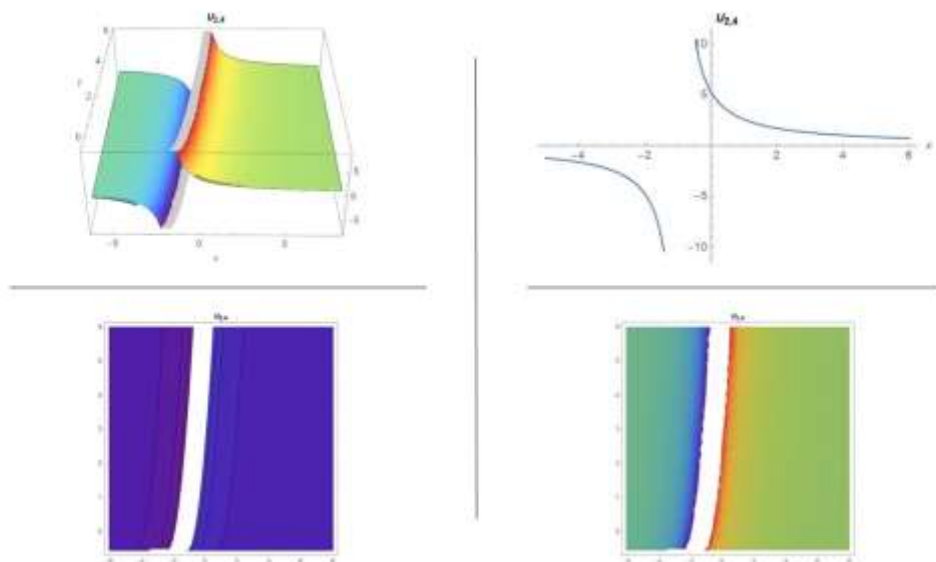


Figure 9. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (34) as a Function of the Parameters $\lambda = 2, \mu = 1, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0.5, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.32, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Family 5: $\mu = 0, \lambda = 0$ and $\lambda^2 - 4\mu = 0$,

$$U_{2,5}(x,t) = \frac{2r}{q(E + \xi)}. \tag{35}$$

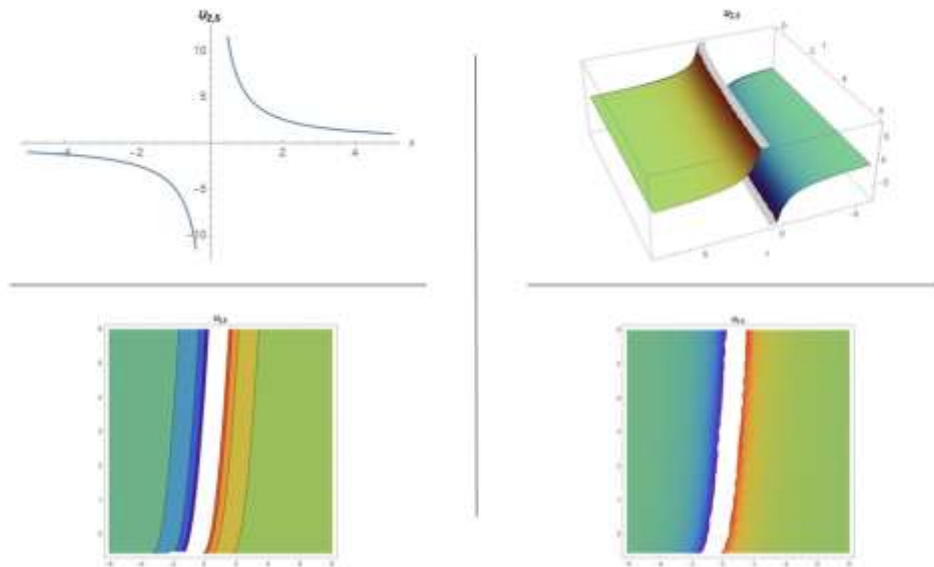


Figure 10. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (35) as a Function of the Parameters $\lambda = 0, \mu = 0, A_2 = 0.5, q = 0.1, r = 0.25, s = 0.32, A_0 = 0, A_1 = 0, B_0 = 0, B_1 = 0.1, c = 0.32, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Analysis of Wave Solutions of Mathematical Model with the Generalized Kudryashov Method (GKM)

In this part of the article, the steps of the GKM, which is the second method in the article for obtaining the traveling wave solutions of the the Time Fractional Clannish Random Walker’s Parabolic Equation will be given. As mentioned earlier, where the two methods used in the paper diverge is in the difference of the solution functions taken as assumptions. According to this method, the solution function is as follows.

$$U(\xi) = \frac{\sum_{j=0}^2 a_j [Q]^j}{\sum_{i=0}^1 b_i [Q]^i} = \frac{a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2}{b_0 + b_1 Q}, \tag{36}$$

where $a_j, b_i, (0 \leq j \leq n, 0 \leq i \leq m)$ are any constants. Then, the derivative terms required in the NODE are get from the solution function accepted as this assumption and written in their place. The equation found is arranged according to the powers of Q .

Case 1.

$$a_0 = 0, a_2 = -a_1, b_0 = -\frac{qa_1}{2r} b_1, c = -r + s. \tag{37}$$

The equations to be written in place of Q with the solution of equation (20) are as follows.

$$Q = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \tanh \left[\frac{\xi}{2} \right] \right), Q = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \coth \left[\frac{\xi}{2} \right] \right). \tag{38}$$

By using the coefficients obtained above and these equations where Q is equal, the solution functions of equation (1) are obtained as follows.

$$U_{3,1}(x,t) = \left(\frac{r \left(-1 + \tanh \left[\frac{1}{2} \xi \right] \right)}{q} \right), \tag{39}$$

where, $\xi = x - \frac{c}{\beta} \left(t + \frac{1}{\Gamma[\beta]} \right)$.

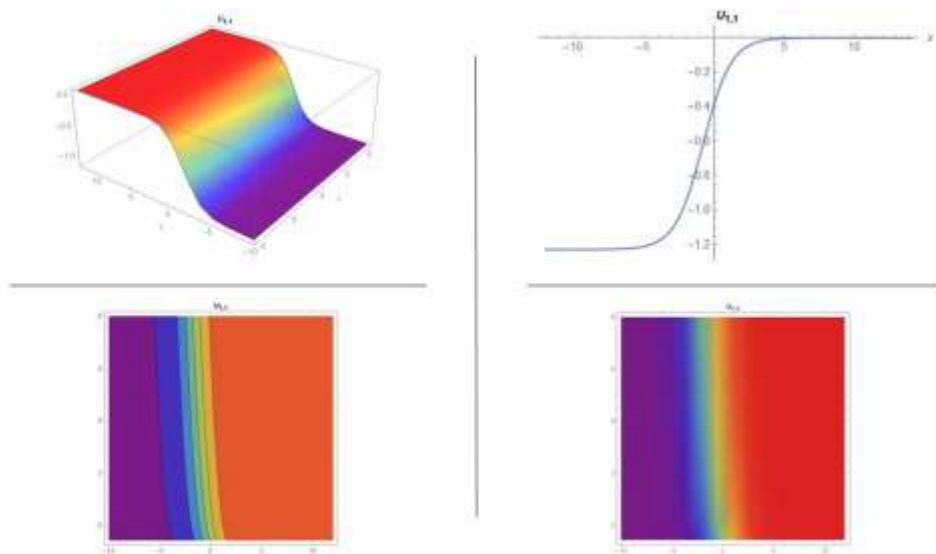


Figure 11. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (39) as a Function of the Parameters $a_1 = 0.24, q = 1.22, r = 0.75, s = 0.44, a_0 = 0, a_2 = -0.24, b_0 = -0.1952, b_1 = 0.1952, c = -0.31, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

$$U_{3,2}(x,t) = \left(\frac{r \left(-1 + \coth \left[\frac{1}{2} \xi \right] \right)}{q} \right). \tag{40}$$

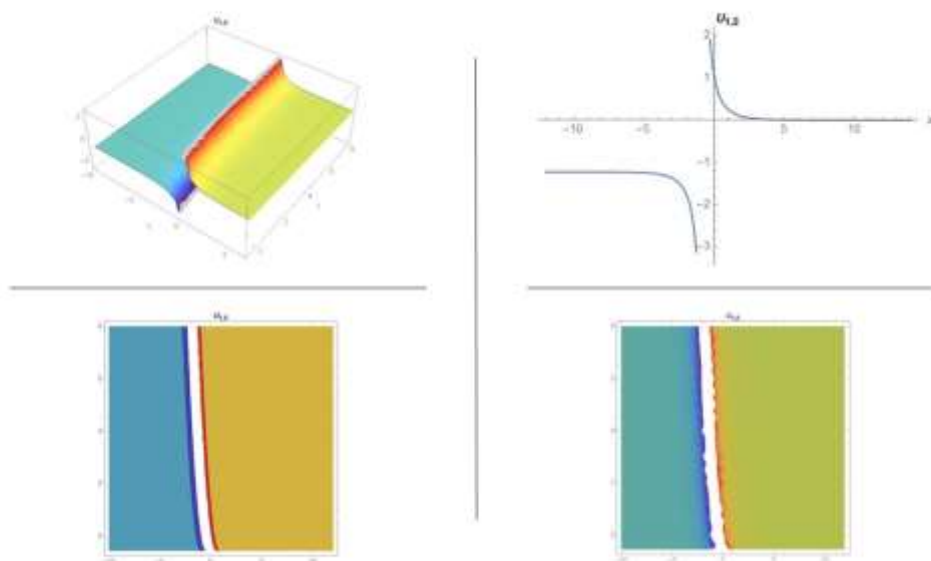


Figure 12. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (40) as a Function of the Parameters $a_1 = 0.24, q = 1.22, r = 0.75, s = 0.44, a_0 = 0, a_2 = -0.24, b_0 = -0.1952, b_1 = 0.1952, c = -0.31, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Case 2.

$$a_0 = \frac{4rb_0}{q}, a_1 = -\frac{8rb_0}{q}, a_2 = \frac{4rb_0}{q}, b_1 = -2b_0, c = 2r + s. \tag{41}$$

$$U_{4,1}(x,t) = \left(\frac{r \left(2 + \coth \left[\frac{1}{2} \xi \right] + \tanh \left[\frac{1}{2} \xi \right] \right)}{q} \right). \tag{42}$$

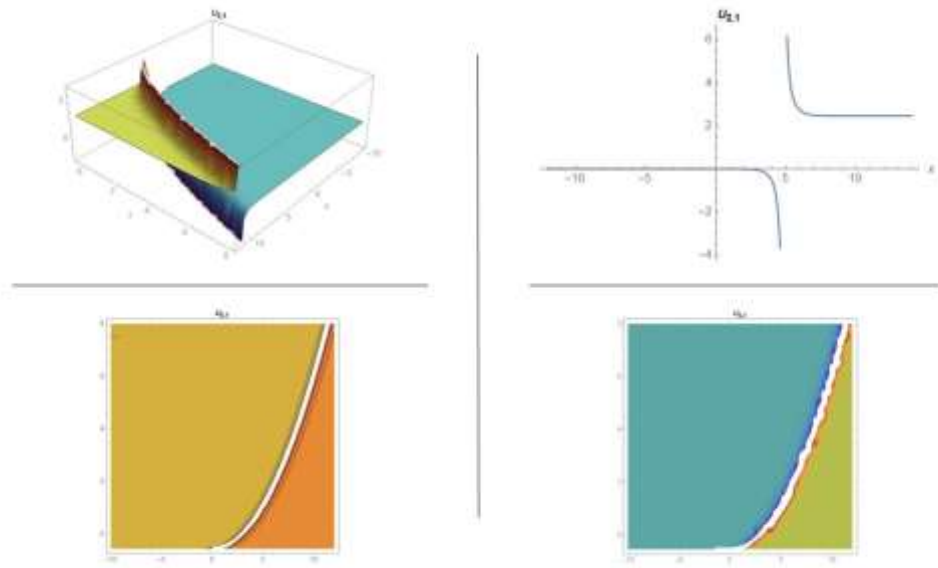


Figure 13. Display of Effective Graphs Showing the Behavior of Equation (42) as a Function of the Parameters $a_1 = -2.70492, q = 1.22, r = 0.75, s = 0.44, a_0 = 1.35246, a_2 = 1.35426, b_0 = 0.55, b_1 = -1.1, c = 1.94, \beta = 0.5, E = 0.75, t = 1$.

Conclusions

This study used two methods, MEFM and GKM, to obtain solutions to the Time Fractional Clannish Random Walker's parabolic equation. It has been found that both methods have superior and inferior aspects when examining the operation of these methods and the resulting solution functions. The similarity between the two methods is that the solutions are partly periodic. The most important advantage of using such functions is that the model continues to behave the same at each interval. The MEFM actually offers more options for varying the solving function. But this method has its own disadvantage. Because of the family 4 and family 5 constraints in particular, the solution functions may not appear in some instances. It is also possible to use this method to find solution functions for a nonlinear mathematical model and to produce diagrams showing how these solution functions behave. In conclusion, it can be said that both of these methods are effective techniques for obtaining the solutions of NPDEs that are of both the integer order and the fractional derivative type.

Authors' Contributions

All authors read and approved the final manuscript.

Ethic

There are no ethical issues with the publication of this article.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no competing interests.

ORCID

Yusuf Gürefe  <https://orcid.org/0000-0002-7210-5683>

Yusuf Pandır  <https://orcid.org/0000-0003-0274-7901>



Tolga Aktürk  <https://orcid.org/0000-0002-8873-0424>

References

- Akbar, M. A., Akinyemi, L., Yao, S. W., Jhangeer, A., Rezazadeh, H., Khater, M. M., & Inc, M. (2021). Soliton solutions to the Boussinesq equation through sine-Gordon method and Kudryashov method. *Results in Physics*, 25, 104228. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104228>
- Baskonus, H. M., & Hasan B. (2015). An effective schema for solving some nonlinear partial differential equation arising in nonlinear physics. *Open Physics*, 13, 280-289. <https://doi.org/10.1515/phys-2015-0035>
- Bulut, H., Akkilic, A. N., & Khalid, B. J. (2021). Soliton solutions of Hirota equation and Hirota-Maccari System by the $(M+ 1/G')$ -expansion method. *Advanced Mathematical Models & Applications*, 6(1). <http://dx.doi.org/10.20852/ntmsci.2019.348>
- Ebadi, G., & Biswas, A. (2011). The G'/G method and 1-soliton solution of the Davey–Stewartson equation. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(5-6), 694-698. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.10.005>
- Ekici, M., Mirzazadeh, M., Sonmezoglu, A., Ullah, M. Z., Zhou, Q., Moshokoa, S. P., & Belic, M. (2017a). Nematicons in liquid crystals by extended trial equation method. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 26(01), 1750005. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1813-0>
- Ekici, M., Mirzazadeh, M., Sonmezoglu, A., Ullah, M. Z., Zhou, Q., Triki, H., & Biswas, A. (2017b). Optical solitons with anti-cubic nonlinearity by extended trial equation method. *Optik*, 136, 368-373. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.141>
- Ergün, A. & Amirov, R. Kh. (2022). Half inverse problem for diffusion operators with jump conditions dependent on the spectral parameter. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 38(3), 577–590. <https://doi.org/10.1002/num.22666>
- Ergun, A. (2020a). The multiplicity of eigenvalues of a vectorial diffusion equations with discontinuous function inside a finite interval. *Turkish Journal of Science*, 5(2), 73-85. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1159115>
- Ergun, A. (2020b). A half inverse problem for the singular diffusion operator with jump condition. *Miskolc Mathematical Notes*, 21(2), 805-821. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.08329>
- Ghanbari, B., & Gómez-Aguilar, J. F. (2019). The generalized exponential rational function method for Radhakrishnan-Kundu-Lakshmanan equation with β -conformable time derivative. *Revista Mexicana de Física*, 65(5), 503-518. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.65.503>
- He, J. H., & Wu, X. H. (2006). Exp-function method for nonlinear wave equations. *Chaos, Solitons & Fractals*, 30(3), 700-708. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2006.03.020>
- Kaplan, M., & Akbulut, A., The analysis of the soliton-type solutions of conformable equations by using generalized Kudryashov method, *Optical and Quantum Electronics*, 53(9), 1-21. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-315162/v1>
- Kudryashov, N. A. (2010). A note on the G'/G -expansion method. *Applied Mathematics and Computation*, 217(4), 1755-1758. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2010.03.071>
- Siddique, I., Mehdi, K. B., Akbar, M. A., Khalifa, H. A. E. W., & Zafar, A. (2022). Diverse exact soliton solutions of the time Fractional Clannish Random Walker's Parabolic Equation via Dual Novel Techniques. *Journal of Function Spaces*, 2022, 1680560. <https://doi.org/10.1155/2022/1680560>
- Yel, G., Baskonus, H. M., & Bulut, H. (2017). Novel archetypes of new coupled Konno–Oono equation by using sine-Gordon expansion method. *Optical and Quantum Electronics*, 49, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1127-z>

- Zayed, E. M., & Gepreel, K. A. (2009). Some applications of the G'/G -expansion method to non-linear partial differential equations. *Applied Mathematics and Computation*, 212(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.02.009>
- Zheng, B. (2014). A new variable-coefficient bernoulli equation-based sub-equation method for solving nonlinear differential equations. *University Politehnica Of Bucharest Scientific Bulletin-Series A-Applied Mathematics And Physics*, 76(2), 63-74. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/fullf78_932361.pdf
- Zhou, Q. (2014). Analytical solutions and modulation instability analysis to the perturbed nonlinear Schrödinger equation. *Journal of Modern Optics*, 61(6), 500-503. <https://doi.org/10.1080/09500340.2014.897391>

Determination of the Effects of Rotational Velocity on Energy Consumption, Cracking Efficiency and Kernel Hazelnut Quality in Centrifugal Hazelnut Cracker

Birkut Güler¹ , Hasan Karaosmanoğlu² 

¹Giresun University, Bulancak Vocational School, Machinery and Metal Technologies, Giresun

²Giresun University, Bulancak Vocational School, Hazelnut Expertise, Giresun

Geliş Tarihi/Received Date: 25.07.2023

Kabul Tarihi/Accepted Date: 09.10.2023

Abstract

In this study, the effects of different hazelnut varieties and impeller velocities on energy consumption, hazelnut cracking efficiency and kernel quality in the centrifugal hazelnut cracking method were examined. Giresun Quality Tombul, Levant Quality Çakıldak and Kara hazelnuts, which are important Turkish hazelnut varieties, were selected as the study material. A centrifugal type machine, which does not require grading, cracks with the help of a rotating impeller, and has a crushing capacity of 100 kg per hour, was used as the experimental device. The study was carried out at 4 different fan rotation speeds: 350, 750, 1100 and 1450 rpm. According to the study results, although it is resulted that each hazelnut varieties different behaviors at different impeller velocities, it can be said that the optimum benefit is achieved at 1100 rpm. The results of the article emphasize that equipment adjustments and the development of hazelnut variety-specific processing strategies are important in optimizing cracking and parted rates in the hazelnut processing process. This study can serve as a basis for studies aimed at contributing to efficiency and quality improvements in the hazelnut processing industry.

Keywords: hazelnut cracking, energy efficiency, process efficiency, kernel quality

Savurmalı Fındık Kıрма Makinesinde Dönme Hızının Enerji Tüketimi, Kıрма Verimi ve İç Fındık Kalitesi Üzerine Etkilerinin Belirlenmesi

Öz

Bu çalışmada, savurmalı fındık kırma yönteminde farklı fındık çeşitlerinin ve işleme hızlarının enerji tüketimi, fındık kırma verimi ve iç kalite üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma materyali olarak önemli Türk fındık çeşitleri olan Giresun Kalite Tombul, Levant Kalite Çakıldak ve Kara fındık seçilmiştir. Deney düzeneği olarak boylama gerektirmeyen, dönen fan yardımıyla kırma yapan, saatlik 100 kg kırma kapasitesine sahip savurmalı tip makine kullanılmıştır. Çalışma 350, 750, 1100 ve 1450 rpm olmak üzere 4 farklı fan dönüş hızında yürütülmüştür. Çalışma sonuçlarına göre farklı fan dönüş hızlarında her fındık çeşidinin farklı davranışlar sergilediği görülse de optimum faydanın 1100 rpm'de sağlandığı söylenebilir. Makalenin sonuçları, ekipman ayarlamalarının ve fındık çeşitlerine özgü işleme stratejilerinin geliştirilmesinin, fındık işleme sürecinde çatlama ve parçalanma oranlarının optimize edilmesinde önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bu çalışma, fındık işleme sanayinde verimlilik ve kalite iyileştirmelerine katkı sağlamak amacıyla yapılan çalışmalara temel teşkil edebilecek özelliktedir.

Anahtar Kelimeler: fındık kırma, enerji verimliliği, proses verimliliği, iç fındık kalitesi

Introduction

Hazelnut (*Corylus avellana* L.) is one of the most popular nuts that can be consumed both natural and roasted, with an annual production of approximately 1.150.000 tons. Turkey, which produces 62% of global hazelnut product, is the most important producer, followed by Italy (13%), USA (6%), Azerbaijan (5%), Chile and Georgia (3%). Hazelnuts are also grown in countries such as Spain, Iran, Poland and France (FAO, 2020). The 18 types of hazelnuts grown in Turkey are divided into two according to their quality: Giresun Quality (prime quality) and Levant Quality (second quality). Prime quality consists of Tömbül hazelnuts grown in the Giresun region, while other hazelnuts are classified as Levant Quality (Alasalvar et al., 2009).

Hazelnut, with its unique taste and crisp texture, is one of the most important nuts, which is used extensively in the confectionery and bakery industries, especially in chocolate, and can also be consumed as natural and roasted. In addition to its organoleptic properties, it is also important that hazelnut has a beneficial nutritional composition for human health (Ghirardello et al., 2016; Moschetti et al., 2012). It has been reported in many studies that regular hazelnut consumption reduces the risk of cardiovascular, diabetes, obesity, some cancer types and inflammatory diseases (Amaral et al. 2006; Pelvan et al. 2018; Pycia et al. 2019). In order to reduce the risk of coronary heart disease, the European Food Safety Authority recommends consuming 32.5 g of nuts containing hazelnuts daily (European Food Safety Authority, 2011).

The beneficial effects of hazelnut on human health are closely related to its special fatty acid profile, high content of tocopherol and phytosterol, and being rich in biologically active phytochemicals (Pelvan et al., 2018). Nutrient composition of hazelnut is also highly sensitive to hydrolytic or oxidative enzymes and degradation of oil by oxidation (Wang et al., 2018). It is very critical to crack the hazelnuts without damaging the inside of the fruit in order to preserve the nutritional components of the hazelnut during its shelf life and to reduce the development of undesirable flavors by fat oxidation.

In order for hazelnuts, which are a hard-shelled fruit, to be consumed as human food, the outer brown hard shell must be broken and separated from the fruit. Therefore, the hazelnut cracking process is a vital step in the hazelnut industry, which is the first and must-be implemented process and directly affects the quality of the hazelnut kernels (Delprete & Sesana, 2014). Hazelnut is a fruit that is rich in unsaturated fatty acids, especially oleic and linoleic acids. Although this makes hazelnuts beneficial for health, it also makes them very sensitive to hydrolytic or oxidative enzymes and oxidative oil degradation (Sun et al., 2022). Due to the special fatty acid composition of hazelnuts, it is of great importance to minimize the defect called bruising by damaging the fruit tissue during the cracking process (Akar, 2016). As a result of damage to the fruit tissue as a consequence of damage, the oil comes out of the tissue and enters into an intense reaction with air oxygen. Because of the rapid oxidation of unsaturated fatty acids, an increase in the amount of free fatty acids occurs and then a rancid taste called rancidity occurs. On the other hand, enzymatic discoloration occurs with the activation of polyphenol oxidase enzymes, especially as a result of physical damage to the brown membrane surrounding the fruit (Karaosmanoğlu, 2023). Therefore, in order to preserve the sensory quality during the shelf life, it is essential to develop cracking units that will not damage the fruit during the hazelnut cracking process.

Of course, there is a close relationship between hazelnut cracking and energy consumption. Hazelnut cracking is generally done by using electrical energy. Therefore, energy is needed to operate the machines used for the process. Electric motors are used to ensure the operation of hazelnut crackers. In addition, the energy consumption during the hazelnut cracking process may vary depending on the capacity of the machines used, the processing volume and the hardness of the shells outside the hazelnuts. Cracking hazelnuts with thicker shells may require more energy. According to Dursun (2023), there is a linear relationship between hazelnut shell thickness and cracking force. Cracking force varies depending on the shell thickness and can reach up to 200 N. The energy consumption of

the machines used for the hazelnut cracking process depends also on factors such as the processing efficiency, the level of technology and the characteristics of the hazelnuts. More efficient machines and energy saving methods can both reduce energy costs and reduce environmental impact (Dursun, 2023).

In Turkey, which is the most important producer country, hazelnut cracking is traditionally carried out in cracking facilities with stone mills. In this system, hazelnuts are first calibrated according to their dimensions, and then the distance between the crackers in the stone mill is adjusted and the cracking process takes place. However, in this system, high and wide structures are needed especially for classification, which results in very high installation costs. Cracking systems, which have been developed on a smaller scale in recent years, still need calibration, although they take up less space. This situation both reduces the cracking capacity and increases the amount of energy consumed. Due to all these negativities, the development of hazelnut cracking machines that do not need fruit calibration, have high cracking efficiency and low energy consumption, and do not damage the inside of the fruit during cracking is of great importance, especially for the expansion of small-scale processing facilities. In this study, the effects of the cracking process on the energy, cracking efficiency and hazelnut kernel quality of Giresun Quality Tombul, Levant Quality Çakıldak and Kara varieties using a rotational system hazelnut cracking machine were investigated.

Materials and Methods

Materials

In the study, Tombul (Giresun Quality), Çakıldak and Kara (Levant Quality) hazelnut varieties, which are commercially important Turkish hazelnut varieties, were used. Tombul, Kara and Çakıldak hazelnut samples are respectively Akköy (Giresun- 40°51'37.73" N, 38°18'59.61" E), Çalıdağ (Giresun- 41°06'02.25" N, 39°15'01.00" E) and from the orchards produced by conventional farming methods in Yeşiltepe (Giresun-40°75'69.53" N, 38°53'16.74" E) regions. The harvested hazelnuts were separated from their green husks with a thresher and then left to dry in a concrete blend on a jute awning (5x5 m) under the sun for 4 days (36 hours) between 09:00 in the morning and 18:00 in the evening (average temperature 23.6 °C). It was also mixed 5 times every day during the drying period. After 18:00 in the evening, each awning was gathered in the middle and covered with a nylon cover to prevent moisture transfer. At the end of the 4th day, the drying process was terminated when the moisture content of the hazelnuts dropped below 6%. Dried hazelnuts were kept in jute sacks under ambient conditions until the day of analysis. Before the analysis, nut sizes, weights and shell thicknesses of the samples were measured according to the methods mentioned in Karaosmanoğlu (2022) (Table 1).

Each experiment was conducted with 100 hazelnuts in 3 repetitions. For every 100 hazelnuts, whole hazelnut, uncracked, damaged, parted and partially cracked were separated and reported as a percentage. When determining the amount of damaged hazelnuts, visible damage was taken into account.

Table 1. Nut and Kernel Dimensions, Weights and Shell Thicknesses of Hazelnut Samples

Cultivar	Nut length (mm)	Nut width (mm)	Nut depth (mm)	Kernel length (mm)	Kernel width (mm)	Kernel depth (mm)	Nut weight (g)	Kernel weight (g)	Shell thickness (mm)
Tombul	18.56±1.22	15.02±1.24	16.58±0.99	14.32±1.09	11.79±1.11	12.73±1.50	1.70±0.23	1.03±0.09	0.95±0.10
Çakıldak	19.06±1.02	15.36±1.11	16.46±1.19	14.01±1.01	11.12±1.01	12.37±1.25	1.57±0.22	0.87±0.10	0.91±0.09
Kara	18.88±0.89	14.38±0.76	16.04±0.52	14.77±0.77	9.81±0.21	10.62±0.71	1.50±0.12	0.77±0.08	0.99±0.08

All values are presented as mean ± standard deviation (n= 3).

Cracking Setup

In the study, a whirlwind type hazelnut cracking machine was used. The hazelnuts are poured from the upper chamber and broken by hitting the blades of the impeller connected to the end of the engine. The schematic picture of the machine is shown in Figure 1 below. There is a shaft coupled to the electric motor and a impeller at the end of the machine. Nuts poured from the feeding chamber get broken by hitting the rotating impeller blades without undergoing any sorting process. There is a 120 Watt motor on the machine. In order to find the amperage drawn by the machine during cracking, an ampere meter is connected in series on the power cable of the machine.

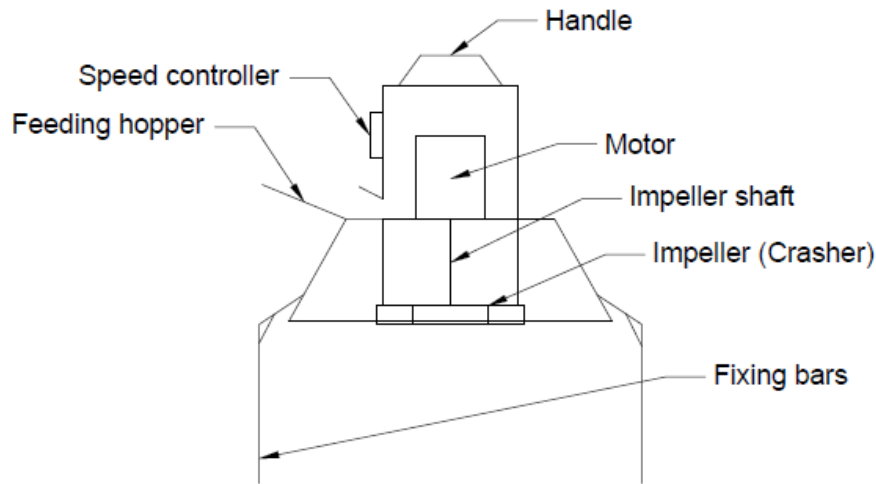


Figure 1. Representation of Hazelnut Cracking Machine

The velocity drive and the cracking impeller in the hazelnut cracking machine were operated at 4 different velocities (350, 750, 110,1450 rpm). Nuts were poured from the feeding chamber on the side of the machine in each revolution and taken into a box. In the box, the hazelnuts were handled one by one and they were categorized under 5 different groups as whole hazelnut, uncracked, damaged, parted, partially cracked.

The amount of current drawn at each of four different velocities was measured with an ampere meter connected in series on the line and the current value was read directly from the ampere meter. The amount of electrical energy consumed was calculated from the Equation 1.

$$P=V.I \quad (1)$$

Where P (Watt) is the power, V (Volt) is the voltage, and I (Ampere) is the current

While normally the current drawn by the motor is expected to increase with increasing velocity, the opposite happened in this study. There is theory between RPM and armature current explained by the principle of electromagnetic induction. Accordingly, as the machine velocity increases, the magnetic field change rate also increases. This leads to a decrease in armature current. A model can be created by considering the forces acting on the hazelnut and the laws of motion.

There are three basic forces acting on the nuts in the rotating impeller. These forces are (1) weight force (mg), (2) centrifugal force ($m\omega^2 r$) and (3) friction force ($\mu m\omega^2 r$).

where m is the mass, g is the gravitational acceleration, r is the radius of rotation of the impeller, and ω is the angular velocity.

If the impact velocity of the nut is greater than the linear velocity of the wheel V , it will accelerate towards the falling direction of the nut and suffer more damage. This is because the centrifugal force acting on the nut increases its effect in the direction of falling.

If the falling velocity of the nut is less than the linear velocity of the wheel V , the centrifugal force will still be effective, but less in the falling direction. In this case, it is expected that the nut will gain less velocity and suffer less damage while falling. Net force acting on the hazelnut can be defined as:

Total force = Centrifugal force - Weight force

$$F_{\text{net}} = mr\omega^2 - mg \quad (2)$$

Impact force: $F_{\text{net}} = mV'$ where V' is the impact velocity of the nut. If V' is drawn from here;

$$V' = (mr\omega^2 - mg) / m \quad (3)$$

V' : (impact velocity, m/s), m : mass (kg), r : diameter (m), ω : angular velocity (rad/s)

Statistical Analysis

Analyses were conducted using JMP (pro-16) statistical software. One-way ANOVA followed by Tukey's post-hoc test was used to compare the means of the study sets. A p-value less than 0.05 was considered to be statistically significant. Results were expressed as means \pm and standart deviation ($n=3$) for each determination.

Results and Discussions

As a result of the experiments, it is seen that the nut cracking rate increases up to a certain velocity of the impeller and then the crack rate does not increase. This situation can be explained by the effects of the rotating impeller and the behavior of the hazelnut. In the rotating impeller, the forces acting on the hazelnut include weight force (mg) and centrifugal force ($mr\omega^2$). The spilled hazelnut accelerates as it is subjected to these forces, and a friction force also interacts. Up to a certain velocity value, as the velocity of the hazelnut increases, the centrifugal force also increases and the effect of the hazelnut in the direction of impact becomes stronger. In this case, the nut crashes faster and is damaged more. Frictional force can also increase with increasing velocity, but generally has a smaller effect than centrifugal force. However, even if the velocity of the hazelnut increases after a certain point, the increase in centrifugal force is limited. At this point, the centrifugal force remains constant or increases very little. Friction force continues to increase rapidly. At this point, the friction force dominates the centrifugal force and limits the impact velocity of the hazelnut. Thus, the hazelnut is less damaged after a certain velocity because the increase in impact velocity slows down.

Energy Consumption

In the study, the data was obtained by operating the machine at 4 different velocities (350, 750, 1100, and 1450 rpm). The average amperage values drawn at no load and at load in each revolution were read. During both idle and load operation, the amount of amperage drawn by the machine increased with the increasing revolution velocity, and the increase in the current value decreased after a certain velocity value. In the idle state, 112, 104, 89 and 88 W energy consumption was achieved for 350, 750, 110 and 1400 rpm, respectively, while this value varied between 135 and 120 W during hazelnut cracking. Since the working principle of the machine is based on the principle that the nuts hit the impeller blades, the current drawn by the machine at load was higher than the current drawn at no load. Figure 2 shows the idle and load power consumptions.

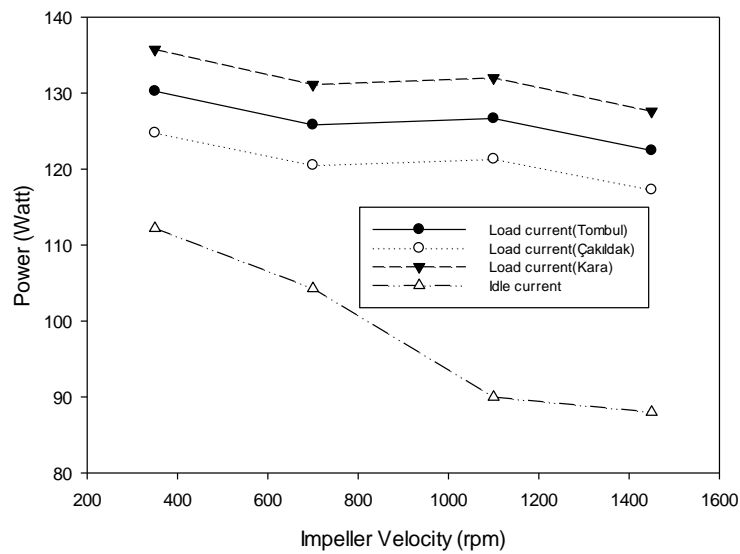


Figure 2. Power Consumption of the Machine

The relationship between impeller velocity and armature current can be explained by the principle of electromagnetic induction. Basically, as the number of revolutions of the machine (especially the rotor) increases, the rate of change of the magnetic field within the armature also increases. This means that the induced electromotive force (EMF) in the armature also increases, leading to a decrease in the armature current. Conversely, as the RPM decreases, the induced EMF decreases, resulting in an increase in armature current. This is known as the "EMF equation" in electrical machines.

Variation of the Number of Whole Hazelnuts with Rotational Velocity

Figure 3, given below, shows the number of whole hazelnut kernels formed in hazelnut cultivars in the cracking process at different velocities. Based on these data, we can observe that each hazelnut cultivar has different nut yields at different times. According to the results, the highest efficiency in Tombul was detected at 350 rpm, while the efficiency increased at a statistically significant level at 750 rpm ($P < 0.001$). There was no significant difference between 1100 and 1450 rpm ($P > 0.05$). While the highest efficiency in Çakıldak was observed at 750 rpm, the lowest efficiency was detected at 350 rpm. The difference between 1100 and 1450 rpm was not found to be statistically significant. As expected, the highest yield in the Kara was detected at 1450 rpm. However, interestingly, while there was no difference between 350 and 750 rpm, the efficiency decreased at 1100 rpm. It is well known that the chemical and physical properties of hazelnuts vary significantly depending on the variety (Amaral et al. 2006). These differences may be due to differences in physical properties such as hazelnut shell thickness and flexibility. Based on these data, we can observe the differences in the nut yield of different hazelnut cultivars.

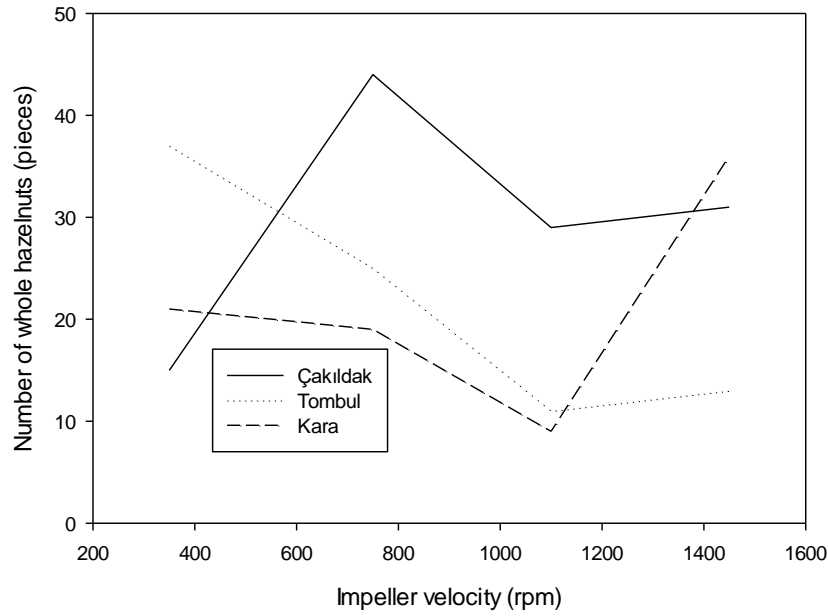


Figure 3. Variation of the Number of Whole Nuts with Impeller Velocity

Variation of the Number of Uncracked with Impeller Velocity

Figure 4 shows the variation of the number of uncracked hazelnuts with the change of impeller velocity. According to these data, we can observe that each hazelnut cultivar has the number of uncracked hazelnuts at different impeller velocities. According to the statistical analysis results, as the rotational velocity increased in Tombul, the proportion of uncracked hazelnuts decreased ($P < 0.001$) and all samples cracked at 1450 revolutions. In addition, the uncracked rate in Tombul, which was 13% at 350 rpm, dropped dramatically to 4% at 750 rpm. There is only a 2% difference between 750 and 1100 rpm. While the highest rate of uncracked hazelnuts in the Çakıldak variety was detected at 350 rpm, it was observed that the other velocities were statistically in the same group ($P < 0.001$). In addition, the rate of 35% in Çakıldak 350 rpm dropped below 2% in other velocities. In Kara, the highest unbroken rate was found at 350 cycles ($P < 0.001$), while no difference was observed between 1100 and 1450 rpm. However, in Kara, the dramatic decrease was recorded at 1100 rpm, probably due to the high crustal thickness. The ratio, which was 46% at 350 rpm, decreased to 27% at 750 rpm and 3.67% at 1100 rpm and remained unchanged thereafter.

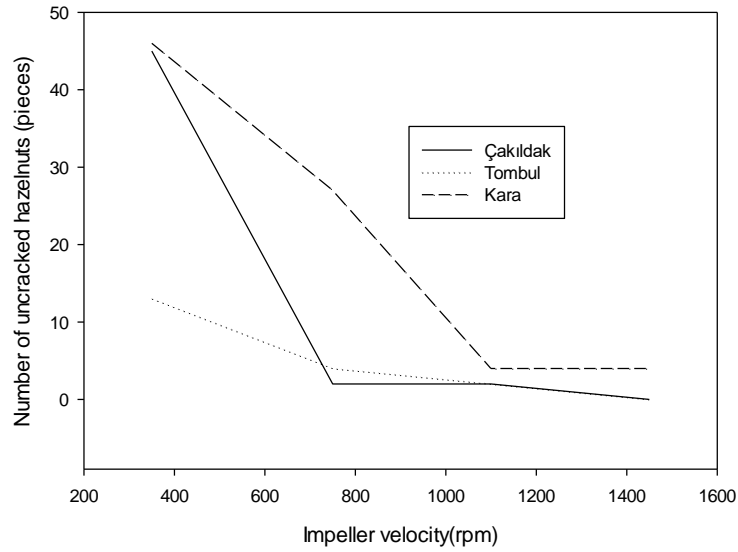


Figure 4. Variation of the Number of Uncracked Hazelnuts with The Rotation Velocity

Variation of the Damaged Nut Number with the Impeller Rotation Velocity

During the cracking process, some nut kernels may be damaged by the effect of rapid impact. As a result of this problem, the oil goes out of the tissue and the oxidation rate increases. Depending on the oxidation, in addition to the rancid taste formation, discoloration may also occur (Akar, 2016). For this reason, it is desired that the damaged nut ratio is low in the cracking process. Figure 5 shows the data on the number of damaged nuts. According to these data, we can observe that each hazelnut cultivar results in varying number of damaged nuts at different impeller velocities. For example, while the highest damaged rate in Tombul and Kara was reached at 1450 rpm, it was at 1100 rpm in Çakıldak. In addition, it is noticed that the number of hazelnuts that are damaged generally increases with the increase in the impeller velocity. According to the results of the statistical analysis, it was observed that as the rpm increased in the Tombul variety, the rate of damaged also increased ($P < 0.001$). The lowest number of damaged was detected at 350 cycles (12%) and the highest at 1450 cycles (25%). While similar behavior was observed for Kara, at 350 and 750 rpm were statistically in the same group. Similarly, in Çakıldak, the lowest damaged was resulted at 350 rpm, while interestingly, a higher damaged rate was determined at 1100 rpm compared to 1450. This may be due to the flexibility in the skin of the Çakıldak variety. Based on these data, it was observed that the rate of damaged generally increased as the rpm increased ($p < 0.001$).

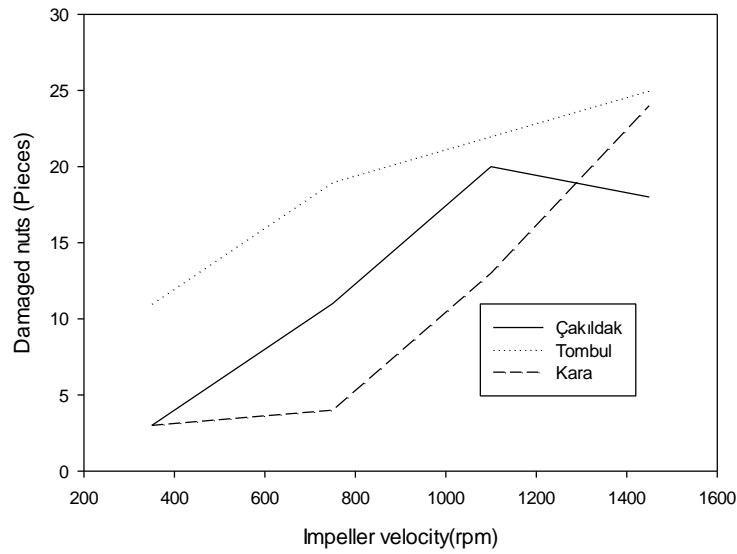


Figure 5. Variation of the Number of Damaged Nut With the Impeller rotation Velocity

Variation of the Number of Parted Hazelnuts with Impeller Rotation Velocity

Figure 6 gives the variation of the number of parted hazelnuts. We can observe that each hazelnut cultivar has the number of hazelnut kernels that are parted at different impeller velocities. For example, in the Tombul variety, the highest parted rate was seen at 1100 rpm, while the parted rate at 1450 rpm was significantly less ($P < 0.001$). The lowest parted rate was observed at 350 rpm, as expected. While there was no statistical difference between 1450 and 1100 rpm for Çakıldak, the lowest parted rate was observed at 350 rpm due to the decrease in revolution. Kara hazelnuts showed a very variable effect. While there was a significant difference between all rpm ($P < 0.001$), the lowest parted rate was resulted at 350 rpm and the highest rate was resulted at 1100 rpm. In addition, it is observed that the number of parted hazelnut kernels increases with the increase in the impeller velocity in general. Based on these data, it is seen that there are differences in the number of cracked hazelnut kernels and the impeller velocity is effective on the number of cracked hazelnut kernels.

It is remarkable that the number of parted hazelnuts does not increase or even decreases although the velocity increases between the 3rd and 4th impellers for different hazelnut cultivars. This indicates that different hazelnut cultivars respond differently to mechanical effects and that the cracking resistance is not directly related to the increase in velocity. Such a situation indicates that the internal structure of hazelnut cultivars may be different and other factors besides impeller velocity may affect the cracking rate. The reasons for the differences between hazelnut cultivars may be factors such as genetic characteristics, shell thickness, compactness or elasticity in the internal structure. This observation indicates that there are factors that need to be optimized in the hazelnut processing and cracking process. Perhaps the adjustment of the equipment used in the cracking process or the development of special processing methods for hazelnut cultivars may affect the increase or decrease in the cracking rate (Delprete & Sesana, 2014; Güner et al., 2003).

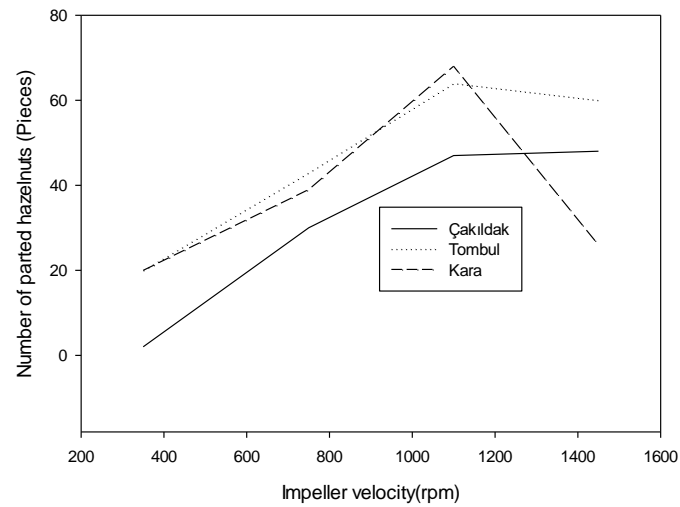


Figure 6. Variation of the Number of Parted Hazelnuts with Impeller Velocity

Variation of the Number of Partially Cracked Hazelnuts with Impeller Velocity

Figure 7 shows the change in the number of partially cracked hazelnuts. According to these data, we can observe that each hazelnut cultivars has the number of partially cracked hazelnuts at different impellervelocities. According to the statistical analysis results, the highest partial cracked rate in Tombul resulted in the lowest rpm, while as the rpm increased, the amount of partial cracked decreased, as expected. However, there was no significant difference between 1100 and 1450 rpm. While the Çakıldak exhibited a similar behavior to Tombul, it showed higher partial crack at low speeds. Interestingly, in Kara hazelnuts, the lowest partial crack rates were resulted at the lowest and highest rpm ($P < 0.001$). While the highest partial crack was detected at 750 rpm, a decrease in partial crack was observed at 1100 rpm ($P < 0.001$). Based on these data, it is seen that there are differences in the number of partially cracked hazelnuts the impeller velocity is effective on the number of partially cracked hazelnuts ($P < 0.001$). Especially in the hazelnut processing process, taking these differences into account, making appropriate adjustments may be important to minimize the number of partially cracked hazelnuts.

According to these data, we can observe that the number of partially cracked hazelnuts in Kara hazelnuts at the 4th impellervelocity increased compared to the 3rd impellervelocity. A similar trend is observed in Çakıldak and Tombul hazelnuts, which are other hazelnut cultivars. This may suggest that the 4th impellervelocity increases the cracking resistance of hazelnut cultivars or that there are less cracked hazelnuts at the 3rd impellervelocity. In conclusion, in the light of these data, we can draw attention to the increase in the number of partially cracked hazelnuts at the 4th impellervelocity compared to the 3rd impellervelocity.

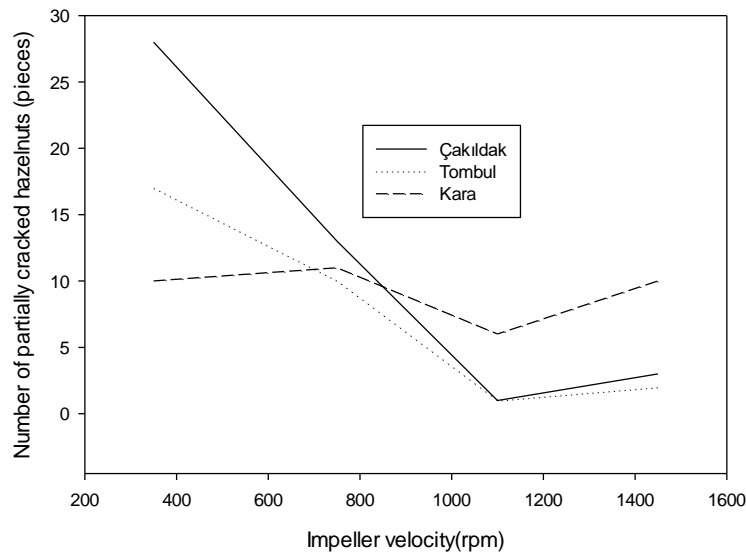


Figure 7. Variation of the Number of Partially Cracked Hazelnuts with Impeller Velocity

Conclusion

Depending on the different hazelnut cultivars (Tombul, Çakıldak, Kara) and their impeller velocity, the cracking and splitting conditions of hazelnuts differ. Differences are observed in the number of cracked hazelnuts and the number of cracked hazelnut kernels among hazelnut cultivars. Each hazelnut cultivar exhibits different cracking and splitting tendencies depending on the impeller velocity. According to the results of the study, it was resulted that impeller velocity affected the energy consumption, whole hazelnuts, uncracked, damaged nuts, parted hazelnuts, partially cracked hazelnuts levels of hazelnut varieties. Energy consumption decreases with increasing impeller velocity. However, no significant difference was observed between 1100 and 1450 rpm. While the amount of whole hazelnut kernels increased up to 750 rpm for Çakıldak, it decreased thereafter. In Tombul and Kara, it decreased up to 1100 rpm and increased at 1450 rpm. The number of uncracked hazelnuts decreased with increasing impeller velocity in all varieties. However, the change after 1100 rpm was not significant. The number of hazelnuts tended to increase with increasing impeller velocity in all three hazelnut varieties. In Çakıldak, it fell after 1100 rpm. While the number of cracked hazelnuts increased up to 1100 rpm for all varieties, it generally decreased thereafter. The number of partially cracked hazelnuts decreased with increasing impeller velocity, but generally increased after 1100 rpm. As a result, when hazelnut kernel quality and other parameters are considered together, it has been seen that the cracking process at 1100 rpm has optimum efficiency.

Author Contribution

Birkut Güler, prepared the experimental environment and followed the experimental process. Performed data collection and statistical analysis. *Hasan Karaosmanoğlu*, performed the data collection and statistical analysis. The authors co-wrote, read, and approved the manuscript.

Ethic

There are no ethical issues regarding the publication of this article.

Conflict of Interest

The authors state that they have no conflict of interest.

ORCID

Birkut Güler  <https://orcid.org/0000-0001-5541-5279>




Hasan Karaosmanoğlu  <https://orcid.org/0000-0002-4652-9861>

References

- Akar, A. (2016). Tombul, Palaz ve Kalinkara fındık çeşitlerinde elle ve patozla ayıklanmış örneklerde depolama süresince meydana gelen kalite değişimleri [Master's thesis]. Ordu University.
- Alasalvar, C., Amaral, J. S., Satır, G., & Shahidi, F. (2009). Lipid characteristics and essential minerals of native Turkish hazelnut varieties (*Corylus avellana* L.). *Food Chemistry*, 113, 919–925. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.08.019>
- Amaral, J. S., Casal, S., Citova, I., Santos, A., Seabra, R. M., & Oliviera, B. P. P. (2006). Characterization of several hazelnut (*Corylus avellana* L.) cultivars based in chemical, fatty acid and sterol composition. *European Food Research and Technology*, 222, 274–280. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0068-0>
- Delprete, C., & Sesana, R. (2014). Mechanical characterization of kernel and shell of hazelnuts: Proposal of an experimental procedure. *Journal of Food Engineering*, 124, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.027>
- Dursun, İ. (2023). *Kabuk kırma makinaları*. İKSAD Publishing House.
- European Food Safety Authority, (2011). Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to nuts and essential fatty acids (omega-3/omega-6) in nut oil (ID 741, 1129, 1130, 1305, 1407) pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 9(4), 2032. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2032>
- FAO (2020). Food and agriculture organization of the United Nations. FAO Statistics Division. Retrieved March 15, 2023 from https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity
- Ghirardello D., Bertolini M., Belviso S., Bello B. D., Giordano M., Rolle L., Gerbi V., Antonucci M., Spigolon N., & Zeppa G. (2016). Phenolic composition, antioxidant capacity and hexanal content of hazelnuts (*Corylus avellana* L.) as affected by different storage conditions. *Postharvest Biol. Technol.*, 112, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.09.039>
- Güner, M., Dursun E., & Dursun, İ. G. (2003). Mechanical behaviour of hazelnut under compression loading. *Biosystems Engineering*, 85(4), 485-491. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00089-8)
- Karaosmanoğlu, H. (2022). Geç hasadın Tombul fındığın biyometrik ve renk özellikleri ile aflatoksin düzeyine etkisi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 26(4), 549-559. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1138327>
- Karaosmanoğlu, H. (2023). Farklı ambalaj materyallerinin depolanan fındıkların geometrik ve renk özellikleriyle aflatoksin oluşumuna etkisi. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 38(2), 331-352. <https://doi.org/10.7161/omuanajas.1115743>
- Moscetti, R., Frangipane, M. T., Monarca, D., Cecchini, M., & Massantini, R. (2012). Maintaining the quality of unripe, fresh hazelnuts through storage under modified atmospheres. *Postharvest Biology and Technology*, 65, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.10.009>
- Pelvan, E., Olgu, E. Ö., Karadağ A., & Alasalvar, C. (2018). Phenolic profiles and antioxidant activity of Turkish Tombul hazelnut samples (natural, roasted, and roasted hazelnut skin). *Food Chemistry*, 244, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.011>

- Pycia, K., Kapusta, I., & Jaworska, G. (2019). Impact of the degree of maturity of walnuts (*Juglans regia* L.) and their variety on the antioxidant potential and the content of tocopherols and polyphenols. *Molecules*, 24(16), 2936. <https://doi.org/10.3390/molecules24162936>
- Sun, J., Hu, P., Lyu, C., Tian, J., Meng, X., Tan, H., Dong, W. (2022). Comprehensive lipidomics analysis of the lipids in hazelnut oil during storage. *Food Chemistry*. 378, 132050. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132050>
- Wang, W., Jung, J., McGorin, R. J., Traber, M. G., Leonard, S. W., Cherian, G., & Zhao, Y. (2018). Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.). *LWT-Food Science and Technology*, 90, 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.002>

Endüstriyel Atık Suların Zirai Atıktan Türetilmiş Grafen Benzeri Malzemeler Kullanılarak Ardışık Elektrokimyasal, Kimyasal ve Fotokimyasal Yöntemlerle Arıtılması

Burcu Palas¹ , Gülin Ersöz¹ , Süheyda Atalay¹ 

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü

Geliş Tarihi / Received Date: 09.08.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 20.11.2023

Öz

Yerinde ön-işlem görmüş gerçek tekstil atık suyu, elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyon işlemlerinin ardışık uygulamalarından oluşan bir hibrid proses ile arıtılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum elektrot kullanılarak en uygun reaksiyon koşulları altında %19,5 toplam organik karbon (TOK) giderimi sağlanmıştır. Tekstil atık suyu elektrokoagülasyondan sonra adsorpsiyona tabi tutulmuştur. Adsorpsiyon işleminde mısır koçanından hazırlanan grafen oksit (MK-GO) adsorbentler kullanılmıştır. En uygun adsorpsiyon koşullarının belirlenmesi için adsorbent yüklemesinin ve başlangıç pH'sının etkisi incelenmiştir. 2 g/L adsorbent yüklemesinde ve pH 5'de %40,3 kümülatif TOK giderimi sağlanmıştır. Adsorpsiyon sonrasında üçüncü adım olarak BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO katalizörler varlığında foto Fenton benzeri oksidasyonu uygulanmıştır. Katalizörlerin TOK giderimi performansları 0,25 ve 0,5 g/L'de karşılaştırılmış ve foto Fenton benzeri oksidasyonu sonrasında en yüksek kümülatif TOK giderimi BiNiO₃/MK-GO varlığında %51 olarak hesaplanmıştır. Biyokütleden türetilen grafen oksitin elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyonundan oluşan bir ardışık arıtım sisteminde tekstil atık suyu giderimi için adsorbent ve katalizör destek malzemesi olarak kullanımı bu çalışmanın temel özgül değerini oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: biyokütleden türetilen grafen benzeri malzeme, endüstriyel atık su arıtımı, elektrokoagülasyon, adsorpsiyon, fotokatalitik oksidasyon

Treatment of Industrial Wastewaters by Sequential Electrochemical, Chemical and Photochemical Methods Using Agricultural Waste Derived Graphene-like Materials

Abstract

The quality of the in-situ pretreated real textile wastewater was improved by a hybrid treatment process comprising of the sequential applications of the electrocoagulation, adsorption and photo Fenton like oxidation processes. Under the most suitable electrocoagulation conditions 19.5% total organic carbon (TOC) removal was accomplished. The textile wastewater was subjected to adsorption after electrocoagulation. Graphene oxide adsorbents were prepared from corncob (C-GO) was used as the adsorbent in the adsorption process. The effect of the adsorbent loading and the initial pH were investigated to determine the most suitable adsorption conditions. At 2 g/L of adsorbent loading and pH 5, 40.3% cumulative TOC removal was achieved. After the adsorption photo Fenton like oxidation was applied as the third treatment step in the presence of BiFeO₃/C-GO and BiNiO₃/C-GO catalysts. The TOC removal performances of the catalysts were compared at 0.25 and 0.5 g/L of catalyst loading. After the photo Fenton like oxidation the highest cumulative TOC removal was evaluated as 51% in the presence of BiNiO₃/C-GO catalysts. The use of biomass-derived graphene oxide as adsorbent and catalyst support material for textile wastewater removal in a sequential treatment system consisting of electrocoagulation, adsorption and photo-Fenton-like oxidation constitutes the main originality of this study.

Keywords: biomass derived graphene-like material, industrial wastewater treatment, electrocoagulation, adsorption, photocatalytic oxidation

Giriş

İklim değişiklikleri ve su kaynaklarının aşırı tüketimi nedeniyle oluşan su sıkıntısı, dünya çapında en önemli sorunlardan biri olarak yer almaktadır. Dünya nüfusunun yaklaşık %40'unun su sıkıntısı çektiği bilinmektedir. Yoğun su tüketimi nedeniyle azalan yeraltı su seviyesi, endüstriyel kaynaklı atık suların yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Pera-Titus vd., 2004; Xiao vd., 2015).

Tekstil endüstrisi, dünyada birçok ülkede ekonomik açıdan en önemli sektörlerden biridir. Çeşitli boya ve kimyasalların kullanıldığı tekstil endüstrisinde su tüketiminin ve atık su üretiminin çok yüksek olduğu prosesler bulunmaktadır. Bu sebeple, tekstil endüstrisi atık sularının arıtılarak yeniden değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Tekstil endüstrisi atık sularının kompleks yapıda olması, yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve toplam organik karbon (TOK) içeriği ve biyolojik bozunabilirliğinin düşük olması nedeniyle (Bisschops ve Spanjers, 2003; GilPavas vd., 2017) kirletici giderim veriminin yüksek değerlere ulaşabilmesi için hibrit arıtım sistemleri kullanılmaktadır. Literatürde tekstil atık sularının arıtılmasıyla ilgili olarak yapılan çalışmalarda koagülasyon/flokülasyon, adsorpsiyon, membran, elektrokoagülasyon, ileri oksidasyon prosesleri ve biyolojik prosesler yaygın olarak kullanılmaktadır (Kavitha ve Namasivayam, 2008; Manenti vd., 2014).

Elektrokoagülasyon (EK), ortama bir elektrik akımı vererek, sulu bir ortamdaki süspansiyon edilmiş veya çözünmüş kirleticilerinin dengesizleştirme işlemidir (Ozyonar ve Karagozolu, 2012). EK prosesi koagülasyon, adsorpsiyon, çöktürme ve flotasyon giderme mekanizmalarını içermekte olup, atık suyun içinde elektrot malzemelerinin çözülmesiyle metal hidroksit parçalarının oluşumuna dayanmaktadır (Eyvaz vd., 2006; Moussa vd., 2017). Elektrokoagülasyon, çeşitli kirletici, organik, boya ve ağır metallerin gideriminde kullanılabilen ve kimyasal malzeme gerektirmeyen çevre dostu bir yöntemdir (Emamjomeh ve Sivakumar, 2009; Khandegar ve Saroha, 2013; Naje vd., 2015).

Adsorpsiyon, atık suyun içindeki organik kirleticilerin ve ağır metallerin uzaklaştırılmasında etkili ve ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Liu vd., 2017; Patel ve Vashi, 2010). Kil, biyomalzemeler, aktif karbon, zeolitler ve bazı katı atıklar, atık suyun içindeki organik maddelerin uzaklaştırılması için adsorbent olarak kullanılabilir (Wang ve Peng, 2010).

İleri oksidasyon prosesleri güçlü oksitleyiciler (genellikle hidroksil radikalleri) açığa çıkarak organik bileşikler daha küçük moleküllere parçalamaktadır. Hidroksil radikalleri seçici olmayıp tüm organik maddeler ile reaksiyona girmekte ve son ürün olarak CO₂ ve H₂O oluşturmaktadır (Vilar vd., 2011). Katalitik ıslak hava oksidasyonu, katalitik ıslak peroksit oksidasyonu, süperkritik su oksidasyonu, O₃/H₂O₂, UV/O₃, UV/H₂O₂, Fenton (Fe²⁺/H₂O₂), foto Fenton (Fe²⁺/H₂O₂/UV) ve ultrasonik oksidasyon en çok uygulanan ileri oksidasyon yöntemleri arasındadır. İleri oksidasyon proseslerinde kullanılan homojen metal katalizörlerin, arıtılan suda çözünmeleri, sınırlı pH aralıklarında etkili olmaları ve ışığın penetrasyonunu engelleyen süspansiyon yapıları oluşturmaları gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle literatürdeki çalışmalarda yerlerini metallerin katalizör destek malzemesine tutturulması ile elde edilen heterojen katalizörlere bırakmışlardır (Foo ve Hameed, 2010).

İki boyutlu karbon allotropu grafen, tek atomik katmanlı petek ağdan oluşmakta ve temel bilimler ve ileri teknolojik uygulamalar için en dikkat çekici malzemelerden biri olarak gösterilmektedir. Grafenin benzersiz termal, optik, elektronik ve mekanik özellikleri, adsorpsiyon, heterojen kataliz, nanoelektronik, biyoalgılama ve hidrojen depolama dahil olmak üzere çeşitli uygulamalara entegre edilebilecek yenilikçi fonksiyonel malzemelerin tasarımı için önem taşımaktadır (Pastrana-Martínez vd., 2012). Grafen oksit (GO), hidroksil, karboksil ve epoksi gibi çeşitli fonksiyonel grupları içeren oksitlenmiş bir grafen formudur (Fan vd., 2015). Grafen oksit yüksek mekanik mukavemeti ve geniş yüzey alanı nedeniyle katalizör destek malzemesi olarak kullanıma elverişli malzemeler arasındadır.

Grafen üretiminde kullanılan klasik yöntemler arasında kimyasal buhar biriktirme, karbon kaynağı olarak yenilenemeyen fosil yakıtları kullandığı için sürdürülebilir değildir. Doğal veya sentetik grafiten grafen üretiminde de yenilenemeyen kaynaklar kullanılmakta ve üretim süreçleri çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, sürdürülebilir grafen üretiminin geliştirilmesi

gerekmektedir. Son yıllarda, düşük maliyetle ve büyük ölçekte yüksek kaliteli grafen üretimine yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Grafen üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanımını arttırmak için biyokütleden türetilen karbon bazlı malzemelere odaklanılmıştır. Grafen üretiminde düşük maliyetli ve kolay erişilebilir biyokütle kullanımı üretim maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır (Sawant vd., 2022; Zhou vd., 2022).

Esas olarak selüloz, hemiselüloz ve lignin biyopolimerlerden oluşan biyokütle, az miktarda protein, basit karbonhidrat, inorganik bileşik ve su içermektedir. Zirai atıklardan oluşan biyokütle çoğunlukla mahsul sapları, yapraklar, kökler, meyve kabukları ve kuruyemiş olarak tüketilen çeşitli tohumların kabuklarıdır. Yenilenebilir bir karbon kaynağı olarak kabul edilen biyokütle yüksek karbon içeriği nedeniyle grafen yapısına dönüştürülmeye elverişlidir (Athanasίου vd., 2022). Literatürdeki çalışmalarda şeker kamışı (Xiao vd., 2017), fıstık kabukları (Luo vd., 2022), fesleğen tohumları (Sanei vd., 2023), *Lentinus edodes* (şitaki mantarı) tozu (Han vd., 2021) gibi çeşitli biyokütlelerden elde edilen grafen malzemeler adsorpsiyon ve fotokatalitik oksidasyon proseslerinde adsorbent, katalizör veya katalizör destek malzemesi olarak etkili olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında mısır koçanından elde edilen grafen oksit benzeri malzeme (MK-GO) ile desteklenen BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO kompozit katalizörler hazırlanmış ve ardışık atık su arıtım proseslerinde tekstil atık suyu arıtım performansları test edilmiştir. Arıtım prosesinde elektrokoagülasyon çıkış suyuna MK-GO adsorbent kullanılarak adsorpsiyon uygulanmıştır. Adsorpsiyon prosesinde pH ve adsorbent yüklemesinin toplam organik karbon giderimi üzerine etkisi incelenmiş ve en uygun işletme koşulları belirlenmiştir. Adsorpsiyon sonrasında fotokatalitik oksidasyonda BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO katalizörlerin fotokatalitik performansları karşılaştırılmıştır. Tekstil atık su arıtımı ile ilgili literatür araştırmasına göre, ardışık atık su arıtım proseslerinde biyokütleden elde edilen grafen oksit benzeri malzemelerin kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bağlamda, biyokütleden türetilen grafen oksit adsorbent ve katalizör destek malzemesi olarak tekstil atık su arıtımında kullanımı bu çalışmanın temel özgün değerini oluşturmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Kimyasallar

Yerinde ön arıtılmış gerçek tekstil atık suyu, İzmir, Türkiye'deki bir tekstil fabrikasından sağlanmıştır. Ön arıtma aşamasında fabrikada fiziksel, biyolojik ve kimyasal arıtma yöntemleri uygulanmıştır. Yerinde ön arıtılmış atık suyun deşarj özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yerinde Ön İşlem Görmüş Gerçek Tekstil Atık Suyu Özellikleri

Atık Su Özellikleri	Değerler	
Toplam Organik Karbon (mg/L)	31,47	
pH	8,3	
İletkenlik (mS/cm)	7,42	
Çözünmüş O ₂ (mg/L)	4,8	
Renk, m ⁻¹	436 nm (sarı)	16,3
	525 nm (kırmızı)	13,3
	620 nm (mavi)	11,2

Grafen oksit adsorbent hazırlanışında grafit yerine ısıtılmış mısır koçanı tozu, sülfürik asit (Merck, 95-97%) ve potasyum permanganat (Merck, 99,0-100,5%) ve hidroklorik asit (Merck, 37%) kullanılmıştır. Perovskit/grafen oksit katalizör sentezinde bizmut nitrat pentahidrat (%98), nikel nitrat heksahidrat (Merck, %99-102), demir nitrat nonahidrat (Merck, %99-102) ve sitrik asit mono hidrat (Merck, %99,5-100,5) kullanılmıştır.

Adsorbent ve Katalizör Hazırlanışı

Atıklardan grafen benzeri malzemelerin eldesi için kimyasal eksfoliasyon, termal kimyasal buhar biriktirme, sıvı fazlı eksfoliasyon, elektrokimyasal eksfoliasyon, katalitik karbonizasyon, tavlama ve piroliz olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Berktaş vd., 2020). Bu çalışmada mısır koçanından grafen oksit elde edilmesi için kimyasal eksfoliasyon ve modifiye Hummer yöntemi kullanılmıştır. Literatürden derlenerek (Akhavan vd., 2014; Ariyanti vd., 2021; Chailuecha vd., 2021) modifiye edilen prosedüre göre mısır koçanları öğütülmüş ve 300°C'de kül fırınında 2 saat süre ile ısıtılma işlemi görmüştür. 1 gram ısıtılma işlemi gören mısır koçanı üzerine 23 ml H_2SO_4 ve 3 g $KMnO_4$ ilave edilerek karışımın sıcaklığı buz banyosu yardımı ile 20°C'nin altında tutulmuştur. Sonrasında karışım 35°C'de 40 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışıma 46 mL su eklendikten sonra 20 dakika daha karışım sağlanmıştır. Son olarak 140 mL su ve 15 mL H_2O_2 (%35'lik) eklenerek karışım bir gün süre ile dinlenmeye bırakılmıştır. Bir gün sonrasında karışım süzülerek sırasıyla HCl (hacimce %5'lik) ve saf su ile yıkanmıştır. Yıkama işlemi tamamlanan grafen oksit 30 dakika boyunca 300°C'de ısıtılma işlemi görmüştür. MK-GO hazırlanış basamakları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Mısır Koçanından Elde Edilen Grafen Oksit Adsorbent ve Katalizör Destek Malzemesi Hazırlanış Adımları

$BiBO_3$ /MK-GO (B: Fe, Ni) hazırlanması için ilk olarak $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ ve $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ veya $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ etanol-su karışımında çözünerek metal nitratların molariteleri toplamının 1,5 katı miktarda sitrik asit monohidrat eklenmiştir. Elde edilen çözeltiye katalizörün kütlece %10'unu oluşturacak miktarda, biyokütleden elde edilen grafen oksit eklenmiş ve 30 dakika ultrasonikasyon uygulanmıştır. Karışım 80°C'de jel oluşumu gözleninceye kadar karıştırılmıştır. Elde edilen jel, 120°C'de 4 saat kurutulmuş ve son olarak kül fırınında 400°C'de 4 saat kalsinasyon yapılmıştır. Katalizör hazırlanışı için uygulanan yöntemin adımları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Mısır Koçanından Elde Edilen Grafen Oksit Adsorbent ve Katalizör Destek Malzemesi Hazırlanış Adımları

Adsorbent ve Katalizör Karakterizasyonu

MK-GO adsorbent ve $BiBO_3$ /MK-GO katalizörlerin yüzey morfolojisi Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde taramalı elektron

mikroskobu ile incelenmiştir. Hazırlanan adsorbent ve katalizörlerin FT-IR spektrumları Ege Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde 4000-650 cm^{-1} aralığında kaydedilirken XRD analizleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tümlşik Araştırma Merkezleri'nde gerçekleştirilmiş ve XRD desenleri $2\theta=5-80^\circ$ aralığında kaydedilmiştir.

Deney Sistemi ve Prosedürü

Yerinde ön işlem görmüş tekstil atık suyu sırasıyla elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyonuna tabi tutulmuştur. Elektrokoagülasyon deney sistemi temel olarak 600 mL deney hacmine uygun 800 ml'lik beher, manyetik karıştırıcı, güç kaynağı, ve 50x50 mm alüminyum elektrotlardan oluşmaktadır. Elektrokoagülasyon, önceki bir çalışmada 220 rpm karıştırma hızı, 25 mA/cm^2 akım yoğunluğu ve pH 5 olarak belirlenen optimum koşullarda gerçekleştirilmiştir (Bener vd., 2019). Adsorpsiyon deney sistemi bir orbital çalkalayıcı (Jeitech, SKF-2025) ve 250 ml'lik erlenlerden oluşmaktadır. Adsorbent olarak mısır koçanından elde edilen grafen oksit (MK-GO) kullanılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri 24 saatlik kesikli süreçler halinde gerçekleştirilmiştir. Adsorbent yüklemesinin ve atık su pH'sının toplam organik karbon giderimi üzerine etkileri incelenerek en uygun adsorpsiyon koşulları belirlenmiştir. Bu koşullar altında adsorpsiyon çıkış suyuna foto Fenton benzeri oksidasyonu uygulanmıştır. Foto Fenton benzeri oksidasyonu deney sistemi 250 mL beher, manyetik karıştırıcı, su banyosu ve 100 Watt halojen lambadan oluşmaktadır. 0,25 ve 0,5 g/L olmak üzere iki farklı katalizör yüklemesinde $\text{BiNiO}_3/\text{MK-GO}$ ve $\text{BiFeO}_3/\text{MK-GO}$ katalizörlerin fotokatalitik performansları karşılaştırılmıştır. Foto Fenton benzeri oksidasyonu deneyleri başlangıç H_2O_2 derişimi 2 mM'da sabit tutularak 2 saat süre ile gerçekleştirilmiştir.

Analiz

Toplam organik karbon bir Shimadzu, TOC-L cihazı ile ölçülmüştür. Toplam organik karbon giderimi Denklem 1'e göre hesaplanmıştır:

$$\% \text{TOK Giderimi} = \left[\frac{\text{TOK}_o - \text{TOK}_t}{\text{TOK}_o} \right] \times 100 \quad (1)$$

TOK_o = Başlangıç anında ölçülen TOK değeri, mg/L

TOK_t = t anında ölçülen TOK değeri, mg/L

İletkenlik, pH, sıcaklık ve çözünmüş oksijen ölçümü bir WTW Multi 340i multimetre ile gerçekleştirilmiştir.

Atık suyun renk değerleri sarı, kırmızı ve maviye karşılık gelen 436, 525, and 620 nm'deki absorbans değerlerinin UV-Görünür spektrofotometrede (Thermo Genesys 10S) ölçümüyle belirlenmiştir.

Adsorbentin sıfır yük noktası analizi 0,1 mol/L HCl veya 0,1 mol/L NaOH kullanarak 50 mL 0,01 mol/L NaCl çözeltilerinin pH değerlerinin 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10'a ayarlanması ile gerçekleştirilmiştir. pH ayarlaması yapılan her bir tuz çözeltisine 0,15 gram grafen oksit eklendikten sonra süspansiyonlar 3 saat bekletilmiş ve son pH değerleri sabit kalıncaya dek belirli aralıklar ile pH ölçümü yapılmıştır (Rivera-Utrilla vd., 2001).

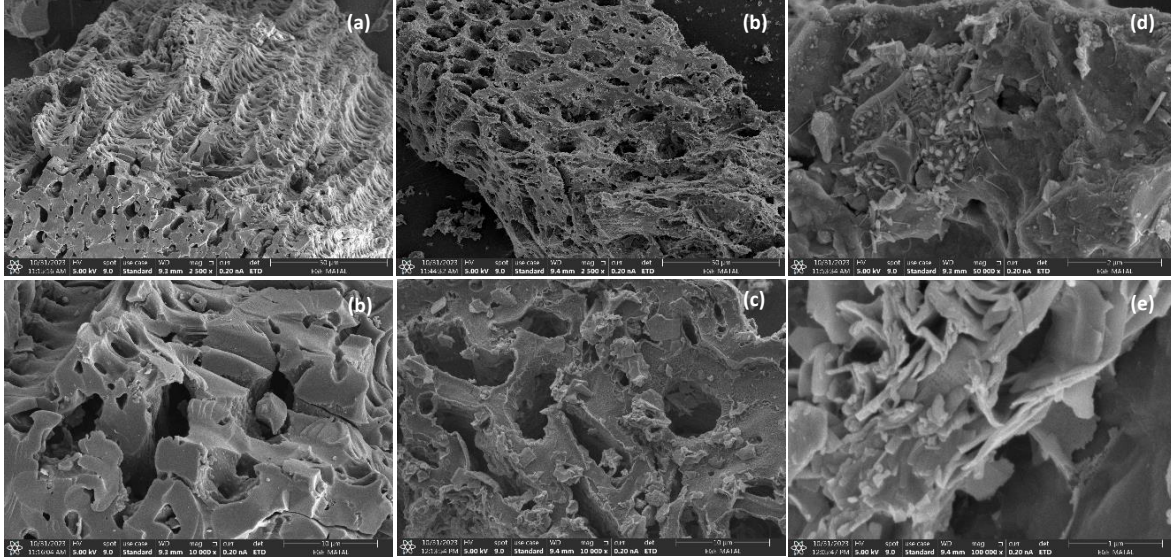
Bulgular ve Tartışma

Katalizör Karakterizasyonu

Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi

MK-GO adsorbent ve katalizör destek malzemesinin ve $\text{BiBO}_3/\text{MK-GO}$ (B: Fe, Ni) fotokatalizörlerin 2500 ve 100000 kat büyütme arasında çekilen taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te yer alan mikrograflara göre, mısır koçanından elde edilen katalizör destek

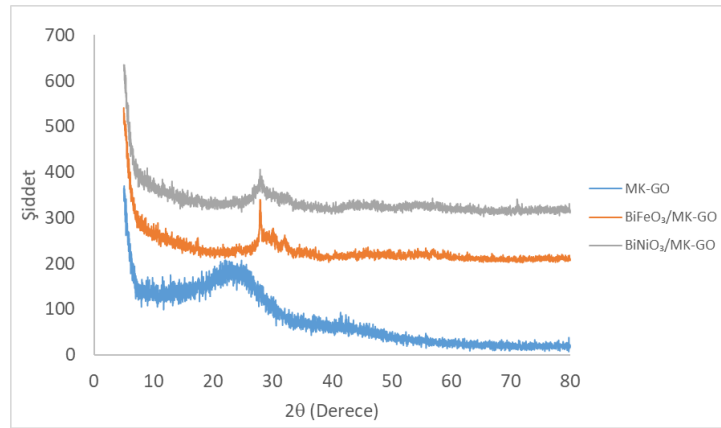
malzemesinin grafen oksit yapısındaki benzer şekilde bir dizi entegre ve kümelenmiş tabakadan oluştuğu görülmektedir. Literatürde de biyokütleden elde edilen grafen oksit benzeri maddelerin tabakalar arası bağlarla birbiri üzerine rastgele istiflenmiş buruşuk ve katlanmış tabakaların gözlemlendiği rapor edilmiştir (Huang vd., 2019). BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO mikrografları incelendiğinde eliptik ve granüler perovskit nano taneçiklerinin grafen oksit benzeri malzeme yüzeyindeki tabakalar arasına karbon yapıya zarar vermeden yerleştiği görülmektedir.



Şekil 3. MK-GO (a,b), BiFeO₃/MK-GO (c,d) ve BiNiO₃/MK-GO (e,f) Malzemelerin Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri

XRD Analizi

MK-GO, BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO için XRD analizi $2\theta = 5-80^\circ$ açı aralığında gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar Şekil 4'te gösterilmiştir.

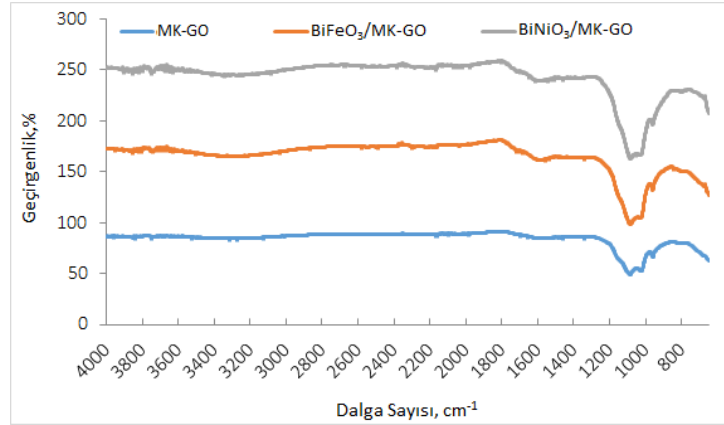


Şekil 4. MK-GO, BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO Malzemelerin XRD Desenleri

Kırınım desenlerinde $2\theta=26^\circ$ civarında gözlenen geniş belirgin pik grafen oksit malzemelerde karakteristik olarak görülen altıgen fazlı grafitin (002) düzlemlerine karşılık gelmektedir (Rajaura vd., 2016). $2\theta=32^\circ$, 57° ve 71° civarında gözlemlenen zayıf pikler kompozit malzemelerdeki eşkenar dörtgen perovskit yapısını belirtmektedir (Moitra vd., 2017).

FT-IR analizi

Tabakalı çift hidroksit katalizörlerin FT-IR spektrumları Şekil 5'te gösterilmektedir. FT-IR analiz sonuçlarına göre 1620 cm^{-1} 'deki bant, numunelerin grafen oksit malzemelerin karbon iskeletindeki C=C titreşimine karşılık gelmektedir (Preetha vd., 2022; Shalini Reghunath vd., 2022). 1020 cm^{-1} 'deki bant alkoksi gruplarının C-O-C gerilmesini ifade etmektedir (Surekha vd., 2020). Spektrumlarda 1700 ve 1080 cm^{-1} civarında gözlenen bantlar karboksil (C=O) ve primer alkol (C-O) gruplarına karşılık gelmektedir (Bukhari vd., 2023). 950 cm^{-1} 'deki bant grafen oksit yapısındaki epoksi gruplarından kaynaklanan (C-C) gruplarını ifade etmektedir (Wang vd., 2017).

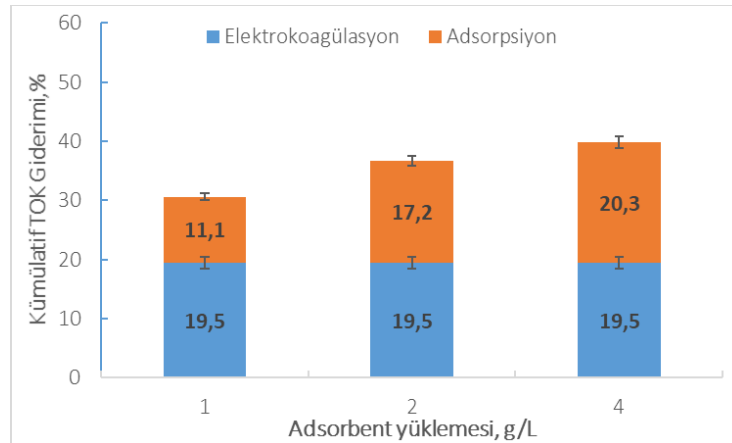


Şekil 5. MK-GO, BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO Malzemelerin FT-IR Spektrumları

Elektrokoagülasyon Çıkış Suyuna Adsorpsiyon Uygulanması

Adsorbent Yükleme Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde 220 rpm karıştırma hızı, 25 mA/cm^2 akım yoğunluğu ve pH 5 koşulları altında 2 saat sonunda %19,5 TOK giderimi elde edilmiştir (Bener vd., 2019). Elektrokoagülasyon çıkış suyuna 1, 2 ve 4 g/L olmak üzere farklı MK-GO adsorbent yüklemelerinde adsorpsiyon uygulanmış ve 24 saat sonunda elde edilen TOK giderim verimleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Hibrit Arıtım Sisteminin Adsorpsiyon Adımında Adsorbent Yükleme Etkisinin TOK Giderimi Üzerine Etkisi

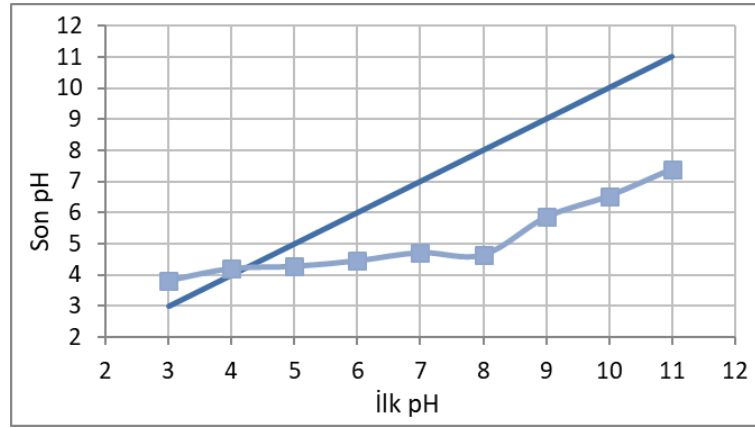
Adsorpsiyon Koşulları: pH=8, T=25 °C

Adsorbent miktarı atık su arıtım verimini ve adsorpsiyon kapasitesini etkileyen önemli faktörler arasındadır. Adsorbent miktarının artırılması, atık sudaki kirleticilerin adsorpsiyonu için daha geniş bir yüzey sağlanması ve yüzeydeki aktif kısımların sayısının artması nedeniyle kirletici giderimi

yüzdesini yükseltmektedir (Kutluay, 2019; Li vd., 2014). Adsorbent yüklemesi 1 g/L den 4 g/L'ye çıktığında adsorpsiyon prosesinde elde edilen TOK giderimi %11,1'den %20,3'e yükselmiştir. Literatürde de grafen oksit adsorbent dozunun artırılması ile daha yüksek giderim değerleri elde edildiği rapor edilmiştir (Sarwar vd., 2021). Ancak, adsorbent dozundaki fazla artış, aktif kısımların doymuş olması nedeniyle adsorpsiyon kapasitesini etkilemeyebilir veya adsorbent birim ağırlığı üzerine adsorbe edilen kirletici miktarı azalmasına ve adsorpsiyon kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır (Guo vd., 2016). Adsorbent yüklemesi 2 g/L'den 4 g/L'ye çıktığında TOK giderimindeki artışa rağmen adsorpsiyon kapasitesi 2,7 mg/g'den 1,59 mg/g'ye düşmüştür. Adsorpsiyon kapasitesindeki düşüş göz önünde bulundurularak en uygun adsorbent yüklemesi 2 g/L olarak belirlenmiştir.

Atık Su pH Değerinin Etkisi

Adsorpsiyon verimini etkileyen en önemli parametrelerden biri atık suyun pH'sıdır. Atık sudaki kirleticilerin iyonlaşma derecesini etkilemesi ve adsorbent yüzey özelliklerinin değişmesi nedeniyle atık su pH'sı adsorpsiyon kapasitesini etkilemektedir. Adsorbent yüzeyinin hangi pH değerlerinde artı veya eksi yüklendiğinin belirlenmesi için öncelikle mısır koçanından türetilen grafen oksit in sıfır yük noktası analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir.

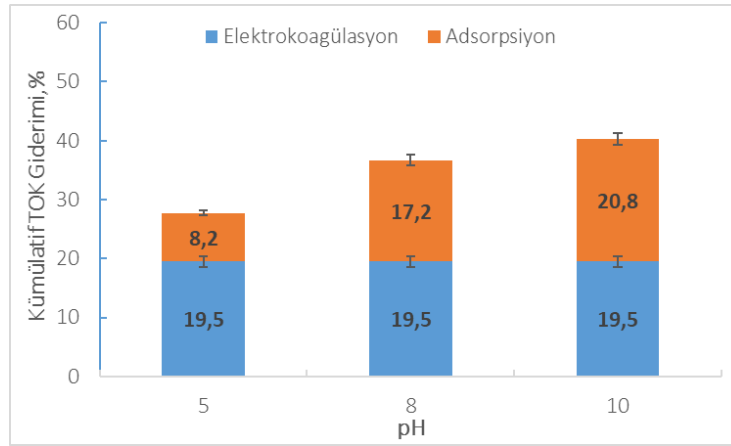


Şekil 7. MK-GO Adsorbent'in Sıfır Yük Noktası Analiz Sonuçları

Mısır koçanından türetilen grafen oksit in sıfır yük 4,2 olarak bulunmuştur. Literatürde grafen oksit in sıfır yük noktası için benzer değerler rapor edilmiştir. G. Zhao, Li, vd. (2011) ve G. Zhao, Ren, vd. (2011) gerçekleştirdikleri çalışmalarda grafen oksit in sıfır yük noktasını (G. Zhao, Li, vd., 2011; G. Zhao, Ren, vd., 2011) 3,9 ve 3,8 olarak hesaplamışlardır. De Assis vd. (2020) ticari grafen nanotabakalı için sıfır yük noktasını 3,78 olarak bulmuşlardır (de Assis vd., 2020). Adsorbent yüzeyi pH sıfır yük noktasının altında iken pozitif, sıfır yük noktasının üzerindeyken negatif yüklenmektedir (Shi vd., 2022; Sitko vd., 2013). Bu nedenle, pH > 4,2 iken MK-GO'nun yüzey yükü negatiftir ve elektrostatik kuvvetler nedeniyle grafen oksit tabakaları ve pozitif yüklü kirleticiler arasındaki etkileşim güçlenmektedir.

Elektrokoagülasyon çıkış suyunun pH'sı 5, 8 ve 10 olmak üzere farklı değerlere ayarlanarak MK-GO adsorbent varlığında belirlenen adsorpsiyon yüklemesinde hesaplanan TOK giderim verimleri Şekil 8'de gösterilmiştir.

Atık su pH'sı arttıkça grafen oksit yüzeyindeki negatif yüklenme artmakta ve grafen oksit yüzeyindeki oksijen içeren anyonik fonksiyonel grupların deprotonasyonuna neden olmaktadır. Süspansiyon formdaki yüksek oranda negatif yüklü grafen oksit tabakaları, elektrostatik itme kuvvetleri ile homojen bir şekilde dağılmakta ve atık sudaki katyonik moleküller ile negatif yüklü tabakalar arasındaki elektrostatik çekim kuvvetleri nedeniyle adsorpsiyon verimi artmaktadır (Peng vd., 2016).



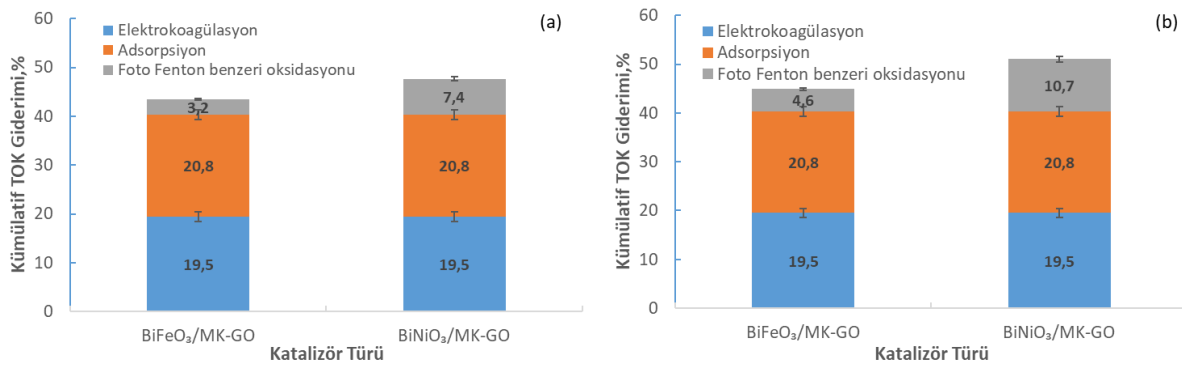
Şekil 8. Hibrit Arıtım Sisteminin Adsorpsiyon Adımında Atık Su pH Değerinin TOK Giderimi Üzerine Etkisi

Adsorpsiyon Koşulları: Adsorbent Yükleme = 2 g/l, T=25 °C

Atık su pH değeri 5'ten 10'a çıkarıldığında adsorpsiyon kapasiteleri ve TOK giderim değerleri artmıştır. 2 g/L adsorbent yüklemesinde adsorpsiyon kapasiteleri pH 5, 8 ve 10'da 1,29, 2,7 ve 2,9 mg/g olarak hesaplanmıştır. En yüksek TOK giderim verimi pH 10'da elde edilmiştir. Ancak pH 8 ve 10'da elde edilen yakın adsorpsiyon kapasiteleri ve pH ayarlamada kullanılan kimyasalın ekonomik ve çevre üzerine etkileri göz önünde bulundurulduğunda pH 8 de çalışma koşulu olarak değerlendirilmiştir. Elektrokoagülasyon prosesinde %19,5 TOK giderimi elde edildikten sonra optimum adsorbent yüklemesinde pH 8 ve 10'da sırasıyla %17,2 ve %20,8 TOK giderimi daha sağlanarak %36,7 ve %40,3 kümülatif TOK giderimine ulaşılmıştır.

Adsorpsiyon Çıkış Suyuna Foto Fenton Benzeri Oksidasyonu Uygulanması

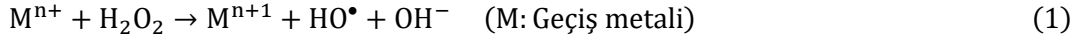
Belirlenen en uygun adsorbent yüklemesi ve atıksu pH değerinde gerçekleştirilen adsorpsiyon çıkış suyu foto Fenton benzeri oksidasyonu uygulanmıştır. BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO katalizörlerinin görünür bölge ışık altında foto Fenton benzeri oksidasyonu performansları, iki farklı katalizör yüklemesinde test edilmiştir. Hibrit arıtım sisteminin üçüncü adımında yer alan ileri oksidasyon prosesinde 0,25 g/L ve 0,50 g/L katalizör kullanılarak elde edilen TOK giderim sonuçları Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Hibrit Arıtım Sisteminin Foto Fenton Benzeri Oksidasyonu Adımında 0,25 g/L (a) ve 0,5 g/L (b) Katalizör Kullanılarak Elde Edilen TOK Giderimi

Adsorpsiyon koşulları: Adsorbent yüklemesi = 2 g/L, pH=10, T=25 °C, Foto Fenton benzeri oksidasyonu koşulları: [H₂O₂]₀=2 mM, T=25 °C

Foto Fenton benzeri oksidasyonunda geçiş metali içeren katalizör ve H₂O₂ etkileşimi ile hidroksil radikalleri açığa çıkmakta (Denklem 2) (Lee vd., 2001) ve atık su içindeki organik maddeler bozunmaktadır:



Elektrokoagülasyon ve adsorpsiyon çıkış suyuna 0,25 g/L katalizör ile uygulanan foto Fenton benzeri oksidasyonu sonucunda BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO varlığında kümülatif TOK giderimi değerleri sırasıyla %43,5 ve %47,7'ye ulaşmıştır. Katalizör yüklemesi 0,25'ten 0,5 g/L'ye yükseltildiğinde, hem BiFeO₃/MK-GO hem de BiNiO₃/MK-GO kullanımında TOK giderim verimleri artmıştır. Katalizör dozajındaki artış belirli bir dereceye kadar katalitik aktiviteyi arttırsa da yükselen maliyet ve çevre etkileri pratik uygulamaları kısıtlamaktadır (Z. Zhao vd., 2022). Ayrıca fazla miktarda katalizör kullanımı reaksiyon sıvısının ışık geçirgenliğini azaltarak fotokatalitik verimi düşürmektedir. Bu nedenle, 0,5 g/L'nin üzerinde katalizör yüklemesi ile deneme yapılmamıştır. Her iki katalizör yüklemesinde de (0,25 ve 0,5 g/L) nikel içeren katalizör, demir içeren katalizöre göre daha yüksek TOK giderim performansı sergilemiştir. Elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyonun ardışık uygulanması sonucu en yüksek kümülatif TOK giderim performansı 0,5 g/L BiNiO₃/MK-GO yüklemesinde %51 olarak hesaplanmıştır.

TOK gideriminin yanı sıra, optimum elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyonu koşullarında işletilen hibrit arıtma sistemi çıkış suyunun renk, pH, iletkenlik ve çözülmüş oksijen ihtiyacı ölçümleri gerçekleştirilmiş ve arıtım sonucu su kalitesindeki değişim Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Hibrit sistem ile arıtılan tekstil atık suyu özellikleri

Atık Su Özellikleri	Değerler	
Toplam organik karbon (mg/L)	15,42	
pH	8	
İletkenlik (mS/cm)	8,95	
Çözülmüş O ₂ (mg/L)	4,63	
Renk, m ⁻¹	436 nm (sarı)	0,9
	525 nm (kırmızı)	0,4
	620 nm (mavi)	0,1

Atık sular arıtım sonrasında sağladıkları su kalitesi kriterlerine göre tarımsal sulama, balıkçılık ve kabuklu deniz ürünleri üretimi ve endüstriyel prosesler gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Kıtaiçi Yerüstü Su Kaynaklarının Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri'ne göre birinci sınıf sular için belirtilen pH (6,5-8,5) ve renk (436 nm ≤ 1,5 m⁻¹, 525 nm ≤ 1,2 m⁻¹, 620 nm ≤ 0,8 m⁻¹) limitleri ve üçüncü sınıf sular için belirtilen çözülmüş oksijen (3 mg O₂/L) limitleri hibrit arıtım yönteminin uygulanması ile sağlanmıştır. Ancak, iletkenlik (veya tuzluluk) parametresine göre ilk üç kalite sınıfının kriteri sağlanamamıştır. Tuzluluk giderimi için ultrafiltrasyon veya ters ozmoz gibi bir arıtım basamağının hibrit arıtım sistemine eklenmesi önerilmektedir. Elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyonu ile arıtılan tekstil atık suları, tuzluluk kriterinin sağlanacağı bir arıtım basamağının eklenmesi durumunda proses suyu ve soğutma suyu olarak kullanım için yüksek potansiyel taşımaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Yerinde ön işlem görmüş gerçek tekstil atık suyunun arıtımı için elektrokoagülasyon, adsorpsiyon ve foto Fenton benzeri oksidasyonu yöntemleri ardışık olarak uygulanmıştır. Mısır koçanından elde edilen grafen oksit, adsorbent ve katalizör destek malzemesi olarak kullanılmıştır. 25 mA/cm² akım yoğunluğu, pH 5 ve 220 rpm çalkalama hızında işletilen elektrokoagülasyon prosesinde %19,5 TOK giderimi elde edilmiştir. Mısır koçanından elde edilen grafen oksit varlığında gerçekleştirilen adsorpsiyon prosesinde en uygun pH ve adsorbent yüklemesinde %20,8 TOK giderimi elde edilmiştir.

Görünür bölge ışık altında gerçekleştirilen foto Fenton benzeri oksidasyonunda BiFeO₃/MK-GO ve BiNiO₃/MK-GO katalizörlerin performansları karşılaştırılmış ve üçüncü adımın sonunda kümülatif TOK giderimi BiNiO₃/MK-GO varlığında %51'e ulaşmıştır. Adsorbent ve katalizör destek malzemesinin zirai atıklardan elde edilmesi sürdürülebilir atık su arıtım sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar, perovskit/grafen oksit malzemelerinin çevre dostu hibrit arıtım teknolojilerinde tekstil atık sularının arıtılması için umut verici alternatifler olduğunu göstermiştir.

Destek ve Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 315M537-ERANETMED –SETPROPER Project). Atık su sağlanması konusunda yardımcı olan SUN Tekstil firmasına teşekkürlerimizi sunuyoruz.

Yazar Katkısı

Tüm yazarlar laboratuvar çalışmalarında, verilerin toplanması ve analiz edilmesinde yer aldı. Yazarlar makaleyi birlikte yazdı, okudu ve onayladı.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

ORCID

Burcu Palas  <https://orcid.org/0000-0002-2815-0057>

Gülin Ersöz  <https://orcid.org/0000-0002-5875-5946>

Süheyda Atalay  <https://orcid.org/0000-0002-1703-1044>

Kaynaklar

- Akhavan, O., Bijanzad, K. ve Mirsepah, A. (2014). Synthesis of graphene from natural and industrial carbonaceous wastes. *RSC Advances*, 4(39), 20441–20448. <https://doi.org/10.1039/c4ra01550a>
- Ariyanti, D., Lesdantina, D., Budiyo ve Satriadi, H. (2021). Synthesis and characterization of graphene-like material derived from sugarcane bagasse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1053(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1053/1/012013>
- Athanasios, M., Yannopoulos, S. N. ve Ioannides, T. (2022). Biomass-derived graphene-like materials as active electrodes for supercapacitor applications: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 446, 137191. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137191>
- Bener, S., Bulca, Ö., Palas, B., Tekin, G., Atalay, S. ve Ersöz, G. (2019). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Effect of operative conditions on the organic carbon removal and kinetic study. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.010>
- Berktaş, I., Hezarkhani, M., Haghghi Poudeh, L. ve Saner Okan, B. (2020). Recent developments in the synthesis of graphene and graphene-like structures from waste sources by recycling and upcycling technologies: a review. *Graphene Technology*, 5(3–4), 59–73. <https://doi.org/10.1007/s41127-020-00033-1>
- Bisschops, I. ve Spanjers, H. (2003). Literature review on textile wastewater characterisation. *Environmental Technology*, 24(11), 1399–1411. <https://doi.org/10.1080/09593330309385684>





- Bukhari, A., Ijaz, I., Zain, H., Mehmood, U., Mudassir Iqbal, M., Gilani, E. ve Nazir, A. (2023). Introduction of CdO nanoparticles into graphene and graphene oxide nanosheets for increasing adsorption capacity of Cr from wastewater collected from petroleum refinery. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(2), 104445. <https://doi.org/10.1016/j.arabic.2022.104445>
- Chailuecha, C., Klinbumrung, A., Chaopanich, P. ve Sirirak, R. (2021). Graphene-like porous carbon nanostructure from corn husk: Synthesis and characterization. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3525–3528. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.512>
- de Assis, L. K., Damasceno, B. S., Carvalho, M. N., Oliveira, E. H. C. ve Ghislandi, M. G. (2020). Adsorption capacity comparison between graphene oxide and graphene nanoplatelets for the removal of coloured textile dyes from wastewater. *Environmental Technology*, 41(18), 2360–2371. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1567603>
- Emamjomeh, M. M. ve Sivakumar, M. (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663–1679. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011>
- Eyvaz, M., Bayramoğlu, M. ve Kobya, M. (2006). Tekstil endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtılması: Teknik ve ekonomik değerlendirme. *Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi*, 16(1–3), 55–65. <https://dergipark.org.tr/en/pub/skatmk/issue/65265/1004375>
- Fan, X., Zhang, G. ve Zhang, F. (2015). Multiple roles of graphene in heterogeneous catalysis. *Chemical Society Reviews*, 44(10), 3023–3035. <https://doi.org/10.1039/C5CS00094G>
- Foo, K. Y. ve Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I. ve Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 191, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>
- Guo, X., Qu, L., Tian, M., Zhu, S., Zhang, X., Tang, X. ve Sun, K. (2016). Chitosan/Graphene Oxide Composite as an Effective Adsorbent for Reactive Red Dye Removal. *Water Environment Research*, 88(7), 579–588. <https://doi.org/10.2175/106143016X14609975746325>
- Han, L., Zhang, P., Li, L., Lu, S., Su, B., An, X. ve Lei, Z. (2021). Nitrogen-containing carbon nano-ions-like and graphene-like materials derived from biomass and the adsorption and visible photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, 543, 148752. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148752>
- Huang, B., Xia, M., Qiu, J. ve Xie, Z. (2019). Biomass Derived Graphene-Like Carbons for Electrocatalytic Oxygen Reduction Reaction. *ChemNanoMat*, 5(5), 682–689. <https://doi.org/10.1002/cnma.201900009>
- Kavitha, D. ve Namasivayam, C. (2008). Capacity of activated carbon in the removal of acid brilliant blue: Determination of equilibrium and kinetic model parameters. *Chemical Engineering Journal*, 139(3), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.011>
- Khandegar, V. ve Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent—A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949–963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>
- Kutluay, S. (2019). Benzen uçucu organik bileşiğinin badem kabuğundan üretilen char üzerine gaz fazı adsorpsiyonu: Kinetik, denge ve termodinamik. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(4), 1432–1445. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.543583>

- Lee, Y. N., Lago, R. M., Fierro, J. L. G. ve González, J. (2001). Hydrogen peroxide decomposition over $\text{Ln}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (Ln = La or Nd and A = K or Sr) perovskites. *Applied Catalysis A: General*, 215(1–2), 245–256. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(01\)00536-1](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(01)00536-1)
- Li, Y., Sun, J., Du, Q., Zhang, L., Yang, X., Wu, S., Xia, Y., Wang, Z., Xia, L. ve Cao, A. (2014). Mechanical and dye adsorption properties of graphene oxide/chitosan composite fibers prepared by wet spinning. *Carbohydrate Polymers*, 102, 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.094>
- Liu, X., Sun, J., Duan, S., Wang, Y., Hayat, T., Alsaedi, A., Wang, C. ve Li, J. (2017). A Valuable Biochar from Poplar Catkins with High Adsorption Capacity for Both Organic Pollutants and Inorganic Heavy Metal Ions. *Scientific Reports*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09446-0>
- Luo, H., Yu, S., Zhong, M., Han, Y., Su, B. ve Lei, Z. (2022). Waste biomass-assisted synthesis of TiO_2 and N/O-contained graphene-like biochar composites for enhanced adsorptive and photocatalytic performances. *Journal of Alloys and Compounds*, 899, 163287. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163287>
- Manenti, D. R., Módenes, A. N., Soares, P. A., Espinoza-Quiñones, F. R., Boaventura, R. A. R., Bergamasco, R. ve Vilar, V. J. P. (2014). Assessment of a multistage system based on electrocoagulation, solar photo-Fenton and biological oxidation processes for real textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 252, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.096>
- Moitra, D., Dhole, S., Ghosh, B. K., Chandel, M., Jani, R. K., Patra, M. K., Vadera, S. R. ve Ghosh, N. N. (2017). Synthesis and Microwave Absorption Properties of BiFeO_3 Nanowire-RGO Nanocomposite and First-Principles Calculations for Insight of Electromagnetic Properties and Electronic Structures. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(39), 21290–21304. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02836>
- Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M. ve Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>
- Naje, A. S., Chelliapan, S., Zakaria, Z. ve Abbas, S. A. (2015). Treatment performance of textile wastewater using electrocoagulation (EC) process under combined electrical connection of electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(7), 5924–5941. <http://www.electrochemsci.org/papers/vol10/100705924.pdf>
- Ozyonar, F. ve Karagozoglu, B. (2012). Systematic assessment of electrocoagulation for the treatment of marble processing wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9(4), 637–646. <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0093-z>
- Pastrana-Martínez, L. M., Morales-Torres, S., Likodimos, V., Figueiredo, J. L., Faria, J. L., Falaras, P. ve Silva, A. M. T. (2012). Advanced nanostructured photocatalysts based on reduced graphene oxide– TiO_2 composites for degradation of diphenhydramine pharmaceutical and methyl orange dye. *Applied Catalysis B: Environmental*, 123–124, 241–256. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.04.045>
- Patel, H. ve Vashi, R. T. (2010). Treatment of textile wastewater by adsorption and coagulation. *Journal of Chemistry*, 7(4), 1468–1476. <https://doi.org/10.1155/2010/987620>
- Peng, W., Li, H., Liu, Y. ve Song, S. (2016). Adsorption of methylene blue on graphene oxide prepared from amorphous graphite: Effects of pH and foreign ions. *Journal of Molecular Liquids*, 221, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.05.074>
- Pera-Titus, M., García-Molina, V., Baños, M. A., Giménez, J. ve Esplugas, S. (2004). Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47(4), 219–256. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2003.09.010>

- Preetha, R., Govinda raj, M., Vijayakumar, E., Narendran, M. G., Varathan, E., Neppolian, B., Jeyapaul, U. ve John Bosco, A. (2022). Promoting photocatalytic interaction of boron doped reduced graphene oxide supported BiFeO₃ nanocomposite for visible-light-induced organic pollutant degradation. *Journal of Alloys and Compounds*, 904, 164038. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164038>
- Rajaura, R. S., Srivastava, S., Sharma, V., Sharma, P. K., Lal, C., Singh, M., Palsania, H. S. ve Vijay, Y. K. (2016). Role of interlayer spacing and functional group on the hydrogen storage properties of graphene oxide and reduced graphene oxide. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(22), 9454–9461. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.115>
- Rivera-Utrilla, J., Bautista-Toledo, I., Ferro-García, M. A. ve Moreno-Castilla, C. (2001). Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 76(12), 1209–1215. <https://doi.org/10.1002/jctb.506>
- Sanei, A., Dashtian, K., Yousefi Seyf, J., Seidi, F. ve Kolvari, E. (2023). Biomass derived reduced-graphene-oxide supported α -Fe₂O₃/ZnO S-scheme heterostructure: Robust photocatalytic wastewater remediation. *Journal of Environmental Management*, 332, 117377. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117377>
- Sarwar, Z., Tichonovas, M., Krugly, E., Masione, G., Abromaitis, V. ve Martuzevicius, D. (2021). Graphene oxide loaded fibrous matrixes of polyether block amide (PEBA) elastomer as an adsorbent for removal of cationic dye from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 298, 113466. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113466>
- Sawant, S. A., Patil, A. V., Waikar, M. R., Rasal, A. S., Dhas, S. D., Moholkar, A. V., Vhatkar, R. S. ve Sonkawade, R. G. (2022). Advances in chemical and biomass-derived graphene/graphene-like nanomaterials for supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 51, 104445. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104445>
- Shalini Reghunath, B., Rajasekaran, S., Devi K R, S., Saravanakumar, B., William, J. J., Pinheiro, D., Govindarajan, D. ve Kheawhom, S. (2022). Fabrication of bismuth ferrite/graphitic carbon nitride/N-doped graphene quantum dots composite for high performance supercapacitors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 171, 110985. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110985>
- Shi, Y., Song, G., Li, A., Wang, J., Wang, H., Sun, Y. ve Ding, G. (2022). Graphene oxide-chitosan composite aerogel for adsorption of methyl orange and methylene blue: Effect of pH in single and binary systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 641, 128595. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128595>
- Sitko, R., Turek, E., Zawisza, B., Malicka, E., Talik, E., Heimann, J., Gagor, A., Feist, B. ve Wrzalik, R. (2013). Adsorption of divalent metal ions from aqueous solutions using graphene oxide. *Dalton Transactions*, 42(16), 5682. <https://doi.org/10.1039/c3dt33097d>
- Surekha, G., Krishnaiah, K. V., Ravi, N. ve Padma Suvarna, R. (2020). FTIR, Raman and XRD analysis of graphene oxide films prepared by modified Hummers method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1495(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012012>
- Vilar, V. J. P., Pinho, L. X., Pintor, A. M. A. ve Boaventura, R. A. R. (2011). Treatment of textile wastewaters by solar-driven advanced oxidation processes. *Solar Energy*, 85(9), 1927–1934. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.033>
- Wang, J., Salihi, E. C. ve Šiller, L. (2017). Green reduction of graphene oxide using alanine. *Materials Science and Engineering: C*, 72, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.017>

- Wang, S. ve Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
- Xiao, J., Xie, Y. ve Cao, H. (2015). Organic pollutants removal in wastewater by heterogeneous photocatalytic ozonation. *Chemosphere*, 121, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.072>
- Xiao, X., Chen, B., Zhu, L. ve Schnoor, J. L. (2017). Sugar Cane-Converted Graphene-like Material for the Superhigh Adsorption of Organic Pollutants from Water via Coassembly Mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12644–12652. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03639>
- Zhao, G., Li, J., Ren, X., Chen, C. ve Wang, X. (2011). Few-Layered Graphene Oxide Nanosheets As Superior Sorbents for Heavy Metal Ion Pollution Management. *Environmental Science & Technology*, 45(24), 10454–10462. <https://doi.org/10.1021/es203439v>
- Zhao, G., Ren, X., Gao, X., Tan, X., Li, J., Chen, C., Huang, Y. ve Wang, X. (2011). Removal of Pb(II) ions from aqueous solutions on few-layered graphene oxide nanosheets. *Dalton Transactions*, 40(41), 10945. <https://doi.org/10.1039/c1dt11005e>
- Zhao, Z., Zhou, W., Lin, D., Zhu, L., Xing, B. ve Liu, Z. (2022). Construction of dual active sites on diatomic metal (FeCo–N/C-x) catalysts for enhanced Fenton-like catalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 309, 121256. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121256>
- Zhou, Y., He, J., Chen, R. ve Li, X. (2022). Recent advances in biomass-derived graphene and carbon nanotubes. *Materials Today Sustainability*, 18, 100138. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100138>

Farklı Tarımsal Atıkların *Pleurotus citrinopileatus* ve *Pleurotus ostreatus* Yetiştiriciliğinde Verim ve Kalite Üzerine Etkisi

Ecem Kara¹ , Gökhan Baktemur¹ , Mustafa Kemal Soylu² , Hatıra Taşkın³ 

¹Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Tarım Bilimleri ve Teknoloji Fakültesi, Bitkisel Üretim ve Teknolojileri Bölümü, Sivas

²Yalova Atatürk Bahçe Kültürleri Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Yalova

³Çukurova Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Adana

Geliş Tarihi / Received Date: 28.08.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 08.11.2023

Öz

Bu çalışmada, *Pleurotus ostreatus* türüne ait Yaprak 77 çeşidi (gri istiridye) ve *Pleurotus citrinopileatus* (sarı istiridye) türüne ait M2502 ve 3040 suşlarının farklı tarımsal atıklarla oluşturulan yetiştiricilik ortamlarındaki performansları belirlenmiştir. Denemede yetiştiricilik ortamları, meşe talaşı ve buğday sapının 2:1 oranında ağırlık üzerinden buğday kepeğiyle karışımlarından oluşturulmuştur (*P. citrinopileatus*: 2 meşe talaşı + 1 buğday kepeği (P1A), 2 buğday sapı + 1 buğday kepeği (P2A); *P. citrinopileatus* (B): 2 meşe talaşı + 1 buğday kepeği (P1B), 2 buğday sapı + 1 buğday kepeği (P2B); *P. ostreatus* (C): 2 meşe talaşı + 1 buğday kepeği (P1C), 2 buğday sapı + 1 buğday kepeği (P2C). Çalışma süresince; elde edilen mantarların şapka çapı, sap uzunluğu, sap çapı, mantar ağırlığı, toplam verim, kuru madde miktarı ve kullanılan yetiştiricilik ortamlarının otoklav sonrası, misel gelişim ve hasat sonu dönemlerinde nem ve pH analizleri gerçekleştirilmiştir. *P. citrinopileatus*-M2502 suşunda en yüksek mantar ağırlığı ve kuru madde miktarı P1A (sırasıyla; 17.08 g, %18.35) kombinasyonundan elde edilmiştir. *P. citrinopileatus*-3040 suşunda, mantar ağırlığı (13.19 g) ve kuru madde miktarı (%11.99) en yüksek olan kombinasyon P2B, toplam verim değeri en yüksek olan kombinasyon P1B (159 g/kg) olarak belirlenmiştir. *P. ostreatus*'da en yüksek, mantar ağırlığı (15.85 g), kuru madde miktarı (%13.81) ve toplam verim (93.18 g/kg) P2C kombinasyonunda tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus citrinopileatus*, yetiştiricilik, tarımsal atık

The Effect of Different Agricultural Wastes on Yield and Quality in Cultivation of *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus ostreatus*

Abstract

The aim of this study was to check the performances of the Yaprak 77 variety (gray oyster) of the *Pleurotus ostreatus* and M2502 and 3040 strains of the *Pleurotus citrinopileatus* (yellow oyster) in the cultivation environments under different agricultural wastes. In the experiment, the growing media were developed by mixing oak sawdust and wheat straw with wheat bran in a ratio of 2:1 by weight (*P. citrinopileatus*: 2 oak sawdust + 1 wheat bran (P1A), 2 wheat straw + 1 wheat bran (P2A); *P. citrinopileatus* (B): 2 oak shavings + 1 wheat bran (P1B), 2 wheat stalks + 1 wheat bran (P2B); *P. ostreatus* (C): 2 oak shavings + 1 wheat bran (P1C), 2 wheat stalks + 1 wheat bran (P2C). Various parameters i.e. Cap diameter, stem length, stem diameter, mushroom weight, total yield, dry matter amount of the mushrooms obtained, and moisture and pH analyses of the growing media used after autoclaving, mycelial development, and post-harvest periods were performed. The highest mushroom weight and dry matter content in *P. citrinopileatus*-M2502 strain was obtained from the P1A combination (17.08 g, 18.35%, respectively). In *P. citrinopileatus*-3040 strain, the combination with the highest mushroom weight (13.19 g) and dry matter content (11.99%) was determined as P2B, and the combination with the highest total yield value was determined as P1B (159 g/kg). In *P. ostreatus*, the highest mushroom weight (15.85 g), dry matter content (13.81%), and total yield (93.18 g/kg) were detected with the P2C combination.

Keywords: *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus citrinopileatus*, cultivation, agricultural waste

Giriş

Avcılık ve toplayıcılık dönemlerinden günümüze kadar mantarlar bilinmekte ve tüketilmektedir (Wani vd., 2010). Mantar, yüksek vitamin ve mineral içeriğinin yanı sıra, düşük kalorili bir besindir. Beslenmenin dışında özellikle doğu ülkelerinde, yüzyıllardır tıbbi amaç için kullanılmakta ve mantarlardan ilaç yapılmaktadır (Öztürk ve Çopur, 2009). Artan dünya nüfusu, sanayileşme ve kentleşme, beraberinde tarım arazilerinin giderek azalmasına sebep olmaktadır. Mantar gibi, gerekli koşullar sağlandığında yıl boyunca üretimi yapılabilen besinler giderek önem kazanmaktadır. Az gelişmiş ülkelerde gerekli olan protein gereksinimini karşılamak amacıyla, mantar yetiştiriciliği son dönemlerde popüler hale gelmiştir (Kurt vd., 2018; Eren ve Pekşen, 2019). Mantarlar, özellikle *Pleurotus* türleri; protein, fosfor, kalsiyum, demir, potasyum ve sodyum gibi mineraller açısından zengindir (Szabová vd., 2013). Ayrıca *P. ostreatus*'taki Amino Asit Skoru (AAS), yetişkinler için gerekli tüm amino asitlerin beslenme gereksinimini karşılamaktadır (Carrasco-González vd., 2017).

Agaricus bisporus ve *A. brasilensis* mantar türleri, %30'luk pay ile dünyada en çok yetiştiriciliği yapılan mantarlardır. Bunu %27'lik pay ile *Pleurotus*, %17'lik pay ile *Lentinula* türleri takip etmektedir (Eren ve Pekşen, 2016). Ülkemizde ise en çok yetiştiriciliği yapılan mantar türü *Agaricus bisporus*'tur (beyaz şapkallı mantar) ve toplam mantar üretimimizin %80'lik kısmını oluşturmaktadır. *Pleurotus ostreatus* (istiridy mantarı)'da en fazla yetiştirilen ikinci mantar türüdür (Eren ve Pekşen, 2019). Diğer yetiştiriciliği yapılan mantar türleri ile kıyaslandığında *Pleurotus* mantarı yetiştiriciliğinin birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar, diğer türlere göre yetiştiricilik süresinin kısa olması, farklı sıcaklık koşullarında yetiştirilebilen çeşitlerin varlığı, iptidai koşullara ve hastalıklara olan dayanımı ve üretim maliyetinin düşük olmasıdır (Ragunathan vd., 1996; Sánchez, 2010).

Son zamanlarda farklı lignoselülozik materyaller üzerinde istiridy mantarı yetiştiriciliği yoğun çalışılmaktadır (Pereira vd., 2017; Postemsky vd., 2017; Sardar vd., 2017). Diğer mantar türlerinde olduğu gibi *Pleurotus* türlerinin de yapılarında lignoselülozik bileşenleri çözebilen enzimler bulunmaktadır. Bu sayede tarımsal atıklar (mısır koçanı, buğday sapı, yarfıstığı kabuğu, çay atığı, soya sapı vb.) yetiştiricilik ortamı olarak kullanılarak geri dönüşüme katkı sağlanmaktadır (Kibar, 2016; Yang vd., 2016). *Pleurotus* türlerinde fındık zuru, sarımsak atıkları, çay yaprakları, pamuk samanı, buğday samanı, pirinç samanı ve muz yaprakları kullanılarak oluşturulan yetiştiricilik ortamlarından yüksek verim alındığı çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Kamthan ve Tiwari, 2017; Pekşen ve Küçükomuzlu, 2004; Sanli ve Pekşen, 2018).

Bu bilgiler ışığında bu çalışmada; *Pleurotus* cinsine ait en fazla üretimi yapılan *P. ostreatus* (gri) ve henüz ülkemizde ticari olarak üretimi yapılmayan *P. citrinopileatus*'un (sarı) iki suşunun, her biri için 2 farklı tarımsal atık reçetesinde yetiştiricilik koşulları denenmiş, verim ve kalite parametreleri incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Çalışma, 2021-2022 yılları arasında, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü'nde tam iklim kontrollü mantar yetiştirme odaları ve Prof. Dr. Saadet BÜYÜKALACA doku kültürü laboratuvarında yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan suşlar, orijinal kodları, temin edildiği yerler ve harflendirilmiş ve Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Suşlar, Harflendirilmesi, Türü ve Temin Edildiği Yerler

Harflendirme	Original kodu	Tür	Temin edildiği yer
A	M2502	<i>P. citrinopileatus</i>	Mycelia Spawn Company-Belçika
B	3040	<i>P. citrinopileatus</i>	Sylvan Spawn Company
C	Yaprak 77	<i>P. ostreatus</i>	Atatürk Bahçe Kùltürleri Merkez Araştırma Enstitüsü

Yöntem

Yetiştirme Ortamlarının Hazırlanması

Çalışmada ele alınan her üç suş için de meşe talaşı ve buğday sapı ayrı ayrı kullanılarak, 2:1 oranında buğday kepeği ve %5 oranında soya unu eklenerek yetiştiricilik ortamları hazırlanmıştır. Kullanılan tarımsal atıkların kepekle karışımları, Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Suşlar ve Yetiştiricilik Ortamlarının İçerikleri

Kullanılan Suşlar	Yetiştiricilik Ortamları
<i>Pleurotus citrinopileatus</i> (A)	2 Meşe talaşı + 1 Buğday kepeği (P1A) 2 Buğday sapı +1 Buğday kepeği (P2A)
<i>Pleurotus citrinopileatus</i> (B)	2 Meşe talaşı + 1 Buğday kepeği (P1B) 2 Buğday sapı +1 Buğday kepeği (P2B)
<i>Pleurotus ostreatus</i> (C)	2 Meşe talaşı + 1 Buğday kepeği (P1C) 2 Buğday sapı +1 Buğday kepeği (P2C)

Yetiştirme ortamlarının hazırlanmasında tartımlar yapılmış ve her ortamın nem değerleri yaklaşık %70 olacak şekilde çeşme suyu ile belli aralıklarla ıslatılmıştır. Ortam pH’sını ayarlamak amacıyla da her ortama %1 oranında kireç ilavesi yapılmıştır.

Sterilizasyon ve Misel Aşılması

Hazırlanan yetiştirme ortamları, yüksek basınç ve sıcaklık koşullarına dayanıklı polipropilen torbalara 1 kg olacak şekilde doldurulmuş ve sterilizasyon amacıyla 121°C’de 1.2 atm basınç altında 1 saat boyunca otoklavda steril edilmiştir. Yetiştiricilik ortamları 25 °C’ye soğuduktan sonra her bir torbaya yaklaşık 25-30 g tohumluk misel ekimi yapılmıştır.

Misel Gelişimi ve Hasat

Misel ekimi tamamlanan yetiştiricilik torbaları, %70-80 nem ve 22±1°C sıcaklıktaki mantar yetiştirme odalarında misel gelişimi sağlanana kadar bekletilmiştir. Miseller torbaların etrafını tamamen kapladıktan sonra, oda sıcaklığı 18±1°C’ye düşürülmüştür. İlk primordiumların oluşumundan sonra üretim odası havalandırılıp, odanın nem oranı %90-95 aralığında tutulmuştur. Nemlendirme işlemi otomasyona bağlı nem cihazı ile otomatik olarak yapılmıştır. Misel sarım döneminde yetiştiricilik odası karanlık iken ilk primordiumların oluşumundan itibaren 200 lüks şiddetinde, floresan lamba 12 saat açık tutularak aydınlatma gerçekleştirilmiştir. Misel sarımının gerçekleşmesinden itibaren primordium oluşumunu teşvik etme amacıyla, yetiştiricilik torbaları 4 farklı yöneyden 5'er cm genişliğinde kesilmiş ve torbaların ağzı açılmıştır. Yetiştiricilik ortamlarında gelişen *Pleurotus* mantarlarına ait görüntüler Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Yetiştiricilik Ortamlarında Gelişen *Pleurotus citrinopileatus* ve *Pleurotus ostreatus* Mantarları

Çalışmada Yapılan Ölçümler

Mantar kalitesi ve toplam verim ile ilgili yapılan ölçümler Ağaoglu vd. (1992)'a göre yapılmıştır.

Toplam Verim

Çalışma boyunca ± 0.01 g duyarlılıkta terazide, her bir uygulama ve tekerrürden günlük hasat sonucu elde edilen mantarların tartımı sağlanmıştır. Hasat sonucunda elde edilen mantarların ağırlığı her uygulama için ayrı ayrı hesaplanıp, toplam verim miktarı hesaplanmıştır.

Mantar Ağırlığı

Hasat edilen mantarlardan 10 adet örnekte, şapka ve sapın birlikte terazide g olarak tartılması ile gerçekleştirilmiştir.

Şapka Çapı

Hasat edilen mantarlardan 10 adet örnekte, şapkanın en geniş ve en dar yerinden ± 0.1 mm duyarlılıktaki kumpas ile mm olarak ölçümler yapılarak ortalamaları hesaplanmıştır.

Sap Uzunluğu

Hasat edilen mantarlardan 10 adet örnekte, sapın şapka ile ortam yüzeyine bağlandığı yer arasındaki mesafe mm cinsinden sap uzunluğu olarak saptanmıştır.

Sap Çapı

Hasat edilen mantarlardan 10 adet örnekte, sapın şapka ve ortam yüzeyi ile birleştiği kısım ile sapın orta noktasından kumpas yardımıyla mm olarak yapılmıştır.

Kuru Madde

Kuru madde tayinleri, ilk hasat edilen mantarlara yapılmıştır. Buna göre mantarlar hassas terazide tartıldıktan sonra 65°C 'ye ayarlanmış gıda kurutucularında sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulduktan sonra tartımı yapılmış ve kuru madde miktarları belirlenmiştir.

pH Analizi

Yetiştiricilik ortamlarının özelliklerini tespit etmek amacıyla ortamlara 3 farklı dönemde (otoklav sonrası, misel sarım sonrası ve hasat sonu) pH analizi yapılmıştır. 10 g örnek her bir ortam için tartılıp, 100 ml saf su içerisinde 90 dakika bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda karışımın suyu süzülerek pH ölçümü yapılmıştır.

Nem İçeriği

Hazırlanan her bir ortamdan alınan örneklerin yaş ağırlıkları belirlendikten sonra ağırlığı sabitlenene kadar 65°C 'de etüvde kurutulmuştur. Belirlenen kuru ağırlıklar 100'den çıkartılarak, ortamların % nem içerikleri tespit edilmiştir.

Deneme Deseni ve İstatistiksel Değerlendirme

Çalışma, Tesadüf Parselleri Deneme Desenine göre 3 tekerrürlü ve her bir tekerrürde 4 torba olacak şekilde planlanmıştır. Sonuçlar, JMP istatistik paket programında analiz edilmiştir. İstatistiki açıdan önemli olduğu belirlenen verilere LSD testi yapılarak harflendirme yapılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

P. citrinopileatus-M2502

P. citrinopileatus-M2502 mantarının üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla kullanılan farklı yetiştiricilik ortamlarının pH ve nem (%) oranları Tablo 3'te verilmiştir. pH analizi sonucunda ortamlar ve dönem interaksyonu arasındaki farklılıklar istatistiki açıdan önemli, dönemlerin ortalamaları arasındaki farklılıklar ise önemsiz bulunmuştur.

P2A ortamının otoklav sonrası döneminden en yüksek pH değeri (6.43) elde edilmiştir. En düşük pH değeri ise P2A ortamının misel gelişim sonrası (5.28) ve hasat sonu (5.24) dönemlerinden elde edilmiştir. Dönemler kendi aralarında kıyaslandığında ise otoklav sonrası dönemde pH değeri yüksek çıkarken, misel gelişim ve hasat sonrasında pH'nın düştüğü dikkat çekmiştir.

Yetiştiricilik ortamlarının nem (%) değerleri incelendiğinde, ortamlar ve dönem arasındaki farklılıklar önemli bulunurken, interaksyon önemli bulunmamıştır. P1A ortamının nem içeriğinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Dönemlerin ortalaması incelendiğinde ise en fazla nem içeriğinin otoklav sonrası (%73.18) dönemde olduğu, bunu misel gelişim sonrasında (%70.40) takip ettiği dikkat çekmiştir.

Hasat sonunda nem miktarının önemli oranlarda düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni, mantar gelişiminin sağlanması için torbaların ağzlarının açılması olarak açıklanabilir.

Tablo 3. *P. citrinopileatus*-M2502 Mantarının Üretildiği Farklı Yetiştiricilik Ortamlarının pH ve Nem Miktarı (%)

Ortam	Dönem pH				Dönem Nem (%)			
	OS	MGS	HS	Ort.	OS	MGS	HS	Ort.
P1A	6.10b	5.59c	5.43cd	5.71	75.56	66.18	75.69	72.47A
P2A	6.43a	5.28d	5.24d	5.65	70.80	64.49	65.10	66.80B
Ort.	6.27A	5.44B	5.34B		73.18A	70.40A	65.33B	
LSD _{zam} ***= 0.21, LSD _{atk} =Ö.D., LSD _{zamxatk} *=0.30					LSD _{zam} **= 4.60, LSD _{atk} **= 3.73, LSD _{zamxatk} = Ö.D.			

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

* $P < 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$, Ö.D: Önemli Değil, OS: otoklav sonrası, MGS: misel gelişimi sonrası, HS: hasat sonu, Ort: ortalama

Farklı yetiştiricilik ortamlarında üretilen *P. citrinopileatus*-M2502 mantarının şapka çapı (mm), sap uzunluğu (mm), sap çapı (mm), mantar ağırlığı (g), verim (g/kg) ve kuru madde miktarı (%); Tablo 4'te verilmiştir. *P. citrinopileatus*-M2502 mantarı için değerlendirilen kalite parametrelerinin hepsi istatistiki olarak önemli bulunmuştur.

Şapka çapı en geniş mantarlar 57.03 mm ile P2A ortamından elde edilirken, P1A ortamından elde edilen mantarların şapka çapının ortalama 51.06 mm olduğu belirlenmiştir. Sap uzunluğu açısından en uzun mantarların P2A (51.48 mm) ortamında olduğu tespit edilmiştir. En kısa mantar sapı uzunlukları ise P1A (35.72 mm) ortamından elde edilmiştir. Sap çapı en geniş olan mantarlar 12.88 mm ile P2A ortamında bulunurken, en düşük olanlar 9.81 mm ile P1A ortamında olduğu tespit edilmiştir. P1A ortamından hasat edilen mantarların ağırlığının en fazla olduğu (17.08 g), bunu P2A (13.10 g) ortamının takip ettiği saptanmıştır.

Her iki uygulamadan da alınan verim değerleri kıyaslandığında, 111.95 g/kg ile P1A ortamından en yüksek, 108.41 g/kg ile P2A ortamından en düşük değerler elde edilmiştir. Mantarların kuru madde miktarları incelendiğinde, en yüksek değerlerin P1A (%18.35) ortamında olduğu dikkat çekmiştir. P2A ortamından elde edilen mantarların kuru madde miktarları ortalamasının %13.95 olduğu tespit edilmiştir.

Atila (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı yetiştiricilik ortamlarının *P. djamor*, *P. citrinopileatus* ve *P. eryngii* yetiştiriciliğinde kullanımını değerlendirilmiştir. Çalışmada, *P. djamor*'da verimin 87.5-258.1 g/kg arasında, *P. citrinopileatus*'da 146-199 g arasında ve *P. eryngii*'de 140.2-234

g arasında olduğu bildirilmiştir. Aynı çalışmada, ortalama mantar ağırlığının ise *P. djamor*'da 11.5-17.6 g arasında, *P. citrinopileatus*'de 3.4-4.8 g arasında ve *P. eryngii*'de 54.7-74.9 g arasında olduğu belirtilmiştir.

Freitas vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, *P. citrinopileatus* mantarının verimi 25.1 g/100 g olarak bildirilmiştir. Dissasa (2022) dört farklı yetiştiricilik ortamını kullandığı çalışmasında, *P. citrinopileatus* türünün toplam veriminin 250.36-550 g arasında olduğunu bildirmiştir. Freitas vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, *P. citrinopileatus* mantarının kuru madde miktarının 9.7 g/100 g olduğu belirtilmiştir.

Çalışma bulguları incelendiğinde *P. citrinopileatus*-M2502 mantarının şapka çapı, sap uzunluğu ve sap çapının en yüksek olduğu ortam P2A (2 Buğday sapı +1 Buğday kepeği) olarak tespit edilmiştir. Mantar ağırlığı, verim ve kuru madde miktarı bakımından en yüksek değerler P1A (2 Meşe talaşı + 1 Buğday kepeği) ortamından elde edilmiştir. Mantar veriminin 63.65 g/kg ile 142.73 g/kg arasında değiştiği tespit edilmiş ve literatürle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4. Farklı Yetiştiricilik Ortamlarında Üretilen *P. citrinopileatus*-M2502 Mantarının Şapka Çapı (mm), Sap Uzunluğu (mm), Sap Çapı (mm), Mantar Ağırlığı (g), Verim (g/kg) ve Kuru Madde Miktarı (%)

Ortam	Şapka Çapı (mm)	Sap Uzunluğu (mm)	Sap Çapı (mm)	Mantar Ağırlığı (g)	Verim (g/kg)	Kuru Madde Miktarı (%)
P1A	51.06b	35.72b	9.81b	17.08a	111.95a	18.35a
P2A	57.03a	40.34a	12.88a	13.10b	108.41b	13.95b
LSD	3.25**	2.40 **	2.27*	3.98**	3.37*	3.45**

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur
* $P < 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$, Ö.D: Önemli Değil

Pleurotus citrinopileatus-3040

P. citrinopileatus-3040 mantarının üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla kullanılan farklı yetiştiricilik ortamlarının pH ve nem (%) oranları Tablo 5'te sunulmuştur. pH analizi sonucunda ortamlar ve dönem etkisiyle dönemlerin ortalamaları arasındaki farklılıklar istatistiksel açıdan önemli bulunurken, ortamların ortalaması önemsiz bulunmuştur.

pH değerinin en yüksek olduğu dönem otoklav sonrası (6.26) olarak bulunmuş ve bunu misel gelişim sonrası (5.58) ve hasat sonu (5.23) dönemleri takip etmiştir.

Yetiştiricilik ortamlarının nem değerleri kıyaslandığında ise dönemler, ortamlar ve etkileşimler arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli olmadığı dikkat çekmiştir. Kullanılan yetiştiricilik ortamlarının nem içeriğinin %70.75-74.84 arasında olduğu saptanmıştır.

Ragunathan ve Swaminathan (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, üç farklı *Pleurotus* türü farklı ortamlarda yetiştirilmiştir. Kullanılan yetiştiricilik ortamlarının nem içeriğinin *P. sajor-caju* için 90.14 ile 93.08 g/kg arasında, *P. platypus* için 90.84 ile 92.08 g/kg arasında ve *P. citrinopileatus* için 90.08 ile 92.87 g/kg arasında olduğu bildirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yetiştiricilik ortamlarının nem içeriği literatüre göre daha düşük bulunmuştur.

Tablo 5. *P. citrinopileatus*-3040 Mantarının Üretildiği Farklı Yetiştiricilik Ortamlarının pH ve Nem Miktarı (%)

Ortam	Dönem pH				Dönem Nem (%)			
	OS	MGS	HS	Ort.	OS	MGS	HS	Ort.
P1B	6.10b	5.60c	5.26d	5.65	75.56	74.71	74.26	74.84
P2B	6.43a	5.55c	5.20d	5.73	70.80	69.21	72.23	70.75
Ort.	6.26A	5.58B	5.23C		73.18	71.96	73.24	
LSD _{zam} ***= 0.18, LSD _{atk} =Ö.D., LSD _{zamxatk} = Ö.D.					LSD _{zam} = Ö.D., LSD _{atk} = Ö.D., LSD _{zamxatk} = Ö.D.			

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur * $P < 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$, Ö.D: Önemli Değil, OS: otoklav sonrası, MGS: misel gelişimi sonrası, HS: hasat sonu, Ort: ortalama

Farklı yetiştiricilik ortamlarında üretilen *P. citrinopileatus*-3040 mantarının şapka çapı (mm), sap uzunluğu (mm), sap çapı (mm), mantar ağırlığı (g), verim (g/kg) ve kuru madde miktarı (%) Tablo 6'da verilmiştir. Her bir uygulamadan elde edilen mantarlara yapılan ölçümler sonucunda şapka çapı, mantar ağırlığı ve verim parametreleri aralarındaki farklılıkların istatistiki açıdan önemli olduğu saptanmıştır.

Şapka çapı en geniş olan mantarlar P2B (62.29 mm) ortamından hasat edilmiştir. P1B ortamında oluşan mantarların şapka çapının (53.60 mm) daha dar olduğu tespit edilmiştir. Hasat edilen mantarların sap uzunlukları ortalamalarının 38.12 mm ile 37.26 mm arasında olduğu ve ortamlar arasındaki farklılıkların istatistiki olarak önemli bulunmadığı tespit edilmiştir. Hasat edilen mantarların sap çapları incelendiğinde ortalamaların 11.34-10.47 mm arasında değiştiği belirlenmiş ve ortamlar istatistiki olarak aynı grupta yer aldığı saptanmıştır. Mantar ağırlığı en yüksek ortam P2B (13.19 g), en düşük olan ortam P1B (8.62 g) olarak tespit edilmiştir.

Ortamlardan hasat edilen mantarların toplam verim değerlerinin 126.76 ile 159.72 g/kg arasında değiştiği dikkat çekmiştir. En yüksek verim P1B ortamından elde edilmiştir. Her bir uygulamadan hasat edilen mantarların kuru madde oranları değerlendirildiğinde, ortalamalar arasındaki farklılıklar istatistiki olarak önemli bulunmayıp, kuru madde miktarının %10.35-11.99 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Ragunathan ve Swaminathan (2003), *P. sajor-caju*, *P. platypus* ve *P. citrinopileatus* türlerini farklı tarımsal atıklar üzerinde yetiştirmiş ve mantarların toplam verimlerini; sırasıyla 23.32 ile 414.18 g/kg arası, 261 ile 334.5 g/kg arası ve 236.42 ile 315.13 g/kg arası olarak belirlemiştir. İnci vd. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, buğday samanı, kinoa samanı ve bunların 1:1 kg karışımlarıyla oluşturulan ortamlarda *P. citrinopileatus* yetiştirilmiş, toplam verim 13.9-29.6 (g/100 g) arasında tespit edilmiştir. *P. citrinopileatus* yetiştiriciliğinde en iyi ortamın buğday samanı olduğu bulunmuştur.

Çalışma bulguları incelendiğinde toplam verim en yüksek P1B (2 Meşe talaşı + 1 Buğday kepeği) ortamından elde edilmiştir. Sonuçlar literatürü destekler niteliktedir.

Tablo 6. Farklı Yetiştiricilik Ortamlarında Üretilen *P. citrinopileatus*-3040 Mantarının Şapka Çapı (mm), Sap Uzunluğu (mm), Sap Çapı (mm), Mantar Ağırlığı (g), Verim (g/kg) ve Kuru Madde Miktarı (%)

Ortam	Şapka çapı (mm)	Sap Uzunluğu (mm)	Sap Çapı (mm)	Mantar Ağırlığı (g)	Verim (g/kg)	Kuru Madde Miktarı (%)
P1B	53.60b	37.26	10.47	8.62b	159.72a	10.35
P2B	62.29a	38.12	11.34	13.19a	126.76b	11.99
LSD	7,51***	ÖD	ÖD	3.57*	21.27***	ÖD

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

* $P < 0.05$, *** $P \leq 0.001$, Ö.D: Önemli Değil

Pleurotus ostreatus

P. ostreatus mantarının üretim koşullarının belirlenmesi amacıyla kullanılan farklı yetiştiricilik ortamlarının pH ve nem (%) oranları Tablo 7’de verilmiştir. Yetiştiricilik ortamlarına yapılan pH analizi sonucunda, ortamların ortalaması ile ortamlar ve dönem interaksyonu önemsiz bulunurken, dönemlerin ortalamaları arasındaki farklılıkların istatistiki açıdan önemli olduğu tespit edilmiştir. Ortamların pH oranları otoklav sonrası (6.27) dönemde en yüksek bulunurken, hasat sonrası (5.37) dönemde en düşük olarak belirlenmiştir. Ortam-dönem interaksyonuna göre en yüksek pH değeri P2-D ortamında (6.43) tespit edilmiştir.

Yetiştiricilik ortamlarının nem içerikleri dönem, ortamlar ve dönem x ortam arasındaki interaksyonda istatistiki olarak önemli bulunmuştur. P1C (%77.35) ortamının nem içeriği en yüksek olarak belirlenmiştir. Dönemler kıyaslandığında ise en yüksek nem içeriğinin hasat sonunda (%77.53) olduğu dikkat çekmiştir.

Kurt ve Büyükalaca (2010) tarafından yapılan bir çalışmada; asma budama atığı, buğday sapı, susam sapı ve talaş ile oluşturulan yetiştiricilik ortamlarının pH değerleri 6.00 ile 6.95 arasında, nem değerleri ise %62.96 ile 73.35 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 7. *P. ostreatus* Mantarının Üretildiği Farklı Yetiştiricilik Ortamlarının pH ve Nem Miktarı (%)

Ortam	Dönem pH (%)				Dönem Nem (%)			
	OS	MGS	HS	Ort.	OS	MGS	HS	Ort.
P1C	6.10b	6.09b	5.42c	5.93	75.56b	75.90b	80.57a	77.35A
P2C	6.43a	6.07b	5.31c	5.87	70.80c	61.43d	74.48b	69.89B
Ort.	6.27A	6.08A	5.37B		73.18B	70.14B	77.53A	
LSD _{zam} ***=0.20, LSD _{atk} =Ö.D., LSD _{zamxatk} = Ö.D.					LSD _{zam} **=3.38, LSD _{atk} ***= 1.73, LSD _{zamxatk} * = 3.00			

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiki olarak önemli bulunmuştur
 ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$, Ö.D: Önemli Değil, OS: otoklav sonrası, MGS: misel gelişimi sonrası, HS: hasat sonu, Ort: ortalama

Farklı yetiştiricilik ortamlarında üretilen *P. ostreatus* mantarlarının şapka çapı (mm), sap uzunluğu (mm), sap çapı (mm), mantar ağırlığı (g), verim (g/kg) ve kuru madde miktarı (%) belirlenmiştir (Tablo 8).

Şapka çapı en geniş mantarlar P2C (73.98 mm) ortamından elde edilmiştir. Sapları en uzun mantarlar P1C (48.60 mm) ortamından elde edilirken, en kısa saplılar ise P2C (45.23 mm) ortamından elde edilmiştir. Sap çapı en yüksek mantarlar P2C (21.03 mm) ortamında, en düşükler ise P1C (13.63 mm) ortamında oluşmuştur. Hasat edilen mantarların ağırlıkları incelendiğinde ortamlar arasındaki farklılıklar önemsiz bulunup, mantar ağırlıklarının 14.82-15.85 g arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Yetiştiricilik ortamlarından hasat edilen mantarların toplam verim sonuçlarına yapılan istatistiki analizler sonucunda, P2C ortamının verim değerinin en yüksek (93.18 g/kg) olduğu tespit edilmiştir. belirlenmiştir. Toplam verimin P1C ortamında ise 74.70 g/kg olduğu belirlenmiştir. Mantarların kuru madde miktarı incelendiğinde, en yüksek değer P2C (%13.81) ortamından, en düşük ise P1C (%8.49) ortamından elde edilmiştir.

Pleurotus türlerinin şapka çapı, sap uzunluğu ve sap çapının tür özelliğine ve yetiştirme koşullarına göre farklılık gösterdiği daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir (Aksu, 2006). Küçükomuzlu (2003) tarafından yapılan bir çalışmada, *P. ostreatus*'un sap çapı 1.12 cm olarak belirlenmiştir. Kurt (2008), *P. ostreatus* mantarının şapka çapını 7.53 ile 7.72 cm arasında, sap uzunluğunu 2.91 ile 4.00 cm arasında, sap çapını ise 1.04 ile 1.12 cm arasında tespit etmiştir.

Yapılan diğer çalışmalarda, *P. ostreatus*'un sap uzunluğunun 1.21-3.92 cm ve sap çapının 8.80-17.41 mm, şapka çapının 6.08 ile 11.12 cm ve şapka uzunluğunun 5.46 ile 13.22 cm arasında olduğu belirlenmiştir (Atila, 2016; Avcı, 2015; Beşikci vd., 2014; Birlik, 2019; Gezer vd., 2016; Kurt, 2008; Küçükomuzlu ve Pekşen, 2005). Kibar (2019), *P. ostreatus*'un şapka enini 9.02 ile 10.46 cm, şapka

uzunluğunu 10.27 ile 13.97 cm, sap uzunluğunu 3.41 ile 4.81 cm ve sap çapını 16.66 ile 28.72 cm arasında olarak belirlemiştir.

P. ostreatus'un mantar ağırlığı ile ilgili yapılan farklı çalışmalarda, 14.19 g (Küçükomuzlu, 2003), 17.0 ile 26.27 g arasında (Kurt, 2008), 22.15 ile 32.42 g arasında (Atila, 2016), 25.10 ile 35.15 g arasında (Birlik, 2019) ve 22.27 ile 29.38 g arasında (Kibar, 2019) sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan farklı çalışmalarda *P. ostreatus*'un verimi, 136-271 g/kg, 246-358 g/kg ve 154-220 g/kg olarak belirlenmiştir (Atila, 2016; Gezer vd., 2016; Kibar vd., 2016). Thongklang ve Luangharn (2016), *P. ostreatus*'u yetiştirmek için en uygun ortamın talaş + pirinç kabuğu olduğunu ve verimin ortalama 277.50 g/800 g olarak belirlendiğini tespit etmişlerdir.

Yamauchi vd. (2018) istiridye mantarının (*P. ostreatus*) yetiştirilmesinde, alternatif bir substrat olarak Moso bambu talaşı kullanımını değerlendirmiş ve verimi 90.3 ile 97.9 (g/600 g) arasında bulmuşlardır. Jin vd. (2018), *P. ostreatus* veriminin 844.40 ile 978.00 g/2.5 kg arasında olduğunu bildirmişlerdir. Kibar (2019), *P. ostreatus* verimini 202.39 ile 330.57 g/kg arasında olarak belirlemiştir. Dissasa (2022) dört farklı yetiştiricilik ortamı kullandığı çalışmada, *P. ostreatus*'un toplam verim değerlerinin 469.63 ile 862 g/1.5 kg arasında olduğunu bildirmiştir.

Çalışma bulguları literatürle kıyaslandığında, şapka çapında, sap uzunluğunda ve sap çapında daha yüksek değerler elde edildiğini, mantar ağırlıkları ve toplam verim değerlerinin daha düşük olduğu göze çarpmaktadır.

Tablo 8. Farklı Yetiştiricilik Ortamlarında Üretilen *P. ostreatus* Mantarının Şapka Çapı (mm), Sap Uzunluğu (mm), Sap Çapı (mm), Mantar Ağırlığı (g), Verim (g) ve Kuru Madde Miktarı (%)

Ortam	Şapka Çapı (mm)	Sap Uzunluğu (mm)	Sap Çapı (mm)	Mantar Ağırlığı (g)	Verim (g/kg)	Kuru Madde Miktarı (%)
P1C	59.29b	48.60a	13.63b	14.82	74.70b	11.49b
P2C	73.98a	45.23b	21.03a	15.85	93.18a	13.81a
LSA	10.63***	2.27*	6.29***	ÖD	10.57***	1.89*

Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

* $P < 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$, Ö.D: Önemli Değil

Sonuç ve Öneriler

Mantarlar sağlıklı gıda olarak değerlendirilmeleri nedeniyle tüketicilerin, yetiştiriciliğinin iklim koşullarına bağlı kalmadan yapılabilmesi nedeni ile de üreticilerin dikkatini çekmektedir. Renkli *Pleurotus* mantarlarının gıdalardaki görseiliği artırma açısından, halkımız tarafından kabul göreceği düşünülmektedir. Sunulan çalışma, ülkemizde mantar üretimini, tüketimini, pazardaki çeşitliliği artırmak ve ülkemizde yaygın şekilde üretilmeyen mantar türlerinin yetiştiricilik koşullarının belirlenmesini hedeflemiştir. Çalışmada kullanılan üç mantar için de şapka çapı ve sap çapı bakımından en iyi 2 Buğday sapı +1 Buğday kepeği ortamında, toplam verim açısından *P. citrinopileatus* suşlarının en iyi 2 Meşe talaşı + 1 Buğday kepeği ortamında, *P. ostreatus* mantarının ise en iyi verim değerlerinin 2 Buğday sapı +1 Buğday kepeği ortamında olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığında, *Pleurotus* türlerinin şapka çapı, sap uzunluğu, sap çapı, mantar ağırlığı, verim ve kuru madde miktarının yetiştiricilik ortamları içeriğine, katkı oranına, substratın biyolojik yapısına ve kullanılan materyalin tipine bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle *P. ostreatus* ve *P. citrinopileatus* türlerinin yetiştiricilik ortam içeriklerinin belirlenmesi çalışmalarına, farklı bölgelerimizin farklı ürün desenine göre denemeler planlanarak devam edilebilir.

Destek ve Teşekkür

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Koordinasyon Birimi (FYL-2019-12322) tarafından desteklenmiştir. Maddi desteklerinden ötürü Ç.Ü. BAP koordinasyon birimine teşekkür ederiz.

Yazar Katkısı

Ecem Kara, deneysel ortamı hazırladı ve deneysel süreci takip etti. *Gökhan Baktemur*, *Mustafa Kemal Soylu* ve *Hatıra Taşkın*, analizlerin yapılması ve verilerin toplanmasını gerçekleştirdi. Yazarlar makaleyi birlikte yazdı, okudu ve onayladı.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

ORCID

Ecem Kara  <https://orcid.org/0000-0002-0118-2673>

Gökhan Baktemur  <https://orcid.org/0000-0002-0362-5108>

Mustafa Kemal Soylu  <https://orcid.org/0000-0003-3492-0043>

Hatıra Taşkın  <https://orcid.org/0000-0002-1784-4731>

Kaynaklar

Ağaoğlu, Y., İlbay, M.E. ve Uzun, A. (1992, Kasım, 2-4). *Değişik talaş + kepek karışımlarının Pleurotus sajor-caju'nun verimi üzerine etkileri* [Sözlü sunum]. Türkiye IV. Yemeklik Mantar Kongresi, Yalova, Türkiye.

Aksu, Ş. (2006). *Kültür mantarı üretim teknikleri*. Hasad Yayıncılık.

Atila, F. (2017). Evaluation of suitability of various agro-wastes for productivity of *Pleurotus djamor*, *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus eryngii* mushrooms. *Journal of Experimental Agriculture International*, 17(5), 1–11. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2017/36346>

Atila, F. (2016). Effect of different substrate disinfection methods on the production of *Pleurotus ostreatus*. *Journal of Agricultural Studies*, 4(4), 52-64. <http://dx.doi.org/10.5296/jas.v4i4.10051>

Avcı, S. (2015). *Farklı ağaç türlerine ait talaş ortamlarının Pleurotus ostreatus mantarının verimi, kalitesi ve antimikrobiyal aktivitesi üzerine etkileri*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi.

Beşikci, N., Düzkale, Sözbir, G. ve Kanat H. G. (2014). *Farklı lignoselülozik atıklar üzerinde yetiştirilen Pleurotus ostreatus mantarının verim, kalite ve mantar özellikleri üzerine etkisi* [Sözlü sunum]. III. Uluslararası Odun Dışı Orman Ürünleri Sempozyumu, Kahramanmaraş, Türkiye.

Birlik, E. (2019). *Tüý peptonunun istiridy mantarı (Pleurotus ostreatus) yetiştiriciliğinde verim ve kalite özellikleri üzerine etkisi*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Atatürk Üniversitesi.

Carrasco-González, J. A., Serna-Saldívar, S. O. ve Gutiérrez-Urbe, J. A. (2017). Nutritional composition and nutraceutical properties of the *Pleurotus* fruiting bodies: Potential use as food ingredient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 58, 39-81. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.01.016>

Dissasa G. (2022). Cultivation of different oyster mushroom (*Pleurotus* species) on coffee waste and determination of their relative biological efficiency and pectinase enzyme production, Ethiopia. *International Journal of Microbiology*, 2022, 5219939. <https://doi.org/10.1155/2022/5219939>

Eren, E. ve Pekşen, A. (2016). Türkiye'de kültür mantarı sektörünün durumu ve geleceğine bakış. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknolojisi Dergisi*, 4(3), 189-196. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i3.189-196.595>

- Eren, E. ve Pekşen, A. (2019). Türkiye’de kültür mantarı üretimi ve teknolojik gelişmeler. *Mantar Dergisi*, 10(3), 225-233. <https://doi.org/10.30708/mantar.649141>
- Freitas, A. C., Antunes, M. B., Rodrigues, D., Sousa, S., Amorim, M., Barroso, M. F., ... & Gomes, A. M. (2018). Use of coffee by-products for the cultivation of *Pleurotus citrinopileatus* and *Pleurotus salmoneo-stramineus* and its impact on biological properties of extracts thereof. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(8), 1914-1924. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13778>
- Gezer, K., Kaygusuz, O., Bayuk, B. G., Kaygusuz, R. ve Kagün, S. (2016). Bazı aromatik bitki atıklarının *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. (kayın mantarı) yetiştiriciliği üzerine etkisi. *Tarım - Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(3), 204-207. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v4i3.204-207.626>
- İnci, Ş., Kırbağ, S. ve Akyüz, M. (2023). Growth period, yield, and nutrient contents of *Pleurotus citrinopileatus* Singer grown on some local agricultural wastes in Turkey. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 15029–15038. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03374-4>
- Jin, Z., Li, Y., Ren, J. ve Qin, N. (2018). Yield, nutritional content, and antioxidant activity of *Pleurotus ostreatus* on corncobs supplemented with herb residues. *Mycobiology*, 46(1), 24-32. <https://doi.org/10.1080/12298093.2018.1454014>
- Kamthan, R. ve Tiwari, I. (2017). Agricultural wastes-potential substrates for mushroom cultivation. *European Journal of Experimental Biology*, 7(5), 31. <https://doi.org/10.21767/2248-9215.100031>
- Kibar, B. (2016). Farklı yetiştirme ortamlarının *Pleurotus eryngii* mantarının gelişimi ve verimi üzerine etkileri. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 2(1), 1-9. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaws/issue/26976/283547>
- Kibar, B., Akdeniz Duran, H. ve Pekşen, A. (2016). *Pleurotus ostreatus* yetiştiriciliğinde katkı maddesi olarak mısır silajının kullanımı. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 2(1), 10-17. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaws/issue/26976/283548>
- Kibar, B. (2019). Farklı *Pleurotus ostreatus* (İstiridye Mantarı) izolatlarının verim ve bazı kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 5(2), 223-230. <https://doi.org/10.24180/ijaws.647848>
- Kurt Ş. (2008). Değişik tarımsal artıkların kayın mantarı (*Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sajor-caju*) yetiştiriciliğinde kullanım olanakları. [Yayımlanmamış doktora tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Kurt, R., Can, A. ve Sivrikaya, H. (2018). Bartın ilinde kültür mantarı yetiştiriciliğinin mevcut durumu, sorunları ve bazı çözüm önerileri. *Journal of Bartın Faculty of Forestry*, 20(2), 25-33. <https://doi.org/10.24011/barofd.412174>
- Kurt, Ş. ve Büyükalaca, S. (2010). *Değişik tarımsal artıkların Pleurotus ostreatus’un mantar kalite özelliklerine etkisi* [Yayımlanmamış doktora tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Küçükumuzlu, B. (2003). *Sterilizasyon ve formaldehit uygulamaları ile torba ağırlıklarının örtü altında yetiştirilen Pleurotus mantar türlerinin gelişme, verim ve kalitesi üzerine etkileri*. [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Küçükumuzlu, B. ve Pekşen, A. (2005). Yetiştirme ortamı ağırlıklarının *Pleurotus* mantar türlerinin verim ve kalitesi üzerine etkileri. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 20(3), 64-71. <https://dergipark.org.tr/en/pub/omuanajas/issue/20234/214251>
- Öztürk, A. ve Çopur, Ö.U., (2009). Mantar bileşenlerinin teröpatik etkileri. *Bahçe*, 38(1), 19-24. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/bahce/issue/3353/46382>
- Pekşen, A.ve Küçükumuzlu, B. (2004). Yield potential and quality of some *Pleurotus* species grown in substrates containing hazelnut husk. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7(5), 768-771.

- Pereira, G.S., Cipriani, M., Wisbeck, E., Souza, O., Strapazzon, J.O. ve Gern, R.M. (2017). Onion juice waste for production of *Pleurotus sajor-caju* and pectinases. *Food. Bioprod. Proces.* 106, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.08.006>
- Postemsky, P.D., Bidegain, M.A., Gonzalez-Matute, R., Figlas, N.D. ve Cubitto, M.A. (2017). Pilot-scale bioconversion of rice and sunflower agro-residues into medicinal mushrooms and laccase enzymes through solid-state fermentation with *Ganoderma lucidum*. *Bioresour. Technol.*, 231, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.064>
- Ragunathan, R. Gurusamy, R., Palaniswamy, M. ve Swaminathan, K. (1996). Cultivation of *Pleurotus* spp. on various agro-residues. *Food Chem.*, 55, 139-144. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(95\)00079-8](https://doi.org/10.1016/0308-8146(95)00079-8)
- Ragunathan, R. ve Swaminathan, K. (2003). Nutritional status of *Pleurotus* spp. grown on various agro-wastes, *Food Chemistry*, 80(3), 371-375. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00275-3](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00275-3)
- Sánchez, C. (2010). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 1321-1337. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2343-7>
- Sanli, S. ve Peksen, A. (2018). Determining of usability of garlic waste in *Pleurotus eryngii* cultivation and physical-chemical properties of garlic based substrates at different stages of production. *ISHS Acta Horticulturae* 1287, 361-368. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1287.46>
- Sardar, H., Ali, M. A., Anjum, M. A., Nawaz, F., Hussain, S., Naz, S. ve Karimi, S.M. (2017). Agro-industrial residues influence mineral elements accumulation and nutritional composition of king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*). *Scientia Horticulturae*, 225, 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.010>
- Szabová, E., Rohalová, L. ve Hedvigy, M. (2013). Semi-solid fermentation of *Pleurotus ostreatus*. *The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 1950. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/semi-solid-fermentation-pleurotus-ostreatus/docview/1648118578/se-2>
- Thongklang, N. ve Luangharn, T. (2016). Testing agricultural wastes for the production of *Pleurotus ostreatus*. *Mycosphere*, 7(6), 766–772. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/7/6/6>
- Wani, B.A., Bodha, R.H. ve Wani, A.H. (2010). Nutritional and medicinal importance of mushrooms. *Journal of Medicinal Plants Research*, 4(24), 2598-2604. <https://doi.org/10.5897/JMPR09.565>
- Yamauchi, M., Sakamoto, M., Yamada, M., Hara, H., Taib, S. M., Rezaia, S., Md Din, M. F. ve Hanafi, F. H. M. (2018). Cultivation of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) on fermented moso bamboo sawdust. *Journal of King Saud University-Science*, 31(4), 490-494. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.04.021>
- Yang, D., Liang, J., Wang, Y., Sun, F., Tao, H., Xu, Q., Zhang, L., Zhang, Z., Ho, C.T. ve Wan, X. (2016). Tea waste: An effective and economic substrate for oyster mushroom cultivation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(2), 680-684. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7140>

Düz Bir Levhaya Çarpan Sınırlandırılmamış ve Sınırlandırılmış Dönmeli Jetlerde Isı Transferi Etkilerinin İncelenmesi

Haluk Keleş¹ , Yücel Özmen² 

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon

Geliş Tarihi / Received Date: 13.07.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 22.12.2023

Öz

Bu çalışmada, düz bir yüzeye çarpan sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış türbülanslı dönmeli hava jetlerinde çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Reynolds sayısının $Re = 20000$ ve 30000 değerleri, lüle-levha arası açıklığın $H/D = 0.5, 1, 3$ ve 6 değerleri ve boyutsuz dönme sayısının $S = 0.125, 0.26$ ve 0.52 değerleri için çarpma levhası yüzeylerinde termal kamera ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın, sınırlayıcı levha durumunun ve boyutsuz dönme sayısının çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır. İncelenen tüm akış alanlarında, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin artan Reynolds sayısı ile arttığı, artan lüle-levha arası açıklık ile azaldığı görülmüştür. Akış alanlarında sınırlayıcı levhanın varlığı, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azaltmaktadır. Boyutsuz dönme sayısı arttıkça, çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir. Çarpma levhası üzerinde üniform dağılıma en yakın Nusselt dağılımı görüntüsü, $H/D=3$ ve $S=0.52$ değerlerinde oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: çarpan dönmeli jet, sınırlayıcı levha, Nusselt dağılımı

Investigation of Heat Transfer Effects in Unconfined and Confined Swirling Jets Impinging on a Flat Plate

Abstract

In this study, the heat transfer effects on the impingement surfaces of unconfined and confined turbulent swirl air jets impacting a flat surface are experimentally investigated. For Reynolds numbers $Re = 20000$ and 30000 , nozzle-to-plate spacings $H/D = 0.5, 1, 3$ and 6 and dimensionless swirl number $S = 0.125, 0.26$ and 0.52 , temperature measurements were performed with a thermal camera on the impingement plate surfaces. From the temperature distributions obtained, the effects of Reynolds number, nozzle-to-plate spacing, the presence of confinement plate and dimensionless swirl number on the Nusselt distributions on the impingement plate were investigated. In all flow fields investigated, it was observed that the Nusselt values on the impingement plate increased with increasing Reynolds number and decreased with increasing nozzle-to-plate spacing. The presence of the confinement plate in the flow fields reduces the Nusselt values on the impingement plate. As the dimensionless swirl number increases, the Nusselt distributions on the impingement plate become more uniform. The Nusselt distribution on the impingement plate is closest to the uniform distribution at $H/D=3$ and $S=0.52$.

Keywords: impinging swirl jet, confinement plate, Nusselt distribution

Giriş

Jet akışları ile doğada ve mühendislik uygulamalarında serbest jet ve bir yüzeye çarpan jet olarak iki farklı şekilde karşılaşılmaktadır. Yüzeye çarpan jetler, genellikle ısıtma ve soğutma işlemlerinde, özellikle yüksek ısı transfer miktarlarının istenildiği durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektronik sistemlerin devrelerinde bulunan transistör, çip ve benzeri elemanlardan kaynaklanan ısı, optimum çalışma sıcaklıklarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu tür elemanların güvenli şekilde çalışabilmeleri ve performanslarının artırılması, ısıl yönden kararlı olmalarına bağlıdır. Çarpan jet akışlarında yüzeyden ısı geçişi, çarpma bölgesinden itibaren yüzey boyunca gittikçe azalmakta ve yüzeyde homojen olmayan bir sıcaklık alanı meydana gelmektedir. Bu tür akışlarda ısı geçiş mekanizması taşınım ağırlıklıdır ve jetin yüzeye çarptığı bölgeden kenarlara doğru ısı taşınım katsayısı azalmaktadır. Elektronik elemanlar üzerinde üniform olmayan sıcaklık dağılımları, iç gerilmelere ve termal kararsızlıklara yol açmakta ve elemanların işlem performansının düşmesine ve ömürlerinin kışalmasına neden olmaktadır. Çarpan jetlerle hem yüksek düzeyde hem de üniform ısı transferini sağlamak amacıyla son yıllarda çarpan dönmeli jetler kullanılmaya başlanmıştır. Dönmeli akışlarla doğada ve birçok endüstriyel uygulamada sıklıkla karşılaşılmaktadır. Dönmeli jetler, normal jetlere göre çevresiyle çok daha hızlı bir karışım performansı göstermektedir. Bu nedenle, havalandırma sistemlerinde etkinliği artırmak için ve gaz türbinlerindeki yakıcılarda alev stabilizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çarpan dönmeli jetler, dönerek ve ilerleyerek hareket etmeleri nedeniyle hem çarpma bölgesini hem de duvar jeti bölgesini genişletmektedir. Çarpan dönmeli jetlerde akış alanı, serbest jet, çarpma alanı, çapraz akış, akış ayrılması, sürüklenme ve zayıflamış akış bölgelerinden oluşmaktadır. Dönme etkisi, akışın radyal olarak açılmasına neden olmaktadır. Yüksek jet hızı ve dönme etkisi dairesel jetlere göre daha fazla sürüklenme etkisi yaratmaktadır. Çarpan dönmeli jet ve dairesel jet durumlarına ait sıcaklık dağılımları karşılaştırıldığında, çarpan dönmeli jetlerin çarpma yüzeyi üzerinde daha üniform bir sıcaklık dağılımı oluşturduğu ve daha yüksek ortalama Nusselt sayısı değerlerine ulaşıldığı görülmektedir (Huang ve El-Genk, 1998).

Çarpan dönmeli jet akışları ile ilgili literatürdeki çalışmalar çoğunlukla deneysel incelemeler şeklindedir. Huang ve El-Genk (1998), dairesel çarpan jet ve dönmeli çarpan jet akışında ısı transferi etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Dönmeli jet durumunda çarpma levhası üzerindeki yerel ve ortalama Nusselt sayılarının daha büyük olduğunu ve levha boyunca üniform bir dağılım gösterdiğini belirtmişlerdir. Lee vd. (2002), dairesel bir lüle içerisine eklenen vida mekanizması ile oluşturulmuş çarpan dönmeli jet akışında ısı transferi karakteristiklerini sıvı kristal yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Dönmeli jet akışının çarpma yüzeyi üzerindeki ısı transferini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Bilen vd. (2002), çarpan dönmeli jet akışında dönmeli geometrideki açının çarpma levhası üzerindeki ısı transferine etkisini tekli ve çoklu jet durumları için sıvı kristal yöntemi ile incelemişlerdir. Dönmeli geometri açısındaki artışın ve çoklu jet durumunun ısı transfer performansını artırdığını belirtmişlerdir. Wen ve Jang (2003), dairesel bir lüleden çıkan dönmeli çarpan jet akışında, çarpma levhası üzerine yerleştirdikleri termoelemanlar ile ısı transferi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Düşük lüle-levha arası açıklıklarda, çarpma bölgesindeki yerel Nusselt sayılarında, dairesel jete göre iyileşmenin olduğunu açıklamışlardır. Çarpan dönmeli jet akışında ısı transferi performansının farklı lüle-levha arası açıklıklarda ve dönmeli geometri açılarında sıvı kristal tekniği kullanılarak incelendiği bir çalışma Senda vd. (2005) tarafından gerçekleştirilmiştir. Artan lüle-levha arası açıklık ve dönmeli geometri açısıyla birlikte, çarpma levhası boyunca Nusselt dağılımının üniform olduğunu belirtmişlerdir. Ianiro ve Cardone (2012), çarpan dönmeli jet akışında, ince folyo şeklindeki çarpma levhası üzerinde akış yapısı ve ısı transferi karakteristiklerini PIV ve termal kamera kullanarak incelemiştir. Lüle içerisine eklenen dönmeli geometri ile oluşturdukları dönmeli jetin, çarpma levhası boyunca sıcaklık dağılımını üniform hale getirdiğini belirtmiştir. Wongcharee vd. (2017) jet akışkanı olarak TiO_2 -su nano karışımını çarpan dairesel ve dönmeli jetlerde kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, sıvı kristal tekniği ile ısı transferi karakteristiklerini incelenmişlerdir. Çarpan dönmeli jetin, dairesel jete göre daha yüksek ısı transfer kapasitesine sahip olduğunu açıklamışlardır. Singh ve Chander (2019), lüle-levha arası açıklık, jetler arası mesafe ve Reynolds sayısı parametrelerinin çarpan çoklu dönmeli jet akışlarındaki ısı transferi üzerine etkisini termal kamera ile

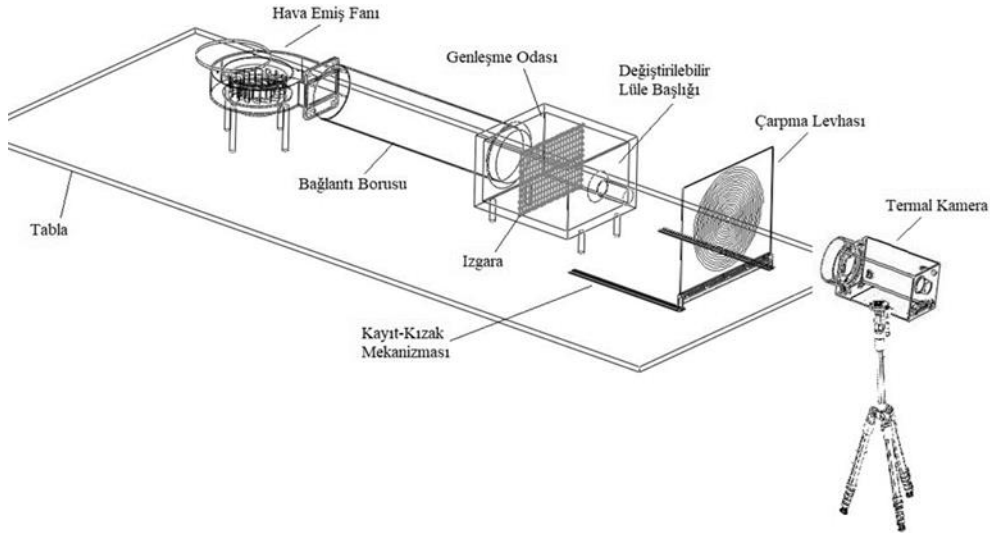
incelemişlerdir. Düşük lüle-levha arası açıklıklarda ve dönmeli geometri açılarında ısı transferinin iyileştiğini ifade etmişlerdir. Mohamed llyas vd. (2019), çarpan dönmeli jet akışında çarpma levhası üzerindeki sıcaklık dağılımlarını sıvı kristal tekniği ile elde ettikleri çalışmalarında, çok küçük lüle-levha arası açıklıklarda dönmeli geometrinin ısı transferi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir.

Wannassi ve Monnoyer (2015) tarafından düz bir yüzeye çarpan dairesel jet ve dönmeli jet akışlarında, akış alanı ve ısı transferi karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada kullanıldıkları SST k- ω türbülans modeli sonuçlarının deneysel veriler ile oldukça uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Zerrout vd. (2017), kılavuz kanat ilavesi ile oluşturdukları tekli ve çoklu çarpan dönmeli jet akışlarında ısı transferi karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. k- ϵ türbülans modeli ile çoklu çarpan dönmeli jetler için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile daha uyumlu olduğunu vurgulamışlardır. Amini vd. (2015), burulmuş şerit eklenerek oluşturulan çarpan dönmeli jet akışında farklı burulma oranları, lüle-levha arası açıklık ve Reynolds sayıları için gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada, çarpma levhası üzerinde ısı transferi karakteristiklerini incelemişlerdir. Düşük lüle-levha arası açıklıklarda ısı transferi performansının arttığını ve artan Reynolds sayısı ile momentum transferinin hızlandığını belirtilmişlerdir.

Bu çalışmada, düz bir yüzeye çarpan sınırlandırılmamış ve sınırlandırılmış türbülanslı dönmeli hava jetlerinde çarpma yüzeylerindeki ısı transferi karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, termal kamera kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada, hem sınırlandırılmamış hem de sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet akışlarında, boyutsuz dönme sayısı etkisi, Reynolds sayısı etkisi ve lüle-levha arası açıklık etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada, dönmeli akış elde etmek amacıyla lüle içerisine yerleştirilen özel kıvrımlı geometrik eklentiler ile çalışmada özgünlük sağlanmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Çarpan dönmeli jet akış alanlarında çarpma levhası üzerindeki ısı transferi etkilerini incelemek amacıyla yatay eksenli çarpan jet akış düzeneği imal edilmiştir. Şekil 1a'da şematik, Şekil 1b'de fotoğraf görüntüsü verilen deney düzeneğinde, fan yardımıyla emilen ortam havası yatay şekilde konumlanmış bağlantı borusundan geçerek genleşme odasına ulaşmaktadır. Lüleden çıkan yatay hava jeti elektriksel olarak ısıtılmış dairesel çarpma levhasına çarpmaktadır. Düşey olarak konumlanmış olan ısıtılmış çarpma levhası, kayıt-kızak mekanizmasıyla yatay doğrultuda hareket ettirilerek lüle-levha arası açıklık değiştirilmektedir. Fan girişine yerleştirilmiş kapağın açıklığı değiştirilerek farklı debiler elde edilmektedir. Sıcaklık ölçümleri, epoksi levhanın arka yüzeyi üzerinde yüzeye dik doğrultuda konumlanmış termal kamera ile gerçekleştirilmektedir.



(a)



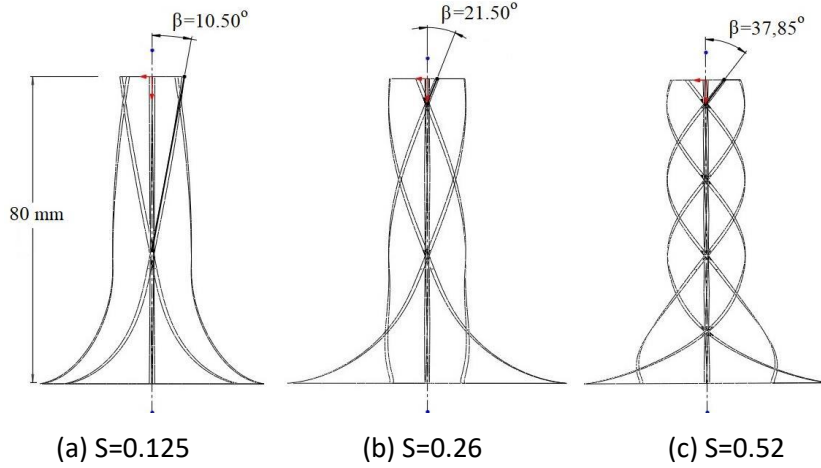
(b)

Şekil 1. Yatay Eksenli Çarpan Jet Akış Düzenekinin Şematik (a) ve (b) Fotoğraf Görünümü

Yatay eksenli çarpan dönmeli jet düzeneğinde, 1.5 mm kalınlığındaki epoksi malzemeden üretilen çarpma levhasının ısıtılacak dairesel bölümünde, üniform sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla baskı devre tekniği kullanılarak 1 mm genişliğe ve 40 μm kalınlığa sahip bakır şeritler ile 180 mm'lik çapa sahip dairesel formda elektriksel devre oluşturulmuştur. Epoksi levhanın ısı iletim katsayısı ve emisivitesi, sırasıyla 0.15 W/mK ve 0.95 dir. Dairesel çarpma levhasının termal kamera tarafındaki arka yüzeyi ise spreyci boya ile mat siyah renge boyanmıştır. Çarpma levhasının dairesel bölümü üzerinde, ayarlı trafo yardımıyla uygulanan 20.3 Volt gerilim ve 2.01 Amper alternatif akımla, 1603.5 W/m²'lik sabit ısı akısı oluşturulmuştur. Çarpma levhasının ısıtılmış dairesel kısmı üzerine üç adet termoeleman yerleştirilmiş ve termoelemanlardan alınan sıcaklık değerleri termal kamera ile karşılaştırılarak emisivite değerleri ayarlanmıştır. Çarpan dönmeli jet düzeneğinde, 20 mm çapa ve 80 mm uzunluğa sahip lüle kullanılmıştır. Dairesel kesitli lüle, dönmeli akış elde etmek amacıyla lüle içerisine yerleştirilen kıvrımlı çubuk eklentileri ve sınırlayıcı düz levha, Creality Ender 3 Pro marka üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Sınırlayıcı düz levha, dönmeli jet lülesinin ucuna sıkı geçme şeklinde monte edilmiştir. Çarpan dönmeli jet akış alanları, dairesel kesitli lülenin içerisine farklı açılara sahip dönmeli geometri eklentilerinin yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu amaçla, üç boyutlu yazıcıda, düşey uzunluğu boyunca kendi eksenini etrafındaki dönüş açıları sırasıyla 90°, 180° ve 360° olmak üzere düşey eksen ile yapmış oldukları açının $\beta = 10.50^\circ$, 21.50° ve 37.50° değerlerinde üç farklı kıvrımlı çubuk eklentisi üretilmiştir. Bu eklentilerin yüzeyleri kabadan inceye doğru zımparalanarak çapaklarından arındırılmış ve yüzey pürüzlülüğü 50 μm seviyesine düşürülmüştür. Şekil 2'de şematik resmi görülen 80 mm uzunluğundaki kıvrımlı çubuk eklentileri, 20 mm çapındaki dairesel kesitli lülenin içerisine sıkı geçme şeklinde monte edilmiştir. Dönmeli jet derecesi, genellikle boyutsuz

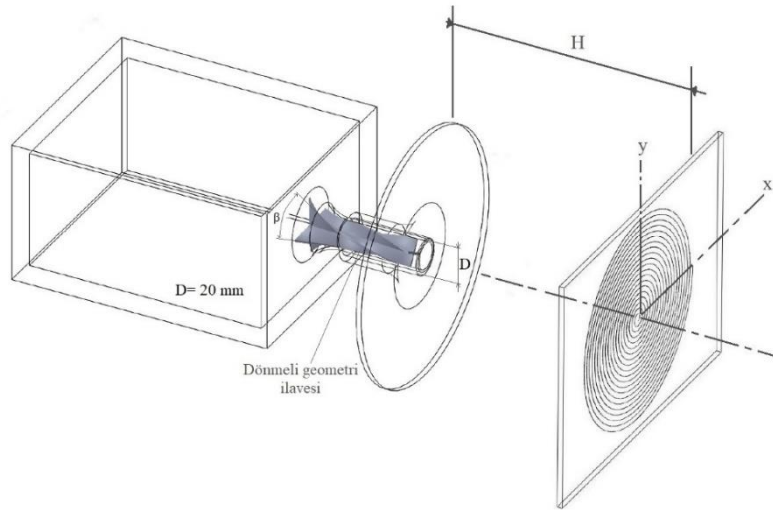
dönme sayısı S ile tanımlanmaktadır. Boyutsuz dönme sayısı, Gupta vd. (1984) tarafından önerildiği şekliyle, Denklem 1’de verilmiştir. Burada, d ve D sırasıyla dönmeli geometri ilavesinin iç ve dış çapını, β ise, dönmeli geometri açısını ifade etmektedir.

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1-(d/D)^3}{1-(d/D)^2} \right) \tan(\beta) \quad (1)$$



Şekil 2. Kıvrımlı Çubuk Eklentilerinin Şematik Görünümü

Çalışma kapsamında yatay eksenli çarpan jet akış düzeneğinde oluşturulan düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet sistemine ait örnek akış alanı şematik olarak Şekil 3’te verilmiştir. Lüleden çıkan hava jeti, sınırlayıcı levhanın ucundan itibaren H mesafesi kadar uzakta olan ve lüle eksenine dik doğrultuda yerleştirilen elektriksel olarak ısıtılan düz levhalara çarpmaktadır.



Şekil 3. Çarpan Dairesel Jet Akış Düzeneğinde Sınırlandırılmış Örnek Akış Alanının Şematik Görünümü

H , lüle-levha arası/levhalar arası açıklığı, D , lüle çapını ve S , boyutsuz dönme sayısını göstermek üzere, çarpan dönmeli jet deneyleri kapsamında, sınırlandırılmamış ve düz levha levha ile sınırlandırılmış, $S = 0.125, 0.26$ ve 0.52 sayısına sahip üç farklı dönmeli geometrik eklenti durumu için, $0.5 \leq H/D \leq 6$ lüle-levha arası/levhalar arası açıklık ve $20000 \leq Re \leq 30000$ Reynolds sayısı aralıklarında çarpma levhası üzerinde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dönmeli geometri eklentisine ait açının, sınırlayıcı levha durumunun, lüle-levha arası/levhalar arası açıklığın ve Reynolds sayısının Nusselt dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çarpma jetlerde Reynolds sayısı, lüle çapına ve lüle çıkışındaki akış hızına göre belirlenmektedir. Çalışma kapsamında incelenen akış alanlarındaki Reynolds sayılarının belirlenmesi amacıyla lüle çıkışlarına yerleştirilen Pitot tüpü ile basınç farkları ölçülerek, lüle çıkışlarındaki jet hızları hesaplanmıştır. Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerleri için, Pitot tüpü ile ölçülen lüle çıkış hızları sırasıyla 15.10 m/s ve 22.65 m/s olarak gerçekleşmiştir.

Isıtılmış durumdaki çarpma levhasına ortam havası sıcaklığındaki jetin çarptırılmasıyla, çarpma levhasından olan ısı transferi etkisi, ısıtılmış çarpma yüzeyinin arka yüzeyi tarafında yüzeye dik doğrultuda konumlanmış termal kamera ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleriyle incelenmiştir. Yüzey sıcaklık ölçümleri, -40°C'den +500 °C'ye kadar ölçüm aralığına ve 0.08 °C hassasiyetine sahip, 240x320 piksel çözünürlüklü, 50 Hz ölçüm hızına sahip FLIR Thermovision A20 model termal kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değerleri, ThermaCAM Researcher Professional paket programı ile kaydedilmiştir. Termal kamera, çarpma levhasının jet tarafındaki yüzeyi üzerine yerleştirilen termoeleman ile kalibre edilmiştir.

Termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin doğrulanması amacıyla, çarpma levhasının her iki yüzeyine toplam üç adet T tipi termoeleman yerleştirilmiştir. Çarpma yüzeyi üzerine yerleştirilen termoeleman ile ölçülen sıcaklık, aynı konumda termal kamera ile ölçülen sıcaklık değeri ile karşılaştırılmış ve çarpma yüzeyindeki 0.98 emisivite değerinde termoeleman ve termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerleri arasındaki farkın ± 1.5 K düzeyinde olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerleri, çarpma levhasındaki yerel sıcaklıkların zamanlara değişmemesi ve akışın kısa sürede sürekli rejime ulaşması nedeniyle 5 dakika süreyle kaydedilmiştir. Çarpma jetlerle ısı transferine yönelik deneysel çalışmalarda, göz önünde bulundurulması gereken faktörlerden biri de sürüklenme etkisidir. Ortam sıcaklığı ile jet akışkanının sıcaklığı arasındaki farkın yüksek olması durumunda ortaya çıkan sürüklenme etkisi, Nusselt sayısı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Çarpma levhasındaki ısı transferi analizinde sürüklenme etkisinin ihmal edilebilmesi için sıcaklık farkının 3 K'den az olması gerekmektedir (Huang, 1996). Bu çalışmada, sürüklenme etkisinin düzeyini belirlemek amacıyla, lüle çıkışına yerleştirilen amacıyla bir adet termoeleman ile jet akışkanının sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda, ortam sıcaklığı ve jet akışkanının sıcaklığı arasındaki farkın 3 K'in altında olması nedeniyle, çarpma levhasındaki sıcaklık ölçümlerinde sürüklenme etkisi ihmal edilmiştir.

Isı Transferi Parametreleri ve Hesaplama Prosedürü

Çalışma kapsamında, lüle çıkışındaki hava jeti hızı U_0 ve lüle çapına göre tanımlanmış Reynolds sayısı sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla hesaplanmıştır.

$$U_0 = \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (3)$$

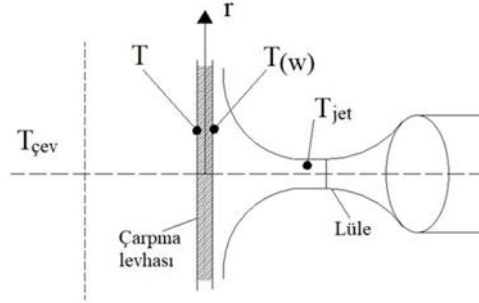
Bu bağıntılarda, ΔP , basınç farkını, ρ , akışkanın yoğunluğunu, μ , dinamik viskoziteyi ve D ise lüle çapını göstermektedir.

Çarpma jet akışlarında, çarpma levhaları üzerindeki ısı transferi etkileri, aşağıda sırasıyla bağıntıları verilen ısı taşınım katsayısı (h) ve boyutsuz Nusselt sayısı (Nu) ile incelenmektedir.

$$h = q_{\text{taşınım}}/A_w(T_w - T_j) \quad (4)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (5)$$

Burada $q_{\text{taşınım}}$, taşınım ile ısı akısını, A_w , ısıtılmış levhanın yüzey alanını, T_w , jet tarafındaki levha sıcaklığını ve T_j , jetin çıkış sıcaklığını ifade etmektedir. Nusselt sayısı ifadesinde yer alan k , havanın ısı iletim katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4'te, düz bir yüzeye çarpan jet akışında, çarpma levhasından ısı transferinde etkili büyüklükler şematik bir görüntü ile verilmektedir. Burada, T , termal kamera ile ölçülen sıcaklığı, $T_{\text{çev}}$, çevre ortamın sıcaklığını ve $T_{(w)}$, jet tarafındaki levha sıcaklığını göstermektedir.



Şekil 4. Çarpan Jetlerde Isı Transferinde Etkili Büyüklükler

$q_{\text{taşınım}}$, taşınım ile ısı akısı, Joule etkisi ile elde edilen ısı akısından (q_{toplam}), ısı kayıpları çıkarılarak hesaplanmaktadır. Çarpma yüzeyindeki enerji dengesinden,

$$q_{\text{taşınım}} = q_{\text{toplam}} - q_{\text{iletim}} - q_{\text{ışınım}} - q_{\text{doğaltaşınım}} \quad (6)$$

elde edilmektedir. Burada, q_{toplam} , toplam ısı akısı miktarını, q_{iletim} , $q_{\text{ışınım}}$ ve $q_{\text{doğaltaşınım}}$ ise sırasıyla çarpma yüzeyinden iletimle, ışımla ve doğal taşınım ile olan ısı kaybını göstermektedir. Epoksi levhaya toplam güç girişi, ayarlı trafo tarafından sağlanan gerilim ve multimetre ile ölçülen levha direnci değerleri kullanılarak hesaplanmakta ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir.

$$Q_{\text{toplam}} = IV = V^2/R \quad (7)$$

Isı kayıpları, levhanın jete maruz kalmayan arka yüzeyi üzerindeki ışımla, iletim ve doğal taşınım etkilerinden kaynaklanmaktadır. Çarpma levhası üzerinde radyal yönde iletimle olan ısı transferi, çarpma levhası malzemesinin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Çarpma levhası ile çevre ortamın sıcaklık değerleri arasındaki fark nedeniyle oluşan ışımla ısı transferi aşağıda verilen Stefan-Boltzmann (Bergman vd., 2011) bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$q_{\text{ışınım}} = \varepsilon A_w \sigma (T_w^4 - T_{\text{çev}}^4) \quad (8)$$

Burada, ε , çarpma levhasının emisivite değerini göstermektedir. Stefan-Boltzmann sabiti $\sigma=5.67 \times 10^{-8}$ [W/(m²K⁴)] değerindedir. Çarpan dairesel jet akış düzeneğinde, düşey konumlandırılan çarpma levhasından doğal taşınım ile olan ısı kaybı, Churchill ve Chu (1975) tarafından aşağıda önerilen ampirik bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 \cdot Ra^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra \leq 10^9 \quad (9)$$

Bu bağıntılarda, Ra ve Pr , sırasıyla Rayleigh sayısını ve Prandtl sayısını ifade etmektedir.

Yukarıda verilen bağıntılar kullanılarak, yatay çarpan jet düzeneğinde, doğal taşınım ve ışımla kayıpları sırasıyla toplam ısı miktarının %3'ü ve %4'ü olarak hesaplanmıştır. Toplam kayıplar, yatay çarpan jet düzeneğinde toplam ısı akısının %7'si değerinde olmaktadır.

Belirsizlik Analizi

Deneyler sırasında yapılan ölçümlerle ilgili belirsizlik analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen Reynolds sayısına ve Nusselt sayısına ait belirsizlikler sırasıyla, $\pm \%2.61$ ve $\pm \% 2.87$ mertebesindedir.

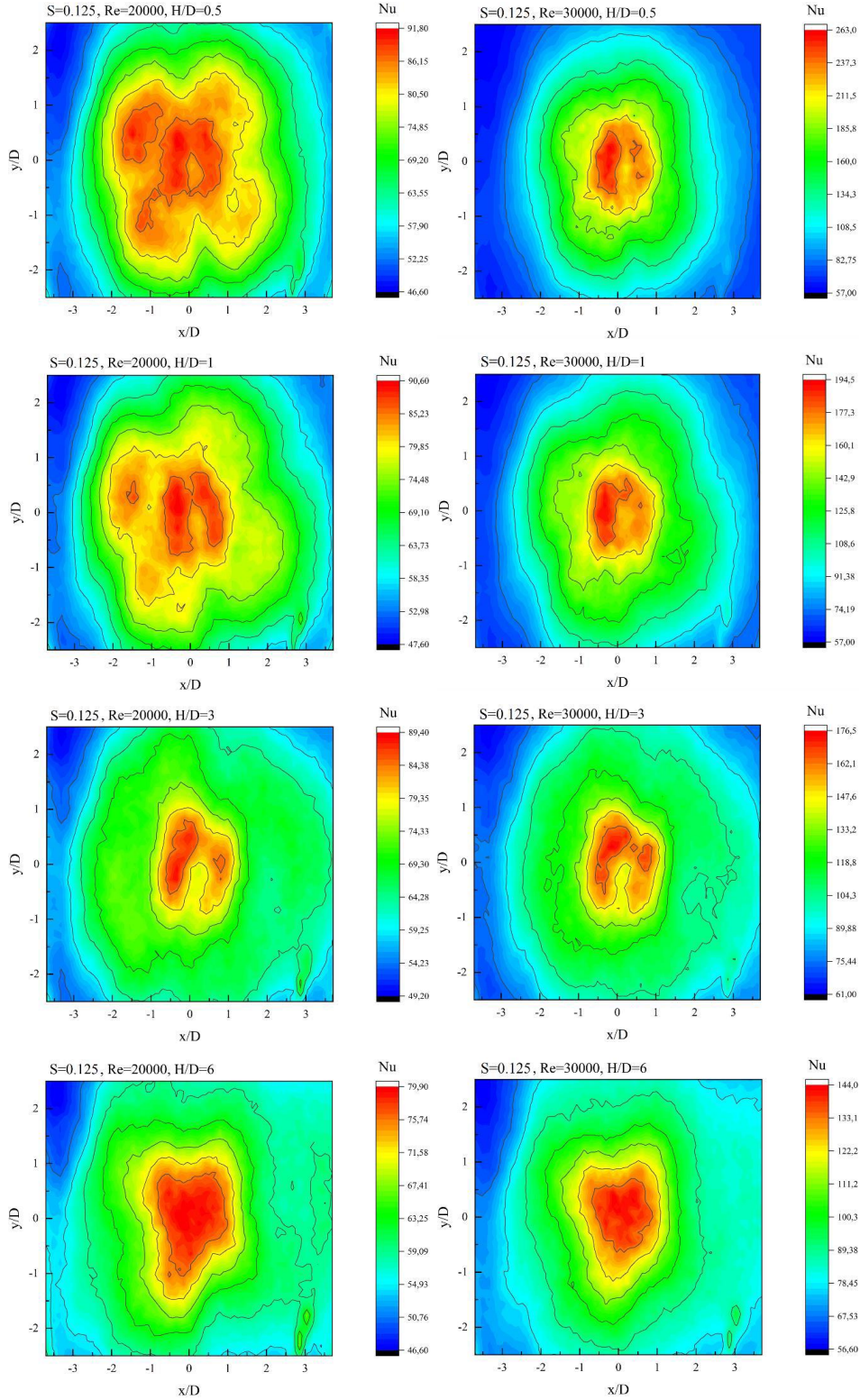
Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, çarpan dönmeli jet akış alanlarında çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İncelenen akış alanlarındaki etkili parametreler için çarpma levhaları üzerinde termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımları, çarpma levhasının tüm yüzeyi boyunca elde edilmiştir. Sıcaklık dağılımlarından elde edilen kontür grafiklerle, dönmeli geometriye ait açının, sınırlayıcı levha durumunun, lüle-levha arası/levhalar arası açıklığın ve Reynolds sayısının çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi incelenmiştir. Çarpan dönmeli jet akışında ısı transferi deneyleri, sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış akış alanlarında Reynolds sayısının $Re = 20000$ ve 30000 değerleri, lüle-levha arası açıklığın / sınırlayıcı levha-çarpma levhası arası açıklığın $H/D = 0.5, 1, 3$ ve 6 değerleri ve dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S= 0.125, 0.26$ ve 0.52 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çarpma levhası üzerindeki sıcaklık değerleri, ısıtılmış çarpma yüzeyinin arka yüzeyi üzerinde yüzeye dik doğrultuda yerleştirilmiş termal kamera kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinden, çarpma levhası üzerindeki boyutsuz Nusselt dağılımları konturlar şeklinde elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar sınırlandırılmamış ve düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet akış alanları için incelenmiştir.

Sınırlandırılmamış Çarpan Dönmeli Jet

Sınırlandırılmamış dönmeli jet akışında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde ve lüle-levha arası açıklığın $0.5, 1, 3$ ve 6 değerlerinde çarpma levhası üzerinde merkezinde çarpma bölgesinin olduğu $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ boyutlarındaki dörtgen alanda ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları, dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S= 0.125, 0.26$ ve 0.52 değerleri için sırasıyla Şekil 5-7'de verilmiştir.

$S=0.125$ boyutsuz dönme sayısına sahip dönmeli geometri ilavesiyle oluşturulan sınırlandırılmamış çarpan dönmeli jet akışında, iki farklı Reynolds sayısı ve dört farklı lüle-levha arası açıklık için çarpma yüzeyi üzerindeki Nusselt dağılımları Şekil 5'de verilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi üzerinde ölçülmüş sıcaklık konturlarından elde edilen Nusselt dağılımlarından, artan Reynolds sayısı ile Nusselt değerlerinin arttığı, artan lüle-levha arası açıklıkla ise Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısında da lüle-levha arası açıklık arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmaktadır. Bu durum, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarının daha üniform hale geldiğini göstermektedir.

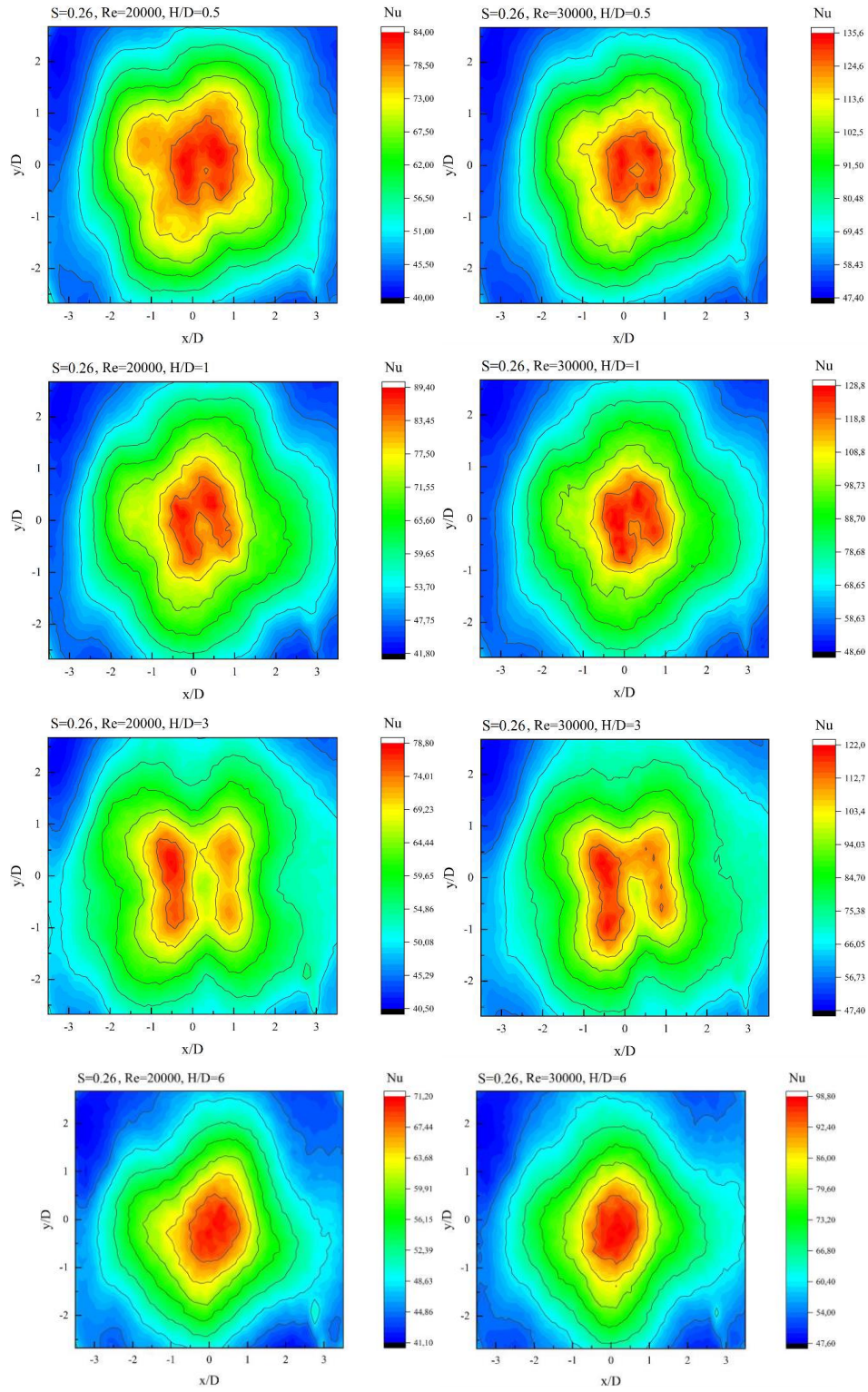


Şekil 5. Sınırlandırılmamış Jet Durumunda, $S=0.125$ 'te, $Re=20000$ ve 30000 ve $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için Nusselt Dağılımları

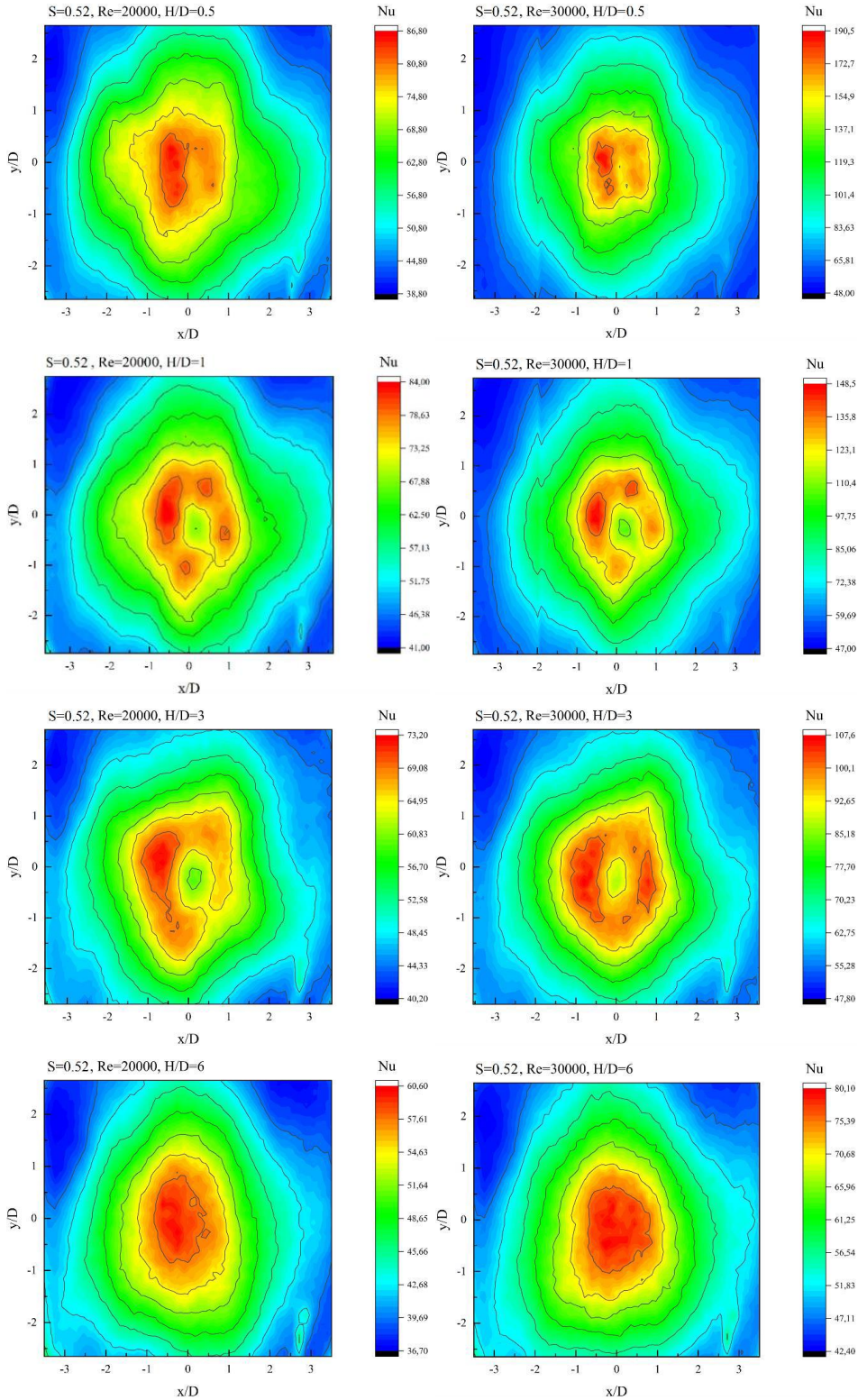
Dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.26$ olduğu durumdaki sınırlandırılmamış çarpan dönmeli jet akışında, dört farklı lüle-levha arası açıklık ve iki farklı Reynolds sayısı için çarpma yüzeyi üzerindeki Nusselt dağılımları Şekil 6'da verilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi üzerinde ölçülmüş sıcaklık konturlarından elde edilen Nusselt dağılımlarından, Şekil 5'teki duruma benzer şekilde, artan Reynolds sayısı ile Nusselt değerlerinin arttığı, artan lüle-levha arası

açıklıkla ise Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısında da lüle-levha arası arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmakta ve Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir.

$S=0.52$ boyutsuz dönme sayısına sahip dönmeli geometri ilavesiyle oluşturulan sınırlandırılmamış çarpan dönmeli jet akışında, iki farklı Reynolds sayısı ve dört farklı lüle-levha arası açıklık için çarpma yüzeyi üzerindeki Nusselt dağılımları Şekil 7'de verilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi üzerinde ölçülmüş sıcaklık konturlarından elde edilen Nusselt dağılımlarından, Şekil 6'daki duruma benzer şekilde, artan Reynolds sayısı ile Nusselt değerlerinin arttığı, artan lüle-levha arası açıklıkla ise Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. Reynolds sayısının her iki değerinde de lüle-levha arası arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmakta ve Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir.



Şekil 6. Sınırlandırılmamış Jet Durumunda, $S=0.26$ 'da, $Re=20000$ ve 30000 ve $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için Nusselt Dağılımları



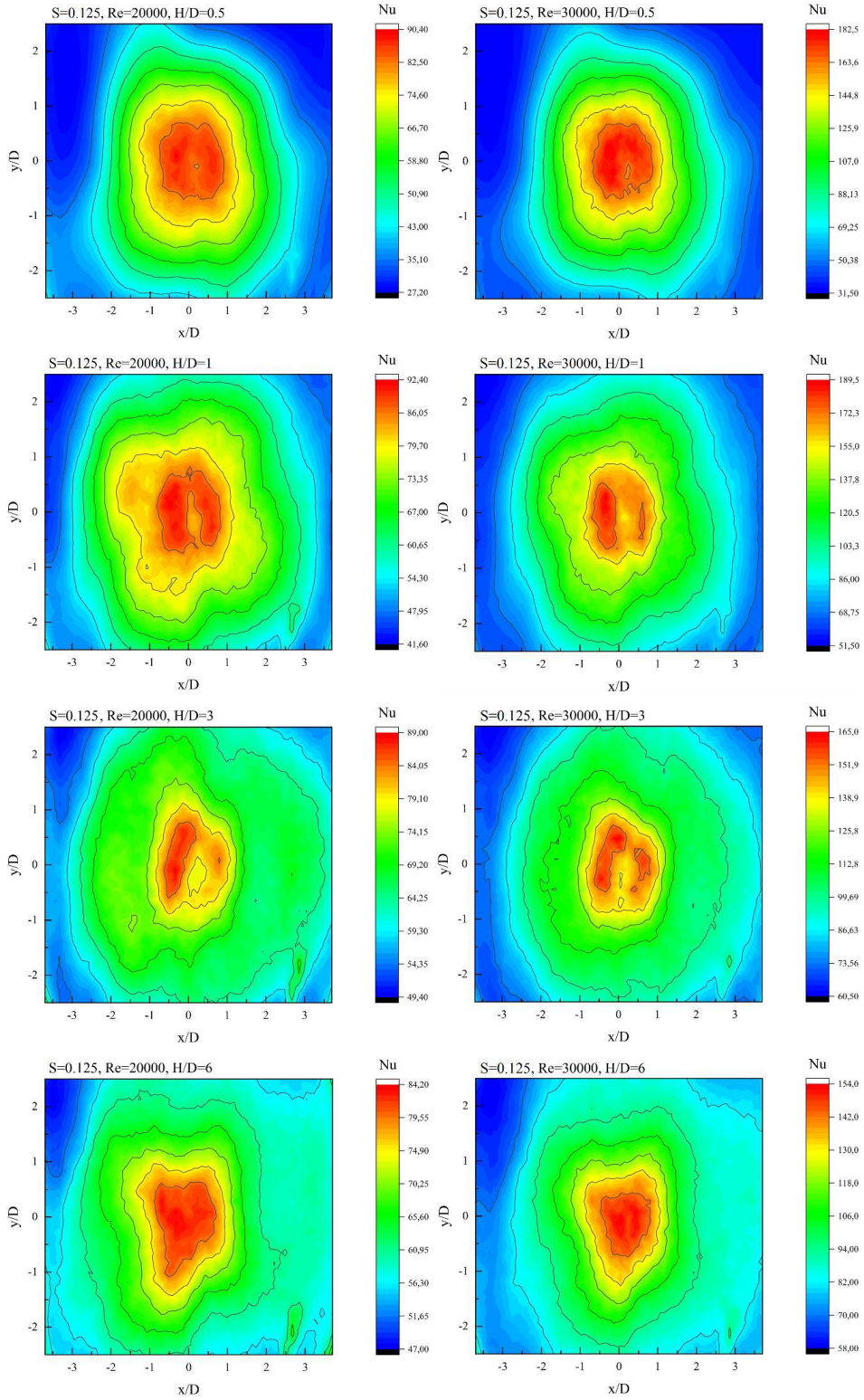
Şekil 7. Sınırlandırılmamış Jet Durumunda, $S=0.52$ 'de, $Re=20000$ ve 30000 ve $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için Nusselt Dağılımları

Sınırlandırılmış Çarpın Dönmeli Jet

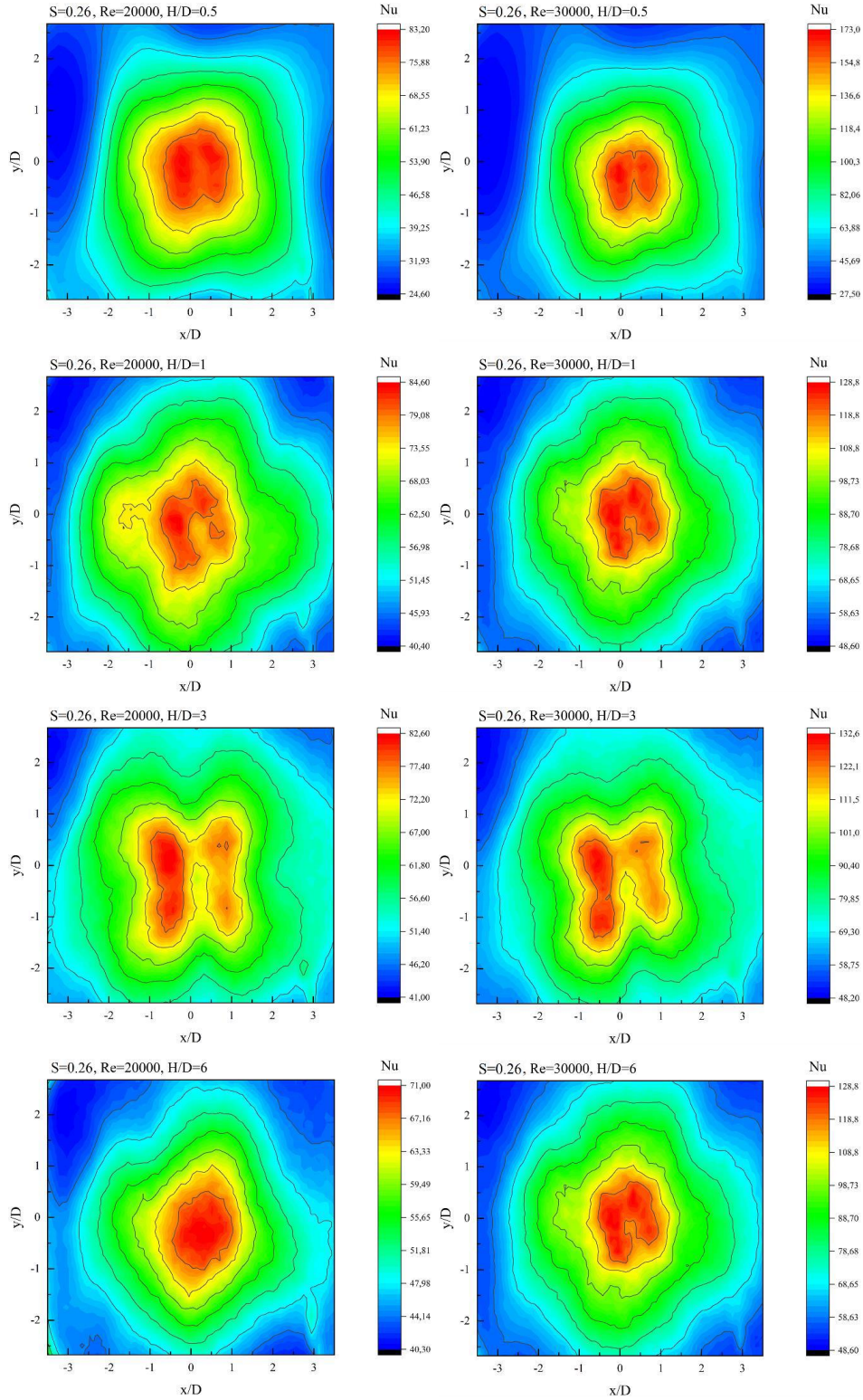
Düz levha ile sınırlandırılmış çarpın dönmeli jet akışında, Reynolds sayısının 20000 ve 30000 değerlerinde ve lüle-levha arası açıklığın $0.5, 1, 3$ ve 6 değerlerinde çarpma levhası üzerinde ölçülmüş sıcaklık değerlerinden elde edilen Nusselt dağılımları, dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $0.125, 0.26$ ve 0.52 değerleri için sırasıyla Şekil 8-10'da verilmiştir.

$S=0.125$ boyutsuz dönme sayısına sahip dönmeli geometri ilavesiyle oluşturulan düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet akışında, iki farklı Reynolds sayısı ve dört farklı lüle-levha arası açıklık için çarpma yüzeyi üzerindeki Nusselt dağılımları Şekil 8’de verilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi üzerinde ölçülmüş sıcaklık konturlarından elde edilen Nusselt dağılımlarından, artan Reynolds sayısı ile Nusselt değerlerinin arttığı, artan lüle-levha arası açıklıkla ise Nusselt değerlerinin $H/D=1$ açıklıktaki küçük bir artış sonrasında azaldığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısında da lüle-levha arası arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmaktadır. Bu durum, artan lüle-levha arası açıklıkla birlikte çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarının daha üniform hale geldiğini göstermektedir.

Dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının 0.26 olduğu durumdaki düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet akışında, dört farklı lüle-levha arası açıklık ve iki farklı Reynolds sayısı için çarpma yüzeyi üzerindeki Nusselt dağılımları Şekil 9’da verilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi üzerinde ölçülmüş sıcaklık konturlarından elde edilen Nusselt dağılımlarından, Şekil 8’deki duruma benzer şekilde, artan Reynolds sayısı ile Nusselt değerlerinin arttığı, artan lüle-levha arası açıklıkla ise Nusselt değerlerinin $H/D=1$ açıklıktaki küçük bir artış sonrasında azaldığı görülmektedir. Her iki Reynolds sayısında da lüle-levha arası arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmakta ve Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir.



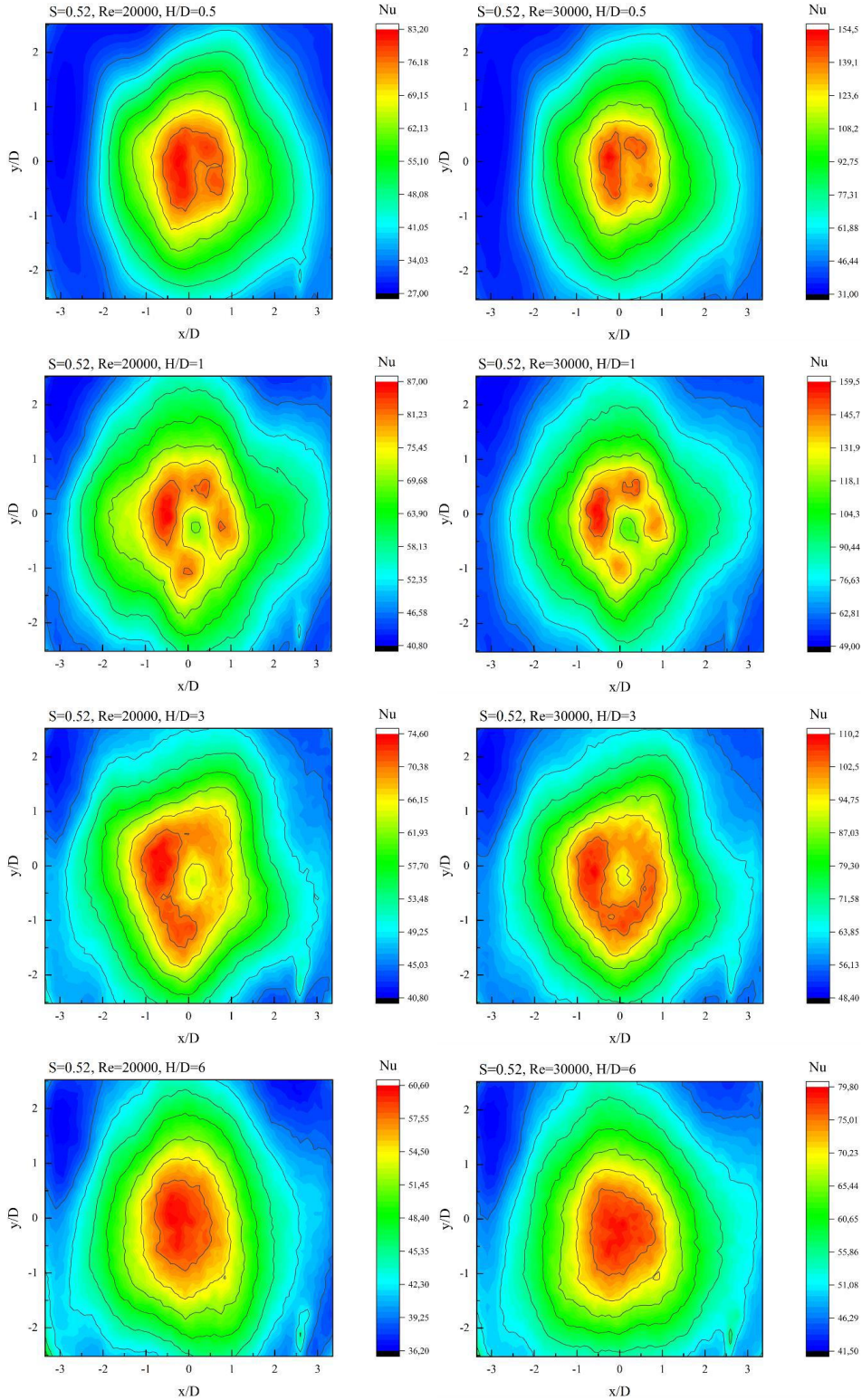
Şekil 8. Düz Levha ile Sınırlanmış Jet Durumunda, $S=0.125$ 'te, $Re=20000$ ve 30000 ve $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için Nusselt Dağılımları



Şekil 9. Düz Levha ile Sınırlanmış Jet Durumunda, $S=0.26$ 'da, $Re=20000$ ve 30000 ve $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için Nusselt Dağılımları

$S=0.52$ boyutsuz dönme sayısına sahip dönmeli geometri ilavesiyle oluşturulan düz levha ile sınırlanmış çarpan dönmeli jet akışında, iki farklı Reynolds sayısı ve dört farklı lüle-levha arası açıklık için çarpma yüzeyi üzerindeki Nusselt dağılımları Şekil 10'da verilmiştir. Çarpma levhasının arka yüzeyi üzerinde ölçülmüş sıcaklık konturlarından elde edilen Nusselt dağılımlarından, Şekil 9'daki duruma benzer şekilde, artan Reynolds sayısı ile Nusselt değerlerinin arttığı, artan lüle-levha arası açıklıkla ise Nusselt değerlerinin $H/D=1$ açıklıktaki küçük bir artış sonrasında azaldığı görülmektedir.

Reynolds sayısının her iki değerinde de lüle-levha arası arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmakta ve Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir.



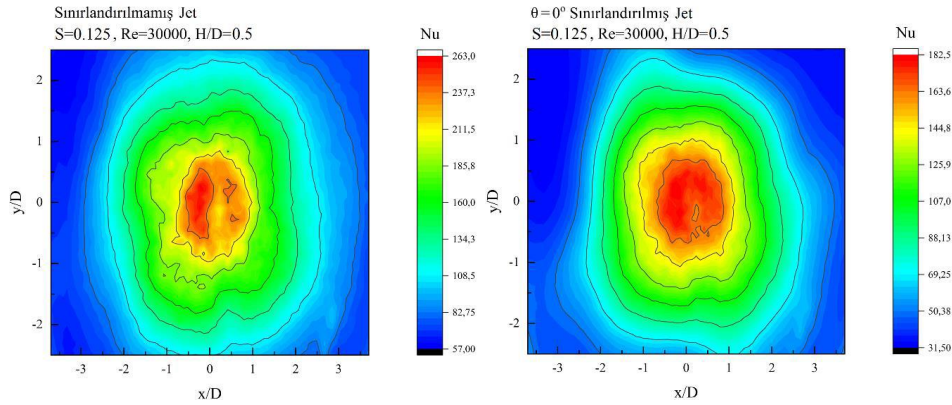
Şekil 10. Düz Levha ile Sınırlanmış Jet Durumunda, $S=0.52$ 'de, $Re=20000$ ve 30000 ve $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 için Nusselt Dağılımları

Çarpan dönmeli jet akışında, sınırlanmamış ve düz levha ile sınırlanmış akış alanlarında Reynolds sayısının $Re = 20000$ ve 30000 değerleri, lüle-levha arası açıklığın / sınırlayıcı levha-çarpma

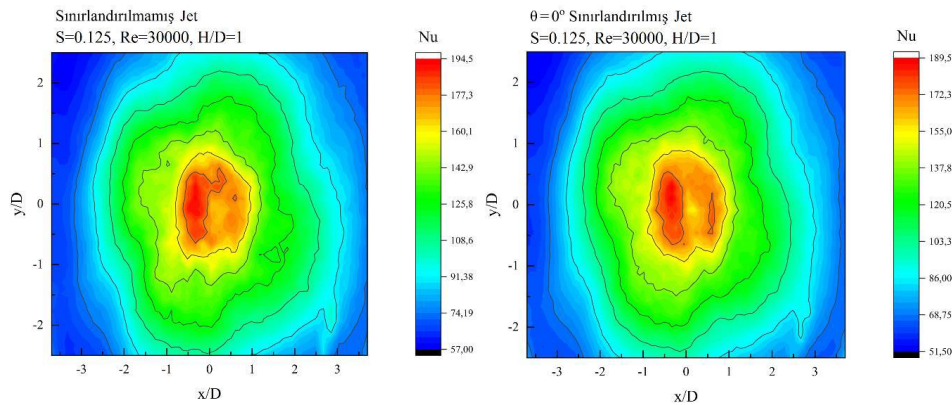
levhası arası açıklığın $H/D = 0.5, 1, 3$ ve 6 değerleri ve dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S = 0.125, 0.26$ ve 0.52 değerlerinde çarpma levhası üzerinden elde edilen Nusselt dağılımları bir arada değerlendirildiğinde, sınırlandırılmamış jet durumdaki maksimum Nusselt sayısı değerlerinin sınırlandırılmış jet durumundaki maksimum değerlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Lüle levha arası açıklık ve dönmeli geometri ilavesinin dönme sayısı arttıkça, çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir.

Sınırlayıcı Levha Etkisi

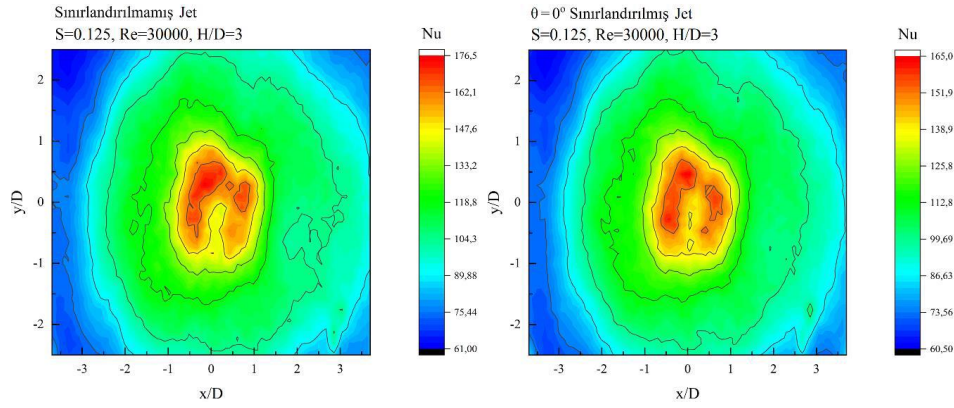
Reynolds sayısının 30000 değeri ve dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S = 0.125$ değeri için çarpma levhasında elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde sınırlayıcı levha durumunun etkisi, lüle-levha açıklığının $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 değerleri için sırasıyla Şekil 11-14'te verilmiştir. Lüle-levha arası açıklığın $H/D=0.5$ değerinde, sınırlandırılmamış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlandırılmış jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. Sınırlayıcı levhanın varlığı çarpma bölgesinde daha üniform bir Nusselt dağılımı oluşturmaktadır (Şekil 11). $H/D=1$ açıklıkta, $H/D=0.5$ 'teki duruma benzer şekilde sınırlayıcı levhanın varlığıyla çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri azalmaktadır (Şekil 12). Lüle-levha arası açıklığın $H/D=3$ değerinde, sınırlandırılmış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark daha küçük olmaktadır (Şekil 13). $H/D=6$ açıklıkta, sınırlayıcı levhanın varlığının, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerine etkisi azalmaktadır (Şekil 14).



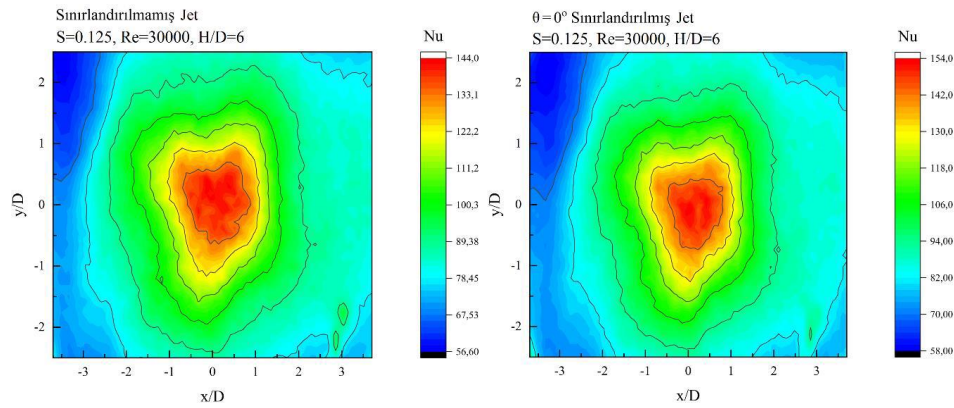
Şekil 11. $Re=30000$, $S=0.125$ ve $H/D=0.5$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



Şekil 12. $Re=30000$, $S=0.125$ ve $H/D=1$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



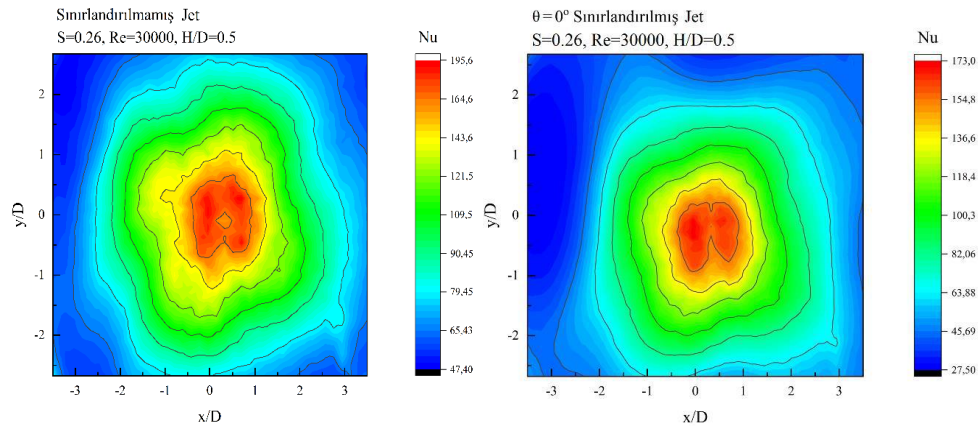
Şekil 13. Re=30000, S=0.125 ve H/D=3 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



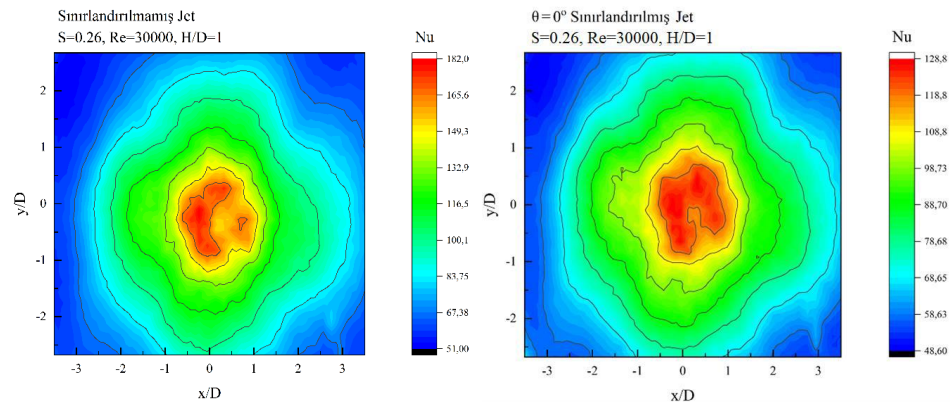
Şekil 14. Re=30000, S=0.125 ve H/D=6 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları

Dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.125$ değerinde, sınırlayıcı levhanın dört farklı lüle-levha arası açıklıktaki etkisi bir arada değerlendirildiğinde, sınırlayıcı levhanın varlığının çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerini azalttığı görülmektedir. Hem sınırlanmamış jet hem de sınırlanmış jet durumunda, lüle-levha arası açıklık arttıkça çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri azalmaktadır. Artan lüle-levha arası açıklık, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki farkı azaltıp daha üniform dağılımların oluşmasını sağlamaktadır.

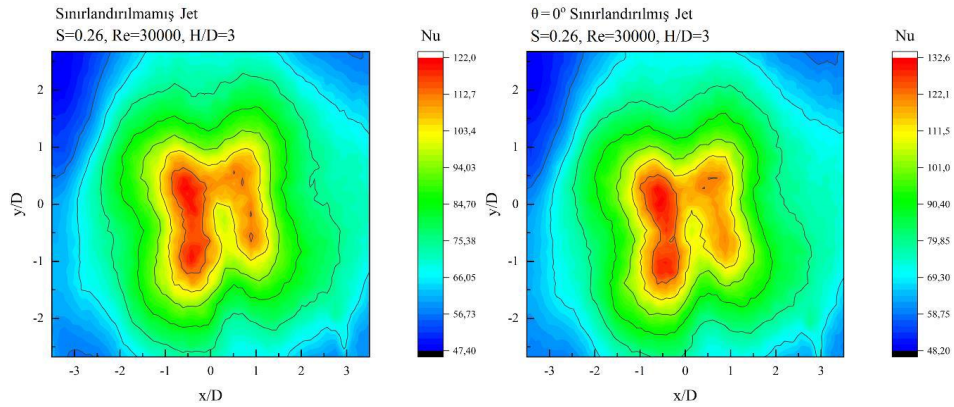
Reynolds sayısının 30000 değeri ve dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.26$ değeri için çarpma levhasında elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde sınırlayıcı levha durumunun etkisi, lüle-levha açıklığının $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 değerleri için sırasıyla Şekil 15-18'de verilmiştir. $H/D=0.5$ açıklıkta, sınırlanmamış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki maksimum Nusselt değeri, sınırlanmış jet durumundaki değerden daha büyük olmaktadır. (Şekil 15). Lüle-levha arası açıklığın $H/D=1$ değerinde, $H/D=0.5$ 'teki duruma benzer şekilde sınırlayıcı levhanın varlığıyla çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri azalmaktadır (Şekil 16). $H/D=3$ ve $H/D=6$ açıklıklarda ise, sınırlanmış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlanmamış jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. (Şekil 17 ve Şekil 18).



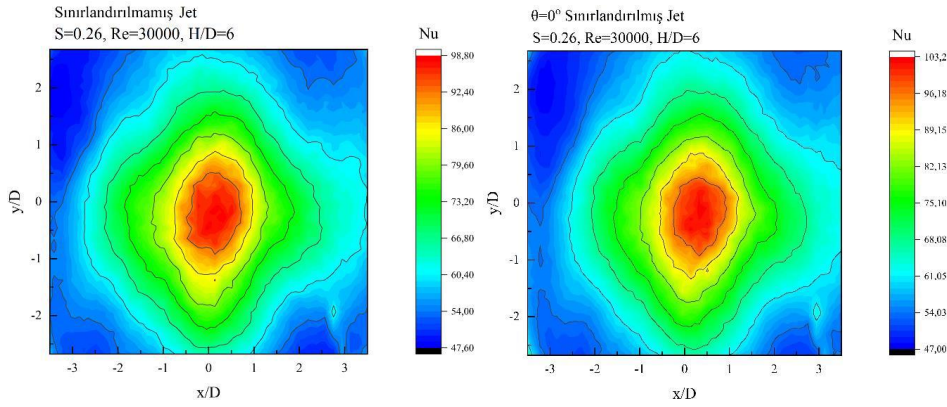
Şekil 15. $Re=30000$, $S=0.26$ ve $H/D=0.5$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



Şekil 16. $Re=30000$, $S=0.26$ ve $H/D=1$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



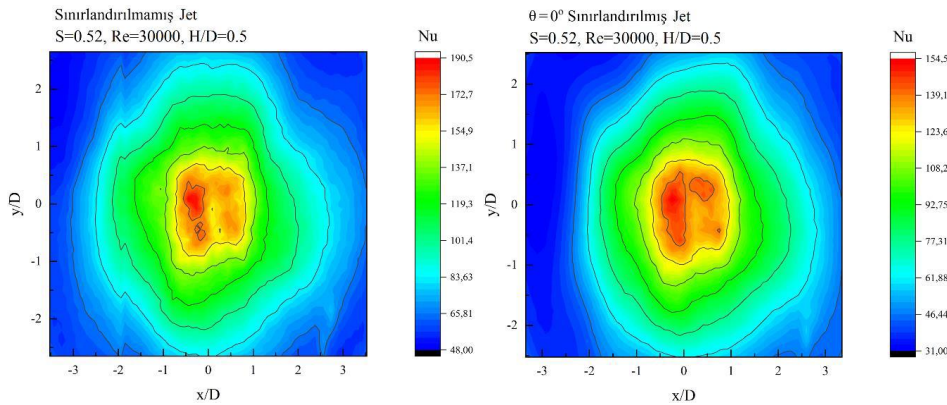
Şekil 17. $Re=30000$, $S=0.26$ ve $H/D=3$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



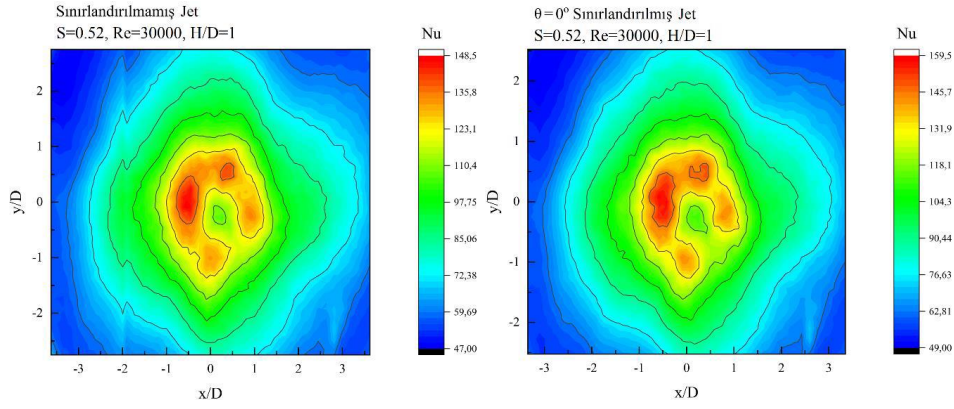
Şekil 18. Re=30000, S=0.26 ve H/D=6 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları

Dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.26$ değerinde, sınırlayıcı levhanın dört farklı lüle-levha arası açıklıktaki etkisi bir arada değerlendirildiğinde, hem sınırlanmamış jet hem de sınırlanmış jet durumunda, lüle-levha arası açıklık arttıkça çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. Küçük lüle-levha açıklıklarında ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerinde sınırlayıcı levhanın varlığıyla azalan Nusselt değerleri, büyük lüle-levha açıklıklarında ($H/D \geq 3$), sınırlayıcı levhanın varlığıyla artmaktadır.

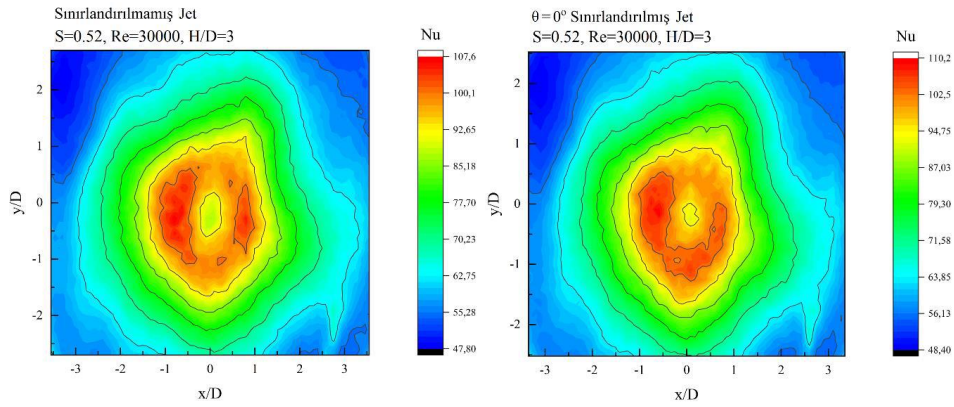
Reynolds sayısının 30000 değeri ve dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.52$ değeri için çarpma levhasında elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde sınırlayıcı levha durumunun etkisi, lüle-levha açıklığının $H/D=0.5, 1, 3$ ve 6 değerleri için sırasıyla Şekil 19-22'de verilmiştir. Lüle-levha arası açıklığın $H/D=0.5$ değerinde, sınırlanmamış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri, sınırlanmış jet durumundaki değerlerden daha büyük olmaktadır. Sınırlayıcı levhanın varlığı çarpma bölgesinde daha üniform bir Nusselt dağılımı oluşturmaktadır (Şekil 19). $H/D=1$ açıklıkta, sınırlayıcı levhanın varlığıyla çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri artmaktadır (Şekil 20). Lüle-levha arası açıklığın $H/D=3$ değerinde, $H/D=1$ 'deki duruma benzer şekilde sınırlanmış jet durumunda çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri daha büyük olmaktadır (Şekil 21). $H/D=6$ açıklıkta, sınırlayıcı levhanın varlığının, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerine etkisi kaybolmaktadır (Şekil 22).



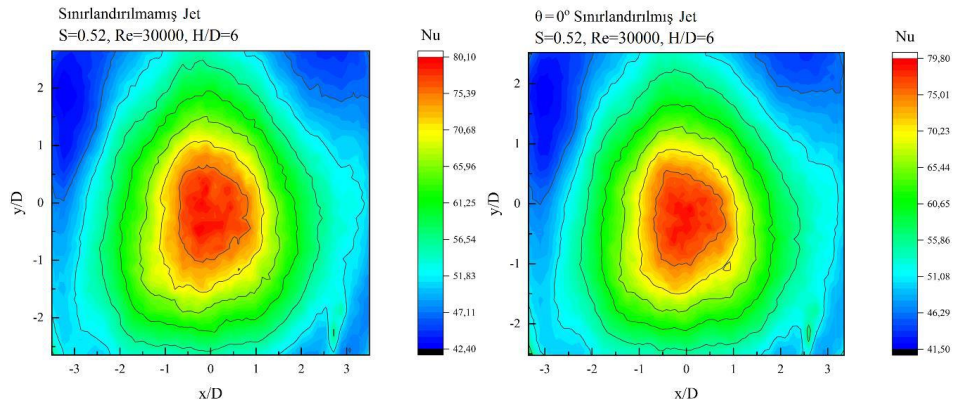
Şekil 19. Re=30000, S=0.52 ve H/D=0.5 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



Şekil 20. Re=30000, S=0.52 ve H/D=1 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



Şekil 21. Re=30000, S=0.52 ve H/D=3 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



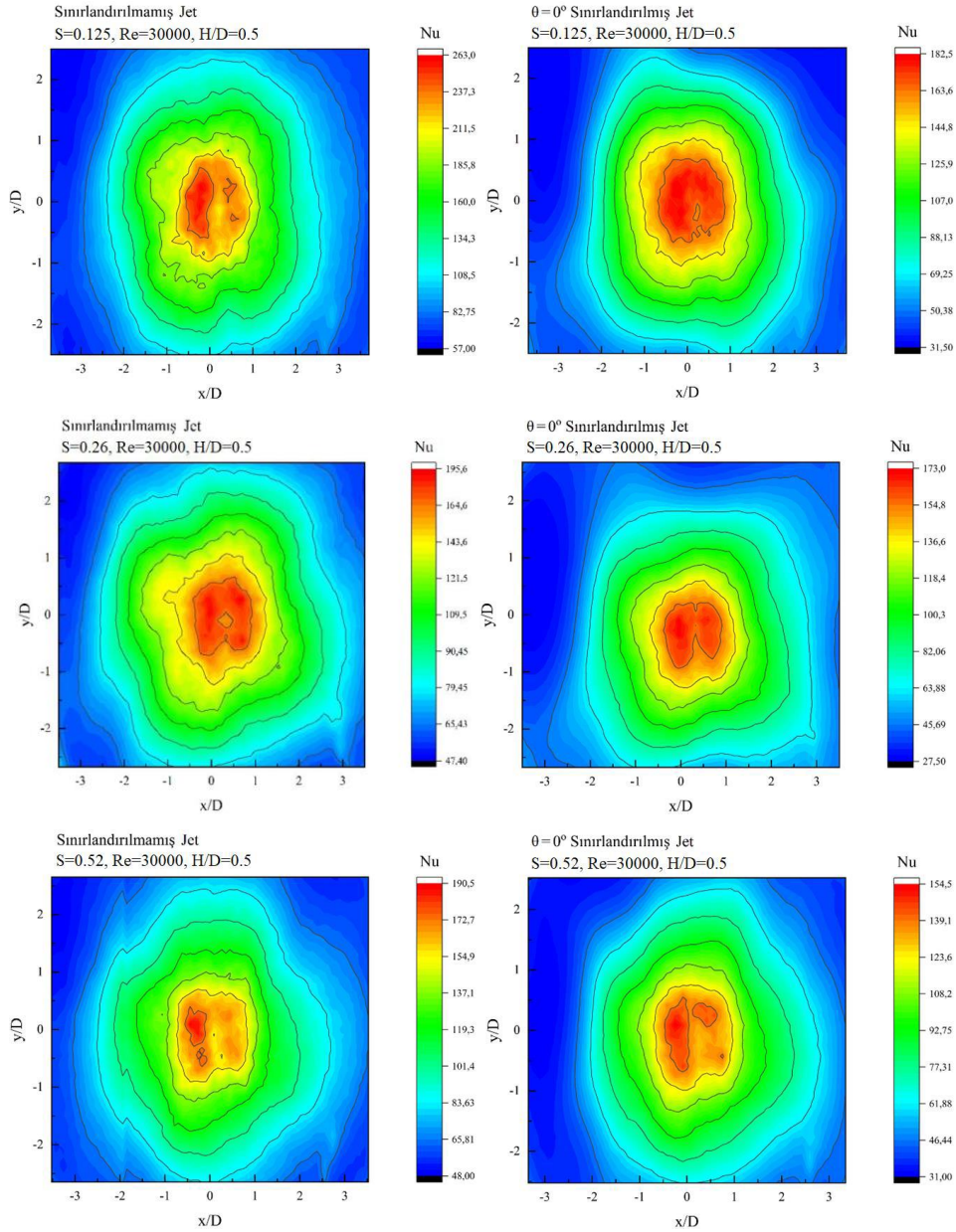
Şekil 22. Re=30000, S=0.52 ve H/D=6 için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları

Dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.52$ değerinde, sınırlayıcı levhanın dört farklı lüle-levha arası açıklıktaki etkisi bir arada değerlendirildiğinde, hem sınırlanmamış jet hem de sınırlanmış jet durumunda, lüle-levha arası açıklık arttıkça çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerlerinin azaldığı görülmektedir. $H/D=0.5$ açıklıkta, çarpma levhası üzerinde sınırlayıcı levhanın varlığıyla azalan Nusselt değerleri, lüle-levha arası açıklığın $H/D=1$ ve $H/D=3$ değerlerinde sınırlayıcı levhanın varlığıyla artmakta, $H/D=6$ açıklıkta ise sınırlayıcı levhanın Nusselt değerleri üzerindeki etkisi kaybolmaktadır.

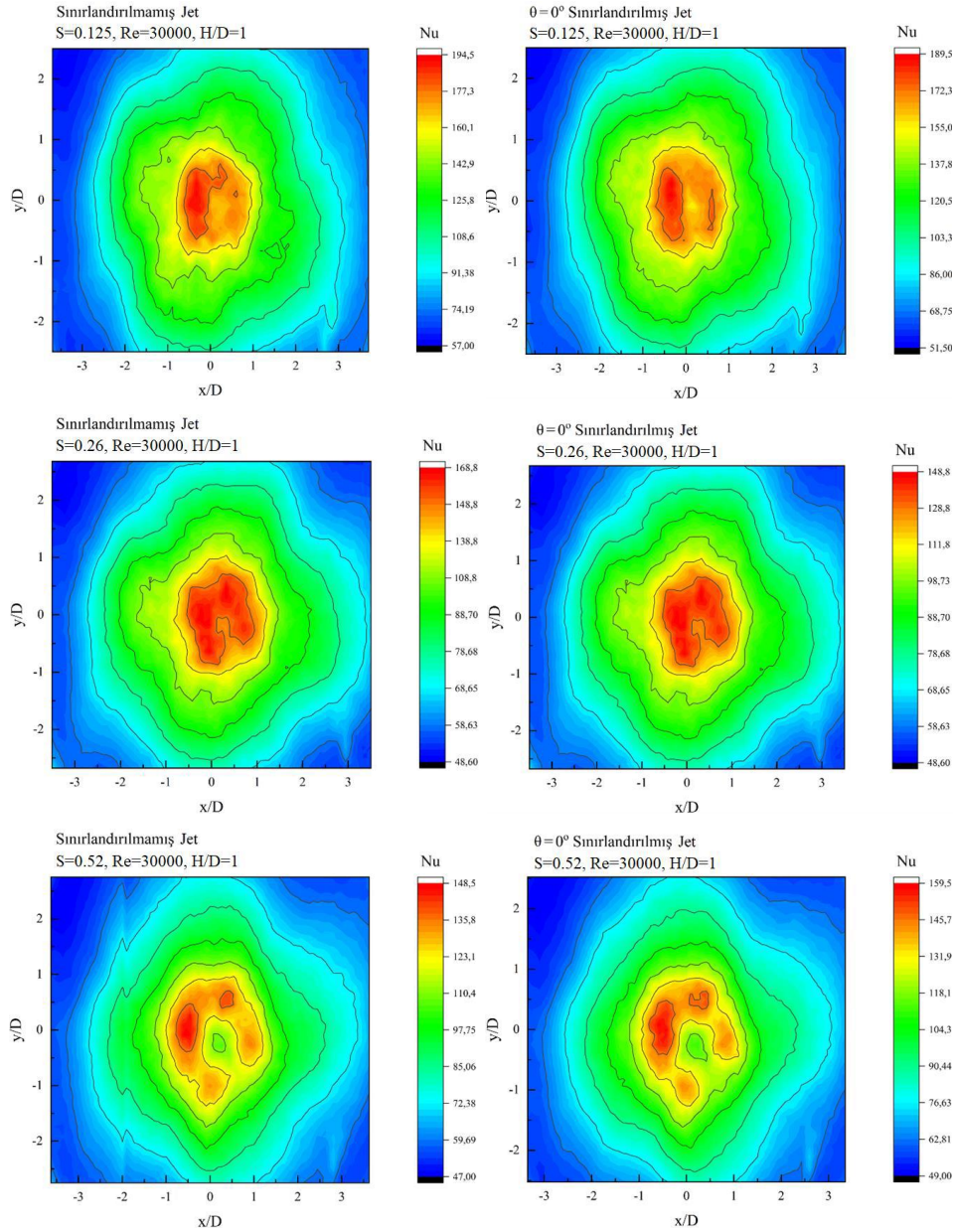
Boyutsuz Dönme Sayısı Etkisi

Reynolds sayısının 30000 değeri için dönmeli geometri ilavesi için tanımlanmış boyutsuz dönme sayısının $S=0.125$, 0.26 ve 0.52 değerlerinde çarpma levhasında elde edilen Nusselt dağılımları üzerinde boyutsuz dönme sayısı etkisi, sınırlanmamış jet ve sınırlanmış jet durumlarına göre

lüle-levha arası/levhalar arası açıklığın $H/D=0.5$ ve 1 değerleri için sırasıyla Şekil 23 ve Şekil 24'te verilmiştir. Levhalar arası açıklığın $H/D=0.5$ değerinde, hem sınırlanmamış jet hem de sınırlanmış jet durumunda artan boyutsuz dönme sayısı ile çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri azalmaktadır (Şekil 23). $H/D=1$ açıklıkta, boyutsuz dönme sayısı arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum Nusselt sayısı değerleri azalmaktadır (Şekil 24). Benzer bulgular, Senda vd. (2005) tarafından da ifade edilmiştir.



Şekil 23. $Re=30000$ ve $H/D=0.5$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları



Şekil 24. $Re=30000$ ve $H/D=1$ için Çarpma Levhası Üzerinde Nusselt Dağılımları

Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, çarpan dönmeli jet akış alanlarında çarpma yüzeylerindeki ısı transferi etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında termal kamera ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımlarından, Reynolds sayısının, lüle-levha arası açıklığın, boyutsuz dönme sayısının ve sınırlayıcı levha durumunun çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımlarına etkisi araştırılmıştır.

Çalışmadan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Hem sınırlandırılmamış hem de düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet akışında, çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri artan Reynolds sayısı ile artmakta, artan lüle-levha/levhalar arası açıklıkla azalmaktadır. Lüle-levha/levhalar arası açıklık arttıkça, çarpma levhası üzerindeki maksimum ve minimum Nusselt değerleri arasındaki fark azalmaktadır.
2. Sınırlandırılmamış çarpan dönmeli jet durumdaki maksimum Nusselt sayısı değerleri sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet durumdaki maksimum değerlerden daha büyük

olmaktadır. Küçük lüle-levha açıklıklarında ($H/D \leq 1$), çarpma levhası üzerinde sınırlayıcı levhanın varlığıyla azalan Nusselt değerleri, büyük lüle-levha açıklıklarında ($H/D \geq 3$), sınırlayıcı levhanın varlığıyla artmaktadır.

3. Hem sınırlandırılmamış hem de düz levha ile sınırlandırılmış çarpan dönmeli jet akışında, boyutsuz dönme sayısının artmasıyla çarpma levhası üzerindeki Nusselt değerleri azalmaktadır.
4. Lüle-levha/levhalar arası açıklık ve boyutsuz dönme sayısı arttıkça, çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları daha üniform hale gelmektedir.
5. Lüle-levha arası açıklığın $H/D=3$ değerinde ve boyutsuz dönme sayısının $S=0.52$ değerinde çarpma levhası üzerindeki Nusselt dağılımları üniform dağılıma en yakın görüntüyü oluşturmaktadır.

Yazar Katkısı

Haluk Keleş, bu çalışmada deneylerin gerçekleştirilmesi, verilerin toplanması ve makale taslağının oluşturulmasında, Yücel Özmen, çalışma bulgularının yorumlanması, irdelenmesi, sonucunun oluşturulmasında ve makale taslağının revize edilmesinde katkı sağlamıştır.

Etik

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

ORCID

Haluk Keleş  <https://orcid.org/0000-0002-6562-8902>

Yücel Özmen  <https://orcid.org/0000-0003-1127-1060>

Kaynaklar

Gupta, A. K., Lilley, D. G. ve Syred, N. (1984). *Swirl flows*. Abacus Press.

Amini, Y., Mokhtari, M., Haghshenasfard, M. ve Barzegar Gerdroodbary, M. (2015). Heat transfer of swirling impinging jets ejected from Nozzles with twisted tapes utilizing CFD technique. *Case Studies in Thermal Engineering*, 6, 104-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.08.001>

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. ve Dewitt, D. P. (2011). *Introduction to heat transfer* (Sixth Edition). Wiley.

Bilen, K., Bakirci, K., Yapici, S. ve Yavuz, T. (2002). Heat transfer from a plate impinging swirl jet. *International Journal of Energy Research*, 26(4), 305-320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.785>

Churchill, S. W. ve Chu, H. H. S. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International journal of heat and mass transfer*, 18(11), 1323-1329. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90243-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90243-4)

Huang, L. (1996). *Heat transfer and flow visualization of conventional and swirling impinging jets* [Doktora tezi]. The University of New Mexico.

Huang, L. ve El-Genk, M. S. (1998). Heat transfer and flow visualization experiments of swirling, multi-channel, and conventional impinging jets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(3), 583400. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00123-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00123-3)

- Ianiro, A. ve Cardone, G. (2012). Heat transfer rate and uniformity in multichannel swirling impinging jets. *Applied Thermal Engineering*, 49, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.018>
- Lee, D. H., Won, S. Y., Kim, Y.-T. ve Chung, Y. S. (2002). Turbulent heat transfer from a flat surface to a swirling round impinging jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 223-227. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00135-1)
- Mohamed Ilyas, S., Ramesh Babu, B. R. ve Venkata Subba Rao, V. (2019). Experimental analysis of heat transfer and multi objective optimization of swirling jet impingement on a flat surface. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(3), 803-817. <https://doi.org/10.29252/jafm.12.03.29172>
- Senda, M., Inaoka, K., Toyoda, D. ve Sato, S. (2005). Heat transfer and fluid flow characteristics in a swirling impinging jet. *Heat Transfer—Asian Research*, 34(5), 324-335. <https://doi.org/10.1002/htj.20068>
- Singh, P. ve Chander, S. (2019). Study of flow field and heat transfer characteristics for an interacting pair of counter-rotating dual-swirling impinging flames. *International Journal of Thermal Sciences*, 144, 191-211. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.06.005>
- Wannassi, M. ve Monnoyer, F. (2015). Fluid flow and convective heat transfer of combined swirling and straight impinging jet arrays. *Applied Thermal Engineering*, 78, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.043>
- Wen, M.-Y. ve Jang, K.-J. (2003). An impingement cooling on a flat surface by using circular jet with longitudinal swirling strips. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(24), 4657-4667. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00302-8](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00302-8)
- Wongcharee, K., Chuwattanakul, V. ve Eiamsa-ard, S. (2017). Heat transfer of swirling impinging jets with TiO₂-water nanofluids. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 114, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.01.004>
- Zerrout, A., Khelil, A. ve Loukarfi, L. (2017). Experimental and numerical investigation of impinging multi-jet system. *Mechanics*, 23(2), 228-235. <https://doi.org/10.5755/J01.MECH.23.2.13900>



ORDU ÜNİVERSİTESİ
BİLİM ve TEKNOLOJİ
DERGİSİ

Ordu Üniversitesi Cumhuriyet Yerleşkesi
Cumhuriyet Mahallesi No:218 Müzik ve Sahne Sanatları
Fakültesi Binası 3. Kat Fen Bilimleri Enstitüsü 52200
Altınordu/ORDU

Tel: 0 452 226 52 00
Faks: 0 452 226 52 20

<http://btd.odu.edu.tr>
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ordubtd>