



Akdeniz Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

YEAR | YIL

2023

VOLUME | CİLT

1

ISSUE | SAYI

1



Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

OWNER | SAHİBİ

on behalf of Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi adına**

Rector | Rektör

Prof. Dr. Özlenen ÖZKAN

EDITOR-IN-CHIEF | BAŞ EDITÖR

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi**

CO-EDITOR | YARDIMCI EDITÖR

Prof. Dr. Ayhan TOPUZ

Akdeniz University **Akdeniz Üniversitesi**



Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

EDITORIAL BOARD | ALAN EDİTÖRLERİ

Prof. Dr. Prof. Dr.	Afşin GÜNGÖR	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Mechanical Engineering Makine Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Erdal KOŞUN	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Geological Engineering Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Mehmet Serkan AKKİRAZ	Kütahya Dumlupınar University Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	Geological Engineering Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Prof. Dr.	Meltem ASİLTÜRK ERSOY	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Materials Science and Engineering Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Ali DANANDEH MEHR	Antalya Bilim University Antalya Bilim Üniversitesi	Civil Engineering İnşaat Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Alper BİLGE	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Computer Engineering Bilgisayar Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Çiğdem SARAÇ	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Biomedical Engineering Biyomedikal Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	Emre YALÇIN	Sivas Cumhuriyet University Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	Computer Engineering Bilgisayar Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doç. Dr.	İ. Ethem KARADİREK	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Environmental Engineering Çevre Mühendisliği



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

EDITORIAL BOARD | ALAN EDİTÖRLERİ

Assoc. Prof. Dr. Doc. Dr.	H. Feza CARLAK	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Electrical and Electronics Engineering Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doc. Dr.	Kubilay YILDIRIM	Ondokuz Mayıs University Ondokuz Mayıs Üniversitesi	Molecular Biology and Genetics Moleküler Biyoloji ve Genetik
Assoc. Prof. Dr. Doc. Dr.	Mehmet TORUN	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Food Engineering Gıda Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doc. Dr.	Mustafa KILIÇ	Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi	Mechanical Engineering Makine Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doc. Dr.	Rıfat TÜR	Akdeniz University Akdeniz Üniversitesi	Civil Engineering İnşaat Mühendisliği
Assoc. Prof. Dr. Doc. Dr.	Süleyman POLAT	Çukurova University Çukurova Üniversitesi	Food Engineering Gıda Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Cihan ÖZGÜR	Isparta University of Applied Sciences Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi	Environmental Engineering Çevre Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Görkem Eğemen GÜLOĞLU	Middle East Technical University Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Aerospace Engineering Havacılık ve Uzay Mühendisliği
Asst. Prof. Dr. Dr. Öğr. Üyesi	Sıtkı GÜNER	Eskişehir Technical University Eskişehir Teknik Üniversitesi	Electrical and Electronics Engineering Elektrik-Elektronik Mühendisliği



Akdeniz Mühendislik Dergisi Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

ADVISORY BOARD | DANIŞMA KURULU

Prof. Dr. **Adnan KAYA**
Prof. Dr. İzmir Kâtip Çelebi University
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Prof. Dr. **Cihan KALELİ**
Prof. Dr. Eskişehir Technical University
Eskişehir Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. **Faruk ŞEN**
Prof. Dr. Muğla Sıtkı Koçman University
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

Prof. Dr. **Mecit Halil ÖZTOP**
Prof. Dr. Middle East Technical University
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. **Mustafa Alper SELVER**
Prof. Dr. Dokuz Eylül University
Dokuz Eylül Üniversitesi

Prof. Dr. **Müfit BAHADIR**
Prof. Dr. Technische Universität Braunschweig
Braunschweig Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. **Serdar KARAKURT**
Prof. Dr. Selçuk University
Selçuk Üniversitesi

Prof. Dr. **Vahid NOURANI**
Prof. Dr. Near East University
Yakın Doğu Teknik Üniversitesi

Assoc. Prof. Dr. **Volkan TUNALI**
Doç. Dr. University of The West of Scotland
Batı İskoçya Üniversitesi



Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering (AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

LANGUAGE EDITOR | DİL EDITÖRÜ

Asst. Prof. Dr.
Dr. Öğr. Üyesi

Joseph William LEDET

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

TECHNICAL EDITORS | TEKNİK EDITÖRLER

Res. Asst. Dr.
Arş. Gör. Dr.

Fatih UÇAR

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst.
Arş. Gör.

Ceyhun ÇELEBİ

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst.
Arş. Gör.

Serenay AŞIK-AYGÜN

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi

Res. Asst.
Arş. Gör.

Taha Yiğit ALKAN

Akdeniz University
Akdeniz Üniversitesi



Akdeniz Mühendislik Dergisi
Akdeniz Journal of Engineering
(AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

CORRESPONDENCE ADDRESS | YAZIŞMA ADRESİ

*Akdeniz University – Faculty of Engineering
Dumlupınar Boulevard, Akdeniz University Campus
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

*Akdeniz Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

E-MAIL | E-POSTA

muhendislik@akdeniz.edu.tr

WEB PAGE | WEB SAYFASI

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/akuje>



Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

(AKUJE)

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

YEAR | YIL
2023

VOLUME | CİLT
1

ISSUE | SAYI
1

CONTENTS | İÇİNDEKİLER

PAGE | SAYFA ARTICLES | MAKALELER

1-14

Tipik Türk Evi ve İş Yerlerinde Düşük Frekanslı Elektromanyetik Alan Kaynakları için Elektromanyetik Risk Analizi

E. YAVUZ DİRİK ^{ID} K. ATEŞ ^{ID} Ş. ÖZEN ^{ID}

Engineering Electromagnetics
Mühendislik Elektromanyetiği

Research Article
Araştırma Makalesi

15-22

Kudret Narı Yağı Yüklü Biyobozunur Nanokapsüllerin Yara Örtüsü Amaçlı Dizaynı ve Üretimi

E. BOZKIR ^{ID} F. İNAN ^{ID} İ. M. BİLGİSEVEN ^{ID} S. KARAKURT ^{ID}

Biofabrication
Biyofabrikasyon

Research Article
Araştırma Makalesi

23-32

α -Laktalbumin'in Isıl Denatürasyonunun İki Farklı Modelle Tanımlanması

S. BUZRUL ^{ID}

Food Engineering
Gıda Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

33-42

Investigation of the Solid-Liquid Extraction Parameters of the Polyphenols from Feijoa Sellowiana Peels: Mass Transfer, Kinetics, and Thermodynamics Studies

R. ABİŞLİ ^{ID} S. ŞAHİN ^{ID}

Chemical Engineering
Kimya Mühendisliği

Research Article
Araştırma Makalesi

43-52

Development of an AI-Based Smart Greenhouse Prototype for Enhanced Agricultural Sustainability

E. GÜNEY ^{ID} E. ÖZDEMİR ^{ID} İ. KAYADİBİ ^{ID} N. KOSKU PERKGÖZ ^{ID} Ü. BAŞARAN FİLİK ^{ID}

Electronics, Sensors and Digital Hardware
Elektronik, Sensörler ve Dijital Donanım

Research Article
Araştırma Makalesi



**TİPİK TÜRK EVİ VE İŞ YERLERİNDE DÜŞÜK FREKANSLI ELEKTROMANYETİK
ALAN KAYNAKLARI İÇİN ELEKTROMANYETİK RİSK ANALİZİ**

***ELECTROMAGNETIC RISK ANALYSIS FOR LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC
FIELD SOURCES IN TYPICAL TURKISH HOMES AND WORKPLACES***

Eda YAVUZ DİRİK^{*1}  Kayhan ATEŞ^{2,3}  Şükrü ÖZEN³ 

1 Kastamonu Valiliği, Kastamonu, Türkiye

2 Telecommunications and Remote Sensing Laboratory, Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering,
University of Pavia, Pavia, Italy

3 Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

ABSTRACT

The widespread usage of electronic devices in daily life has led to studies on the electromagnetic fields (EMF) caused by these devices and their possible effects. In this study, EMF levels created in the vicinity of various household appliances and electrical devices used in workplaces were determined and measurements were carried out for the low frequency region. Additionally, EMF dosimetry analyzes were performed for children, females, and males. In this context, induced electric fields and current densities in the child and adult human body by the effect of external magnetic fields in the frequency range of 50 Hz-100 kHz were calculated using the ellipsoidal models. The results were obtained according to the realistic values by normalizing the magnetic field intensity to 1 μ T. Furthermore, electromagnetic risk analyzes were carried out depending on the interaction of the external magnetic field with the body models. According to the measurements, the maximum electric field value was measured at 3 cm away from the washing machine and was determined to be 7.52 V/m. The minimum electric field value was measured at 1 m away from the electric razor and dishwasher and was detected to be 0.07 V/m. In magnetic field measurements, the maximum value was recorded as 9.81 μ T from an electric vacuum cleaner at 3 cm, while the minimum value was measured as 0.023 μ T at 1 m from smart watch and tablet devices. According to the results of the calculated induced current density in the body tissue, the maximum value was observed when the magnetic field was perpendicular to the face domain. The results were evaluated according to international standards. In addition, recommendations were declared to reduce electromagnetic exposure in houses and workplaces in daily life.

Keywords: Electromagnetic Field Exposure; Model Analysis; Electromagnetic Dosimetry; Measurement and Simulation

ÖZET

Günlük hayatta yaygınlaşan elektronik cihaz kullanımı, bu cihazların neden olduğu elektromanyetik alanlara (EMA) ve olası etkilerine dönük çalışmalara neden olmuştur. Bu çalışmada, ev ve iş yerlerinde kullanılan çeşitli elektrikli cihazların yakın çevresinde oluşturdukları EMA seviyeleri belirlenerek düşük frekans bölgesi için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çocuk, kadın ve erkekler için EMA dozimetri analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda, 50 Hz-100 kHz frekans aralığında dış kaynaklı manyetik alanların etkisiyle çocuk ile yetişkin insan vücudunda indüklenen elektrik alanlar ve akım yoğunlukları, eliptik modeller sayesinde hesaplanmıştır. Sonuçlar, manyetik alan şiddeti 1 μ T değerine normalize edilerek gerçek değerler ışığında elde edilmiştir. Ayrıca, dış kaynaklı manyetik alanın vücut modelleri ile etkileşim şekline bağlı olarak elektromanyetik risk analizleri yapılmıştır. Ölçümlere göre, en yüksek elektrik alan değeri çamaşır makinesinden 3 cm uzaklıkta ölçülmüş ve 7,52 V/m olarak belirlenmiştir. En düşük elektrik alan değeri ise elektrikli tıraş makinesinden ve bulaşık makinesinden 1 m uzaklıkta ölçülmüş ve 0,07 V/m olarak tespit edilmiştir. Manyetik alan ölçümlerinde ise en yüksek değer, 3 cm uzaklıktaki bir elektrikli süpürge 9,81 μ T olarak kaydedilirken, en düşük değer akıllı saat ve tablet cihazlarından 1 m uzaklıkta 0,023 μ T olarak ölçülmüştür. Vücut dokusunda hesaplanan indüklenen akım yoğunluğu sonuçlarına göre en yüksek değer, manyetik alanın yüz hizasına dik gelmesiyle gözlenmiştir. Sonuçlar, uluslararası standartlara göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, günlük hayatta ev ve iş yerlerinde elektromanyetik maruziyeti azaltmak için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Alan Maruziyeti; Elektromanyetik Dozimetri; Model Analizi; Ölçüm ve Simülasyon

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: edda_yavvuz@hotmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
30.10.2023	17.11.2023	19.12.2023	27.12.2023

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yaşam alanlarımızı elektrikli cihazlar çevrelemiştir. Günümüzde evlerde ve iş yerlerinde cihaz yoğunluğu çok arttığından, kapalı ortamlarda bu cihazlardan kaynaklı elektromanyetik alan maruziyeti de ciddi seviyelere ulaşmıştır. Çoğu yeşil bina derecelendirme sisteminde iç mekân çevre kalitesi, binada yaşayanlar için daha iyi ve sağlıklı bir çevre sağlamak için puanlama kategorilerinden biri olarak kabul edilmiştir. Ortamın elektromanyetik alan seviyesi, sağlıklı bir çevreyi oluşturan parametrelerden birisidir. İyonize olmayan elektromanyetik alan maruziyetindeki küçük bir artış, sağlık tehlikelerine neden olabileceğinden büyük öneme sahiptir.

Zamanla değişen elektromanyetik alanların insan vücudu ile etkileşimi, elektrik yükünün hareketine ve dokudaki elektrik dipollerinin tekrar yönlenmesine yol açar. Bu durum, vücudun elektriksel iletkenlik ve dielektrik geçirgenlik özelliklerine bağlıdır. Elektrik iletkenliği ve dielektrik geçirgenlik, vücut dokusunun türüne göre değişir ve ayrıca uygulanan alanın frekansına da bağlıdır. Dış kaynaklı alanların vücuda maruziyeti ile elektrik alan indüklenir. Vücut üzerinde indüklenen yükler; vücudun maruz kaldığı koşullara bağlı olarak indüklenen akımlara dönüşür. İndüklenen alanların büyüklüğü, manyetik alanın değişim hızı, manyetik akı yoğunluğu, döngünün yarıçapı ve dokunun elektriksel iletkenliği ile orantılıdır. Söz konusu bu etkileri engellemek için uluslararası kuruluşlar tarafından maruziyet limit değerleri yayımlanmıştır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da tanınan ve uluslararası bir komisyon olan ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu) tarafından yayımlanmış önceki standartlarda, indüklenen akım yoğunluğu incelenmekteydi. Günümüzde anatomik modellerin gelişmesi ve dokuların elektriksel özellikleriyle beraber modellenmesi mümkün hale geldiği için vücutta indüklenen akım yoğunluğu yerine indüklenen elektrik alan ifadesi de ele alınabilmektedir. ICNIRP tarafından 50 Hz çalışma frekansında merkezi sinir sisteminde indüklenen elektrik alanın genel halk referans seviyesi 20 mV m^{-1} iken çalışanlar için 100 mV m^{-1} 'dir [1]. ICNIRP'nin yayınladığı 50 Hz frekansındaki elektrik alan ve manyetik alan maruziyet değerleri ise genel halk için sırasıyla 5 kV m^{-1} ile $200 \text{ } \mu\text{T}$ iken çalışanlar için sırasıyla 10 kV m^{-1} ve $1000 \text{ } \mu\text{T}$ 'dir.

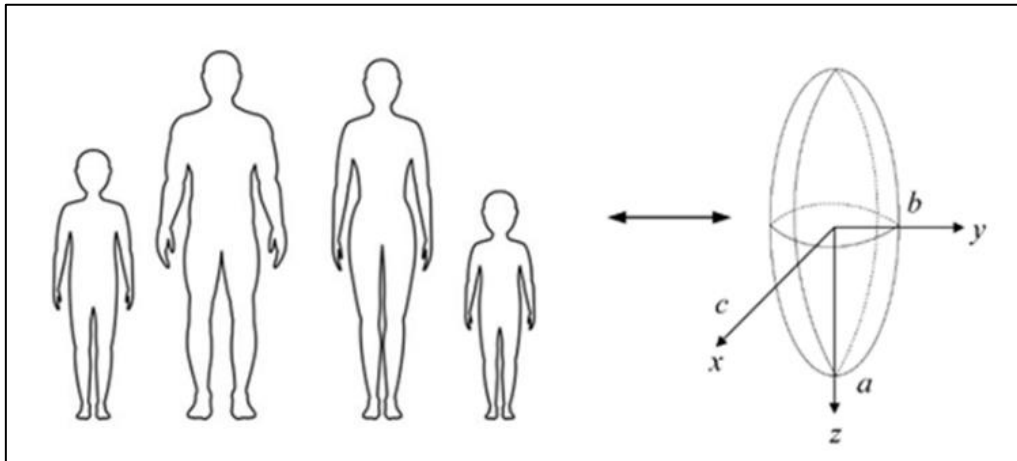
Çok düşük frekanstaki elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri, 1979 yılında Wertheimer ve Leeper'in çocukluk dönemi kanseri ile çok düşük frekanstaki manyetik alan maruziyeti arasındaki ilişkiyi gösterdikten sonra araştırmacılar tarafından daha detaylı bir şekilde incelenmektedir [2]. El-Marakby tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, evdeki elektrikli cihazların sebep olduğu elektromanyetik maruziyet değerlendirilmiştir [3]. Ev ortamındaki elektromanyetik alan seviyelerinin enerji iletim hatlarına uzaklığa, evdeki elektrikli cihazların sayısı ve türüne, ev elektrik tesisatının konfigürasyonuna gibi birçok faktöre bağlı olduğu belirtilmiştir. Bu kapsamda ev ortamında en yaygın olarak kullanılan 13 farklı elektrikli cihaz seçilerek 3 cm ve 100 cm için ölçümler gerçekleştirilmiştir. En yüksek manyetik alan seviyeleri, elektrikli süpürge makinesinden $154,6\text{-}198,3 \text{ mG}$ aralığında ve saç kurutma makinesinden $129,9\text{-}183,1 \text{ mG}$ aralığında ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre elektromanyetik alan seviyelerinin beklendiği üzere mesafeyle azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında elektromanyetik alan riskini azaltmak için bir dizi önlem önerilmiştir. Yayımlanan başka bir araştırmada, İspanya'daki çocukların düşük frekanstaki elektromanyetik alanlara maruziyeti karakterize edilmiştir [4]. Çalışma kapsamında 104 evde, 26 okul ile oyun alanlarında ve 105 parkta ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ev ortamında 24 saatlik zamanda ortalama en yüksek manyetik alan şiddeti değeri $0,15 \text{ } \mu\text{T}$ ölçülmüştür. Düşük frekanstaki elektrik alan ölçüm sonuçlarının iç mekanlarda 1 ile 15 V/m arasında değişmekteyken dış mekanlarda ise $0,3$ ile $1,1 \text{ V/m}$ arasında değiştiği gözlenmiştir. En yüksek elektrik alan değeri, bir okul bahçesinde $55,5 \text{ V/m}$ olduğu belirtilmiştir. Almanya merkezli yapılan bir çalışmada ise yerleşim yerlerine yakın yüksek gerilim hatlarından yayılan çok düşük frekanslı manyetik alanın testis kanseri ile ilişkisi incelenmiştir [5]. Çalışma, 1995 ile 1997 yılları arasında tanı konulan, 15 ila 69 yaşları arasındaki 145 yeni vaka ve yaşları 5 yıllık gruplar halinde eşlenmiş 313 kontrol grubunu içermektedir. Hasta kişiler olarak Hamburg Kanseri Kayıt Merkezi tarafından kaydedilmiş testis kanseri vakalarının adresleri saptanmıştır. Kontrol grubu olarak da Hamburg'daki zorunlu yerleşim yerleri kaydından rastgele kişiler seçilmiştir. Analizler, iki ayrı model referans alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk modelde (Model A) maruziyet, mesafe ile tanımlanmışken ikinci modelde ise (Model B), ikamet süresi ile en yakındaki yüksek gerilim hattına mesafe dikkate alınmıştır. Bu modellerde düşük ve yüksek

maruziyet arasında ayırım yapılmıştır. 40 yaşından küçük ve büyük erkeklerde sonuçları değerlendirmek üzere ayrı analizler yapılmıştır. Hamburg'daki 100 m'lik bir koridor içinde yüksek gerilim hatlarına maruz kalma sıklığı, vakalarda %6,9 ve kontrol grubunda %5,8 olarak elde edilmiştir (%95 Güven aralığı = 0,56-2,80). Daha genç erkekler her iki modelde de hafif artmış riskler göstermiştir. Sonuçlara göre yüksek gerilim hatlarına maruz kalmanın testis kanseri için büyük bir risk faktörüdür. Ateş ve arkadaşları tarafından yapılmış bir çalışmada, ev ortamında kullanılan elektronik cihazların yaydığı elektromanyetik alanlar ölçülmüştür [6]. Bu bağlamda, ev aletlerinin elektromanyetik ışıma karakteristikleri FCC Part-15 Sınıf-A standardına göre değerlendirilmiştir. Ölçümler, yansız odada 3 metre uzaklık için gerçekleştirilmiştir. İncelemeler sonucunda saç kurutma makinesinin ve elektrikli süpürge'nin beklenenden fazla elektromanyetik ışıma yaptığı gözlenmiştir. Elektrikli su ısıtıcı, ütü, vantilatör ve ampulün ise standartları sağladığı belirtilmiştir. Araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise homojen eliptik modeller sayesinde 100 Hz ile 100 kHz arasındaki elektrik ve manyetik alanların vücut dokusunda yarattığı etkiler incelenmiştir [7]. Yetişkin ve çocuk modellerinde, dışarıdan uygulanan $1 \mu\text{T}$ manyetik alana benzer düzeyde elektrik alan indüklemek için 25 ila 2000 V/m arasında dış kaynaklı elektrik alan seviyesinin gerektiği gözlenmiştir. Konutlarda elektrik ve manyetik alan bileşenleri ile ilgili veriler, genellikle manyetik alan bileşeninin yetişkinlerde ve çocuklarda elektrik alana göre dokuda daha fazla elektrik alan ve akım indükleyebileceğini göstermektedir. Yapılan başka bir çalışmada ise, uygulanan 50 Hz frekansındaki elektrik ve manyetik alanlardan kaynaklı dokuda oluşan akım yoğunluğu hesaplanmıştır [8]. Vücut pozisyonu, anatomisi, yaş ve gebelik etkilerini incelemek için 25 farklı voksel modeli kullanılmıştır. Farklı pozisyonlar ve voksel modelleriyle yapılan hesaplamalar, dış kaynaklı elektrik alanlar için $0,32 \text{ mA/m}^2$ 'ye ve manyetik alanlar için 7 mA/m^2 'ye kadar değişen maksimum akım yoğunluklarına ulaşılmıştır.

Literatüre bakıldığında, düşük frekans bölgesinde mesleki ve genel halk maruziyetini içeren farklı çalışmalar bulunmaktadır [9-13]. Gelişen teknoloji ile ev ve işyerlerinde artan cihaz yoğunluğuna bağlı olarak, düşük frekans bölgesi EMA kaynaklarını birlikte ele alan ve bu kaynaklara maruziyet için EM risk analizini içeren bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, ev ve iş yerlerinde kullanılan çeşitli elektrikli cihazların yakın çevresinde oluşturdukları EMA seviyeleri belirlenerek düşük frekans bölgesi için ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı insan modelleri için EMA dozimetri analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 50 Hz ile 100 kHz frekans bölgesinde, dış kaynak tarafından yayılan manyetik alanların etkisiyle çocuk (yaş gruplarına göre) ve yetişkin insan vücuduna indüklenen elektrik alan ve akım yoğunlukları hesaplanmıştır. Manyetik alan şiddeti $1 \mu\text{T}$ 'ye normalize edilmiştir ve farklı boyutlardaki insan vücutları için eliptik modeller kullanılmıştır. Dış kaynaklı manyetik alanın vücut modelleri ile etkileşim şekline bağlı olarak risk analizleri yapılmıştır. Bunun sonucunda günlük hayatta ev ve iş yerlerinde elektromanyetik maruziyet riskini düşürmek için önerilerde bulunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

İnsan vücudu için temel bir eliptik model analizi, Şekil 1'de sunulmuştur. Burada, $2a$ uzunluğu insan boyunu, $2b$ kalçadan kalçaya genişliği ve $2c$ ise gövde ile kalça arasındaki uzunluğu belirtir [14].



Şekil 1. Eliptik model analizi.

Tablo 1, çeşitli anatomik eliptik model parametrelerini belirtir [14]. Doku modelinin farklı frekanslardaki dielektrik özellikleri ise Tablo 2’de sunulmuştur [14].

Tablo 1. İncelenen insan modellerinin eliptik model parametreleri.

Model	a (m)	b (m)	c (m)
Ortalama erkek	0,875	0,195	0,098
Ortalama kadın	0,805	0,2	0,091
Ortalama endomorfik (şişman) adam	0,88	0,225	0,17
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	0,88	0,16	0,08
Küçük kadın	0,725	0,18	0,079
Büyük kadın	0,865	0,215	0,114
10 yaşında çocuk	0,69	0,143	0,078
5 yaşında çocuk	0,56	0,12	0,069
1 yaşında çocuk	0,37	0,095	0,068

Tablo 2. Doku modelinin farklı frekanslardaki dielektrik özellikleri.

Frekans	Dielektrik Sabit (ϵ_r)	İletkenlik (S/m)
50 Hz	1×10^6	0,1
100 Hz	7×10^5	0,15
1 kHz	1×10^5	0,15
10 kHz	3×10^4	0,2
100 kHz	1×10^4	0,3

Bir eliptik modelde E_0 (V/m) genliğindeki dış kaynaklı elektrik alan tarafından indüklenen elektrik alanın genliği, Denklem (1)’de verildiği şekilde hesaplanır [15].

$$E = \frac{j\omega\epsilon_0 E_0}{\sigma^* A} \quad (1)$$

Burada, ω açısal frekans (rad/sn), ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m), A ise eliptik modelle ilgili bir katsayıdır. $\sigma^* = \sigma + j\omega\epsilon_r\epsilon_0$ (S/m) kompleks elektriksel iletkenliktir. Dış kaynaklı elektrik alan gövdeye dik geldiğinde indüklenen elektrik alan maksimum olarak hesaplanır [15]. Dokuda indüklenen elektrik alan tarafından oluşan akım yoğunluğu ise Denklem (2)’deki gibi belirtilir:

$$J = \sigma E \quad (2)$$

Burada, J akım yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{m}^2$); σ , insan modelinin elektriksel iletkenliği (S/m); E ise elektrik alanıdır (V/m). Biyolojik dokuda çok düşük frekans bölgesindeki manyetik alan tarafından oluşan ikincil alanlar, literatürde de belirtildiği gibi ihmal edilebilir [16].

3. ELEKTROMANYETİK ALAN ÖLÇÜMLERİ

Elektrik ve manyetik alan ölçümleri ICNIRP’nin belirlemiş olduğu 6 dakikalık maruziyet süresi referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Ev ve işyerindeki elektromanyetik alan seviyeleri ve manyetik alan değerleri 3 cm, 30 cm ve 1 m olmak üzere farklı mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan HIOKI 3470 Magnetic Field Hitester ve Narda Broadband Field Meter NBM-550 marka cihazlar sayesinde ölçümler yapılmıştır [17, 18]. Ölçüm sonuçları, Tablo 3’te ortalama değer olarak sunulmuştur.

Tablo 3. Ev ve işyerinde kullanılan farklı cihazların uzaklığa bağlı olarak manyetik alan şiddetleri (**B**, μT) ve elektrik alan seviyeleri (**E**, V/m) ölçüm sonuçları.

Elektrikli Cihaz	3 cm Uzaklıkta		30 cm Uzaklıkta		1 m Uzaklıkta	
	B	E	B	E	B	E
Boş Ortam	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Saç Kurutma Makinesi	2,17	0,92	0,13	0,36	0,037	0,32
Elektrikli Tıraş Makinesi	0,23	0,12	0,068	0,1	0,061	0,07
Elektrik Süpürgesi	9,81	0,67	0,243	0,2	0,091	0,16
Floresan Lamba	0,48	0,72	0,16	0,22	0,081	0,12
Su Isıtıcı	0,093	0,42	0,039	0,2	0,03	0,12
Akıllı Saat	0,048	0,11	0,024	0,09	0,023	0,07
Fırın	2,198	0,15	0,403	0,14	0,106	0,14
Çamaşır Makinesi	0,06	7,52	0,043	0,2	0,036	0,14
Ütü	2,74	1,52	0,48	0,14	0,38	0,12
Bulaşık Makinesi	0,186	0,5	0,138	0,12	0,089	0,07
Masaüstü Bilgisayar	0,04	0,86	0,028	0,35	0,025	0,17
Tablet	0,027	1,32	0,024	0,32	0,023	0,12
Buzdolabı	0,077	0,32	0,065	0,12	0,056	0,1
Klima	0,2	0,9	0,05	0,73	0,03	0,6
Dizüstü Bilgisayar	0,05	0,73	0,03	0,35	0,026	0,28
Televizyon	0,22	0,33	0,04	0,18	0,29	0,1

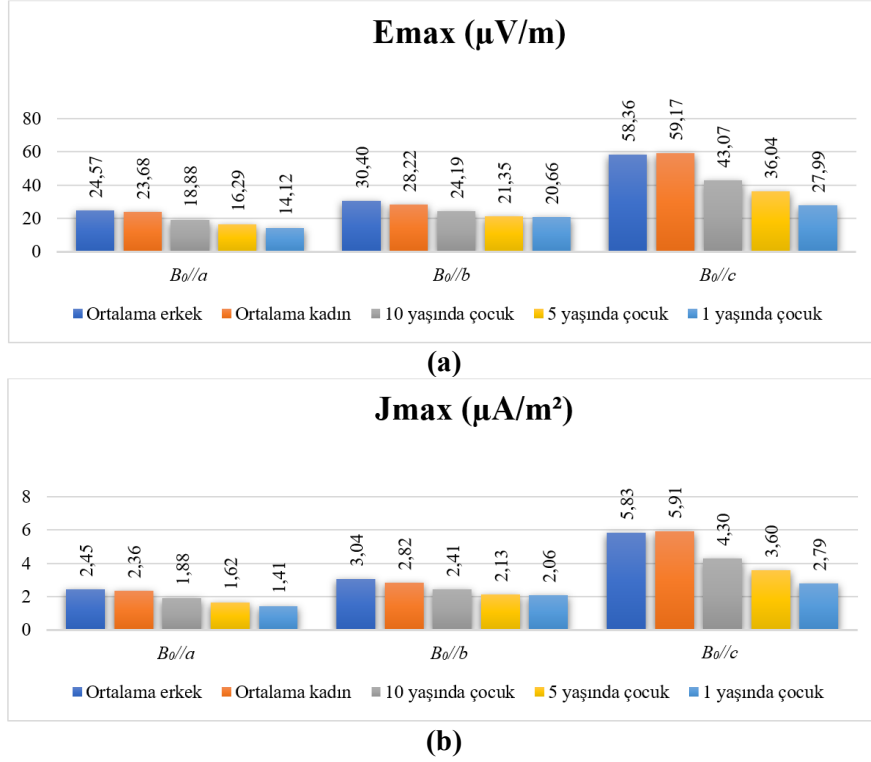
Ölçüm sonuçlarına göre çamaşır makinesi, 3 cm uzaklıkta 7,52 V/m ile en yüksek elektrik alan değerine sahipken elektrikli tıraş makinesi ve bulaşık makinesi ise 0,07 V/m ile 1 m uzaklıkta en düşük elektrik alan değerlerine sahiptir. Manyetik alan ölçüm sonuçlarında en yüksek değer, 3 cm uzaklıkta elektrik süpürgesinden 9,81 μT olarak elde edilmiştir. En düşük olarak akıllı saat ve tableten 1 m uzaklıkta 0,023 μT olarak ölçülmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

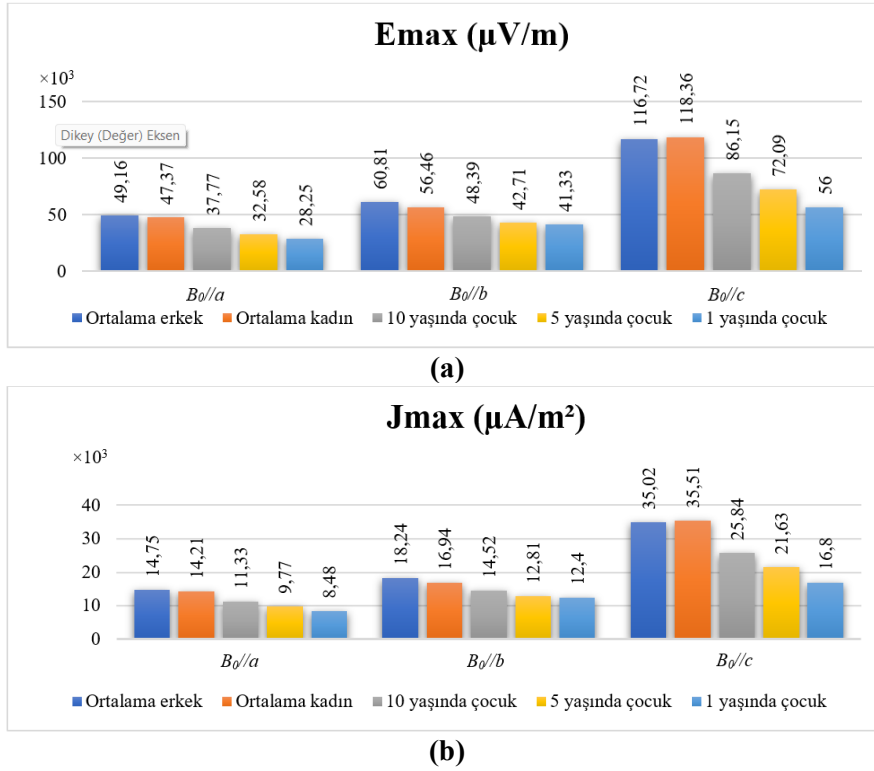
4.1. Analitik Model Analizleri

Literatürde, dokuda indüklenen alan seviyeleri ve akım yoğunluğu için farklı çalışmalar bulunmaktadır [19-22]. Bu çalışma kapsamında 1 μT genliğindeki normalize kaynak manyetik alan şiddetine maruz bırakılan eliptik modellerin analitik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. 50 Hz ve 100 kHz frekanslarında yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen indüklenen elektrik alan ve akım yoğunluğu sonuçları, Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.

Hesaplanan indüklenmiş maksimum elektrik alan ve akım yoğunlukları, sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te sunulmuştur. Manyetik alan, modelin uzun eksenine paralel olarak uygulandığında vücutta indüklenen alan, diğer konfigürasyonlara göre daha düşüktür. En fazla indüklenen alan, vücudun yan eksenine aynı hizada olduğu senaryoda elde edilmiştir. İndüklenen alanın genliği vücut şekli, boyutu, frekans ve vücudun alana göre konumlanmasına bağlı olarak değişmektedir. Frekansın harmonik bileşenlerinin analiz sonuçları, frekansa arttıkça artmıştır.



Şekil 2. (a) 50 Hz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum elektrik alan sonuçları; **(b)** 50 Hz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum akım yoğunluğu sonuçları.



Şekil 3. (a) 100 kHz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum elektrik alan sonuçları; **(b)** 100 kHz için farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum akım yoğunluğu sonuçları.

Tablo 4. Farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum elektrik alan sonuçları.

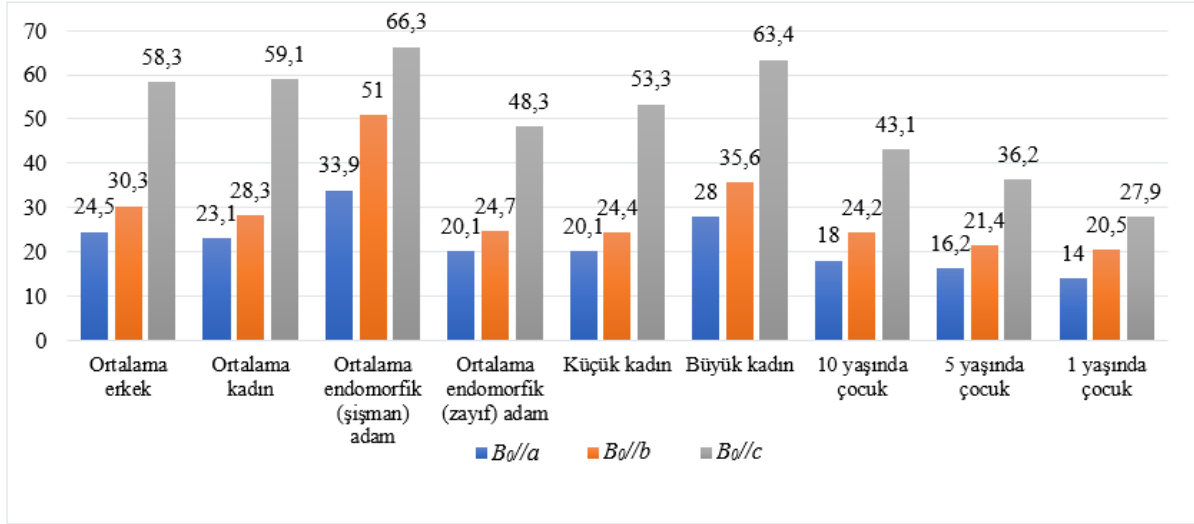
Model	E _{max} (µV/m)														
	B ₀ /la					B ₀ /lb					B ₀ /lc				
	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz
Ortalama erkek	24,6	49,2	491,6	4915,9	49159,8	30,4	60,8	608,1	6081,2	60812,4	58,4	116,7	1167,2	11672,5	116724,3
Ortalama kadın	23,7	47,4	473,7	4737	47370,2	28,2	56,5	564,6	5645,6	56455,6	59,2	118,4	1183,6	11835,8	118357,9
Ortalama endomorfik (şişman) adam	34	68	680	6799,7	67997,1	51,5	103	1029,7	10297	102971,3	66,3	132,7	1327	13269,7	132696,9
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	20,1	40,2	402,1	4021,2	40212,4	24,9	49,9	498,5	4985,3	49853,5	48,7	97,3	973,1	9731,4	97314
Küçük kadın	20,8	41,6	416,2	4162	41620,1	24,5	49,1	490,5	4905,5	49054,7	53,3	106,5	1065,3	10653,1	106530,7
Büyük kadın	28	55,9	559,1	5591	55909,5	35,2	70,4	704,1	7040,5	70405,4	63,6	127,2	1272,3	12722,8	127228,4
10 yaşında çocuk	18,9	37,8	377,7	3777,1	37771,1	24,2	48,4	483,9	4839	48390,5	43,1	86,1	861,5	8614,9	86149,3
5 yaşında çocuk	16,3	32,6	325,8	3258,2	32581,7	21,4	42,7	427,1	4270,6	42705,6	36	72,1	720,9	7208,8	72088,1
1 yaşında çocuk	14,1	28,3	282,5	2825,1	28251,1	20,7	41,3	413,3	4133	41329,7	28	56	560	5600	55998,6

Tablo 5. Farklı eliptik modellerde hesaplanan indüklenen maksimum akım yoğunluğu sonuçları.

Model	J _{max} (µA/m ²)														
	B ₀ //a				B ₀ //b				B ₀ //c						
	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	50 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz			
Ortalama erkek	2,5	7,4	73,7	983,2	14747,7	3	9,12	91,2	1216,2	18243,7	5,8	17,5	175,1	2334,5	35017,5
Ortalama kadın	2,4	7,10	71,1	947,4	14211,1	2,8	8,5	84,7	1129,1	16936,7	5,9	17,8	177,5	2367,2	35507,4
Ortalama endomorfik (şişman) adam	3,39	10,2	102	1359,9	20399,1	5,1	15,4	154,5	2059,4	30891,4	6,6	19,9	199,0	2653,9	39809
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	2	6	60,3	804,2	12063,7	2,5	7,5	74,8	997,1	14956	4,9	14,6	146	1946,3	29194,2
Küçük kadın	2,1	6,2	62,4	832,4	12486	2,5	7,4	73,6	981,1	14716,4	5,3	16	159,8	2130,6	31959,2
Büyük kadın	2,8	8,4	83,9	1118,2	16772,9	3,5	10,6	105,6	1408,1	21121,6	6,4	19,1	190,8	2544,6	38168,5
10 yaşında çocuk	1,9	5,7	56,7	755,4	11331,3	2,4	7,3	72,6	967,8	14517,1	4,3	12,9	129,2	1723	25844,8
5 yaşında çocuk	1,6	4,9	48,9	651,6	9774,5	2,13	6,4	64,1	854,1	12811,7	3,6	10,8	108,1	1441,8	21626,4
1 yaşında çocuk	1,4	4,2	42,4	565	8475,3	2,06	6,2	62	826,6	12398,9	2,8	8,4	84	1120	16799,6

4.2. Sayısal Simülasyon Sonuçları

50 Hz frekansında $1 \mu\text{T}$ 'ye normalize edilmiş manyetik alan şiddetine maruziyet sonucu vücutta indüklenen maksimum elektrik alan seviyesi, sonlu integrasyon yöntemi (SİT) tabanlı çalışan CST Studio Suite ile hesaplanmıştır. SİT, Maxwell denklemlerinin integral formlarına göre çözüm yapan bir yöntemdir. Problem uzayı zaman düzleminde sonlu farklar metoduna benzer şekilde ayrıklaştırılmaktadır. Ardından, uygun sınır koşullarına göre genel çözüme ulaşılmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulan eliptik model parametrelerine göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te simülasyon sonuçları sunulmuştur.



Şekil 4. Farklı eliptik modellerde indüklenen maksimum elektrik alanların simülasyon sonuçları.

Gövde modelinin boyutu, şekli, manyetik alanın yönü ve frekans, indüklenen elektrik alan ve akım yoğunluğu için ana parametrelerdir. Manyetik alan modelin uzun eksenine paralel uygulandığında (B_0/a), dokuda indüklenen elektrik alan diğer konfigürasyonlardan daha az hesaplanmıştır.

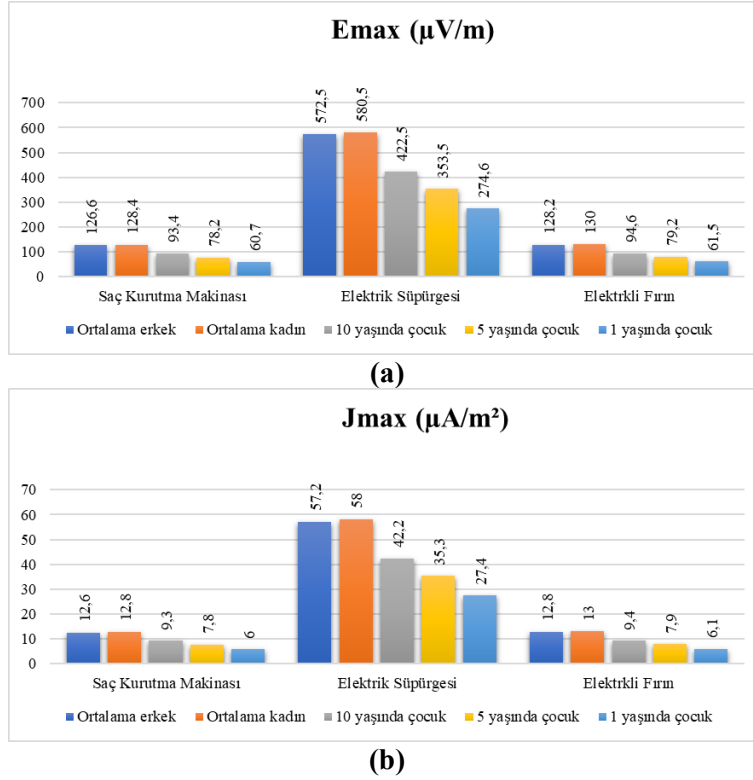
4.3. Sonuçların Karşılaştırılması

Bu çalışma sayesinde, ev ve iş yerlerinde kullanılan cihazların elektromanyetik çevreye etkileri incelenmiştir. Ayrıca şebeke frekansında ve 100 kHz'e kadar oluşturduğu manyetik alanların farklı vücut modellerinde indüklediği elektrik alanları ve akım yoğunlukları hesaplanmıştır. En yüksek alan seviyesi, vücudun yan ekseninin uzunluğuna göre elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde indüklenen alan seviyesi; vücudun şekline, boyutuna, maruz kalma sıklığına, vücudun alan kaynağına göre yönelimine ve frekansa bağlı olarak değişmektedir.

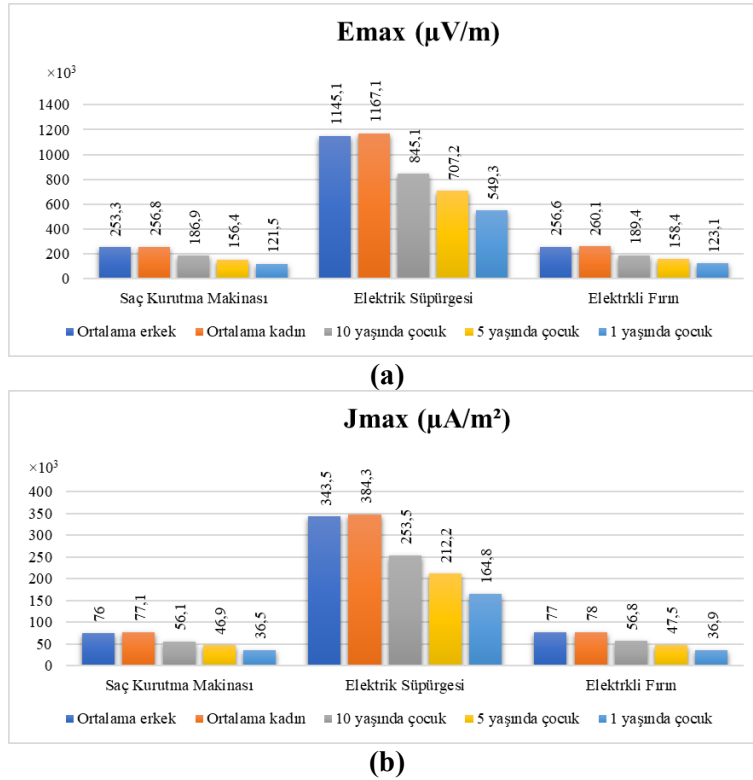
Simülasyonlar ile analitik sonuçlar incelendiğinde, birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Tablo 6'da 50 Hz frekansında aynı senaryolara göre elde edilen analitik sonuçlar ile simülasyon sonuçları, hata payları gözetilerek sunulmuştur. Ayrıca, gerçekleştirilen ölçümler sonucunda farklı yaş ve cinsiyetlerdeki kişilerin çeşitli elektrikli cihazların kullanımı esnasında maruz kaldığı manyetik alandan dolayı vücutlarında indüklenecek elektrik alan ile akım yoğunluğu değerleri de hesaplanmıştır ve Şekil 5 ile Şekil 6'da belirtilmiştir.

Tablo 6. 50 Hz çalışma frekansındaki manyetik alanın farklı eliptik modeller için gövdeye z-ekseni yönünde dik gelmesiyle ($B_0//a$), gövdeye y-ekseni yönünde dik gelmesiyle ($B_0//b$) ve gövdeye x-ekseni yönünde dik gelmesiyle ($B_0//c$) indükleyeceği maksimum elektrik alanının analitik sonuçları ile SİT tabanlı benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

Model	E _{max} (µV/m)								
	$B_0//a$			$B_0//b$			$B_0//c$		
	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı	Analitık Çözümler	SEY Tabanlı Çözümler	Hata Payı
Ortalama erkek	24,579	24,5	% 0,32	30,406	30,3	% 0,34	58,362	58,3	% 0,10
Ortalama kadın	23,685	23,1	% 2,46	28,227	28,3	% 0,25	59,178	59,1	% 0,13
Ortalama endomorfik (şişman) adam	33,998	33,9	% 0,28	51,485	51,0	% 0,94	66,348	66,3	% 0,07
Ortalama endomorfik (zayıf) adam	20,106	20,1	% 0,02	24,926	24,7	% 0,90	48,656	48,3	% 0,73
Küçük kadın	20,810	20,1	% 3,4	24,527	24,4	% 0,51	53,265	53,3	% 0,06
Büyük kadın	27,954	28,0	% 0,16	35,202	35,6	% 1,13	63,614	63,4	% 0,33
10 yaşında çocuk	18,885	18,0	% 4,68	24,195	24,2	% 0,02	43,074	43,1	% 0,06
5 yaşında çocuk	16,290	16,2	% 0,55	21,352	21,4	% 0,22	36,044	36,2	% 0,43
1 yaşında çocuk	14,125	14,0	% 0,88	20,664	20,5	% 0,79	27,99	27,9	% 0,32



Şekil 5. 50 Hz frekansındaki ölçüm sonuçlarına göre gövdeye x -ekseni yönünde dik gelen (B_0/c) manyetik alanın farklı eliptik modellerde indüklediği (a) maksimum elektrik alan seviyesi; (b) maksimum akım yoğunluğu.



Şekil 6. 100 kHz frekansındaki ölçüm sonuçlarına göre gövdeye x -ekseni yönünde dik gelen (B_0/c) manyetik alanın farklı eliptik modellerde indüklediği (a) maksimum elektrik alan seviyesi; (b) maksimum akım yoğunluğu.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, günlük hayatta ev ve işyerinde kullanılan cihazların yaydığı düşük frekans bölgesindeki elektromanyetik alanların dozimetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, 50 Hz ile 100 kHz arasında yapılmıştır. Buna göre, yaygın olarak kullanılan cihazlardan kaynaklanan elektrik ve manyetik alanların düşük frekans bölgesinde analitik ve nümerik model simülasyonları ve iyonize olmayan dozimetri değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, günlük hayatta kullanılan cihazların yaydığı alan seviyeleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre, en yüksek elektrik alan değeri 3 cm uzaklıktaki çamaşır makinesinden 7,52 V/m genliğinde, en düşük elektrik alan değeri ise 1 m uzaklıktaki elektrikli tıraş makinesinden ve bulaşık makinesinden 0,07 V/m olarak ölçülmüştür. Manyetik alan şiddeti ölçümlerine göre en yüksek değer, 3 cm uzaklıktaki elektrik süpürgesinden 9,81 μ T olarak elde edilmiştir. En düşük değer ise 1 m uzaklıktaki akıllı saat ve tablet cihazlarından 0,023 μ T olarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçları, ICNIRP'nin yayınladığı genel halk ve mesleki maruziyet limit değerlerinin altındadır.

Elektromanyetik çevrede manyetik alanın üç bileşeniyle de karşılaşılabilir ve o çevrede bulunan tüm canlıları etkileyebilir. Bu çalışma kapsamında farklı eliptik modellerde 50 Hz ile 100 kHz frekans aralığında hesaplanan dokuda indüklenen elektrik alan şiddeti, kaynak manyetik alanın yönüne ve modelin boyutuna göre değişmektedir. Kaynak manyetik alan, modelin uzun eksenine göre $(B_0//a)$ uygulandığında, vücutta indüklenen alan seviyelerinin ve akım yoğunluklarının diğer konfigürasyonlardan $(B_0//b)$ ve $(B_0//c)$ daha az olduğu hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, vücut eksenine yüz hizasından dik gelen manyetik alan $(B_0//c)$ daha fazla akım yoğunluğu indüklemiştir. 1 μ T'ye normalize edilen kaynak manyetik alanın etkisiyle dokuda indüklenen elektrik alan, analitik ve nümerik olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen frekans bandı sayesinde günlük hayatta elektrik şebekesinden kaynaklı 50 Hz frekansındaki alanların ve farklı frekanslarda çalışan anahtarlama elemanlarının sebep olduğu maruziyet modellenmiştir. Burada yapılan hesaplamalar normalize değerler olmasına rağmen ICNIRP'nin yayınladığı maruziyet limitlerinin altındadır. ICNIRP kılavuzu incelendiğinde belirtilen sınır değerlerinin sağlık etkileri için kesinlik arz etmediği, konuyla ilgili daha kapsamlı araştırmalar yapılması gerektiği belirtilmektedir. Bu çalışma kapsamında hesaplanan sonuçlara göre dokuda indüklenen en yüksek akım yoğunluğu, manyetik alanın yüz hizasına dik gelmesiyle gözlenmiştir.

Literatürdeki benzer çalışmalarda, elektromanyetik alanların etkilerini azaltmak için öneriler bulunmaktadır [3]. Elde edilen bulgulara göre, günlük hayatta elektrikle çalışan cihazların kullanımı ile konutlardaki elektrik tesisatı projelendirilmesine ilişkin önlemler alınabilir. Ev ve ofis ortamlarında kullanılmayan cihazların fişlerinin prizden çekilmesi önerilebilir. Çocuklarda maruziyet sürelerini azaltmak için elektrikli cihaz kullanımlarını olabildiğince sınırlandırmak bir çözüm olarak sunulabilir. Ev ortamında çocukların ve yetişkinlerin yatak odaları, elektrik hatlarına ve yaydıkları manyetik alanlara göre düzenlenebilir. Ofis ortamlarında ise yüksek alan kaynakları olarak belirtilen cihazlar için elektromanyetik ekranlama yöntemi sunulabilir. Ofis masalarının konumları, çalışanların maruz kaldıkları alan seviyeleri ve maruziyet eksenlerine göre yeniden düzenlenebilir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarına göre uzaklık arttıkça elektromanyetik alan seviyeleri azalmaktadır. Buna göre hem ev hem de ofis ortamında kullanılmayan cihazlardan olabildiğince uzaklaşmak, diğer bir çözüm olarak sunulabilir.

Elektromanyetik alanlara maruziyet, elektriğin kullanımının artmasından dolayı günümüzde incelenmesi gereken konulardan birisi olarak belirtilebilir. Araştırmacılar, bu disiplinle ilgili çalışmalarını yoğun bir şekilde devam ettirmektedir. Gelecek çalışmalarda, konuyla ilgili gerçekçi anatomik modeller üzerinde simülasyonlar yapılabilir. Ayrıca çözüm önlemlerinin etkilerini ele almak için teorik ve deneysel incelemeler gerçekleştirilebilir. İlerleyen çalışmalarımız, yüksek frekans bölgesindeki elektromanyetik alanların insan vücudu modeli üzerindeki dozimetrik analizleri ve uluslararası standartlara göre değerlendirilmesini de içermektedir.

REFERANSLAR

- [1] ICNIRP, Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz To 100 kHz), *Health Phys.* 99 (6), 818-836, 2010.
- [2] N. Wertheimer and E. Leeper, Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer, *Am. J. Epidemiol.* 109 (3), 273-284, 1979.
- [3] F.A. El-Marakby. Personal Exposure to Electromagnetic Fields Emitted from Household Electrical Appliances in Alexandria. *Journal of High Institute of Public Health.* 42 (2), 224-234, 2012.
- [4] M. Gallastegi, A. Jiménez-Zabala, L. Santa-Marina, J.J. Aurrekoetxea, M. Ayerdi, J. Ibarluzea, A. Huss, Exposure To Extremely Low And Intermediate-Frequency Magnetic And Electric Fields Among Children From The INMA-Gipuzkoa Cohort, *Environmental Research*, 157, 190-197, 2017.
- [5] C. Baumgardt-Elms, M. Schumann, W. Ahrens, K. Broman, A. Stang, I. Jahn and K.H. Jockel. Residential Exposure to Overhead High-Voltage Lines and the Risk of Testicular Cancer: Results of a Population-Based Case-Control Study in Hamburg (Germany). *Int Arch Occ Env Hea.* 78 (1), 20-26, 2005.
- [6] K. Ateş, Ş. Özen and H.F. Carlak, Elektrikli Ev Aletlerinin Elektromanyetik (EM) Işıma Karakteristiklerinin İncelenmesi ve EM Girişim analizi, 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016). 2016.
- [7] W.T. Kaune, J.L. Gutmann and R. Kavet, Comparison of Coupling of Humans to Electric and Magnetic Fields With Frequencies Between 100 Hz and 100 kHz, *Bioelectromagnetics.* 18, 67-76, 1997.
- [8] P.J. Dimbylow and R. Findlay, The Effects of Body Posture, Anatomy, Age and Pregnancy on the Calculation of Induced Current Densities at 50 Hz. *Radiat Prot Dosim.* 139 (4), 532-538, 2010.
- [9] S. Ozen, Evaluation and Measurement of Magnetic Field Exposure at a Typical High-Voltage Substation and Its Power Lines. *Radiat. Prot. Dosim* 128 (2), 198-205, 2008.
- [10] K. Ates, H.F. Carlak and S. Ozen, Magnetic Field Exposures due to Underground Power Cables: A Simulation Study, 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16). 2016.
- [11] K. Ates, H.F. Carlak and Sukru Ozen, Dosimetry Analysis of the Magnetic Field of Underground Power Cables and Magnetic Field Mitigation Using an Electromagnetic Shielding Technique, *Int. J. Occup. Saf. Ergo.* 28 (3), 1672-1682, 2022.
- [12] S. Helhel and S. Ozen, Assessment of Occupational Exposure to Magnetic Fields in High-Voltage Substations (154/34.5 kV), *Radiat. Prot. Dosim.* 128 (4), 464-470, 2008.
- [13] M.S. Linet, E.E. Hatch, R.A. Kleinerman, L.L. Robinson, W.T. Kaune, D.R. Friedman, R.K. Severson, C.M. Haines, C.T. Hartsock, S. Niwa vd. Residential Exposure to Magnetic Fields and Acute Lymphoblastic Leuke-Mia in Children. *New Eng. J. Med.* 337 (1), 1-7, 1997.
- [14] C.H. Durney, H. Mussoudi and M.F. Iskender, *Radio Frequency Radiation Dosimetry Handbook* Fourth Ed. Brooks Air Force Base, TX: United State Air Force, School of Aerospace Medicine, Report USAFSAMTR-85-73, 1986.
- [15] S. Ozen, Low-Frequency Transient Electric and Magnetic Fields Coupling to Child Body. *Radiat. Prot. Dosim.* 128 (1), 62-67, 2007.
- [16] E. Yavuz Dirik, İş Yerleri ve Yaşam Alanlarında Bulunan Cihazların Elektromanyetik Alan Seviyelerinin Belirlenmesi ve Elektromanyetik Risk Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 2022.

-
- [17] M. Bedeloğlu, N. İl, K. Ateş, Ş. Özen, Measurement and Analysis of Electric and Magnetic Field Strength in Grid-Tied Photovoltaic Power System Components. *Radiat. Prot. Dosim.* 194 (1), 57-64, 2021.
- [18] M. Erol, K. Ateş and Ş. Özen, Elektrikli Araçlarda Kablosuz Güç Transferi Sistemi Tasarımı ve Elektromanyetik Alan Maruziyetinin Değerlendirilmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* 6 (1), 605-618, 2023.
- [19] H.F. Carlak, Ş. Özen and S. Bilgin, Low-Frequency Exposure Analysis Using Electric and Magnetic Field Measurements and Predictions in the Proximity of Power Transmission Lines in Urban Areas, *Turk. J. Electr. Eng. Co.* 25 (5), 3994-4005, 2017.
- [20] H. Massoudi, C.H. Durney and C.C. Johnson, Long-Wavelength Analysis of Plane Wave Irradiation of an Ellipsoidal Model of Man, *IEEE Transact. Microwave Theory Tech.* MTT-25 (1), 41-52, 1977.
- [21] F.X. Hart, Numerical and Analytical Methods to Determine the Current Density Distributions Produced in Human and Rat Models by Electric and Magnetic Fields, *Bioelectromagnetics.* 13 (S1), 27-42, 1992.
- [22] R.W.P. King, A Review of Analytically Determined Electric Fields and Currents Induced in the Human Body When Exposed to 50–60-Hz Electromagnetic Fields, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 52 (5), 1186-1192, 2004.



**KUDRET NARI YAĞI YÜKLÜ BİYOBOZUNUR NANOKAPSÜLLERİN
YARA ÖRTÜSÜ AMAÇLI DİZAYNI VE ÜRETİMİ**

**DESIGN AND PRODUCTION OF MOMORDICA CHARANTIA OIL LOADED
BIODEGRADABLE NANOCAPSULES FOR WOUND HEALING PURPOSES**

Elif BOZKIR¹ Fatma İNAN¹ İrem Mukaddes BİLGİSEVEN² Serdar KARAKURT^{*1,2}

1 Biyokimya Bölümü, Fen Fakültesi, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye

2 Kimyasal Biyolojik Radyolojik ve Nükleer Savunma Ana Bilim Dalı, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye

ABSTRACT

Wound formation occurs as a result of chemical, chemical, mechanical, or thermal damage, leading to the disruption of tissue integrity on the skin surface, and can potentially create complications in our body at any moment. The rapid treatment of wounds and the care of wounds depend on the wound dressing material. Nanofiber wound dressings produced by the electrospinning method have become a promising method for the rapid healing of wounds. The nano-sized fibers in nanofiber wound dressings are highly preferred as an ideal treatment method due to their similarities to the extracellular matrix and their ability to contain drugs/biological agents, providing a suitable environment for wound healing. In this study, the aim was to develop a polymer-based nanofiber wound dressing that significantly accelerates the healing of wounds and enhances patient well-being, utilizing Momordica charantia (bitter melon) oil containing active biological agents. For this purpose, Momordica charantia oil was encapsulated into poly(lactic-co-glycolic acid) and electrospun into a polyethylene glycol-based nanofiber wound dressing. Fourier Transform Infrared (FTIR) and Scanning Electron Microscope (SEM) analyses were performed to determine the chemical structure and morphology of the obtained nanofiber wound dressing. In the FTIR analysis of the nanofiber wound dressing developed with biodegradable nanocapsules, the chemical bonds of the nanofiber wound dressing were observed in detail. In the SEM analysis, uniformly sized PLGA nanocapsules were obtained, and it was observed that PLGA nanoparticles encapsulated with bitter melon oil were homogeneously distributed among the PEG nanospray structure. In conclusion, the nanofiber wound dressing developed to protect wounds from infections and expedite the healing process is an important candidate as an integrated polymeric wound dressing material, combined with traditional aromatic herbal oil treatment.

Keywords: Electrospinning; Momordica charantia (bitter melon); Nanofiber Wound Dressing; PEG; PLGA

ÖZET

Yara, kimyasal, mekanik veya termal hasar sonucu cilt yüzeyindeki doku bütünlüğünün bozulmasıyla meydana gelmektedir ve her an vücudumuzda komplikasyon yaratabilir. Yaranın hızlı bir şekilde tedavi edilebilmesi ve yaraların bakımı pansuman materyaline bağlı olarak değişmektedir. Elektro-eğirme yöntemi ile üretilen nanofiber yara örtüleri, yaraların hızlı iyileşmesi açısından umut verici bir yöntem haline gelmiştir. Nanofiber yara örtülerinde yer alan nano boyutlu lifler, hücre dışı matrikse benzerliklerinden dolayı ve ilaç/biyolojik ajan içerebileceğinden kaynaklı olarak yaraların iyileşmesi için uygun ortam sağladıkları için oldukça tercih edilen ideal bir tedavi yöntemidir. Bu çalışmada, aktif biyolojik ajanlar içeren Momordica charantia (kudret narı) yağı sayesinde yaraların iyileşmesini önemli ölçüde hızlandıran ve hasta refahını artıran polimer tabanlı nanofiber yara örtüsü geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için, Momordica charantia yağı polilaktikoglikolik asit içerisine enkapsüle edilerek, polietilen glikol tabanlı nanofiber yara örtüsü elektro-spreylenmiştir. Elde edilen nanofiber yara örtüsünün kimyasal yapısı ve morfolojisi için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nanofiber yara örtüsünün FTIR analizinde biyobozunur nanokapsüllerle geliştirilen nanofiber yara örtüsünün kimyasal bağları ayrıntılı bir şekilde gözlenmiştir. SEM analizinde ise eş boyutlu PLGA nanokapsüllerin elde edildiği ve kudret narı yağı ile kapsüllenen PLGA nanopartiküllerinin PEG nanosprey yapısı arasında homojen dağıldığı görülmüştür. Sonuç olarak yarayı enfeksiyonlardan korumak, iyileşme sürecini hızlandırmak amacı ile geliştirilen nanofiber yara örtüsü geleneksel aromatik bitkisel yağ tedavisi ile birleştirilerek entegre polimerik yara örtü malzemesi olarak kullanılabilir önemli bir adaydır.

Anahtar Kelimeler: Elektrospinning; Momordica charantia (kudret narı); Nanofiber Yara Örtüsü; PEG; PLGA

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: kserdar1@yahoo.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
02.11.2023	15.12.2023	19.12.2023	27.12.2023

1. GİRİŞ

Deri, canlıların kendilerini çevre etkilerinden koruyan ve birçok biyolojik fonksiyonu yerine getiren en büyük duyu organıdır. Travma, böcek ısırıkları, ameliyat gibi benzer durumlarda derinin anatomik yapısı ve fonksiyonunun bozulması yara olarak adlandırılmaktadır. Yara iyileşmesinde derinin fonksiyonu yeniden sağlanılarak anatomik yapı yeniden oluşmaktadır. İnsan vücudunda yara iyileşmesi, dört aşamada gerçekleşir: hemostaz, inflamasyon, proliferasyon ve yeniden şekillenme. Bu aşamalar ve bu aşamaların getirdiği biyofizyolojik işlemler belirli zaman aralıklarında birbirini takip eden uygun bir sıralamada ve belirli bir süre boyunca devam etmelidir [1]. İnflamasyon, bozulan doku bütünlüğüne karşı yabancı maddelerin yayılımını engellemek, kan kaybını önlemek ve dokunun onarımı için ortam hazırlanan safhadır. Bu süreçte trombositler, trombosit kaynaklı büyüme faktörü (PDGF), makrofajlar, sitokinler iş görmektedir. Hücresel proliferasyon safhasında fibroblast, keratosit, endotel hücreler bulunur ve yaranın olduğu bölgede granülasyon dokunun oluşumu gerçekleşir. Yara iyileşme sürecinin son ve en uzun evresi olan yeniden şekillenme, granülasyon dokunun yerini skar dokunun aldığı safhadır [2, 3]. Süreçte bir kesinti, anormallik ya da sürede uzama gerçekleştiğinde yara iyileşmesi gecikebilir veya iyileşmeyen kronik yaralar meydana gelmektedir.

Yaranın meydana gelmesinin ardından patolojik istilayı engelleyebilmek ve vücut dengesinin sağlanması açısından kısa sürede ve etkili tedavi yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [4]. Bu amaçla elektro-eğirme yöntemi ile üretilen nanofiber yara örtüleri; geniş yüzey alanı, üç boyutlu destek yapısı ve küçük gözenekli yapıları sayesinde yaraların hızlı iyileşmesinde önemli role sahiptir [5]. Nanofiber yapıların hücre dışı matrikse (ECM) benzerliğinden dolayı yara çevresinde bulunan hücreler ile etkileşim kurabilir ve hücrelerin büyümesine, çoğalmasında yardımcı olurlar [6]. Nanofiber yapıları tedavi malzemeleri, yüksek hacim ve yüzey oranlarının çeşitli biyoaktif molekülleri yükleme kapasitelerine sahip olması nedeniyle yara bakımı için oldukça etkili potansiyele sahip yapılarıdır [7]. Elektro-eğirme yöntemi, basit ve kusursuz morfolojik yapıya sahip nanofiberler elde etmek için kullanılan bir tekniktir [8]. Bu yöntem, yüksek bir elektrik alanı altında enjektör iğnesinden çıkan çözeltiyi püskürtme işlemi yaparak karşısında bulunan toplayıcının yüzeyinde nanofiber yapıların meydana gelmesine dayanmaktadır [9]. Elektro-eğirme yöntemi ile elde edilen nanofiberlerde poliüretan, polivinilalkol, polietilen glikol, jelatin gibi çeşitli doğal veya sentetik polimerler kullanılabilir. Poliüretan (PU), esnekliği ve güçlü mukavemet sergilemesi sayesinde nanofiber membranlar için kullanılabilir mükemmel bir matrikstir. Geliştirilen poliüretan/propolis nanofiber yara örtüsü güçlü antibakteriyel özelliklerine ek olarak fibroblast hücrelerinde hücre canlılığını artırarak yara pansumanı ve cilt doku mühendisliğinde kullanılabilir [10]. Diğer yandan polivinil alkol (PVA), mükemmel biyoyumluluğa sahip bir polimerdir. PVA/gümüş nanopartiküller/salyangoz mukus kompozitlerinden geliştirilen nanofiber yara pansumanı enfekte cilt bölgesinde bakteriyel büyümenin engellenmesiyle *in vitro* ve *in vivo* yara iyileştirme çalışmalarında hücre canlılığını artırmıştır [11]. Polilaktik-ko-glikolik asit (PLGA) ise istenilen şekil ve boyutta işlenebilmesi ve her boyuttaki molekülleri kapsülleyebilme özelliğine sahip olması sayesinde sık tercih edilen biyoyumlu kopolimerlerdendir [12, 13]. Polietilen glikol (PEG) hem suda hem de organik çözücülerde çözünebilir, düşük toksisiteye ve düşük erime noktasına sahiptir ve mükemmel biyoyumluluğu sayesinde ilaç dağıtım sistemlerinde ve doku mühendisliğinde kullanılabilir [14-16]. Elektro-eğirme yöntemi ile geliştirilen PLA/PEG/kurkumin (Cur) kompozit nanofiberlerinin gözenekli yapısı sayesinde ilaç salım özelliği geliştirilerek ilaç dağıtım, biyolojik iskele, tıbbi pansuman ve antibakteriyel malzemeler gibi biyomedikal uygulamalar için büyük potansiyele sahip olabilir [17]. *Momordica charantia* (kudret narı)'nın viral enfeksiyonlar, diyabet, HIV, inflamasyon, kanser ve ülser gibi birçok hastalığın tedavisinde kullanılan tıbbi bir bitki olduğu bilinmektedir [18]. Ayrıca bazı çalışmalarda yara bakımı uygulamalarında kullanılmaya başlandığı görülmektedir. *Momordica charantia* PLA/Ag nanofiberlerin yeşil sentezi için tercih edilmiştir [19], yine başka bir çalışmada farelerde anti-inflamatuar bir materyal olarak kudret narı kullanılmış ve proinflamatuar sitokinleri azaltarak sepsisli farelerde inflamasyon tepkilerini artırarak etki göstermiştir [20]. PLGA nanotaşıyıcı sistemleri, genellikle ilaç, gen, protein ve diğer biyoaktif maddelerin taşınması ve kontrollü salınımını sağlamak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Bu biyopolimerin temel özelliklerinden biri, vücut içinde doğal olarak biyolojik olarak parçalanabilir olması ve bu parçalanma sürecinde oluşan ürünlerin zararsız metabolitlere dönüşebilmesidir. Bu özelliği, nanotaşıyıcıların vücutta uzun süreli bir kalmayı önleyerek istenmeyen birikimleri engelleyerek, biyolojik uyumluluk

açısından avantajlı kılar. PLGA, ilaç veya diğer biyoaktif maddelerin kontrollü salınımını gerçekleştirmek amacıyla bir matriks olarak kullanılabilir. Bu özellik, tedavi edilen bölgede uzun süreli bir etki sağlamak açısından kritiktir. PLGA nanotaşıyıcıları, özellikle ilaç taşınması alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. İlaç molekülleri, nanotaşıyıcı içine entegre edilir ve bu nanotaşıyıcılar, hedef bölgeye taşınarak zaman içinde kontrollü bir ilaç salınımını gerçekleştirir. Ayrıca, PLGA nanotaşıyıcıları gen terapisi uygulamalarında da etkili bir rol oynayabilir. Bu sistemler, genetik materyali koruyarak ve kontrollü salınım mekanizmalarını kullanarak gen terapisinin etkinliğini artırabilir. PLGA nanotaşıyıcı sistemleri, sadece ilaç ve gen terapisi alanlarında değil, aynı zamanda aşı taşıyıcısı, görüntüleme ajanı taşıyıcısı ve doku mühendisliği gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu çok yönlü kullanım, PLGA nanotaşıyıcılarını biyomedikal araştırmalarda öne çıkan bir malzeme haline getirmiştir. Bu nanotaşıyıcılar, genellikle emülsiyon, çift emülsiyon, çözelti çekimi ve elektro-eğirme gibi çeşitli üretim yöntemleri ile elde edilebilir.

Bu çalışmada, antibakteriyel, antidiyabetik, antioksidan [21] özelliklere sahip *Momordica charantia* (kudret narı) yağı PLGA içerisine çift emülsiyon uçurma yöntemi ile enkapsüle edilmiştir. Ardından pansuman malzemesi üzerine taşıyıcı katman olarak adlandırdığımız ve içerisinde tedavi edici özelliğe sahip *Momordica charantia* yağında bulunduğu biyobozunur nanokapsül-PEG kompleksi elektro-eğirme yöntemi ile üretilmiştir. Böylelikle akut ve kronik olarak meydana gelen yaraların iyileştirilmesinde kullanılmak üzere yenilikçi bir yara pansuman malzemesinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yara pansuman malzemesinde yaranın biyolojik aktivitesi oldukça iyi olan kudret narı yağı ile hızlı bir şekilde iyileşmesi ve bu süre içerisinde elastik yapıya sahip olması nedeniyle hastanın günlük konforunu olumsuz yönde etkilemeden yaranın kapanmasına destekçi olması amaçlanmıştır. Geliştirilen yara örtüsünün kimyasal karakterizasyon çalışmaları FTIR, SEM ve DLS kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen nanofiber yara örtüsü geleneksel aromatik bitkisel yağ tedavisi ile birleştirilerek entegre polimerik yara örtü malzemesi olarak kullanılabilen önemli bir aday niteliği taşımaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler

Polilaktik-ko-glikolik asit (PLGA, Mw:100 kDa), Polietilen glikol (PEG, Mw = 100 kDa), Polivinil alkol (PVA, Mw: 130 kDa), Diklorometan (DCM) ve Dimetilformamid (DMF) Sigma-Aldrich (Missouri, ABD)'den satın alınmıştır.

2.2. Biyobozunur Nanokapsül Sentezi

Nanokapsüller çift emülsiyon uçurma yöntemine göre sentezlenmiştir. Öncelikle 50 mg PLGA tartılarak 500 µL DCM içerisinde çözdürülmüştür. %4 PVA ve %0,3 PVA çözeltileri ayrı ayrı dH₂O'da hazırlanmıştır. *Momordica charantia* (Kudret Narı) yağı kapsülasyonu için PLGA çözeltisi içine 150 µL kapsülasyon maddesi, PVA (%4) ve PVA (%0,3) eklenerek DCM'nin uzaklaşması için 3 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Nanokapsüller 10.000 x rpm'de 15 dakika boyunca santrifüjlenmiştir. Yıkama işlemi dH₂O ile yapılmıştır ve 3 kez tekrarlanmıştır. Santrifüj ve yıkama işlemleri sonunda nanokapsüller-110°C'de liyofilizatörde kurutularak katı hale getirilmiştir [22].

2.3. Nanofiber Yara Örtüsü Tasarımı

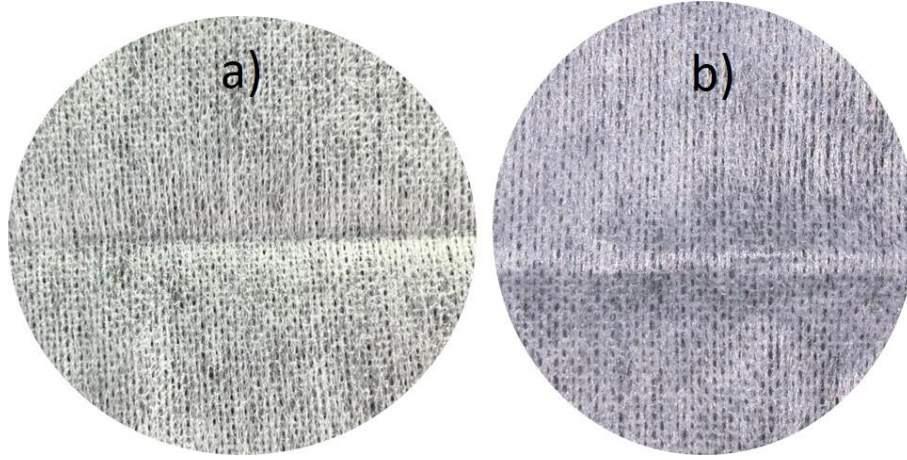
PEG ve biyobozunur nanokapsül içeren nanofiber yara örtüsü elektro-eğirme yöntemiyle geliştirilmiştir [23]. İdeal bir yara örtüsü üretebilmek amacıyla optimizasyon çalışmaları için %3, %5 ve %10 konsantrasyonlarda PEG çözeltisi DMF çözücüsünde ayrı ayrı hazırlanmıştır. Polimer çözeltileri 5 ml'lik bir şırıngaya yerleştirilmiştir. Elektro-eğirme kullanım parametreleri olarak 10-22 kV, 0,5-1,5 ml/saat akış hızı ve 10-20 cm toplayıcı mesafesi ayarlanarak optimum koşullar araştırılmıştır. En ideal konsantrasyon olarak %5 PEG seçilmiştir ve nanofiber yara örtüsü için bu konsantrasyon 1:10 oranında biyobozunur nanokapsüllerle birleştirilmiştir. Polimer ve nanokapsül karışımı 5 mL'lik şırıngaya alınarak 20 kV, 1 ml/saat akış hızında, 18 cm mesafede 60 dk boyunca elektro-spreylenmiştir.

2.4. Morfolojik Analiz

Biyobozunur nanokapsüllerin boyut dağılımları ve zeta potansiyelleri Dinamik Işık Kırılımı (DLS, Malvern) ile araştırılmıştır. PEG ve biyobozunur nanokapsül içeren nanofiber yara örtüsünün yüzey grupları ve kimyasal yapısı ATR-FTIR (Thermo Scientific Nicolet iS-5 ATR/FTIR Spektrometresi) ve yüzey morfolojisi ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak (JEOL JSM 7600F) incelenmiştir [24].

3. BULGULAR

Yara örtüsünü ideal koşullarda üretebilmek için öncelikle farklı konsantrasyonlarda hazırlanan PEG polimer çözeltileri için farklı elektro-eğirme parametreleri kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir (**Tablo 1**). En etkili ve başarılı nanofiber üretim süreci için ideal PEG konsantrasyonu %5 olarak seçilmiştir. Voltaj 20 kV, şırınga ucu ve kolektör arasındaki uzaklık 18 cm, akış hızı 1.0 mL/saat olacak şekilde nanofiber üretilmiştir (**Şekil 1**).



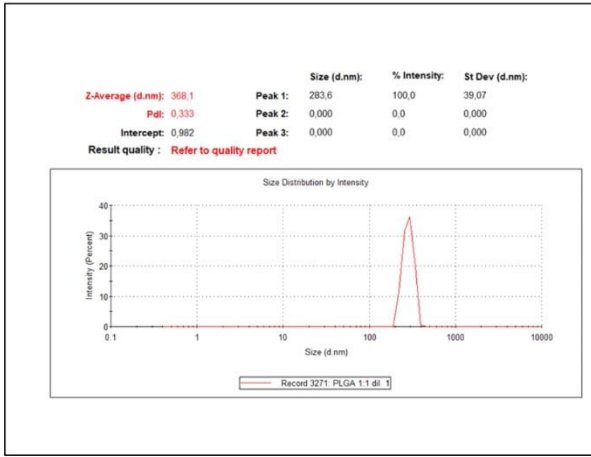
Şekil 1. Oluşturulan biyobozunur nano yapıları **a)** Elyaf malzeme; **b)** Elyaf malzeme üzerine kudret narı içeren PLGA kapsülleri ile PEG karışımı

Tablo 1 Yara örtüsü üretiminde kullanılan PEG polimeri için farklı elektro-eğirme koşulları. Gözlem sütunundaki + işareti nanofiberlerin başarılı bir şekilde oluştuğunu gösteren proses koşullarını ifade etmektedir.

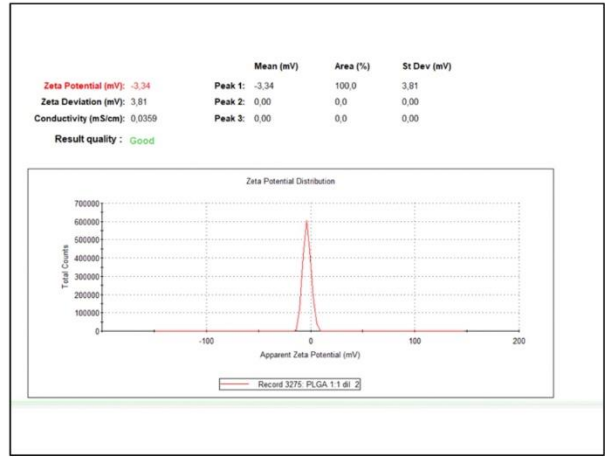
Polimer Konsantrasyonu (%)	Voltaj (kV)	Mesafe (cm)	Enjeksiyon hızı (ml/saat)	Gözlem
%3 PEG	12	15	0.8	-
	15	15	0.8	-
	18	18	1.0	-
%5 PEG	15	12	0.5	-
	20	18	1.0	+
	22	15	0.5	+
%10 PEG	18	15	1.0	+
	22	15	0.5	-
	22	18	0.5	-

Biyobozunur nanokapsüllerin boyut dağılımlarını öğrenmek için öncelikli olarak DLS analizi gerçekleştirilmiştir. Kudret narı yağı ile kapsüllenen PLGA nanopartiküllerinin boyutunun 100-300 nm arasında olduğu görülmüştür. **Şekil 2a**'ya göre nanopartiküllerin ortalama parçacık boyutu 283.6 ± 39.07 nm olarak belirlenmiştir. PLGA nanopartiküllerinin, nanopartikül yüzeylerinde karboksil uç gruplarının varlığından dolayı -3.34 ± 3.81 mV zeta potansiyeline sahip olduğu gözlenmiştir (**Şekil 2b**). Elektro-eğirme yöntemi ile geliştirilen nanofiber yara örtüsünün SEM görüntüsünde eş boyutlu PLGA nanokapsüllerin elde edildiği ve kudret narı yağı ile kapsüllenen PLGA nanopartiküllerinin PEG nanosprey yapısı arasında homojen dağıldığı görülmektedir (**Şekil 2c**). PLGA nanofiberlerin PEG ile elektro-sprey yapması sonucu ve yapıda kudret narı yağının bulunması ile SEM görüntülerinde mikro küre oluşumları gözlenmiştir. **Şekil 2d**'deki ATR-FTIR sonuçlarına göre biyobozunur nanokapsüllerle geliştirilen nanofiber yara örtüsünün kimyasal bağları ayrıntılı bir şekilde gözlenmiştir. FT-IR spektrumunda gözlenen 1466 cm^{-1} 'deki pik muhtemelen kopolimerin karbonil grubunun bir parçasıdır. 1059 cm^{-1} 'deki pik PEG'in varlığı sonucu yapıda meydana gelen C-O-C bağından kaynaklanabilir. PLGA'nın varlığı ise 2877 cm^{-1} 'de C-H bandını gösteren bant ile doğrulanmıştır [25].

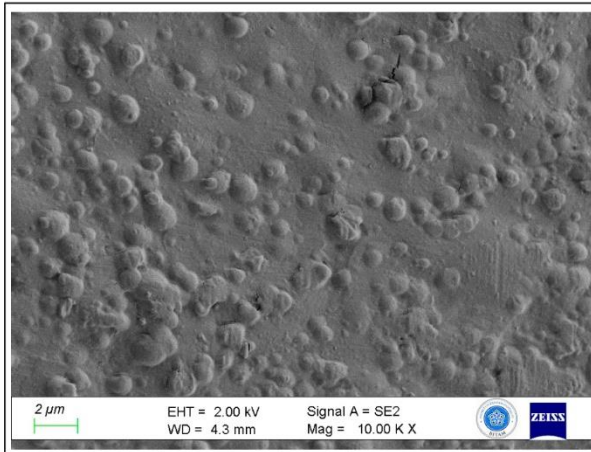
a)



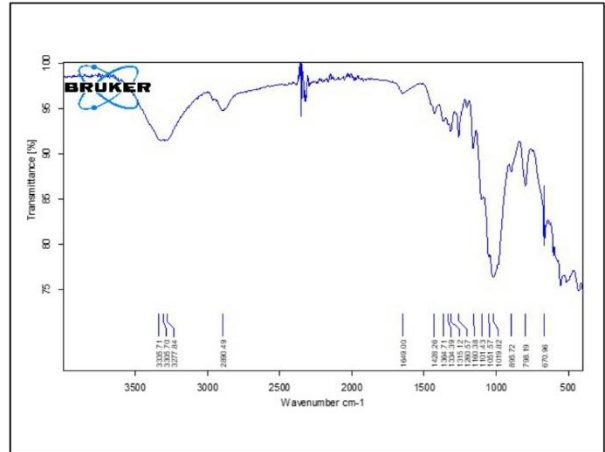
b)



c)



d)



Şekil 2. Kudret narı yağı yüklü biyobozunur nanokapsüllerin kimyasal karakterizasyonlarına ait analiz sonuçları a) Ortalama partikül boyutları; b) Zeta potansiyelleri; c) SEM görüntüleri; d) ATR-FTIR sonuçları.

4. TARTIŞMA

Yara iyileşmesi sürecinde, hemostatik, inflamatuvar, proliferatif ve remodelleme olmak üzere dört temel adım mevcuttur. Cildin bariyer fonksiyonu, vücudu çevresel etkenlere karşı koruma, nemin muhafazası ve patojenlere karşı direnç gösterme gibi kritik bir rol oynar. Bu nedenle, cilt bütünlüğünün zarar

görmesi, vücut için potansiyel ciddi sağlık riskleri doğurabilir. Hasar görmüş cildin hızlı iyileşmesini sağlamak amacıyla, yara bölgesindeki intrinsik iyileşme süreci derhal başlatılır. Yara iyileşme süreci karışık süreçleri içinde barındıran patofizyolojik bir süreçtir. Yara iyileşmesi sürecine engel olan yara enfeksiyonunun önlenmesine ek olarak etkili ve kapsamlı yara bakımının yapılması yara bakımı açısından önem kazanmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen yeni nesil nanofiber yara örtüler içerdiği çeşitli polimerler sayesinde ve biyoaktif ajanları dahil etme yeteneği ve ECM'yi taklit edebilme yeteneklerinden dolayı tercih edilmektedir [12]. Bu çalışmada kudret narı yağı PLGA içerisine çift emülsiyon uçurma yöntemi ile enkapsüle edilerek PEG ile kompleks oluşturulmuş ve elektro-eğirme yöntemi ile yara örtüsü üretilmiştir. Geliştirilen yara örtüsünün amacı şeker hastaları başta olmak üzere akut ve kronik yaralanmalara maruz kalan hastaların iyileşmelerinde kullanılmak üzere, mevcut yara pansuman malzemelerinden farklı olarak bitkisel tedavi edici ajanı biyobozunur polimer nanopartikül içerisine kapsülleyerek nanopüskürtme yöntemi ile yara örtüsünün destek yüzeylerini oluşturmaktır. Elektrospinning yalnızca tek bir polimer nanofiberin hazırlanmasına değil, aynı zamanda birden fazla polimerin karıştırılmasına ve bunların biyoaktif maddelerle yüklenmesine olanak tanır ve geniş bir şekilde yara iyileşmesinde kullanılmaktadır [26]. Derinin ekstrasellüler matriksi, kollajen, elastin, laminin ve çeşitli polisakkaritler ve proteoglikanların fibroz yapısal proteinler olarak bir araya gelmesinden oluşur. Elektrospinning ile deri dokusundaki ECM ile benzer bir kompozisyon ve yapı/sistemdeki nanofiberler üretilebilir. Elektrospun nanofiberler, deri hücre proliferasyonu, göçü, diferansiyasyonu ve ekstrasellüler matriks birikimi tepkilerini düzenleyebilir [27]. Bu benzersiz özellikler nedeniyle nanofiberler, cerrahi dikişler, yara pansumanları ve yara iyileşmesi ile doku mühendisliği gibi alanlarda kullanılabilir gibi, aynı zamanda enfeksiyon önleme amacıyla antimikrobiyal ajanlar içeren nanofiber pansumanlar veya dikişler ile de kullanılabilir, çünkü bakteriler çoğu antimikrobiyal ajan, örneğin antibiyotiklere karşı bazı direnç geliştirmişlerdir [28]. Nanofiber yara örtüleri tasarlanırken yara iyileşmesi sürecini teşvik etmek ve bu süreçte mikrobiyal kontaminasyonun önüne geçebilmek için uygun polimerler seçilmelidir. Yapıya doğal ürünler eklemek biyoyumluluğu ve tıbbi özellikleri geliştirerek yeşil kimyanın avantajlarını sunmaktadır. Literatürde nanofiber yara örtüsü tasarlanırken *Momordica charantia* farklı amaçlarla kullanılmıştır. *Momordica charantia* ekstraktının indirgeyici olarak kullanıldığı PLA/Ag nanofiberlerin antibakteriyel özellikleri ve *in vitro* biyoyumluluğunun arttığı gözlenmiştir [19]. Farklı bir çalışmada *Momordica charantia* yüklü PVA nanofiberleri hem gram pozitif hem de gram negatif bakterilere karşı uygun antibakteriyel aktivite göstermiştir [29]. *Momordica charantia*'daki vicin ve polipeptit-p gibi aktif bileşikler hipoglisemik özellikler sergilerken aynı zamanda pektinler, saponinler ve steroidal glikozitler de içerir [30]. Bitkisel kaynaklardan elde edilen pektin ve saponinlerin yara iyileştirici özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. *Momordica charantia* özütü kullanılarak hazırlanan merhem sıçan yaralarını povidon merheminden daha iyi ve daha hızlı bir şekilde iyileştirmiştir [31]. Geliştirilen yara örtüsünün kimyasal karakterizasyonu başarılı bir şekilde nanofiber yapının üretildiğini göstermektedir. Ancak üretilen yara örtüsünün tam iyileşme mekanizmasını ortaya çıkarmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Yapılacak *in vitro* ve *in vivo* çalışmalar neticesinde yara örtüsünün iyileştirme gücü araştırılarak moleküler mekanizmasının aydınlatılması gerekmektedir.

5. SONUÇ

Yara örtüleri tasarlanırken nanofiber yapıların ve pozitif biyolojik aktiviteye sahip doğal maddelerin kombinasyon halinde kullanımları biyoaktif/interaktif yara pansuman malzemeleri geliştirilmesi açısından dikkat çekici özellikler taşımaktadır. Nanofiber yapıların yüksek yüzey/hacim oranları, kontrollü ilaç salınım kapasiteleri, ayarlanabilen gözenekli yapıları, su buharı ve oksijen geçirgenlikleri büyüleyici özellikler sunmaktadır. Geliştirilen nanofiberlerin bu fiziksel özelliklerine ek olarak *Momordica charantia* yağı yüklü biyobozunur nanokapsüllerin antioksidan özellikleri ve hücre proliferatif aktiviteleriyle birleştirilerek biyolojik özelliklerinin güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen kimyasal karakterizasyonlar neticesinde nanofiberlerin çapları, nanofiberlerin morfolojileri ve gözenek yapıları yara iyileşmesi için uygun ortam sağlayabilecek özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine [Proje no:23402001] destekleri için teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

- [1] Guo, S. and L.A. Dipietro, Factors affecting wound healing, *J Dent Res*, 89(3), 219-29, 2010.
- [2] Karasu, A. and B. Bakir, Yara ve Yara İyileşmesi (Wound and Wound Healing), 36-43, 2008.
- [3] Wang, P.-H., et al., Wound healing, *Journal of the Chinese Medical Association*, 81(2), 2018.
- [4] Simões, D., et al., Recent advances on antimicrobial wound dressing: A review, *Eur J Pharm Biopharm*, 127, 130-141, 2018.
- [5] Jiang, Z., et al., Nanofiber Scaffolds as Drug Delivery Systems Promoting Wound Healing, *Pharmaceutics*, 15(7), 1829, 2023.
- [6] Homaeigohar, S. and A.R. Boccaccini, Antibacterial biohybrid nanofibers for wound dressings, *Acta Biomaterialia*, 107, 25-49, 2020.
- [7] Wang, F., et al., Advances in Electrospinning of Natural Biomaterials for Wound Dressing, *Journal of Nanomaterials*, 2020, 8719859, 2020.
- [8] Sarwar, M.N., et al., Electrospun PVA/CuONPs/Bitter Gourd Nanofibers with Improved Cytocompatibility and Antibacterial Properties: Application as Antibacterial Wound Dressing, *Polymers*, 14(7), 1361, 2022.
- [9] Bhardwaj, N. and S.C. Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advances*, 28(3), 325-347, 2010.
- [10] Kim, J.I., et al., Electrospun propolis/polyurethane composite nanofibers for biomedical applications, *Materials Science and Engineering: C*, 44, 52-57, 2014.
- [11] El-Attar, A.A., et al., Silver/Snail Mucous PVA Nanofibers: Electrospun Synthesis and Antibacterial and Wound Healing Activities, *Membranes (Basel)*, 12(5), 2022.
- [12] Liu, S.-J., et al., Electrospun PLGA/collagen nanofibrous membrane as early-stage wound dressing, *Journal of Membrane Science*, 355(1), 53-59, 2010.
- [13] Makadia, H.K. and S.J. Siegel, Poly Lactic-co-Glycolic Acid (PLGA) as Biodegradable Controlled Drug Delivery Carrier, *Polymers (Basel)*, 3(3), 1377-1397, 2011.
- [14] Kikuchi, A., 4.17 Surface-Grafting Methods for Biomaterials, in *Comprehensive Biomaterials II*, P. Ducheyne, Editor. 2017, Elsevier: Oxford. p. 292-302.
- [15] Badi, N., Non-linear PEG-based thermoresponsive polymer systems, *Progress in Polymer Science*, 66, 54-79, 2017.
- [16] Rahmani, S., et al., Chapter 7 - Polymer nanocomposites for biomedical applications, in *Fundamentals of Bionanomaterials*, A. Barhoum, J. Jeevanandam, and M.K. Danquah, Editors. 2022, Elsevier. p. 175-215.
- [17] Wang, F., et al., Preparation, Characterization and Properties of Porous PLA/PEG/Curcumin Composite Nanofibers for Antibacterial Application, *Nanomaterials (Basel)*, 9(4), 2019.
- [18] Dandawate, P.R., et al., Bitter melon: a panacea for inflammation and cancer, *Chin J Nat Med*, 14(2), 81-100, 2016.
- [19] Alippilakkotte, S., S. Kumar, and L. Sreejith, Fabrication of PLA/Ag nanofibers by green synthesis method using *Momordica charantia* fruit extract for wound dressing applications, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 529, 771-782, 2017.
- [20] Chao, C.-Y., et al., Anti-Inflammatory Effect of *Momordica Charantia* in Sepsis Mice, *Molecules*, 19(8), 12777-12788, 2014.

-
- [21] Pişkin, A., et al., The beneficial effects of *Momordica charantia* (bitter gourd) on wound healing of rabbit skin, *Journal of Dermatological Treatment*, 25(4), 350-357, 2014.
- [22] Ebadollahi, A., et al., Nanoencapsulation of Acetamiprid by Sodium Alginate and Polyethylene Glycol Enhanced Its Insecticidal Efficiency, *Nanomaterials*, 12(17), 2971, 2022.
- [23] Chen, S.H., et al., Electrospun Water-Borne Polyurethane Nanofibrous Membrane as a Barrier for Preventing Postoperative Peritendinous Adhesion, *Int J Mol Sci*, 20(7), 2019.
- [24] Wang, F., et al., Preparation, Characterization and Properties of Porous PLA/PEG/Curcumin Composite Nanofibers for Antibacterial Application, *Nanomaterials*, 9(4), 508, 2019.
- [25] Ghandforoushan, P., et al., Novel nanocomposite scaffold based on gelatin/PLGA-PEG-PLGA hydrogels embedded with TGF- β 1 for chondrogenic differentiation of human dental pulp stem cells in vitro, *Int J Biol Macromol*, 201, 270-287, 2022.
- [26] Safonova, L., et al., Silk Fibroin/Spidroin Electrospun Scaffolds for Full-Thickness Skin Wound Healing in Rats, *Pharmaceutics*, 13(10), 2021.
- [27] Barbosa, F., et al., Novel Electroactive Mineralized Polyacrylonitrile/PEDOT:PSS Electrospun Nanofibers for Bone Repair Applications, *Int J Mol Sci*, 24(17), 2023.
- [28] Luraghi, A., F. Peri, and L. Moroni, Electrospinning for drug delivery applications: A review, *J Control Release*, 334, 463-484, 2021.
- [29] Hashmi, M., S. Ullah, and I.S. Kim, Electrospun *Momordica charantia* incorporated polyvinyl alcohol (PVA) nanofibers for antibacterial applications, *Materials Today Communications*, 24, 101161, 2020.
- [30] Jia, S., et al., Recent Advances in *Momordica charantia*: Functional Components and Biological Activities, *International Journal of Molecular Sciences*, 18(12), 2555, 2017.
- [31] Hussan, F., et al., *Momordica charantia* ointment accelerates diabetic wound healing and enhances transforming growth factor- β expression, *J Wound Care*, 23(8), 400, 402, 404-7, 2014.



**α -LAKTALBUMIN'İN ISIL DENATÜRASYONUNUN İKİ FARKLI MODELLE
TANIMLANMASI**

***DEMONSTRATION OF TWO DIFFERENT MODELS FOR THERMAL DENATURATION OF
 α -LACTALBUMIN***

Sencer BUZRUL*¹

1 Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

ABSTRACT

The n^{th} -order model commonly used in kinetic modeling and an empirical model were used to describe previously published denaturation of α -lactalbumin at different temperatures (67.5, 70, 72.5, 75, 77.5 and 80°C) as the primary models and a comparison was made. Application of the models revealed that the first-order kinetic model could not be used to describe these data i.e., the first-order kinetic model would be inadequate. The n^{th} -order model produced slightly better fits at five temperatures, while the empirical model had better result at only one temperature. Since one parameter of each model did not depend on temperature, it was possible to fix these parameters by using the average values of six temperatures, and hence reduce the models. The reduced n^{th} -order model had better results at four temperatures, whereas the empirical model produced better fits at two temperatures. It was observed that the sole parameter in the reduced models changed linearly with temperature, and secondary modeling was performed by simple linear regression. Secondary models were integrated into the primary (reduced) models and predictions were made at three different temperatures. Although the predictions of the two models were different at 68°C, the models had almost the same predictions at 74 and 76.5°C. It was concluded that both models can be used to describe the data for kinetic modeling purposes; however, outcomes may be different for other data sets.

Keywords: Denaturation Kinetics; Kinetic Modeling; Model Fitting; Model Prediction; Regression

ÖZET

Kinetik modellemede kullanılan n^{inci} dereceden (n -derece) model ile başka bir ampirik model birincil model olarak daha önce yayımlanmış α -laktalbumin'in farklı sıcaklıklardaki (67.5, 70, 72.5, 75, 77.5 ve 80°C) denatürasyonunu tanımlamak için kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Modellerin uygulamasından birinci dereceden kinetik modelin bu verileri tanımlamak için kullanılamayacağı ya da bu veriler için yetersiz kalacağı anlaşılmıştır. Az farkla da olsa beş sıcaklıkta n -derece model daha iyi uyum göstermiş, ampirik model ise sadece bir sıcaklıkta daha iyi sonuç vermiştir. Her iki modelin de birer parametresi sıcaklığa bağlı olarak değişmediğinden bu parametreleri altı sıcaklığın ortalaması olarak sabitlemek ve modelleri sadeleştirmek ya da indirgemek mümkündür. Benzer şekilde indirgenmiş n -derece model dört sıcaklık değerinde daha iyi sonuçlar vermiş, ampirik model iki sıcaklıkta daha iyi uyum göstermiştir. İndirgenmiş modellerde yer alan tek parametrenin de sıcaklıkla doğrusal olarak değiştiği görülmüş ve ikincil modelleme basit doğrusal regresyon kullanılarak yapılmıştır. İkincil modeller birincil (indirgenmiş) modeller içerisine yerleştirilerek üç farklı sıcaklıkta tahmin çalışması yapılmıştır. Her ne kadar 68°C'de iki modelin tahmini farklı çıkmış olsa da 74 ve 76.5°C'lerde iki model de hemen hemen aynı tahmini vermiştir. Sonuç olarak kinetik modelleme amacıyla bu veri setleri için her iki modelin de kullanılabileceği ancak farklı veri setleri için farklı sonuçlar elde edilmesinin mümkün olabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bozunma Kinetiği; Kinetik Modelleme; Model Tahmini; Model Uyumu; Regresyon

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: sencer.buzrul@erbakan.edu.tr; sencer.buzrul@gmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
11.11.2023	08.12.2023	19.12.2023	27.12.2023

1. GİRİŞ

Kinetik, zamana bağlı değişiklikleri tanımlayan bilim dalı olup bu değişiklikler gıdalar için kimyasal, fiziksel veya mikrobiyolojik olabilir [1]. Kinetik modelleme gıda bilimlerinde sıklıkla kullanılmakta ve gıdalardaki bazı bileşenler için denatürasyon veya bozunma (örneğin vitaminlerin zamana bağlı bozunması) genellikle sıfıncı, birinci ya da ikinci dereceden bozunma kinetiği ile tanımlanmaya çalışılmaktadır [2]. Ancak son yıllarda gıdaların bozunma kinetiği için yapılan çalışmalar göstermektedir ki bozunma kinetiğinde tepkime (reaksiyon) derecesi sıfır, bir ya da iki yerine herhangi bir dereceden (örneğin 1.7 derece) olabilmektedir [3].

Jaskulka vd. [4] yapmış oldukları çalışmada daha önce tepkime derecesi birinci ya da ikinci derecede olarak rapor edilen β -laktoglobulin'in ısı denatürasyonu için gerçek tepkime derecelerinin 0.5 ile 2.5 arasında değiştiğini göstermişlerdir. Bu nedenle gıdalarda yapılan çalışmalarda tepkime derecesini önceden sabitlemek ya da öngörerek modellemeye başlamak yerine tepkime derecesini modelleme yaparak elde etmek doğru bir yaklaşım olacaktır.

Bu çalışmanın ana amacı daha önce yayımlanmış veri setlerini iki farklı modelle tanımlamak, bu modellerin performansını ve tahmin yeteneklerini karşılaştırmaktır. İkinci amacımız geleneksel modellemelerden farklı bir yol izleyerek kinetik modellemeyi uygulayacak araştırmacılara farklı bir bakış açısı kazandırmaktır.

2. YÖNTEM

2.1. Veri setleri

Bu çalışma için kullanılan veriler Halabi vd.'den [5] alınmıştır. Halabi vd. [5] sıcaklığın α -laktalbumin denatürasyon kinetiği üzerindeki etkisini çalışmışlardır. Bu verileri kullanmamızın amacı (i) çalışmanın 6 farklı sıcaklıkta (67.5, 70, 72.5, 75, 77.5 ve 80°C) yapılmış olması, (ii) her bir sıcaklık için yüksek α -laktalbumin konsantrasyonundan düşük konsantrasyona doğru veri toplanması (en az %90 denatürasyon), (iii) her bir sıcaklık için en az 13 farklı zamanda veri alınmış olması yani veri sayısının fazlalığıdır. Literatürde yapılan kinetik çalışmalar genellikle az sayıda sıcaklıkla (≤ 3), az sayıda veri ile (≤ 5) ve denatürasyon/bozunma oranı %50'yi geçmeyecek şekilde yapıldığından kullanılan bu veri seti modelleme için çok uygundur. Veriler WebPlotDigitizer (<https://automeris.io/WebPlotDigitizer>) kullanılarak sayısallaştırılmış ve Excel® programına aktarılmıştır.

2.2. Modelleme

Bozunma kinetiği için kullanılan n-derece denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\frac{dC}{dt} = -k' \cdot C^n \quad (1)$$

Bu denklemde C α -laktalbumin konsantrasyonu (g/L), t zaman (dakika), k' hız sabiti ($g^{1-n} \cdot L^{n-1}/dakika$), n ise birimsiz tepkime derecesidir. Denklem 1'i düzenleyip integral alırsak:

$$C(t) = [C_0^{1-n} + (n-1) \cdot k' \cdot t]^{\frac{1}{1-n}} \quad n \neq 1 \quad (2)$$

Burada C_0 α -laktalbumin'in ilk ($t = 0$) konsantrasyonudur. Denklemi yeniden düzenlersek:

$$\frac{C(t)}{C_0} = [1 + (n-1) \cdot K \cdot t]^{\frac{1}{1-n}} \quad n \neq 1 \quad (3)$$

Bu denklemde K yeni hız sabiti olup ($K = k' \cdot C_0^{n-1}$) birimi 1/dakika'dır.

Eğer Denklem 1'de $n = 1$ olursa

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C \quad (4)$$

Denklem 4 çözüldürse:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-k \cdot t) \quad (5)$$

Burada da k (1/dakika) hız sabiti olup, $\exp = e$ ise Euler sayıdır ($e^1 = 2.71828$)

Literatürde Denklem 3'e alternatif olarak aşağıdaki denklem önerilmiştir [6]:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-b \cdot t^m) \quad (6)$$

Burada b hız sabiti olarak düşünülebilir çünkü birimi 1/dakika^m'dir, m ise birimsiz bir parametredir. Dikkat edilecek olursa, eğer $m = 1$ ise tamamen ampirik bir model olan Denklem 6, birinci dereceden denkleme (Denklem 5) dönüşmektedir. Hem Denklem (3) hem de Denklem (6) ikişer parametreye sahiptir ve verileri tanımlamak için kullanılmışlardır.

2.3. Modellerin karşılaştırılması

Verileri tanımlamak için kullanılan modeller aşağıdaki gibi karşılaştırılmıştır:

- (i) Görsel karşılaştırma: Görsel olarak modellerin veriyle uyumuna bakılmıştır. Ancak, bu karşılaştırma sayısal bir değer vermediği gibi bazı durumlarda yanıltıcı da olmaktadır. Bu nedenle tek başına bir şey ifade etmeyen bu karşılaştırma sadece modellerin verilere yakınlığını değerlendirmektedir. Sonuç olarak verilere daha yakın olan model tercih edilmelidir.
- (ii) Model parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı: Parametreleri anlamsız olan model ($p > 0.05$) varsa anlamlı parametrelere ($p \leq 0.05$) sahip model tercih edilmelidir.
- (iii) Model uyum göstergeleri: Belirleme katsayısı (R^2) ile ayarlı belirleme katsayısı ($R^2_{\text{ayarlı}}$) yüksek ve 1'e yakın olan model tercih edilmelidir. Öte yandan, modelin standart hatasının (RMSE) düşük ve 0'a yakın olması model uyumunun iyi olduğunu göstergesidir.
- (iv) Modellerin tahmin yeteneği: Model için kullanılan sıcaklıklardan farklı sıcaklık ya da sıcaklıklar için modellerin tahminlerine bakılarak daha iyi tahmin veren model tercih edilmelidir.

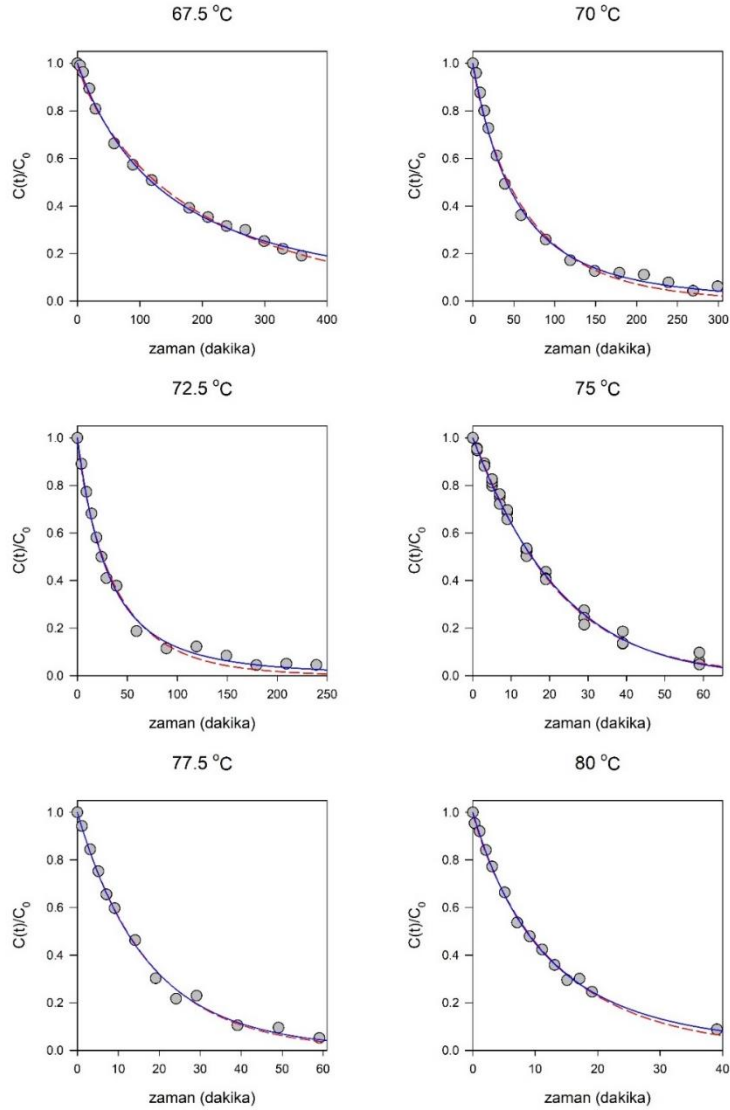
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'de her iki modelin (Denklem 3 ve Denklem 6) 6 farklı sıcaklıktaki α -laktalbumin denatürasyonunu tanımlaması gösterilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde her sıcaklık için yüksek konsantrasyondan diğer deyişle $C(t)/C_0 = 1$ 'den düşük konsantrasyona diğer deyişle $C(t)/C_0 = 0$ 'a çok sayıda veri alınmış ve sonuçta modelleme için son derece uygun bir veri seti ortaya çıkmıştır. Görsel olarak her iki model de verilerle uyumludur. Hatta bazı sıcaklıklarda (67.5, 75, 77.5 ve 80°C) her iki model hemen hemen aynı uyumu göstermiştir (Şekil 1). Ayrıca iki modelin de parametreleri tüm sıcaklıklarda istatistiksel olarak anlamlı ($p \leq 0.05$) çıkmıştır.

Tablo 1'de modellerin uyum göstergeleri (R^2 , $R^2_{\text{ayarlı}}$ ve RMSE) listelenmiş olup n-dereceden model (Denklem 3) ampirik modele (Denklem 6) göre az farkla da olsa daha iyi uyum göstermiştir. Ampirik model sadece 75°C sıcaklıkta daha iyi sonuç vermiştir, onun dışındaki tüm sıcaklıklarda n-dereceden model daha iyidir (Tablo 1).

Tablo 1. Birincil modellerin (Denklem 3 ve Denklem 4) uyum göstergelerinin karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	R^2		$R^2_{\text{ayarlı}}$		RMSE	
	Denklem 3	Denklem 6	Denklem 3	Denklem 6	Denklem 3	Denklem 6
67.5	0.9975	0.9958	0.9973	0.9955	0.0157	0.0202
70	0.9967	0.9928	0.9965	0.9923	0.0210	0.0310
72.5	0.9948	0.9907	0.9944	0.9900	0.0248	0.0332
75	0.9965	0.9970	0.9964	0.9969	0.0193	0.0178
77.5	0.9961	0.9958	0.9958	0.9954	0.0220	0.0230
80	0.9980	0.9971	0.9979	0.9968	0.0137	0.0166



Şekil 1. Denklem 3 (sürekli mavi eğriler) ve Denklem 6'nın (kesikli kırmızı eğriler) altı farklı sıcaklıkta α -laktalbumin denatürasyon verilerine (gri daireler) uygulanması. Orijinal veriler Halabi vd.'den [5] alınmıştır.

Şekil 2'de n -dereceden modelin (Denklem 3) ve ampirik modelin (Denklem 6) sırasıyla n ve m parametrelerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir. Denklem 3'teki n parametresinin de Denklem 6'daki m parametresinin de sıcaklığa bağlı olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle bu parametrelerin sıcaklığa bağlı modelini (ikincil model) elde etmek mümkün değildir. n parametresi 0.9 ile 1.6 arasında değişirken, m parametresi 0.8 ile 1.1 arasında değişmektedir. Şekil 2'den çıkarabileceğimiz bir diğer sonuç ise α -laktalbumin'in sıcaklığa bağlı denatürasyonunun birinci dereceden olmadığıdır çünkü m değeri hiçbir sıcaklıkta 1 değildir. Dahası n değeri 5 sıcaklık için 1'den büyük, bir sıcaklık (75°C) için 1'den küçüktür ve birinci dereceden kinetik model bu veriler için uygun değildir.

Modellerin her ikisinde de model parametreleri birbirleriyle bağlantılıdır (gösterilmeyen sonuçlar) ve bu da bir parametre değerindeki hatanın diğer parametredeki hata ile dengelenebileceği, dolayısıyla istatistiksel olarak bir sorun teşkil edebileceği anlamını taşımaktadır [7]. Bu nedenle sıcaklığa bağlı olmayan ya da sıcaklığın "zayıf" bir fonksiyonu olan n ve m parametrelerini sabitlemek bu sorunu çözecektir. Her iki parametrenin altı sıcaklıktaki değerinin ortalaması alınarak parametreler sabitlenmiştir: $n_{ortalama} = 1.26$ ve $m_{ortalama} = 0.92$. Bu durumda Denklem 3 aşağıdaki gibi

$$\frac{C(t)}{C_0} = [1 + 0.26 \cdot K \cdot t]^{-\frac{1}{0.26}} \quad (7)$$

Denklem 6 aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp(-b \cdot t^{0.92}) \quad (8)$$

Bu indirgenmiş modeller artık iki değil tek parametreye sahiptir ve orijinal hallerine göre daha basit modellere dönüşmüşlerdir. Aynı veri setlerine indirgenmiş modeller uygulanmıştır ve bunlar Şekil 3'te gösterilmektedir. Modeller her sıcaklık için görsel olarak neredeyse aynı uyumu göstermiştir.

Tablo 2'de indirgenmiş modellerin uyum göstergeleri (R^2 , $R^2_{\text{ayarlı}}$ ve RMSE) verilmiştir. Orijinal modellerde (Denklem 3 ve Denklem 6) olduğu gibi indirgenmiş modellerde de n-dereceden model ampirik modele göre az da olsa daha iyi sonuç vermiştir. İndirgenmiş ampirik model sadece 75 ve 77.5°C'lerde indirgenmiş n-dereceden modelden daha iyi uyuma sahiptir (Tablo 2). Modellerin indirgenmiş halleri orijinal modellerin uyumuna göre daha düşük olsa da 80°C indirgenmiş modeller veriyile daha uyumludur (Tablo 1 ve Tablo 2). Ayrıca indirgenmiş modeller tek parametreye sahip olduklarından $R^2 = R^2_{\text{ayarlı}}$ [8].

Tablo 2. İndirgenmiş modellerin (Denklem 7 ve Denklem 8) uyum göstergelerinin karşılaştırılması

Sıcaklık (°C)	R^2		$R^2_{\text{ayarlı}}$		RMSE	
	Denklem 7	Denklem 8	Denklem 7	Denklem 8	Denklem 7	Denklem 8
67.5	0.9933	0.9919	0.9933	0.9919	0.0247	0.0271
70	0.9962	0.9922	0.9962	0.9922	0.0216	0.0312
72.5	0.9940	0.9897	0.9940	0.9897	0.0256	0.0336
75	0.9886	0.9903	0.9886	0.9903	0.0341	0.0315
77.5	0.9939	0.9946	0.9939	0.9946	0.0264	0.0250
80	0.9980	0.9971	0.9980	0.9971	0.0131	0.0160

İndirgenmiş modellerden elde edilen parametrelerin yani Denklem 7'den elde edilen K parametresi ile Denklem 8'den elde edilen b parametresinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Her ne kadar hız sabiti geleneksel olarak Arrhenius denklemi ile tanımlansa da [1], Arrhenius denkleminin kullanılması sürekli eleştiri konusu olmuştur [6, 9]. Dahası Arrhenius denkleminin mevcut verilere (Şekil 4) uygulanması neticesinde daha kötü model uyumu ortaya çıkmıştır (gösterilmeyen sonuçlar). Bu nedenle her iki parametrede mümkün olan en basit modelle tanımlanmış ve iki parametrenin de sıcaklıkla doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4).

İkincil modeller aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$K = 0.0066 \cdot T - 0.4443 \quad (9)$$

$$b = 0.0069 \cdot T - 0.4619 \quad (10)$$

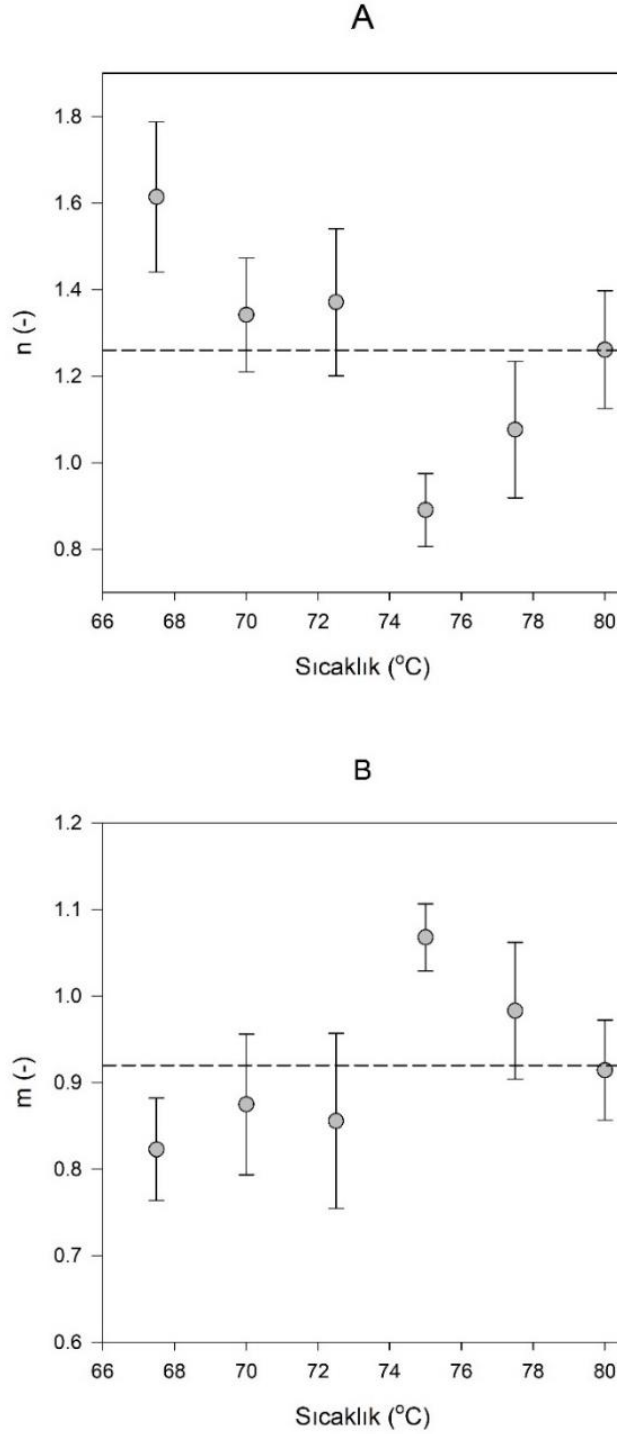
Bu denklemlerde T sıcaklıktır (°C). İkincil modeller karşılaştırıldığında b parametresinin K parametresine göre doğrusal modelle daha uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4). Eğer ikincil modeller indirgenmiş birincil modellerin (Denklem 7 ve Denklem 8) içerisine yerleştirilirse aşağıdaki modeller elde edilir:

$$\frac{C(t)}{C_0} = [1 + 0.26 \cdot (0.0066 \cdot T - 0.4443) \cdot t]^{-\frac{1}{0.26}} \quad (11)$$

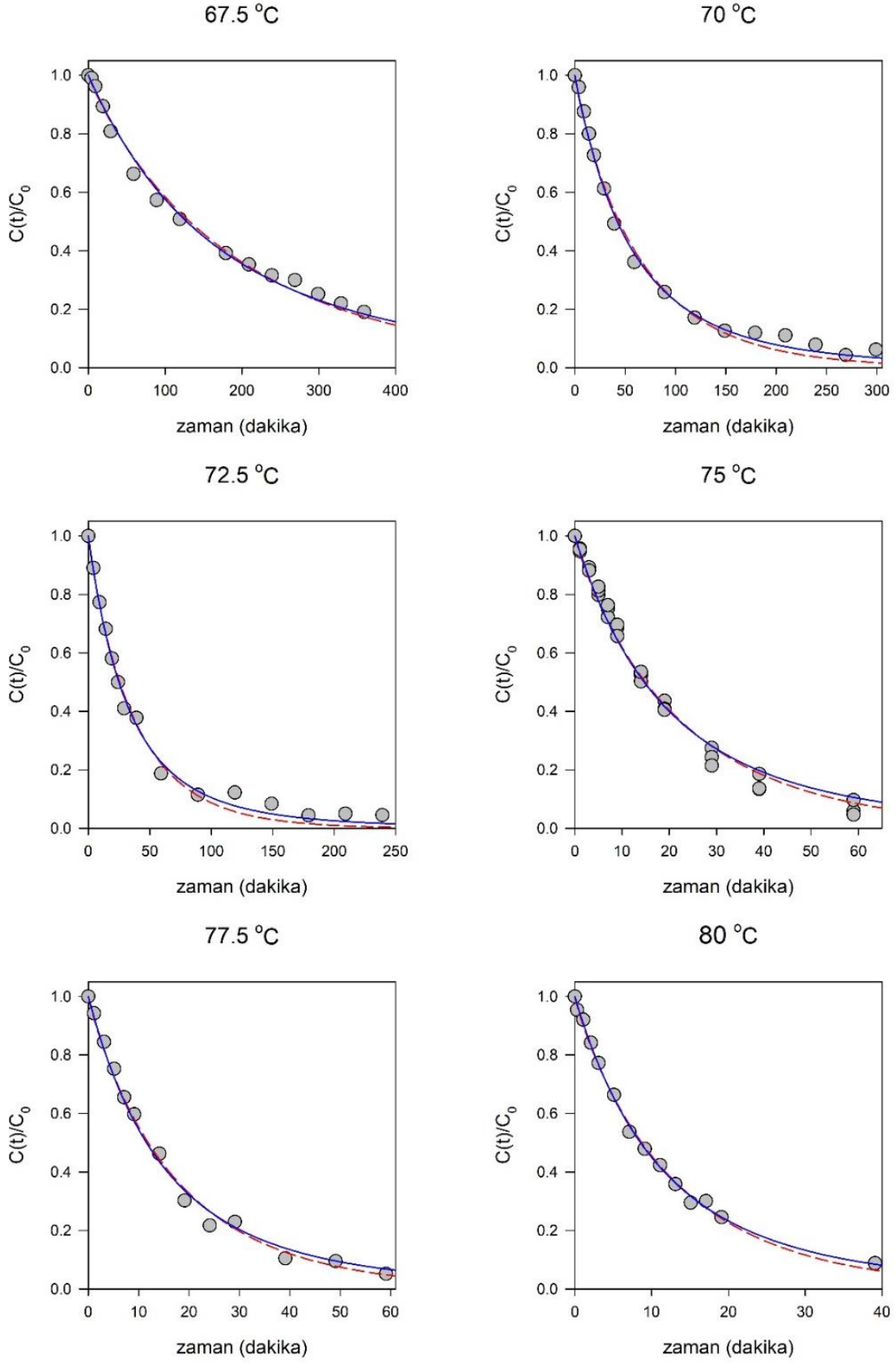
$$\frac{C(t)}{C_0} = \exp[-(0.0069 \cdot T - 0.4619) \cdot t^{0.92}] \quad (12)$$

Denklem 11 ve Denklem 12 kullanılarak modelleri oluşturmak için kullandığımız sıcaklıklardan farklı sıcaklıklarda α -laktalbumin denatürasyonunu tahmin edebilmek mümkündür. Bu amaçla 67.5-80°C

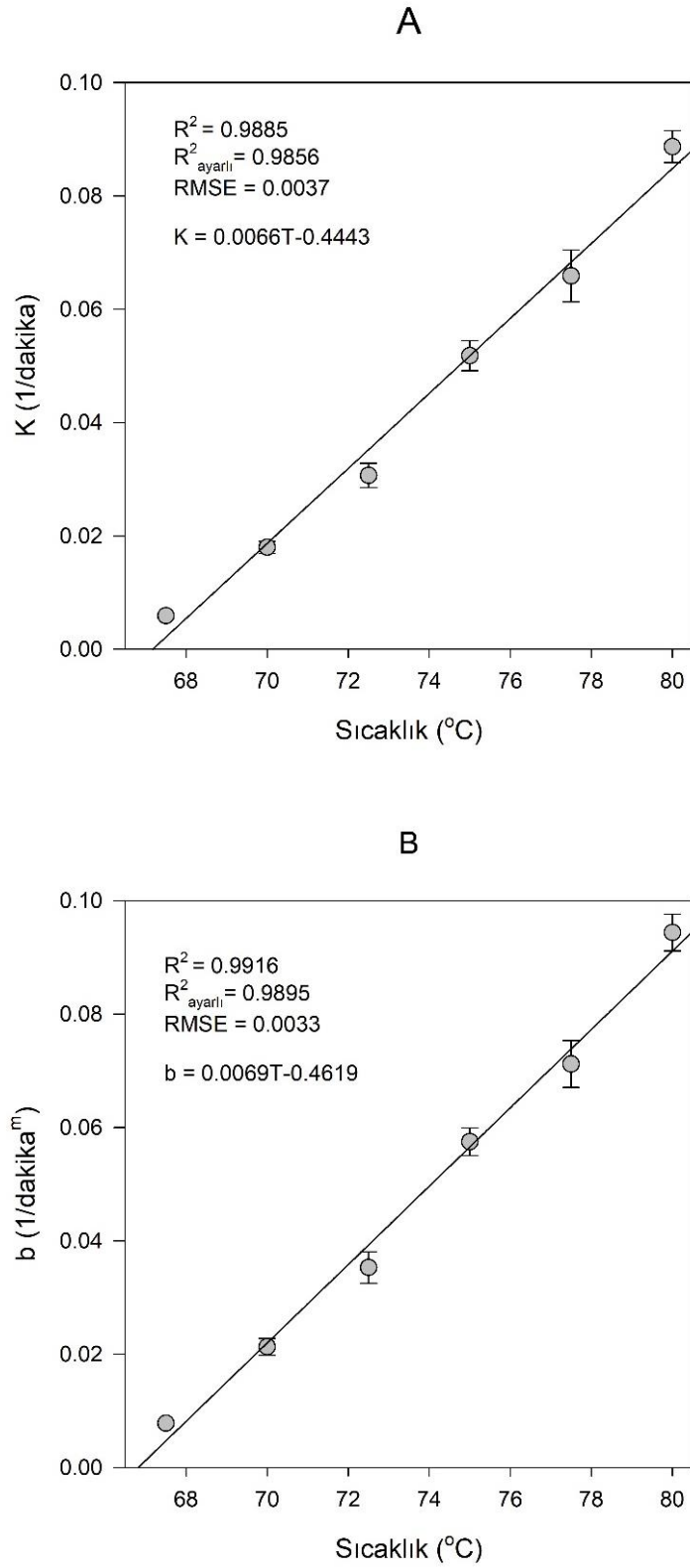
aralığında üç farklı sıcaklık seçilmiştir: 68, 74 ve 76.5°C. Tahmin benzetimleri Şekil 5'te gösterilmektedir. Her ne kadar 68°C'de iki modelin tahmini farklı olsa da 74 ve 76.5°C'lerde iki model hemen hemen aynı tahminleri vermiştir. Maalesef tahmin sonuçlarını değerlendirebilecek veriler elimizde bulunmamaktadır. Orijinal verilerin alındığı Halabi vd. [5] de herhangi bir tahmin çalışması yürütmemişleridir. Yine de bu tür çalışmalarda sabit sıcaklıklarda model tahminlerinin nasıl yapıldığını göstermesi bakımından sonuçlarımız önemlidir.



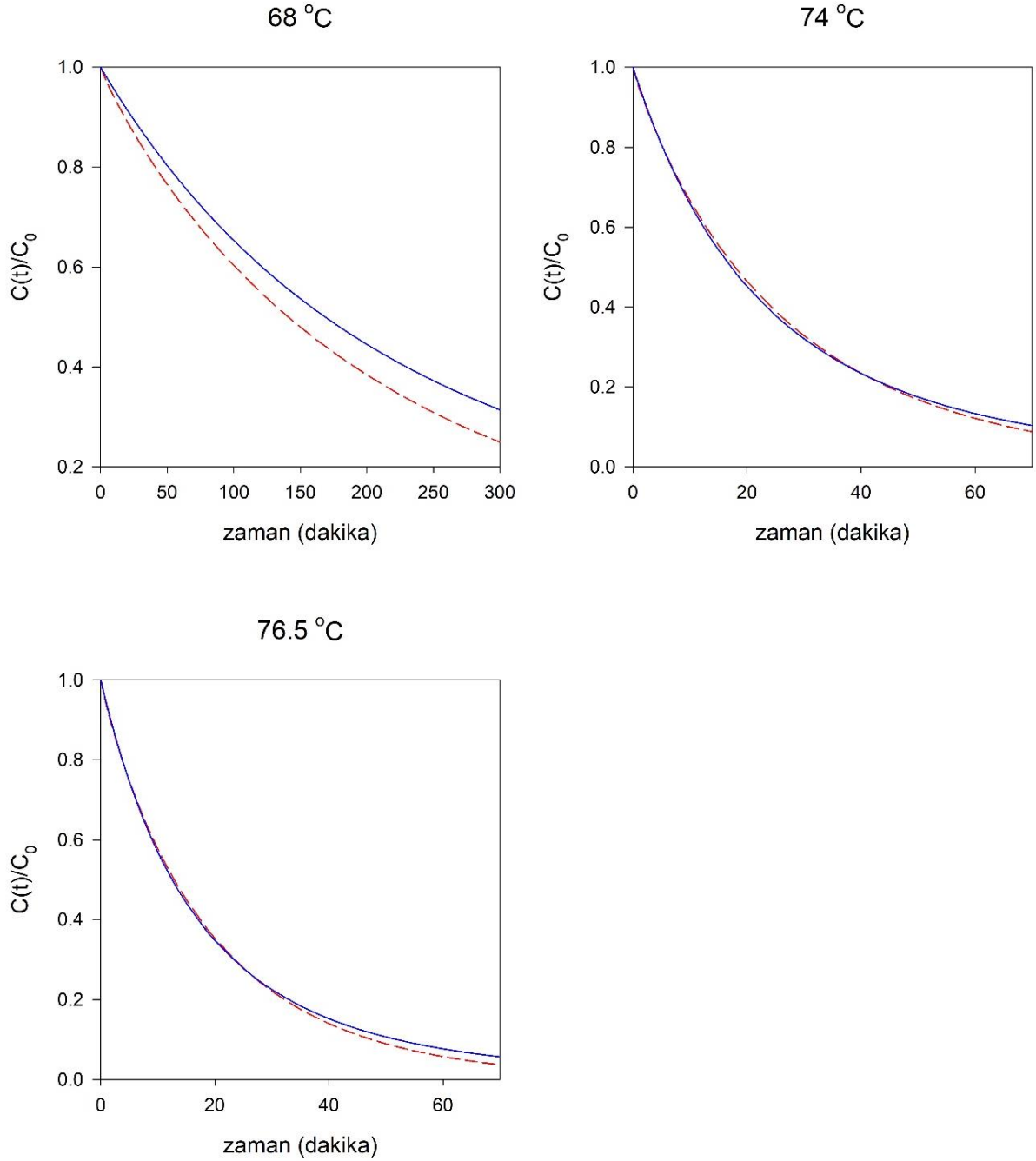
Şekil 2. Denklem 3'te yer alan n parametresinin sıcaklıkla değişimi (A) ile Denklem 6'da yer alan m parametresinin sıcaklıkla değişimi (B). Her bir grafikteki kesikli çizgiler değerlerin ortalamasıdır: $n_{ortalama} = 1.26$ ve $m_{ortalama} = 0.92$. Hata çubukları %95 güven aralıklarını göstermektedir.



Şekil 3. İndirgenmiş modellerin yani Denklem 7 (sürekli mavi eğriler) ve Denklem 8'in (kesikli kırmızı eğriler) altı farklı sıcaklıkta α -laktalbumin denatürasyon verilerine (gri daireler) uygulanması. Orijinal veriler Halabi vd.'den [5] alınmıştır.



Şekil 4. Denklem 7’de yer alan K parametresinin sıcaklıkla değişimi (A) ile Denklem 8’de yer alan b parametresinin sıcaklıkla değişimi (B). Hata çubukları %95 güven aralıklarını göstermektedir.



Şekil 5. Denklem 11 (sürekli mavi eğriler) ve Denklem 12'nin (kesikli kırmızı eğriler) üç farklı sıcaklıkta tahmin eğrileri

4. SONUÇ

Bu çalışmada iki farklı modelin altı farklı sıcaklıktaki α -laktalbumin denatürasyonunu tanımlaması ve tahmini gösterilmiştir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar şunlardır:

- (i) Denklem 3 Denklem 6'ya göre verilere az farkla da olsa daha iyi uyum sağlamıştır (Şekil 1 ve Tablo 1). Her iki modeli de α -laktalbumin denatürasyonunu tanımlamak için kullanmak mümkündür. (Birincil modelleme)
- (ii) Denklem 3'teki n parametresi ile Denklem 6'daki m parametresi sıcaklığa bağlı değildir ve sabitlenebilir (Şekil 2). Bu parametreler sabitlenerek modeller indirgenebilir yani parametre

sayıları ikiden bire düşürülebilir. Böylece Denklem 7 ve Denklem 8 elde edilir. (Yeniden birincil modelleme)

- (iii) İndirgenmiş modeller (Denklem 7 ve Denklem 8) en az orijinal modeller kadar kullanışlıdır (Şekil 3 ve Tablo 2). Burada da az farkla olsa da Denklem 7 Denklem 8'e göre daha iyi sonuç vermiştir (Tablo 2).
- (iv) Denklem 7'deki K parametresi ile Denklem 8'deki b parametresi sıcaklıkla doğrusal değişmektedir (Şekil 4). (İkincil modelleme)
- (v) İkincil modeller (Denklem 9 ve Denklem 10) birincil modellerin (Denklem 7 ve Denklem 8) içine yerleştirilip elde edilen modeller (Denklem 11 ve Denklem 12) tahmin çalışması için kullanılabilir.
- (vi) Denklem 11 ve Denklem 12, 68°C hariç çok yakın tahmin sonuçları vermiştir.

Nihai olarak bu çalışmanın kinetik modellemeyi araştırmalarında kullanacak birçok kişi için yol gösterici olabileceği söylenebilir.

REFERANSLAR

- [1] M.A.J.S. van Boekel, Kinetics of heat-induced changes in dairy products: Developments in data analysis and modelling techniques, *International Dairy Journal* 126, 105187, 2022.
- [2] M.A.J.S. van Boekel, Kinetics of heat-induced changes in foods: A workflow proposal. *Journal of Food Engineering* 306, 110634, 2021.
- [3] S.M. Loveday, β -Lactoglobulin heat denaturation: A critical assessment of kinetic modelling, *International Dairy Journal* 52, 92-100, 2016.
- [4] F.J. Jaskulka, D.E. Smith, K. Larntz, Determining the kinetic reaction rate order for the thermal denaturation of β -lactoglobulin using two statistical approaches. *International Dairy Journal* 10, 589-595, 2000.
- [5] A. Halabi, A. Deglaire, P. Hamon, S. Bouhallab, D. Dupont, T. Croguennec, Kinetics of heat-induced denaturation of proteins in model infant milk formulas as a function of whey protein composition. *Food Chemistry* 302, 125296, 2020.
- [6] M., Peleg, M.D. Normand, M.G. Corradini, A New Look at Kinetics in Relation to Food Storage. *The Annual Review of Food Science and Technology* 28, 135-153, 2017.
- [7] S. Buzrul, A predictive model for high-pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms. *Journal of Food Safety* 29, 208-223, 2009.
- [8] C. Leylak, M. Yurdakul, S. Buzrul, Gıda bilimlerinde Excel kullanımı 1: Doğrusal regresyon. *Food and Health* 6, 186-198, 2020.
- [9] M., Peleg, M.D. Normand, M.G. Corradini, The Arrhenius equation revisited. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52, 830-851, 2012.



**INVESTIGATION OF THE SOLID-LIQUID EXTRACTION PARAMETERS OF THE
POLYPHENOLS FROM FEIJOA SELLOWIANA PEELS: MASS TRANSFER, KINETICS,
AND THERMODYNAMICS STUDIES**

***FEIJOA SELLOWIANA KABUKLARINDAN POLİFENOLLERİN KATI-SIVI
EKSTRAKSİYONUNDA ÇEŞİTLİ PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ: KÜTLE İLETİMİ,
KİNETİK VE TERMODİNAMİK ÇALIŞMALAR***

Ramiz ABİSHLİ¹ Selin ŞAHİN^{*1}

1 Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Istanbul University-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

ABSTRACT

In this study, polyphenol recovery from feijoa (*Feijoa sellowiana*) peels was investigated in terms of mass transfer, kinetics and thermodynamics approaches. Ultrasound-assisted extraction (UAE) was employed. 3 different amplitudes (10, 15 and 20%) were used. It was observed that all three systems reached equilibrium within the first five minutes. Increasing the amplitude of the energy increased the temperature of the environment, and in this case, the efficiency increased slightly (≈ 17 mg-GAE/g-DP to ≈ 18 mg-GAE/g-DP). In the UAE system, the diffusion coefficient varied between 2.120×10^{-8} and 3.995×10^{-8} m²/min. The Biot number changed between 150.333×10^3 and 206.867×10^3 , while the mass transfer coefficient was calculated between 9.507 and 14.050 m/min. The kinetic data of the UAE system was represented by both kinetic models ($R^2 > 0.97$). Additionally, it was observed that the rate constants (k_1 and k_2) of both kinetic models generally increased with temperature. When the thermodynamic structure of the UAE system was evaluated with parameters such as $\Delta H (>0)$, $\Delta S (>0)$ and $\Delta G (<0)$, the system has been endothermic, spontaneous and moving towards disorder.

Keywords: Bioactive Metabolites; Biot Number; Biowaste; Effective Diffusivity; Ultrasound Technology

ÖZET

Bu çalışmada feijoa (*Feijoa sellowiana*) kabuklarından polifenol geri kazanımı kütle transferi, kinetik ve termodinamik yaklaşımlar açısından incelenmiştir. Ultrason destekli ekstraksiyon (UDE) kullanılmıştır. 3 farklı genlikte (%10, 15 ve 20) çalışılmıştır. İlk beş dakika içinde her üç sistemin de dengeye ulaştığı gözlemlendi. Enerjinin genliğinin artırılması ortamın sıcaklığını arttırdı ve bu durumda verim bir miktar arttı (≈ 17 mg-GAE/g-DP'den ≈ 18 mg-GAE/g-DP'ye). UDE sisteminde difüzyon katsayısı $2,120 \times 10^{-8}$ ile $3,995 \times 10^{-8}$ m²/dk arasında değişiyordu. Biot sayısı 150.333×10^3 ile 206.867×10^3 arasında değişirken, kütle transfer katsayısı 9.507 ile 14.050 m/dk arasında hesaplandı. UDE sisteminin kinetik verileri her iki kinetik modelle ($R^2 > 0.97$) temsil edildi. Ayrıca her iki kinetik modelin hız sabitlerinin (k_1 ve k_2) genel olarak sıcaklıkla arttığı gözlemlenmiştir. UDE sisteminin termodinamik yapısı $\Delta H (>0)$, $\Delta S (>0)$ ve $\Delta G (<0)$ gibi parametrelerle değerlendirildiğinde sistemin endotermik, kendiliğinden ve düzensizliğe doğru ilerlediği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Biot Sayısı; Biyoaktif Metabolitler; Biyoatık; Etkin Yayılma; Ultrason Teknolojisi

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: selins@istanbul.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
15.11.2023	08.12.2023	26.12.2023	27.12.2023

1. INTRODUCTION

Biorefinery approach simply comprises the conversion processes where raw materials of biological origin are processed to produce high value-added products such as heat, electricity, fuel and fine chemicals. Therefore, particularly biowaste by-products have recently attracted the attention of researchers working in natural products chemistry. Agro-food industry produces huge amounts of solid waste, which is generally employed as feed or fertilizer [1]. Actually, valorization of this biowaste is of great value from an economic perspective. Moreover, recovery of high-added value materials from waste of agro-food industries attracts interest because of the novel technologies in process engineering [2]. The peel, which is almost half the weight of the fruit, is also a rich source of antioxidant polyphenols [3]. So, the recent studies on the bioactive extraction from peels of several fruits show the related source is of significant importance. Suleria et al. screened the bioactive properties of the 20 different fruit peels [4]. The peels of apple, apricot, avocado, banana, custard apple, dragon fruit, grapefruit, kiwifruit, mango, lime, melon, nectarine, orange, papaya, passionfruit, peach, pear, pineapple, plum and pomegranate were compared in terms of total polyphenols, flavonoids and antioxidant activity. *Phaleria macrocarpa* peels were also investigated as raw material with respect to antioxidant activity and total polyphenols [5]. Microwave-assisted extraction was used as the obtaining method. Guthrie et al. recovered phenolic antioxidants from green kiwifruit peel using subcritical water extraction [6]. Hanafy et al. used pomegranate, orange and banana peels to extract bioactive metabolites [7].

In the current study, we applied ultrasound-assisted extraction (UAE). Castañeda-Valbuena et al. and Safdar et al. extracted polyphenols from mango peels by means of UAE [8,9]. Pomegranate peels were also extracted by the same method (UAE) [10–12]. Mandarin peels were used as polyphenol source by application of UAE [13,14]. Ultrasound treatment was also used for the extraction of polyphenols from orange peels [15]. In this study, we used feijoa (*Feijoa sellowiana*) peels as polyphenol source. This research material was used as potential antioxidant source in previous studies. Santos et al. used pressurized liquid extraction and supercritical fluid extraction methods for the concerned material [16], while Abishli et al. employed microwave-assisted extraction for the recovery of polyphenols [17]. The polyphenols have been recovered from feijoa peels by means of UAE. The UAE system has been investigated in terms of mass transport, kinetics and thermodynamics. The response of the UAE system was selected as total polyphenol content (TPC). The aim of this study is to produce findings on effective diffusivity, kinetics and thermodynamics for the first time. So, this study will serve as a guide for further similar studies on the recovery processes of several biomass.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

Fruit samples were brought from Azerbaijan. The peels were separated from the fruit samples after the fruit was cleaned by distilled water. The peels were dried at ambient conditions before grounded. The moisture content was $\approx 16\%$. The particle size of the solid material was adjusted to 855 μm . Additionally, ethanol, methanol, Folin reagent, gallic acid and Na_2CO_3 were from Merck (Darmstadt, Germany).

2.2. Extraction Procedure

The UAE method was used to examine the kinetics, thermodynamics and mass transfer mechanisms of the extraction process. The UAE device was produced by Sonics and Materials Inc (Newtown, USA; 750 W and 20kHz). The device had a probe system. Ethanol-water solution (60%, v/v) was used as the solvent. The solvent volume was kept at 35 mL, and the weight of the solid was set at 0.5 g. Extract samples with a volume of approximately 30 mL were stored in centrifugal plastic test tubes with a capacity of 50 mL.

2.3. Quantification of Total Polyphenols

Total polyphenol content (TPC) was measured by Folin method as described earlier [18]. The spectrophotometric measurements were performed by UV-Visible spectrophotometer (PG Instruments, T60/Leicestershire, UK). Incubation time was adjusted as 30 min. After 30 min, the absorbance of the solution was read at 765 nm. The data was given as the gallic acid equivalence per g dried peel (mg-GAE/g-DP).

2.4. Mass Transfer, Kinetics and Thermodynamic Calculations

Diffusion coefficient (D_e), mass transfer coefficient (K_T) and Biot number (Bi) were calculated for the UAE of polyphenols from feijoa peels by using the Eqs.1-3. Eq.1 is derived from Fick's second law, while Bi determines the ratio of internal and external resistances of mass transfer by Eq.2 [19].

$$\ln\left(\frac{Y_s}{Y_s - Y_t}\right) = \left(\frac{D_e \pi^2}{r \pi^2}\right)t + \frac{\ln \pi^2}{6} \quad (1)$$

Y_s = TPC yield at equilibrium (mg-GAE/g-DP)

Y_t = TPC yield at any time (mg-GAE/g-DP)

r = Particle radius (m)

D_e = Diffusion coefficient (m^2/sec)

$$\ln\left(\frac{C_\infty}{C_\infty - C_T}\right) = \left(\frac{K_T A}{V_s}\right) \quad (2)$$

C_∞ = TPC concentration at equilibrium (mg-GAE/L)

C_T = TPC concentration at any time (mg-GAE/L)

K_T = Mass transfer coefficient (m/min)

A = Particle total surface area (m^2)

V_s = Solution volume (m^3)

$$Bi = \frac{rK_T}{D_e} \quad (3)$$

The kinetic data was evaluated by pseudo-first-order model (Eq.4), pseudo-second-order model (Eq.5) and Arrhenius equation (Eq.6), respectively [20]:

$$\ln\left(\frac{c_\infty}{c_\infty - c_t}\right) = k_1 t + \ln\left(\frac{c_\infty}{c_\infty - c_0}\right) \quad (4)$$

$$\frac{t}{C_t} = \frac{1}{k_2 C_e^2} + \frac{t}{C_e} \quad (5)$$

$$\ln k = \left(-\frac{E_a}{R}\right) \times \frac{1}{T} + \ln k_0 \quad (6)$$

C_0 = Initial TP concentration (mg-GAE/L)

C_∞ = TPC concentration at equilibrium (mg-GAE/L)

C_t = TPC concentration at any time (mg-GAE/L)

t = Time (min)

k_1 = First-order rate constant (1/min)

k_2 = Second-order rate constant (L/mg min)

k = Extraction rate constant (L/mg sec) or (1/min)

E_a = Activation energy (kJ/mol)

k_0 = Frequency factor

T = Temperature (K)

R = Universal gas constant (8.314 J/mol K)

The thermodynamics of the system was evaluated in terms of enthalpy (ΔH), entropy (ΔS) and Gibbs free energy (ΔG) [21]. Eqs.7-9 were used to calculate the related terms:

$$\ln K_e = -\frac{\Delta H}{R} \times \frac{1}{T} + \frac{\Delta S}{R} \quad (7)$$

$$K_e = \frac{Y_s}{Y_{max} - Y_s} \quad (8)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (9)$$

K_e = Equilibrium constant rate

Y_s = TPC yield at equilibrium (mg-GAE/g-DP)

Y_{max} = TPC yield at maximum (mg-GAE/g-DP)

ΔG = Gibbs free energy change (kJ/mol)

ΔH = Enthalpy change (kJ/mol)

ΔS = Entropy change (kJ/mol K)

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Ultrasound-Assisted Extraction

Table 1 and Figure 1 demonstrate the polyphenol levels in the peel extracts obtained by UAE under several amplitude values depending on the time. The amplitude of the ultrasound indicates the energy. The temperature values were also recorded after each run. The given temperature values are the arithmetic mean of the all extracts under constant amplitude.

Table 1. TPC levels of the *Feijoa sellowiana* peel extracts obtained by UAE under different amplitude and time values.

Amplitude (%)	Time (min)	TPC (mg-GAE/g-DP)	Temperature (°C)
10	1	9.9±0.01	21
	2	15.3±0.03	
	3	16.5±0.01	
	4	16.6±0.01	
	5	16.9±0.02	
	10	16.9±0.01	
	15	16.89±0.05	
	20	16.88±0.04	
15	1	12.87±0.01	25
	2	16.07±0.01	
	3	17.057±0.06	
	4	17.26±0.01	
	5	17.23±0.05	
	10	17.30±0.01	
	15	17.25±0.01	
	20	17.23±0.01	
20	1	12.34±0.01	30
	2	16.12±0.01	
	3	18.23±0.06	
	4	18.3±0.01	

5	18.3±0.01
10	18.3±0.05

As seen in Figure 1, the related system is in equilibrium within the first five minutes. Increasing the amplitude of the energy increased the temperature of the environment, and in this case, the efficiency increased slightly. The TPC yield increased from approximately 16.5 (10%) to ≈ 17 mg-GAE/g-DP (15%), and finally to ≈ 18 mg-GAE/g-DP (20%). These findings are superior than those of the supercritical fluid extraction (with CO₂ and ethanol) [16]. Our results were also in convenient with the values of microwave-assisted extraction [17].

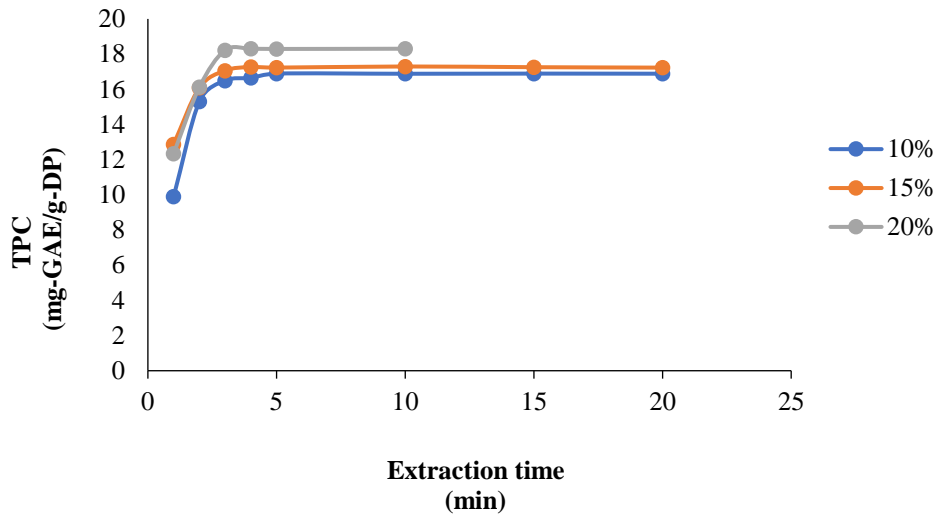


Figure 1. Identification of the equilibrium time under different amplitude values.

3.2. Mass Transfer Studies

The mass transfer mechanism in obtaining extract from *F. sellowiana* fruit peels using UAE was expressed by diffusion coefficient, mass transfer coefficient and Biot number, respectively. The UAE system operated under three different temperatures (294, 298 and 304 K). Table 2 shows the diffusion coefficient, mass transfer coefficient and Biot number values for the system depending on the temperature.

Table 2. Mass transport parameters of the UAE system for the recovery of *F. sellowiana* fruit peels.

Parameter	Temperature (K)		
	294	298	304
D_e (m ² /min) $\times 10^{-8}$	2.120	2.823	3.995
$Bi \times 10^3$	191.710	206.867	150.333
K_T (m/min)	9.507	13.661	14.050

As seen in Table 2, the diffusion coefficient varies between 2.120×10^{-8} and 3.995×10^{-8} m²/min (Figure 2). The mass transfer coefficient was calculated between 9.507 and 14.050 m/min (Figure 3). It is observed that mass transfer increases with temperature. This is an expected result, since increasing the temperature decreases the viscosity. In this case, it increases the transmission of the target component to the solvent system.

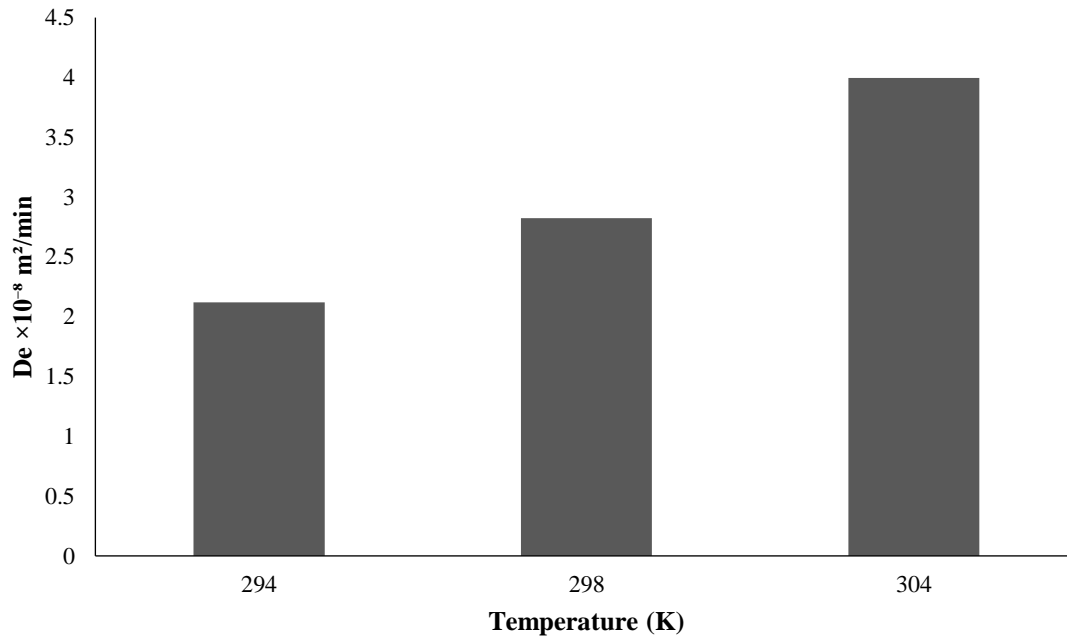


Figure 2. Diffusion coefficients under different temperature values.

The Biot number varies between 150.333×10^3 and 206.867×10^3 (Figure 4). The level of Bi gives an idea about the resistance between the internal and external. So, our Bi was calculated as high (>100), indicating that internal resistance is higher than external resistance. This means that the contact between the feijoa peel and the solvent (60% of ethanol solution) [22].

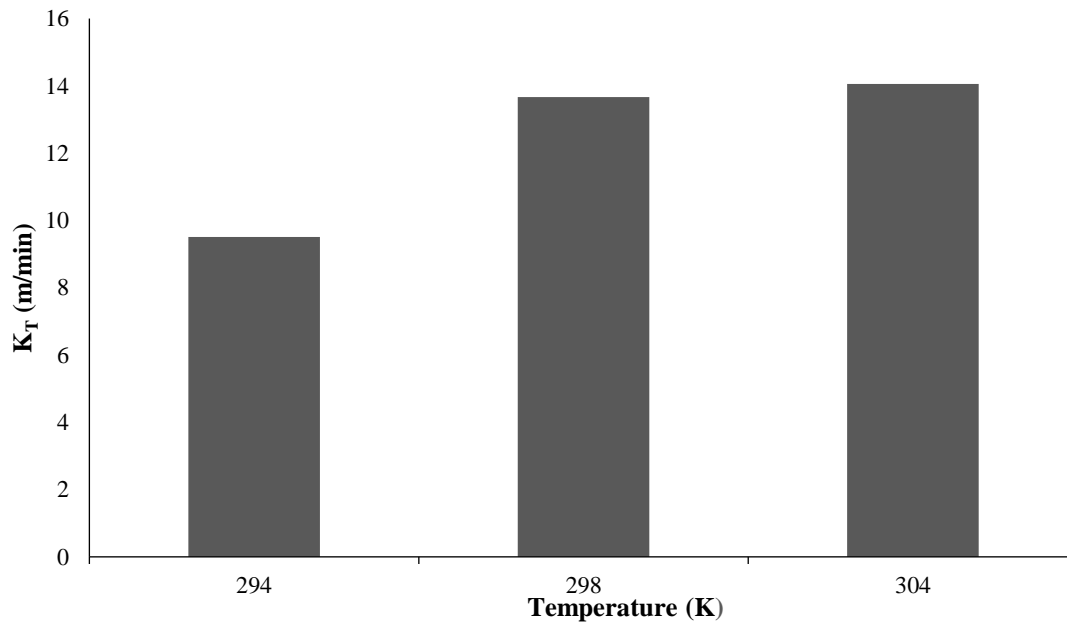


Figure 3. Mass transfer coefficients under different temperature values.

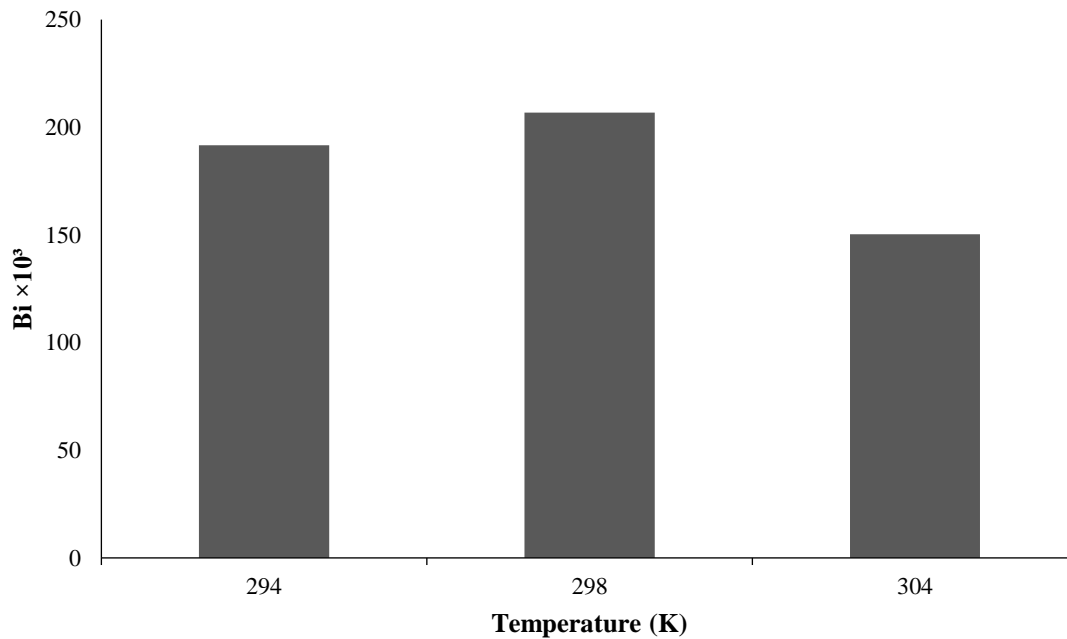


Figure 4. Biot numbers under different temperature values.

3.3. Kinetics Studies

Within the scope of this study, the kinetics mechanism for the obtaining extract from *F. sellowiana* fruit peels using UAE was explained with 2 different mathematical models. These models are pseudo-first-order kinetic model and pseudo-second-order kinetic model. The kinetics were studied at three different temperatures (294, 298 and 304 K). Table 3 shows the first- and second-order rate constants, activation energy and R^2 values for the related equations.

Pseudo-first-order constant increases by temperature as seen in Table 3. Similar observation on pseudo-first-order constant tendency was also recorded by Sant'Anna et al, who investigated polyphenol extraction from grape marc [23]. Additionally, the R^2 values of the model are satisfactory. The kinetic data was represented much better with pseudo-second-order kinetic model depending on the R^2 values (>0.99). Hence, activation energy was calculated by Arrhenius equation using the constant of pseudo-second-order kinetic model (k_2).

Table 3. Kinetic parameters of the UAE system for the recovery of *F. sellowiana* fruit peels.

Model	Parameter	Temperature (K)		
		294	298	304
Pseudo-first-order		294	298	304
	k_1 (1/sec)	0.6235	0.8959	0.9215
	R^2	0.9949	0.9985	0.9757
Pseudo-second-order		294	298	304
	k_2 (L/mg sec)	0.0023	0.0029	0.0024
	R^2	0.9976	0.9984	0.9960
	E_a (kJ/mol)	4.90		

R²

0.9520

The relationship between $1/T$ and $\ln k_2$ is indicated by Figure 5. E_a was calculated as 4.9 kJ/mol as seen in Table 3. 3.52 kJ/mol was reported for the UAE of polyphenols from moringa leaves [24].

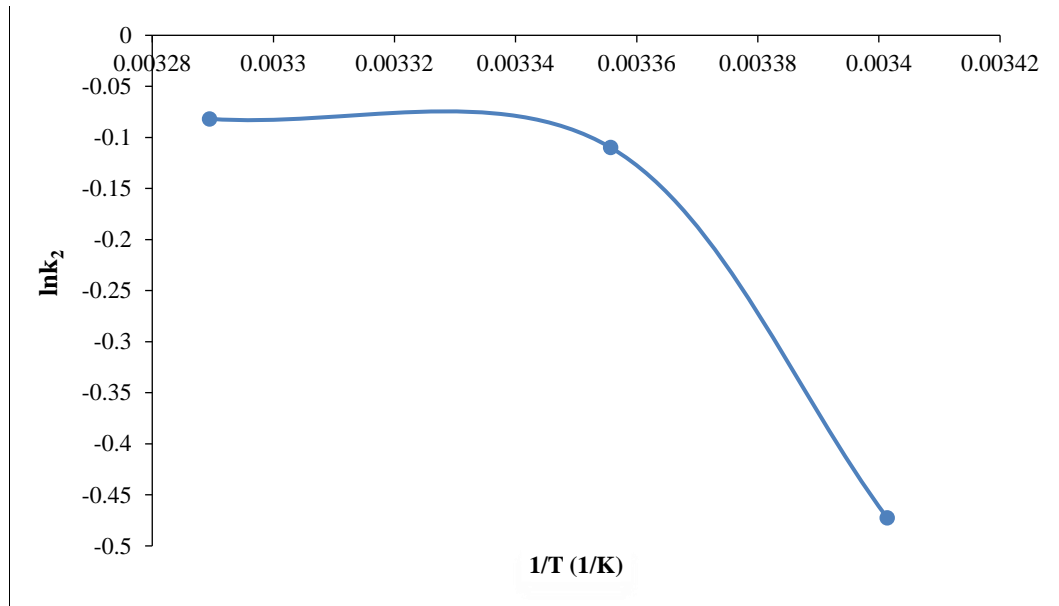


Figure 5. Application of Arrhenius equation to calculate activation energy.

3.4. Thermodynamics Studies

The thermodynamic structure of the system was evaluated with parameters such as ΔH , ΔS and ΔG in obtaining extract from *F. sellowiana* fruit peels using UAE. Table 4 shows the relevant parameters.

Table 4. Thermodynamics parameters of the UAE system for the recovery of *F. sellowiana* fruit peels.

Parameter	Temperature (K)		
	294	298	304
K_e	3.8259	4.1276	6.2390
ΔH (kJ/mol)	37.45		
ΔS (kJ/mol K)	0.138		
ΔG (kJ/mol)	-3.122	-3.674	-4.502
R ²	0.9272		

A positive enthalpy change indicates that the system is endothermic. A positive entropy change is an indication that the system is heading towards disorder. Gibbs free energy was calculated as negative at all temperature values. This indicates that the UAE system studied behaves spontaneously. Similar thermodynamic tendency in case of entropy, enthalpy and Gibbs free energy changes was also reported for the UAE of polyphenols from moringa leaves [24], microwave-assisted extraction of metabolites from *Terminalia bellerica* [25], and UAE of bioactive substance from UAE *Taxus chinensis* leaves [26].

4. CONCLUSION

Feijoa fruit (*Feijoa sellowiana*) peel was chosen as the source of polyphenol within the scope of this study. Ultrasound-assisted extraction was chosen to achieve the target material. The extraction time was

determined by obtaining the kinetic data of the ultrasound-assisted extraction method. The kinetic mechanism of the method was explained by two different mathematical models: pseudo-first-order kinetic model and pseudo-second-order kinetic model. Additionally, the activation energy of the relevant system was calculated using the kinetic data. The mass transfer mechanism of the ultrasound-assisted extraction process was expressed by the diffusion coefficient, mass transfer coefficient and Biot number under different temperature values. Thermodynamic parameters (enthalpy, entropy and Gibbs free energy changes) of the same system were also calculated. To conclude, the outcome of the current study indicates that the peel of feijoa fruit is a rich source of bioactive components. The data produced is of great value for the prediction of process conditions in industrial scales.

REFERENCES

- [1] M. González, V. González, Sample preparation of tropical and subtropical fruit biowastes to determine antioxidant phytochemicals, *Anal. Methods*. 2 (2010) 1842–1866. <https://doi.org/10.1039/C0AY00361A>.
- [2] S. Rajamanikandan, M. Biruntha, G. Ramalingam, Blue Emissive Carbon Quantum Dots (CQDs) from Bio-waste Peels and Its Antioxidant Activity, *J. Clust. Sci.* 33 (2022) 1045–1053. <https://doi.org/10.1007/S10876-021-02029-0/FIGURES/8>.
- [3] C. Jimenez-Lopez, M. Fraga-Corral, M. Carpena, P. García-Oliveira, J. Echave, A.G. Pereira, C. Lourenço-Lopes, M.A. Prieto, J. Simal-Gandara, Agriculture waste valorisation as a source of antioxidant phenolic compounds within a circular and sustainable bioeconomy, *Food Funct.* 11 (2020) 4853–4877. <https://doi.org/10.1039/D0FO00937G>.
- [4] H.A.R. Suleria, C.J. Barrow, F.R. Dunshea, Screening and Characterization of Phenolic Compounds and Their Antioxidant Capacity in Different Fruit Peels, *Foods* 2020, Vol. 9, Page 1206. 9 (2020) 1206. <https://doi.org/10.3390/FOODS9091206>.
- [5] O.R. Alara, S.K.A. Mudalip, N.H. Abdurahman, M.S. Mahmoud, E.O.O. Obanijesu, Data on parametric influence of microwave-assisted extraction on the recovery yield, total phenolic content and antioxidant activity of Phaleria macrocarpa fruit peel extract, *Chem. Data Collect.* 24 (2019) 100277. <https://doi.org/10.1016/J.CDC.2019.100277>.
- [6] F. Guthrie, Y. Wang, N. Neeve, S.Y. Quek, K. Mohammadi, S. Baroutian, Recovery of phenolic antioxidants from green kiwifruit peel using subcritical water extraction, *Food Bioprod. Process.* 122 (2020) 136–144. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2020.05.002>.
- [7] S.M. Hanafy, Y.M. Abd El-Shafea, W.D. Saleh, H.M. Fathy, Chemical profiling, in vitro antimicrobial and antioxidant activities of pomegranate, orange and banana peel-extracts against pathogenic microorganisms, *J. Genet. Eng. Biotechnol.* 19 (2021) 1–10. <https://doi.org/10.1186/S43141-021-00151-0/TABLES/5>.
- [8] M.N. Safdar, T. Kausar, M. Nadeem, Comparison of Ultrasound and Maceration Techniques for the Extraction of Polyphenols from the Mango Peel, *J. Food Process. Preserv.* 41 (2017) e13028. <https://doi.org/10.1111/JFPP.13028>.
- [9] D. Castañeda-Valbuena, T. Ayora-Talavera, C. Luján-Hidalgo, P. Álvarez-Gutiérrez, N. Martínez-Galero, R. Meza-Gordillo, Ultrasound extraction conditions effect on antioxidant capacity of mango by-product extracts, *Food Bioprod. Process.* 127 (2021) 212–224. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.03.002>.
- [10] A.P.D.F. Machado, B.R. Sumere, C. Mekaru, J. Martinez, R.M.N. Bezerra, M.A. Rostagno, Extraction of polyphenols and antioxidants from pomegranate peel using ultrasound: influence of temperature, frequency and operation mode, *Int. J. Food Sci. Technol.* 54 (2019) 2792–2801. <https://doi.org/10.1111/IJFS.14194>.
- [11] P. Sharayei, E. Azarpazhooh, S. Zomorodi, H.S. Ramaswamy, Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from pomegranate (*Punica granatum L.*) peel, *LWT.* 101 (2019) 342–350. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2018.11.031>.

- [12] P.R. More, S.S. Arya, Intensification of bio-actives extraction from pomegranate peel using pulsed ultrasound: Effect of factors, correlation, optimization and antioxidant bioactivities, *Ultrason. Sonochem.* 72 (2021) 105423. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2020.105423>.
- [13] M. Anticono, J. Blesa, D. Lopez-Malo, A. Frigola, M.J. Esteve, Effects of ultrasound-assisted extraction on physicochemical properties, bioactive compounds, and antioxidant capacity for the valorization of hybrid Mandarin peels, *Food Biosci.* 42 (2021) 101185. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2021.101185>.
- [14] S. Kaur, P.S. Panesar, H.K. Chopra, Standardization of ultrasound-assisted extraction of bioactive compounds from kinnow mandarin peel, *Biomass Convers. Biorefinery.* 1 (2021) 1–11. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01674-9/FIGURES/3>.
- [15] A. Montero-Calderon, C. Cortes, A. Zulueta, A. Frigola, M.J. Esteve, Green solvents and Ultrasound-Assisted Extraction of bioactive orange (*Citrus sinensis*) peel compounds, *Sci. Rep.* 9 (2019) 16120–16120. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52717-1>.
- [16] P.H. Santos, D.H. Baggio Ribeiro, G.A. Micke, L. Vitali, H. Hense, Extraction of bioactive compounds from feijoa (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret) peel by low and high-pressure techniques, *J. Supercrit. Fluids.* 145 (2019) 219–227. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.12.016>.
- [17] R. Abishli, R. Albarri, S. Şahin, Mass transfer, kinetics, and thermodynamics studies during the extraction of polyphenols from Feijoa sellowiana peels, *J. Food Process. Preserv.* 45 (2021). <https://doi.org/10.1111/JFPP.15736>.
- [18] S. Şahin, A novel technology for extraction of phenolic antioxidants from mandarin (*Citrus deliciosa* Tenore) leaves: Solvent-free microwave extraction, *Korean J. Chem. Eng.* 32 (2015) 950–957. <https://doi.org/10.1007/s11814-014-0293-y>.
- [19] G.V.S. Bhagya Raj, K.K. Dash, Ultrasound-assisted extraction of phytochemicals from dragon fruit peel: Optimization, kinetics and thermodynamic studies, *Ultrason. Sonochem.* 68 (2020) 105180. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105180>.
- [20] R. Albarri, İ. Toprakçı, E. Kurtulbaş, S. Şahin, Estimation of diffusion and mass transfer coefficients for the microwave-assisted extraction of bioactive substances from *Moringa oleifera* leaves, *Biomass Convers. Biorefinery.* (2021) 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01443-8>.
- [21] E.C. Lima, A.A. Gomes, H.N. Tran, Comparison of the nonlinear and linear forms of the van't Hoff equation for calculation of adsorption thermodynamic parameters (ΔS° and ΔH°), *J. Mol. Liq.* 311 (2020) 113315. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113315>.
- [22] S.H. Lee, J.H. Kim, Kinetic and thermodynamic characteristics of microwave-assisted extraction for the recovery of paclitaxel from *Taxus chinensis*, *Process Biochem.* 76 (2019) 187–193. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.11.010>.
- [23] V. Sant'Anna, A. Brandelli, L.D.F. Marczak, I.C. Tessaro, Kinetic modeling of total polyphenol extraction from grape marc and characterization of the extracts, *Sep. Purif. Technol.* 100 (2012) 82–87. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2012.09.004>.
- [24] R. Albarri, S. Şahin, Kinetics, thermodynamics, and mass transfer mechanism of the ultrasound-assisted extraction of bioactive molecules from *Moringa oleifera* leaves, *Biomass Convers. Biorefinery* 2021. 1 (2021) 1–8. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01686-5>.
- [25] R. Yedhu Krishnan, K.S. Rajan, Microwave assisted extraction of flavonoids from *Terminalia bellerica*: Study of kinetics and thermodynamics, *Sep. Purif. Technol.* 157 (2016) 169–178. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2015.11.035>.
- [26] G.S. Ha, J.H. Kim, Kinetic and thermodynamic characteristics of ultrasound-assisted extraction for recovery of paclitaxel from biomass, *Process Biochem.* 51 (2016) 1664–1673. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2016.08.012>.



**DEVELOPMENT OF AN AI-BASED SMART GREENHOUSE PROTOTYPE FOR
ENHANCED AGRICULTURAL SUSTAINABILITY**

**GELİŞMİŞ TARIMSAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK İÇİN YAPAY ZEKA TABANLI AKILLI SERA
PROTOTİPİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Eray GÜNEY¹  Enes ÖZDEMİR¹  İsmail KAYADİBİ²  Nihan KOSKU PERKGÖZ¹ 
Ümmühan BAŞARAN FİLİK¹ 

1 Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Eskisehir Technical University, Eskisehir, Türkiye

2 Department of Management Information Systems, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Türkiye

ABSTRACT

Addressing the critical global need to combat agricultural scarcity, this research introduces artificial intelligence (AI) based smart greenhouse prototype as a holistic solution for enhanced productivity and sustainable practices. The study presents the design and implementation of an AI-powered intelligent greenhouse that integrates advanced technologies to optimize agricultural processes. Central to this prototype are integrated sensors that continuously capture real-time data on environmental parameters and crop conditions. This data is then used to develop predictive models, mitigating potential issues such as crop diseases. Complementing these capabilities, renewable energy sources, specifically solar power, are harnessed to meet the greenhouse's energy requirements, fostering eco-friendly operations. The research outlines a comprehensive system architecture, encompassing sensor data acquisition, serial communication, Python-based data analysis, and integration with the Thingspeak platform for data visualization and access. This cohesive setup allows stakeholders to gain insights into the greenhouse environment and crop well-being, facilitating informed decision-making. The proposed smart greenhouse prototype presents an innovative approach to precision agriculture, showcasing the potential of AI and renewable energy integration in revolutionizing conventional farming practices. By enhancing productivity, energy efficiency, and adaptability, this prototype offers a promising solution to address the challenges of modern agriculture while promoting sustainability.

Keywords: Artificial Intelligence; Energy Efficiency; Precision Agriculture; Smart Greenhouse

ÖZET

Tarimsal kıtlıkla mücadele için kritik küresel ihtiyacı ele alan bu araştırma, gelişmiş verimlilik ve sürdürülebilir uygulamalar için bütünsel bir çözüm olarak yapay zeka (AI) tabanlı bir akıllı sera prototipini tanıtmaktadır. Bu çalışma, tarımsal süreçleri optimize etmek için gelişmiş teknolojileri entegre eden yapay zeka destekli akıllı bir seranın tasarımını ve uygulamasını sunmaktadır. Bu prototipin merkezinde, çevresel parametreler ve mahsul koşulları hakkında gerçek zamanlı verileri sürekli olarak yakalayan entegre sensörler bulunmaktadır. Bu veriler daha sonra tahmine dayalı modeller geliştirmek için kullanılıyor ve mahsul hastalıkları gibi potansiyel sorunları hafifletebilmektedir. Bu yetenekleri tamamlayan yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle de güneş enerjisi, seranın enerji gereksinimlerini karşılamak için kullanılıyor ve çevre dostu operasyonları teşvik etmektedir. Bu çalışmada sensör veri toplama, seri iletişim, Python tabanlı veri analizi ve veri görselleştirme ve erişim için Thingspeak platformuyla entegrasyonu içeren kapsamlı bir sistem mimarisinin ana hatları sunulmuştur. Bu uyumlu kurulum, paydaşların sera ortamı ve mahsulün refahı hakkında bilgi edinmesini sağlayarak bilinçli karar vermeyi kolaylaştırmaktadır. Önerilen akıllı sera prototipi, geleneksel tarım uygulamalarında devrim yaratmada yapay zeka ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun potansiyelini sergileyerek hassas tarıma yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Üretkenliği, enerji verimliliğini ve uyarlanabilirliği artıran bu prototip, sürdürülebilirliği teşvik ederken modern tarımın zorluklarını ele almak için umut verici bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Sera; Enerji Verimliliği; Hassas Tarım; Yapay Zeka

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: ikayadibi@aku.edu.tr

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
05.11.2023	15.12.2023	15.12.2023	27.12.2023

1. INTRODUCTION

The World Bank's projections indicate that the global population is set to surpass 9.6 billion by 2050 [1]. However, the expansion of urban areas, coupled with land degradation and the diversion of crops for biofuel production, is expected to result in a reduction of suitable agricultural land ranging from 8% to 20% by 2050 [2]. Given these circumstances, there's a pressing need for agricultural production to escalate by approximately 50% by 2050. In terms of energy consumption, insights from greenhouse practices across various nations reveal that cultivating 1 kg of dry lettuce demands 70 kWh of electricity in the Netherlands, 111 kWh in the United Arab Emirates, 195 kWh in Sweden, and 247 kWh in Colombia [3].

Considering the conditions of Turkey and the climate conditions and level of development in the researched countries, it can be argued that this country can provide better greenhouse conditions than the countries involved in the research.

There is a close relationship between global warming and arable land for agriculture. The impact of global warming can result in land degradation, drought, and diminishing water resources, leading to a decrease in agricultural productivity. Excessive heat and climate change can have adverse effects on agricultural production and reduce the amount of land suitable for farming. Additionally, the decline in water resources can restrict the amount of water available for agricultural irrigation. Climate change is also one of the sources threatening food security. It is critical to effectively handle water resources, enhance farming methods, and adopt climate-conscious agricultural approaches to strengthen the resilience and sustainability of agriculture [4].

The main focus of smart greenhouses is to realize more efficient crop production with less energy compared to conventional methods, while also improving the quality of the harvested crops. Among the objectives, renewable energy and energy efficiency are also included in the greenhouse prototype to meet the energy requirements. This is achieved by harnessing solar energy through the use of solar panels within the greenhouse.

The sensors located in the greenhouse, which are connected to a microcontroller, provide data on various parameters such as temperature, humidity, and air quality. Through the microcontroller, the controlled units such as fans and water motors are regulated to maintain optimal conditions for plant growth. This integration of sensors and control units enables the greenhouse to acquire the smart greenhouse feature, ensuring optimal conditions for plant development.

In summary, this paper presents the basic parameters of a greenhouse for a smart greenhouse and the proposed solutions to renewable energy and energy efficiency issues. For this, an example smart greenhouse prototype and microcontroller software have been developed. The primary objectives of this paper and its addition to the literature are as follows:

- 1) Development of a low-cost smart greenhouse prototype with various electronic hardware to enhance AI applications in agriculture,
- 2) Demonstration of the use of Industry 4.0 tools such as the Internet of Things in a greenhouse,
- 3) Transferring the basic parameters such as temperature and humidity that need to be controlled in a greenhouse to remote servers via the Internet of Things, thus enabling the development of data analysis techniques for monitoring plant growth processes in the greenhouse.

In the remainder of the article, Section 2 describes the materials and methods used in the formation of the smart greenhouse. Afterward, Section 3 is the general working diagram of the developed smart greenhouse. Finally, Section 4 describes in detail the results obtained and future work.

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, a smart greenhouse prototype has been developed for AI-based precision agriculture applications. The flow diagram of the development stages of this prototype is given in Figure 1.

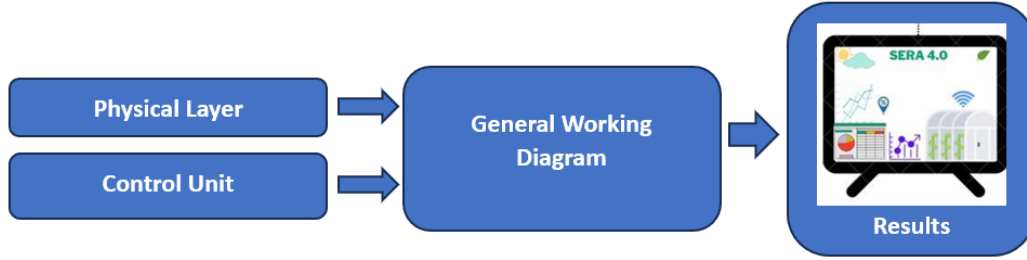


Figure 1. Flow Diagram

As shown in Figure 1, firstly, the greenhouse prototype is prepared with the physical layer and control unit stage. Then, the software to control the greenhouse is developed in the general working diagram section and finally, the results obtained from the smart greenhouse are exhibited in the conclusion section. For this developed greenhouse, all the main process steps are explained in detail below.

2.1. Physical Layer

The physical layer of the greenhouse consists of three parts. These parts are explained in detail in the sub-headings

2.1.1. Flower Pot and Plexiglass

While constructing the prototype greenhouse, plexiglass was used. The reason for using Plexiglass is that it is lighter and more durable than glass. In addition, the light transmittance of plexi is better than other materials. Likewise, plastic pots were used to make the greenhouse lighter and more portable. The use of plexiglass and plastic containers for the greenhouse is shown in Figure 2.



Figure 2. Flower Pot and Plexiglass

2.1.2. Solar Panel and Batteries

A 24V solar panel was used to meet the energy needs of the prototype greenhouse. The solar panels used are shown in Figure 3. The electrical energy obtained with this panel was transferred to 2 parallel connected 12V 9Ah batteries via a solar charge controller. When the energy consumption of the greenhouse is examined, two different situations are observed.

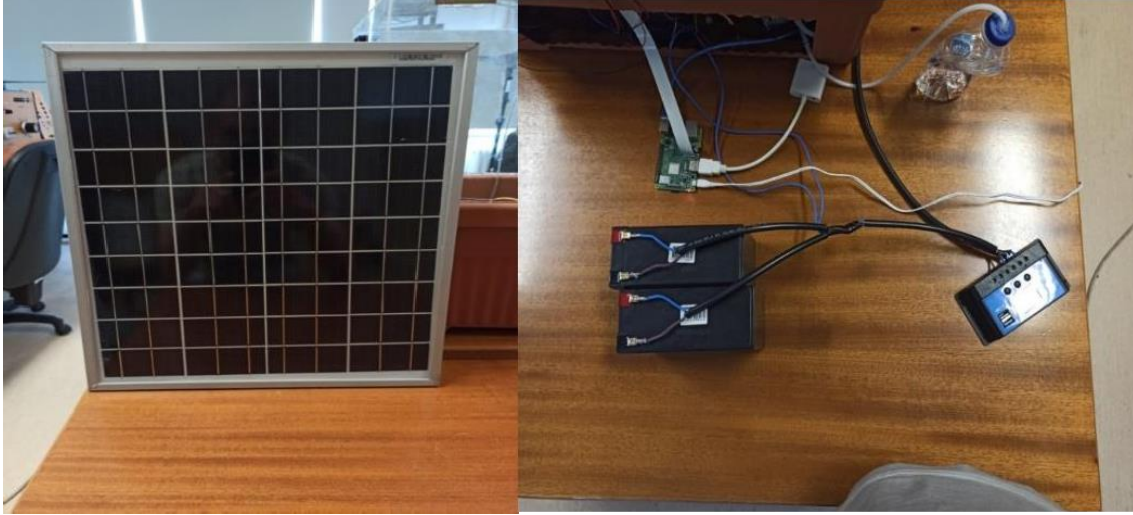


Figure 3. Solar Panel, Batteries, and Charge Controller

When the indoor environment needs to be heated in cold weather conditions, the energy consumed increases and the energy need of the system is met by the solar panel at a rate of 25 percent. This is because the heater draws a large amount of current. However, in hot weather, 80 percent of the system's energy needs are met by the solar panel.

2.2. Control Unit

The control unit of the smart greenhouse to be developed consists of three parts. These are the microcontroller, sensors, and components controlled by the microcontroller.

2.2.1. Microcontroller

The microcontroller to be used in this research is Arduino. Arduino has a relatively simple programming process compared to other microcontrollers with its simple software language, which is open to development thanks to its open-source codes. It is a kind of small computer that can read inputs from sensors, control actuators, and communicate with other devices through various communication protocols. Arduino development environment is software that allows one to write code for the microcontroller and upload the code to the board. It is also generally used in education and research to teach programming and electronics. In this system, an Arduino "MEGA" microcontroller will be used because there are many analog inputs [5]. The Arduino Mega used in this study is shown in Figure 4.



Figure 4. Arduino "MEGA" Microcontroller [6]

2.2.2. Sensors

In this study, in determining the sensors to be used in smart the greenhouse, the parameters to be followed in a greenhouse were examined and the parameters that could be important for the plants were determined. These are the preferred air temperature and humidity, soil moisture, light measurement, air quality, and CO₂ parameters for plant status indicators. In this case, suitable sensors that will enable the microcontroller preferred in this study to measure these parameters are explained in detail below.

In the smart greenhouse, it was first preferred to use DHT22 to measure air temperature and humidity. DHT22 is an air temperature and humidity sensor that works with Arduino. This sensor uses a capacitive humidity sensor and a thermistor to measure the surrounding air and sends digital data over a single wire interface [7]. Another used sensor is the soil moisture sensor. This sensor is used in this system to measure the moisture ratio in the soil. It includes a sensor that can be installed into the soil and an analog interface, connected to the sensor to an Arduino board. When it is connected, the Arduino can be programmed to read the sensor's output and convert it into a moisture level reading [8]. For light measurement in the smart greenhouse, Light Dependent Resistor (LDR) is preferred for the measurement of the light state. This sensor has the feature of changing the resistance of the sensor depending on the intensity of light coming into the sensor. In this way, it sends data to Arduino depending on the light intensity coming into the greenhouse and undertakes the task of providing data in the operation of the plant growth light [9]. For air quality measurement, MQ-135 is a sensor that detects harmful gases (alcohol and smoke) in the air and gives a value of "ppm" according to the particle ratios of these gases in the air. It is connected to the Arduino via an analog pin [10]. For the CO₂ measurement of a smart greenhouse, an MH-Z14 sensor is preferred. The MH-Z14 is an Arduino-compatible sensor that measures the CO₂ composition in the air. It works by measuring the absorption of infrared light at a specific wavelength by CO₂ molecules. The sensor has an infrared emitter and a detector, and it uses a microcontroller to analyze the signal and calculate the CO₂ concentration [11]. In summary, in total, five sensors were used to monitor the basic parameters in the smart greenhouse in this study.

2.2.3. Controlled Components

Optimum conditions for plant growth are provided by these components, these components are controlled by the microcontroller with relays. These are ventilation fans, heater fans, plant grow lights, and peristaltic liquid pumps. Its use is detailed below.

As ventilation fans, two fans will be used. The first is for fresh air to enter the greenhouse. Our aim here is to provide the most suitable conditions for the plant to perform photosynthesis. For this purpose, it will be ensured that fresh air from the outside is taken into the greenhouse. The second fan will be used to remove the harmful gases accumulated in the greenhouse from the greenhouse. The Arduino will control the fans. Thanks to the data it receives from the Arduino sensors, it will monitor the air in the greenhouse and run the fans when necessary. On another issue, temperature is an important factor for plant growth. The appropriate temperature for each plant may vary. The Arduino will monitor the temperature in the greenhouse with sensors and perform the necessary actions. The heater fan will be used to heat the greenhouse interior and will be controlled by the Arduino. Plant growth light is used for plant growth.

The purpose of using plant growth light is to achieve plant growth as soon as possible. Plants develop in a light environment. For this reason, in this study, we will use these special lights so that the plant can develop overnight. Finally, the peristaltic liquid pump provides the facility's water needs by drawing water from the water tank with a water pump.

2.3. Communication and Data Tracking Unit

In this subsection, Raspberry Pi is used for data collection and the Thingspeak interface is used for data monitoring. Details of these uses are given below.

2.3.1. Raspberry Pi 3B+

Raspberry Pi 3B+ is a small and affordable single-board computer with a 1.4 GHz quad-core processor, 1GB RAM, built-in Wi-Fi and Bluetooth, multiple ports for connectivity, and support for various operating systems. It is widely used for educational, DIY, and IoT projects [12]. Arduino sends the data it receives from the sensors to the Raspberry via serial communication (USB). These data are recorded as strings with the developed Python software and then these data are sent to the Thingspeak interface created for the smart greenhouse. The Python code developed for the data read via Arduino and sent to the Thingspeak interface is given in Figure 5.

```

import serial
import time
import schedule
import requests
import threading

list_values = []
def main_func():
    print('Established serial connection to Arduino')
    arduino_data = arduino.readline()
    decoded_values = str(arduino_data[0:len(arduino_data)].decode("utf-8"))
    print(decoded_values)
    list_values = decoded_values.split('x')
    print(list_values[0])
    sensor_readings={'api_key': 'X0796GCP2EE94FFS', 'field1':list_values[0], 'field2':list_values[1], 'field3':list_values[2], 'field4':list_values[3], 'field5':list_values[4], 'field6':list_values[5], 'field7':list_values[6]}
    url = 'https://api.thingspeak.com/update.json'
    requests_headers={'Content-Type': 'application/json'}
    print("Sending data to thingspeak.com")
    response=requests.post(url,sensor_readings,requests_headers)
    print("Response code:",response.status_code)
    print("Response code:",response.text)

schedule.every(15).seconds.do(main_func)
while True:
    schedule.run_pending()
    time.sleep(1)

```

Figure 5. Python Code for ThingSpeak

2.3.2. ThingSpeak

An Internet of Things (IoT) platform called ThingSpeak.com allows users to gather, examine, and visualize data from connected devices. In addition to providing tools for data processing, analysis, and visualization, it offers cloud-based storage for sensor data. ThingSpeak enables customers to effortlessly monitor and control their IoT applications by supporting a variety of IoT devices and integrating with well-known platforms. For advanced data analysis and machine learning capabilities, it also provides MATLAB Analytics integration. ThingSpeak offers a flexible and user-friendly solution for IoT data administration and application development thanks to its open-source status and vibrant community. The data of the smart greenhouse was sent to ThingSpeak via Raspberry Pi with Python Code and the graphic examples obtained are given in Figure 6.



Figure 6. Illustration of smart greenhouse data posted to Thingspeak

3. GENERAL WORKING DIAGRAM

The general operation diagram is detailed in two parts the control unit and communication subsections.

3.1. Controller Unit

All steps performed in the controller unit of the general flow diagram are explained below.

- 1) Data Acquisition from Sensors: The system acquires data from sensors, which detect various physical or environmental variables. These variables are converted into electrical signals and transmitted to the Arduino microcontroller.
- 2) Data processing: The signals that are received are processed by the Arduino microcontroller. The data from the sensors are analyzed as part of this processing, and they are then mapped to particular value ranges. The Arduino code makes decisions in accordance with this data processing and analysis.
- 3) Relay Control: The Arduino code utilizes relays to control the operation of the monitored components.
- 4) Signal Transmission: Based on the specified value ranges in the Arduino code, the relays of the monitored components receive "HIGH" or "LOW" signals. The "HIGH" signal shows that a component should be activated and operated, while the "LOW" signal shows that a component should be deactivated and not operate.
- 5) Operation of Components: The "HIGH" or "LOW" signals sent to the relays affect their switching. This enables the operation of the monitored components.

Therefore, by transmitting data from the sensors to the Arduino microcontroller, decisions are made based on this data, and appropriate signals are sent through the relays of the monitored components to enable their operation. An example of the general operation diagram of the smart greenhouse is given in Figure 7.

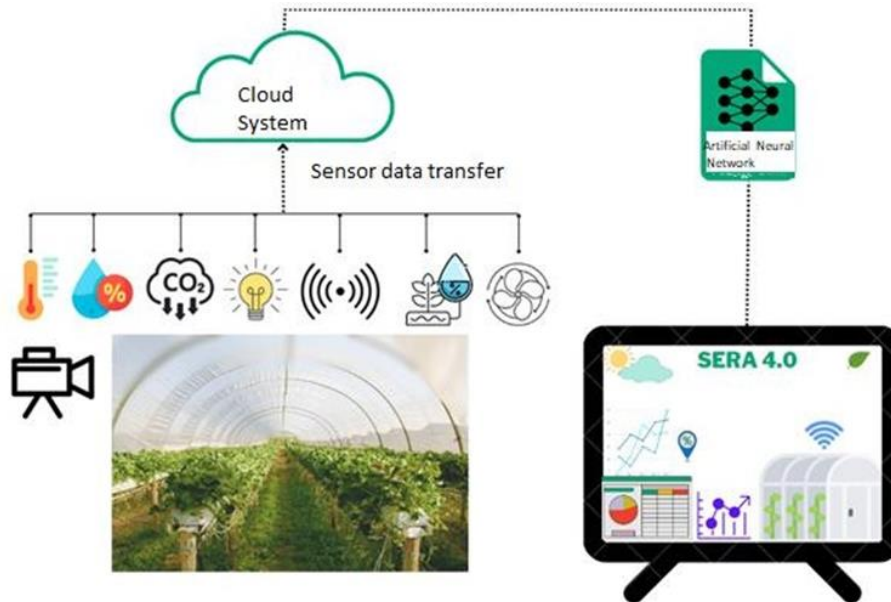


Figure 7. General working diagram of smart greenhouse

As seen in Figure 7, basic parameters such as temperature and humidity obtained from a greenhouse can be given as input to an artificial neural network (ANN). In this direction, a sample ANN model can be developed for the estimation of parameters such as energy, heat, etc., or the determination of normal/abnormal conditions in the greenhouse (14). ANN, one of the AI methods, is a method used in many different fields for processing and modeling numerical values. For this purpose, this study aims to show that the sensor information obtained can be processed with an ANN model and feedback can be

provided on a smart greenhouse using digital twin technology. Accordingly, in this study, the development of a smart greenhouse example modeling that can provide mutual feedback between the digital twin and the greenhouse and take actions according to the situation is shown.

3.2. Communication

All steps performed in the communication section of the general flow diagram are explained below.

1. **Data Acquisition from Sensors:** The system collects data from sensors that detect various physical or environmental variables. This sensor data is transmitted to the Arduino microcontroller.
2. **Serial Communication:** The Arduino microcontroller uses serial communication to transmit the sensor data to Raspberry Pi. Serial communication allows data transfer between Arduino and Raspberry Pi.
3. **Data Analysis with Python:** Raspberry Pi receives sensor data and uses Python code to analyze the data. The Python code processes and interprets the received data according to the desired analysis algorithms or logic.
4. **Sending Data to Thingspeak:** After data analysis, Raspberry Pi sends the processed data to the Thingspeak platform. Thingspeak is an IoT analytics platform that allows users to store, analyze, and visualize their sensor data.
5. **Accessing Data:** By sending the data to Thingspeak, the user gains access to the latest sensor data. Users can access this data through the Thingspeak platform's user interface or retrieve it programmatically through APIs provided by Thingspeak.

By employing this setup, the sensor data is transmitted from the sensors to the Arduino via serial communication. The Arduino forwards the data to the Raspberry Pi, where it is analyzed using Python code. Finally, the processed data is sent to Thingspeak, enabling users to access and interact with the data for various purposes. The developed smart greenhouse prototype is shown in Figure 8.

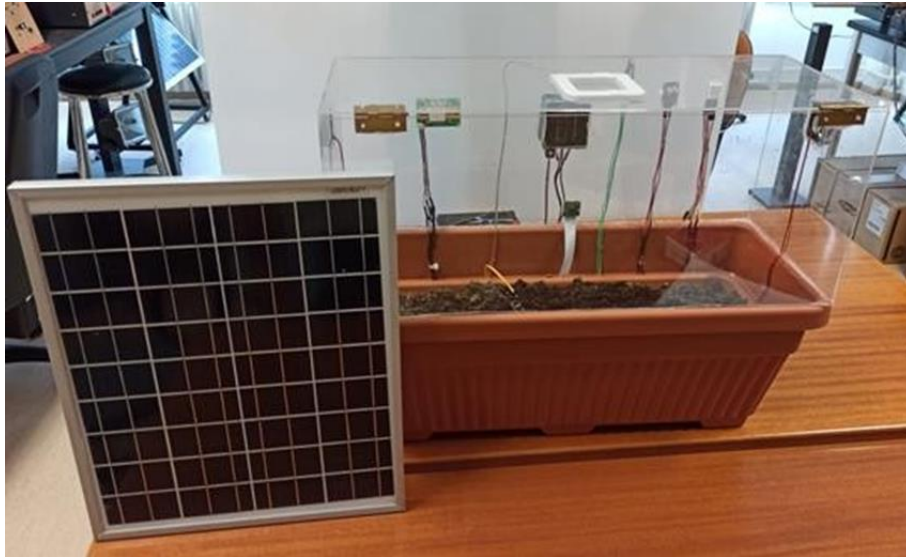


Figure 8. Prototype smart greenhouse

4. RESULTS AND FUTURE WORKS

The system has been carefully designed to be self-sustaining in terms of energy consumption and user-friendly for easy control. The prototype greenhouse serves as a confirmation of these qualities. However, the system has further development potential and there are future studies that could expand its capabilities. One of the areas of development is digital twin technology. Thanks to the real-time information and insights provided, digital twin technology offers various advantages such as improved performance, predictive capabilities, and remote monitoring. In this context, this technology involves

creating a virtual copy of a physical system in a computer environment. Accordingly, sensors data from a greenhouse can be used for remote monitoring and predictive features to improve performance.

Digital twin technology involves creating a virtual replica of a physical system in a computer environment. In the case of the prototype greenhouse, the most significant resource for creating a digital twin would be the sensor data. Once this data is stored, it can be used to generate various scenarios. Risk analysis can be performed based on these scenarios, and necessary warnings or alerts can be provided to the user. Ultimately, by automating the control of the components within the system, the goal is to achieve a fully automated system.

Future developments in the system's evolution encompass the integration of digital twin technologies and its transition toward a fully automated state. These advancements are poised to augment the system's capabilities, efficiency, and dependability, thereby paving the way for a more sophisticated and intelligent control of the greenhouse environment. The incorporation of a soil mineral level sensor represents a noteworthy contribution to the research endeavor. This sensor enables us to monitor the essential minerals required for plant growth. Consequently, it allows us to supply the requisite minerals to the soil via the irrigation system. The irrigation system, equipped with sensor data, is poised to deliver the essential minerals to the plants automatically. For instance, in the event of a sensor detecting a low nitrogen level, it can administer a nitrogen-rich fertilizer or nutrient solution to the soil autonomously. This proactive approach promotes the healthy growth and development of the plants. The soil mineral level sensor plays a pivotal role in furnishing minerals necessary for plant growth promptly and accurately. This not only enhances plant development and productivity but also facilitates the judicious utilization of fertilizers and water, thereby contributing to the optimization of resource management.

This new development will improve the ability to provide the essential mineral nutrients for optimal plant growth, transforming it into a more sophisticated plant cultivation and management system. Plant growth optimization will boost production and improve resource management. Image processing is widely used for plant disease detection. Plant diseases are symptoms produced by pathogenic organisms or infections that degrade plant health and reduce production. Image processing tools let us detect plant illness by analyzing photos of plant leaves or other plant elements [13].

The following steps are commonly included in the identification of plant diseases using image processing:

1. **Image Acquisition:** First, high-resolution photographs of plant leaves or plant components are obtained. These photos will be obtained with the help of a Raspberry Pi camera.
2. **Preprocessing:** The resulting images go through preprocessing steps. These steps are contrast enhancement, color conversion, noise reduction, and image corrections. Their purpose is to improve image quality to get better analysis.
3. **Feature Extraction:** To identify disease signs, features are retrieved from photos. The color, shape, texture, and morphological properties of leaves are examples of these qualities. Feature extraction allows for picture analysis utilizing statistical or artificial intelligence-based techniques.
4. **Classification:** The collected characteristics are added to the classification models utilizing machine learning or artificial intelligence approaches. These models are used to tell the difference between healthy and diseased plants. Diseases are detected using categorization findings.
5. **Disease Detection and Analysis:** Plant diseases are detected and evaluated based on classification results. The purpose of this analysis is to ascertain the type, severity, or scope of the disease. Based on this knowledge, relevant actions or interventions can be implemented to lessen the disease's impacts.

Image processing represents a rapid, efficient, and automated approach to the detection of plant diseases. This technology has evolved into a pivotal tool for both monitoring plant health and facilitating the early diagnosis of diseases within the agricultural sector.

In summary, in this study, a smart greenhouse prototype was developed and an exemplary digital twin technology infrastructure was prepared. In future research, a completely automated greenhouse system could be realized through the analysis of collected data using AI techniques. Sophisticated greenhouse management systems can be created by capturing parameter values from sensors at specific intervals. This process can facilitate the generation of recommendations for optimal climatic conditions conducive to plant growth.

ACKNOWLEDGMENT

In memory of the 2023 Kahramanmaraş earthquake victims, we extend our gratitude to Ahmet Muhittin Özer, a driving force behind this project, who was tragically lost in the quake. We also acknowledge the support of the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under grant 1919B012218243. We would also like to thank Sarıcakaya Municipality for their contribution during the realization of the project.

REFERENCES

- [1] World Bank Group. Population Estimates and Projections. 2020. Available online: <https://databank.worldbank.org/source/population-estimates-and-projections> (accessed on 6 September 2021).
- [2] The State of Food and Agriculture; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2017.
- [3] L. Graamans, E. Baeza, A. Van Den Dobbelsteen, I. Tsafaras and C. Stanghellini, Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agric. Sys.* 160, 31-43, 2018.
- [4] T. Chapagain and M. N. Raizada, Impacts of natural disasters on smallholder farmers: gaps and recommendations. *Agriculture & Food Security*, 6(1), 1-16, 2017.
- [5] N. Ariesen-Verschuur, C. Verdouw and B. Tekinerdogan, Digital Twins in greenhouse horticulture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107183, 2022.
- [6] A. Yahaya, Y. A. Abass and S.A Adeshina, Greenhouse monitoring and control system with an Arduino system. In 2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 1-6, 2019.
- [7] J. D. Chaux, D. Sanchez-Londono and G. Barbieri, A digital twin architecture to optimize productivity within controlled environment agriculture. *Applied Sciences*, 11(19), 8875, 2021.
- [8] Clausen, K. Arendt, A. Johansen, F.C. Sangogboye, M.B. Kjærgaard, C. T. Veje and B. N. Jørgensen, A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings. *Energy Informatics*, 4, 1-19, 2021.
- [9] R. Kumar, K. Pandey and P. Rai, Advanced Greenhouse Monitoring and Control System. In Biennial International Conference on Future Learning Aspects of Mechanical Engineering, 479-492, 2022.
- [10] J. N. C. Bongulto, A. Y. L. O Cabato and R.B. Caldo, Design and implementation of smart farm data logging and monitoring system. *Laguna J. Eng. Comput. Stud.* 3(3), 42-54, 2016.
- [11] J. A. Enokela and T. O. Othoigbe, An automated greenhouse control system using Arduino prototyping platform. *Australian Journal of Engineering Research*, 1(1), 64-73, 2015.
- [12] J. J. Wong, Smart Green House using IOT and cloud computing (Doctoral dissertation, UTAR), 2021.
- [13] A. Haridasan, J. Thomas and E. D. Raj, Deep learning system for paddy plant disease detection and classification. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 120, 2023.
- [14] Petrakis, T., Kavga, A., Thomopoulos, V., & Argiriou, A. A. Neural Network Model for Greenhouse Microclimate Predictions. *Agriculture*, 12(6), 780, 2022.



Akdeniz Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Akdeniz
MÜHENDİSLİK
Dergisi

Akdeniz Mühendislik Dergisi

Akdeniz Journal of Engineering

CORRESPONDENCE ADDRESS | YAZIŞMA ADRESİ

*Akdeniz University – Faculty of Engineering
Dumlupınar Boulevard, Akdeniz University Campus
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

*Akdeniz Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi
07070 - Konyaaltı, Antalya, TÜRKİYE*

E-MAIL | E-POSTA

muhendislik@akdeniz.edu.tr

WEB PAGE | WEB SAYFASI

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/akuje>
