

## Konya Ekolojik Şartlarında Yetiştirilen Farklı Tipteki Şeker Pancarı Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Tespiti

Nursel ÇÖL KESKİN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü Endüstri Bitkileri Anabilim Dalı, Konya

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0089-8442>

\*Sorumlu yazar: [nurselcol@selcuk.edu.tr](mailto:nurselcol@selcuk.edu.tr)

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 12.06.2024

Kabul tarihi: 01.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

*Beta vulgaris saccharifera* L.

Şeker pancarı

Verim

Polar şeker oranı

Polar şeker verimi

### ÖZ

Bu çalışma; Konya ekolojik koşullarında 2023 yılı yetiştirme sezonunda farklı tipteki şeker pancarı çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin tespiti amacıyla yürütülmüş olup çalışmada N tipi (Eider, Esperanza, Danicia), NZ tipi (Bison, Rodeo, Sentinel, Mohican, Libellule), Z tipi (Serenada, Ernestina, Bernache, Terranova) olmak üzere farklı tipteki 12 adet şeker pancarı çeşidi kullanılmıştır. “Tesadüf Blokları Deneme Deseni”ne göre 3 tekerrürlü olacak şekilde kurulan bu çalışmada; kök-gövde uzunluğu (cm), kök-gövde çapı (cm), kuyruk uzunluğu (cm), kök-gövde verimi (kg/da), yaş yaprak verimi (kg/da), kök-gövde ağırlığı (g/bitki), yaş yaprak ağırlığı (g/bitki), kuru madde oranı (%), polar şeker oranı (%) ve polar şeker verimi (kg/da) parametreleri incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre yaş yaprak verimi (kg/da) ve yaş yaprak ağırlığı (g/bitki) bakımından çeşitler arasındaki farklılıklar %5 düzeyinde, diğer tüm incelenen parametreler bakımından da %1 düzeyinde önemli olduğu kaydedilmiştir. Farklı tipteki şeker pancarı çeşitleri arasında; en yüksek kök-gövde ağırlığı 893,36 g/bitki ile Libellule çeşidi (NZ), en yüksek kök-gövde verimi ise 7817,83 kg/da ile Bison çeşidinde (NZ) tespit edilmiştir. En yüksek polar şeker oranı Bernache (Z) çeşidinde %18,82 ve polar şeker verimi ise Bison çeşidinde (NZ) 1388,96 kg/da olarak hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda Konya ve benzer ekolojilere sahip lokasyonlarda kök-gövde ve polar şeker verimi açısından Bison; kuru madde ve polar şeker oranı açısından ise Bernache çeşitleri ön plana çıkmaktadır.

## Determination of Yield and Quality Characteristics of Different Types of Sugar Beet Varieties Grown in Konya Ecological Conditions

### Research Article

#### Article History:

Received: 12.06.2024

Accepted: 01.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

*Beta vulgaris saccharifera* L.

Sugar beet

Yield

Polar sugar ratio

Polar sugar yield

### ABSTRACT

This study was conducted during the 2023 growing season under the ecological conditions of Konya to determine the yield and quality characteristics of different types of sugar beet varieties. The study material consisted of 12 different types of sugar beet varieties, including N-type (Eider, Esperanza, Danicia), NZ-type (Bison, Rodeo, Sentinel, Mohican, Libellule), and Z-type (Serenada, Ernestina, Bernache, Terranova). The study was set up in a randomized complete block design with three replications. Parameters such as root-stem length (cm), root diameter (cm), tail length (cm), root yield (kg da<sup>-1</sup>), fresh leaf yield (kg da<sup>-1</sup>), root weight (g plant<sup>-1</sup>), fresh leaf weight (g plant<sup>-1</sup>), dry matter ratio (%), polar sugar ratio (%), and polar sugar yield (kg da<sup>-1</sup>) were examined. According to the research results, differences among varieties in terms of fresh leaf yield (kg da<sup>-1</sup>) and fresh leaf weight (g plant<sup>-1</sup>) were significant at the 5% level, while differences in all other examined parameters were significant at the 1% level. Among the different types of sugar beet varieties, the highest root weight was recorded in the Libellule variety (NZ) with 893.36 g plant<sup>-1</sup>, and the highest root-stem yield was found in the Bison variety (NZ) with

7817.83 kg da<sup>-1</sup>. The highest polar sugar ratio was calculated in the Bernache variety (Z) with 18.82%, and the highest polar sugar yield was calculated in the Bison variety (NZ) with 1388.96 kg da<sup>-1</sup>. As a result of the research, it was determined that the Bison variety stands out in terms of root and polar sugar yield in Konya and similar ecological locations, while the Bernache variety stands out in terms of dry matter and polar sugar ratio.

**To Cite:** Çöl Keskin N. Konya Ekolojik Şartlarında Yetiştirilen Farklı Tipteki Şeker Pancarı Çeşitlerinin Verim ve Kalite Özelliklerinin Tespiti. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 1-16.

## 1. Giriş

Dünyada şeker üretiminde; %79'luk bir oran ile şeker kamışı, %21'lik oran ile de şeker pancarı söz sahibi olup şeker üretimi miktarı 2022/23'te, bir önceki döneme göre 177,2 milyon ton ile %2,5 azalış göstermiş olmakla birlikte 023/24 sezonunda %6,0 oranında (187,8 milyon ton) artış göstermesi öngörülmektedir. Türkiye'de ise sadece şeker pancarı bitkisinde şeker üretimi yapılmakta ve 2023 yetiştirme döneminde şeker pancarı ekim alanı yaklaşık 3,6 milyon dekar, üretimi 23,5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Şeker pancarının ekim alanı ve üretim miktarları bakımından Rusya, ABD, Fransa ve Almanya'dan sonra %6,6'luk bir payla Türkiye beşinci sırada yer almıştır. Verime göre değerlendirildiğinde; Fransa, Almanya, ABD ve Türkiye ilk dörtte yer alan ülkeler olarak sıralanmaktadır. Ayrıca, Türkiye 2022/23 yetiştirme döneminde 3,4 milyon tonluk (%1,9) şeker üretimi ile dünyada 11. sırada yer almaktadır.

Ülkemizde şeker pancarı tarımı; gıdadan, ilaca nakliyeden istihdama kadar birçok iş sahasının temel konusu durumundadır. Şeker pancarı tarımında; toprak hazırlığından, gübreleme, ekim, bakım, hastalık ve zararlılarla mücadele, sulama, hasat ve silolamaya kadar geniş bir üretim şemasında, çeşit seçimi de büyük önem arz etmektedir. Son zamanlarda üreticiler çeşit seçiminde pancar kooperatifinin verdiği tohum yerine piyasadaki temin edilen farklı çeşitleri de kullanmaya başlamışlardır (Eştürk, 2018; Anonim, 2024).

Bu kadar önemli bir konumda olan şeker pancarından sadece şeker amaçlı değil; aynı zamanda biyoetanol, maya, küspe, melas olarak da yararlanılmaktadır. Bundan dolayı verim kadar, kalite de şeker pancarı için çok büyük bir önem teşkil etmektedir (Güneş ve ark., 2020; Kanat, 2023). Bu kadar kullanım alanına sahip şeker pancarı için, üreticilerin çeşit seçiminde bazı dikkat edilmesi gereken temel konular vardır. Bunlar; ekilen bölgenin iklim ve toprak yapısı, hastalık ve tohumla kalkmaya dayanıklılık, kök ve şeker veriminin yüksek olması, çimlenme gücü ve tarlada çıkış oranının iyi olması, ucuz olması gibi faktörlere bağlı olarak çeşit seçimi değişkenlik gösterebilmektedir (Anonim, 2024).

Böylece şeker fabrikalarının talepleri çerçevesinde; çevre koşullarına uyumlu, yüksek şeker oranına ve uygun kök verimine sahip olan çeşitlerin bölge çiftçisine ve nihayetinde ülke ekonomisine katkı sağlaması ile de bu çalışma büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı; şeker pancarının tarımında söz sahipliğinde öncü olan Konya iline uygun, farklı tipteki şeker pancarı çeşitlerinin belirlenmesidir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışma; 2023 yılında Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Prof. Dr. Aldülkadir Akçin Deneme Arazisi'nde yapılmıştır. N tipi (Eider, Esperanza, Danicia), NZ tipi (Bison, Rodeo, Sentinel, Mohican,



Libellule), Z tipi (Serenada, Ernestina, Bernache, Terranova) olmak üzere farklı tipteki 12 adet şeker pancarı çeşidi çalışmada materyal olarak kullanılmıştır. Deneme alanının farklı noktalarından alınan toprak örnekleri Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre; toprak yapısı sınıfı tınlı yapıda olup organik madde içeriği %1,37, inorganik azot 8,6 mg kg<sup>-1</sup>, fosfor 5,0 mg kg<sup>-1</sup>, potasyum 48 mg kg<sup>-1</sup> ve pH 7,81 (1:2,5) olarak belirlenmiştir.

**Tablo 1.** Deneme alanı toprağının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri\*

Toprak Özellikleri (0-30 cm)		Toprak Özellikleri (0-30 cm)	
<b>Tekstür</b>	Tın	<b>Kalsiyum (Ca)</b>	3922 mg kg <sup>-1</sup>
<b>pH (1:2.5, Toprak: Su)</b>	7,81	<b>Magnezyum (Mg)</b>	112 mg kg <sup>-1</sup>
<b>EC (Tuz) (1:5, Toprak:Su)</b>	72,2 µS cm <sup>-1</sup>	<b>Sodyum (Na)</b>	42 mg kg <sup>-1</sup>
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	%2,8	<b>Bor (B)</b>	0,20 mg kg <sup>-1</sup>
<b>Organik madde</b>	%1,37	<b>Bakır (Cu)</b>	0,33 mg kg <sup>-1</sup>
<b>İnorganik azot (NH<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>-N)</b>	8,6 mg kg <sup>-1</sup>	<b>Demir (Fe)</b>	4,12 mg kg <sup>-1</sup>
<b>Fosfor (P)</b>	5,0 mg kg <sup>-1</sup>	<b>Çinko (Zn)</b>	0,14 mg kg <sup>-1</sup>
<b>Potasyum (K)</b>	48 mg kg <sup>-1</sup>	<b>Mangan (Mn)</b>	9,04 mg kg <sup>-1</sup>

\*Toprak analizi Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Gübre Bitki Besleme Araştırma Laboratuvarı’nda yapılmıştır.

Araştırmanın yürütüldüğü 2023 yılına ait yetiştirme dönemini ve uzun yılları kapsayacak şekilde (Mayıs-Ekim) Konya iline ait ortalama sıcaklık (°C), toplam yağış (mm) ve nisbi nem (%) değerleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Araştırmanın yürütüldüğü ortalama sıcaklık ve nisbi nem değerlerine bakıldığında uzun yıllar ortalaması ile 2023 yılı verileri birbirleriyle yakın bulunmuştur. Toplam yağış miktarı ise 2023 yılı (299,3 mm) uzun yıllar ortalamasından (131,3 mm) yüksek değerde kaydedilmiştir (Tablo 2).

**Tablo 2.** Denemenin yürütüldüğü yetiştirme sezonlarına ait iklim verileri\*

Aylar	Ortalama Sıcaklık (°C)		Toplam Yağış (mm)		Nisbi Nem (%)	
	Uzun Yıllar**	2023	Uzun Yıllar	2023	Uzun Yıllar	2023
Mayıs	17,6	14,8	34,9	75,8	55,1	62,9
Haziran	21,7	19,1	33,2	72,8	48,9	62,8
Temmuz	25,3	24,3	6,9	4,2	38,9	36,3
Ağustos	25,5	27,2	5,4	3,3	37,8	30,3
Eylül	20,6	20,5	18,9	15,4	44,3	38,6
Ekim	13,6	15,1	32,0	27,8	58,6	53,0
Top./Ort.	20,7	20,1	131,3	199,3	47,3	47,3

\*Konya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü Kayıtlarından alınmış olup Konya Havalimanı verileri verilmiştir. \*\*Uzun Yıllar: 2004-2022 yıllarını kapsamaktadır.

Deneme, 12 Mayıs 2023 tarihinde “Tesadüf Blokları Deneme Deseni”ne göre 3 tekerrürlü olarak kurulmuştur. Bitki sıklığı 45x16 cm olacak şekilde (Şahiner ve Demir, 2020) sıra araları markörle açılmış olup, parsel uzunluğu 5 m ve her parselde 5 sıra olacak şekilde elle ekim yapılmıştır. Ekimden önce dekara 25 kg Diamonyum Fosfat (DAP 18-46-0), üst gübre olarak dekara 29 kg Amonyum Sülfat (%21 N) gübresi ikinci sulamayla verilmiştir (Kulan ve ark., 2016). Çıkış tamamlandıktan sonra bitkiler

ihtiyaç duydukça 4 kez el çapası yapılmış (Şekil 3) ve küsküt görülen yerlerde yayılım olmadan elle toplanmış ardından tarladan uzaklaştırılmıştır. Hasat; 15 Ekim 2023 tarihinde el ile pancar sökme çatalı kullanılarak yapılmıştır. Her parselde gerekli ölçüm, tartım ve sayımlar tamamlanmış ardından kuru madde ve polar şeker oranı Kavas ve Leblebici (2004)'nin yöntemine göre Konya Şeker Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi Laboratuvarlarında yapılmıştır. Araştırmada; kök-gövde uzunluğu (cm), kök-gövde çapı (cm), kuyruk uzunluğu (cm), kök-gövde verimi (kg/da), yaş yaprak verimi (kg/da), kök-gövde ağırlığı (g/bitki), yaş yaprak ağırlığı (g/bitki), kuru madde oranı (%), polar şeker oranı (%) ve polar şeker verimi (kg/da) parametreleri incelenmiştir. Kök-gövde uzunluğu; hasat parselden tesadüfi olarak seçilen 10 bitkinin sökülerek temizlendikten sonra, baş kısmından itibaren kuyruk başına kadar olan kısmı metre ile ölçülmüştür (Çelikel, 1989). Kök-gövde çapı, seçilen bu pancarların yaprakları kesilerek boyun kısmından metre yardımıyla ölçülüp çevresi olarak kaydedildikten sonra hesaplanmıştır. Kuyruk uzunluğu değeri ise, seçilen aynı örneklerdeki köklerin uç kısımları metre ile ölçülmüştür. Kök-gövde ağırlığı, her hasat parselindeki tüm pancarların baş kısımları kesilerek, kalan kısmı tartılarak kg/da cinsinden hesaplanmıştır. Şeker verimi, her parsel için hesap edilen kg/da cinsinden kök-gövde verimi değerleri ile aynı parseldeki numunelerden tespit edilen polar şeker oranlarının çarpımının 100'e bölünmesi ile belirlenmiştir (Şahiner, 2020). Yaş yaprak ağırlığı, her hasat parselindeki tüm örneklerin yaş yaprakları ve başları birlikte tartılıp kg/da cinsinden kaydedilmiştir (Kısaoğlu, 1987). Bitki başına kök-gövde ve yaş yaprak ağırlıkları ise hasat parselindeki bitki sayısı sayılarak g olarak tespit edilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen değerler "Tesadüf Blokları Deneme Deseni"ne göre "JUMP" istatistik paket programı ile, istatistiki olarak önemli bulunan parametrelerin ortalama değerlerinin karşılaştırılması ise "MSTAT-C" istatistik paket programı kullanılarak DUNCAN testine göre yapılmıştır.

### **3. Bulgular ve Tartışma**

Çalışmada farklı tipteki şeker pancarı çeşitlerinin; kök-gövde uzunluğu (cm), kök-gövde çapı (cm), kuyruk uzunluğu (cm), kök-gövde verimi (kg/da), kök-gövde ağırlığı (g/bitki), kuru madde oranı (%), polar şeker oranı (%) ve polar şeker verimi (kg/da) parametreleri yönünden farklılıklar istatistiki olarak %1, yaş yaprak verimi (kg/da), yaş yaprak ağırlığı (g/bitki) parametreleri yönünden ise %5 düzeyinde önemli olduğu belirlenmiştir (Tablo 3).

**Tablo 3.** Denemede tarımsal ve kalite özelliklerine ait varyans sonuçlarının analizi-1

		Kareler Ortalaması				
Varyasyon Kaynakları	SD	Kök-gövde uzunluğu (cm)	Kök-gövde çapı (cm)	Kuyruk uzunluğu (cm)	Kök-gövde verimi (kg/da)	Yaş yaprak verimi (kg/da)
Tekerrür	2	7,69	0,04	14,21	221887,95	1362236,82
Çeşit	11	11,54**	0,94**	9,07**	1897148,79**	2441544,45*
Hata	22	3,13	0,23	1,80	269259,43	789389,28

		Kareler Ortalaması				
Varyasyon Kaynakları	SD	Bitki başına kök-gövde ağırlığı (g)	Bitki başına yaş yaprak ağırlığı (g)	Kuru madde oranı (%)	Polar şeker oranı (%)	Şeker verimi (kg/da)
Tekerrür	2	10891,52	8547,99	0,29	0,15	9886,99
Çeşit	11	29939,92**	13624,15*	7,46**	5,39**	109955,31**
Hata	22	5580,68	4985,12	0,75	0,44	7550,86

\*\*%1 seviyesinde. \*%5 seviyesinde önemlidir.

**Kök-gövde uzunluğu (cm):** Çeşitlerin kök-gövde boyları; 30,49 -37,00 cm (ortalaması 32,84 cm)'dir. En yüksek kök-gövde uzunluğu 37,00 cm ile Terranova çeşidi (a) grubunda sınıflandırılırken, sırasıyla 30,49 cm, 30,56 cm ve 30,77 ile Rodeo, Mohican ve Bison çeşitleri arasında istatistiki bir fark bulunmamış olmakla birlikte üç çeşit de (c) grubunda tasnif edilmiştir (Tablo 4). Cesur (2023) yapmış olduğu bir çalışmada, şeker pancarında son yapılan hasat zamanlarında çeşitlerin kök-gövde uzunluklarının artmakta olduğu rapor edilmiştir. Çünkü kök-gövde uzunluğuna, hasat zamanı geciktikçe yapılan uygulamaların (sulama, bakım vb.) doğru orantılı olarak tesir ettiği bilinmektedir. Birçok lokasyonda farklı şeker pancarı çeşitleri denemeye alınmış ve kök-gövde uzunlukları değişkenlik arz etmiştir. Kırşehir'de yapılan bir çalışmada çeşitlerin kök-gövde uzunlukları 25,47-30,20 cm (Şahiner ve Demir, 2020), Şanlıurfa'da yetiştirilen kışlık şeker pancarı çeşitlerinde kök-gövde uzunlukları 32,1-35,6 cm (Erbil, 2021) olarak kaydedilmiştir. Diğer taraftan, her bitkide su ve besin elementi alımından bitkinin kök sistemi sorumludur. Şeker pancarında yapılan bir çalışmada, kuraklık stresi altında yetiştirilen çeşitlerin kök-gövde büyüklükleri ve köklenme modellerinde genotipin ana etken olduğu belirlenmiştir (Fitters ve ark., 2022). Kuraklık stresi kök-gövdesinin büyümesine diğer yandan kök çapının azalmasına neden olmaktadır (Fitters ve ark., 2017). Bu çalışmadaki kök-gövde boylarının farklılık arz etmesi sulama vb. bakım uygulamaları, genotip, iklim ve toprak yapısına bağlı olduğu düşünülmektedir ve atıf yapılan araştırmacıların bulguları, bu çalışmadan elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

**Kök-gövde çapı (cm):** Şeker pancarında kök-gövde çapı değerleri büyüme dönemine göre değişkenlik göstermektedir. Aynı derinlikte bulunan çeşitlerde yapılan kök-gövde çaplarının ölçümünde değerlerin bitki gelişiminin son safhalarına doğru gidildikçe düştüğü görülmüştür (Fitters ve ark., 2017; Fitters ve ark., 2022). Sanaie Niri ve ark. (2024) tarafından yapılan bir çalışmada; kök çapı ile polar şeker oranı ve kök verimi arasında önemli ve pozitif bir ilişki mevcut olduğu bildirilmiştir. Diğer taraftan son yıllarda yüksek verimli çeşitlerin ıslah edilmesiyle kök-gövde morfolojisinin etkilendiği ve kök-gövde çapı ile verimi arasında yakın bir ilişki olduğu da rapor edilmiştir. Fakat aynı çalışmada verim bakımından çeşitler arasındaki varyasyon; lokasyon, iklim, genotip, ekim ve hasat zamanlarına göre

değişkenlik arz etmesine rağmen verim ve kök-gövde çapı arasındaki ilişki yer ve yıl gibi farklı çevre koşullarından etkilenmediği bildirilmiştir. Bununla birlikte, topraktaki penetrasyon direncinin artması ile kök-gövde çapının büyümesinin sınırlanabileceği öngörülmektedir (Hoffmann, 2017). Tsialtas ve Maslaris (2010) tarafından yürütülen iki yıllık tarla çalışmalarında; ana faktörler olan yıl, yer, çeşit ve bunların etkileşimleri kök şekli parametreleri üzerinde verim ve bileşenlerine göre daha az etkiye sahip olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada en yüksek kök-gövde çapı Ernestina (12,04 cm) ve Esperanza (12,03 cm) çeşitlerinde ölçülmüş ve aynı grupta (a) yer almışlardır. Rodeo çeşidinde ise (10,15 cm) en düşük kök-gövde çapı kaydedilmiş ve (c) grubunda yer almıştır (Tablo 4). Eskişehir koşullarında kurulan bir çalışmada bazı şeker pancarı çeşitlerinin performansları tespit edilmiş ve kök-gövde çapları 10,93-12,37 cm olarak bildirilmiştir (Kulan ve ark., 2016). Konya’da yapılan başka bir çalışmada ise, şeker pancarı kök-gövde çapları çok düşük tespit edilmiş ve deneme ortalaması 8,0 cm olarak kaydedilmiştir (Çatal ve Akınerdem, 2013). Kulan ve ark. (2016)’nın kök-gövde çapları ile ilgili bulguları bu çalışmadan elde edilen veriler uyum içerisinde olup Çatal ve Akınerdem (2013)’in bulgularından yüksek sınırlarda tespit edilmiştir.

**Kuyruk uzunluğu (cm):** Pancarda kuyruk bölümü kök gövdesinin devamı olup, kökün alta doğru 1-2 cm incelendiği kısımdan başlar. Genelde uzunluğu 10-25 cm kadardır. Hafif topraklarda 1,0-1,5 m derinliğe kadar inebilmektedir. Hasat sırasında çoğunlukla kendiliğinden kopar ve toprak içinde kırılarak kalır. Kök gövdesindeki oranı %1-2 kadardır. Düşük şeker oranı ihtiva ettiğinden (%1-2) teknolojik öneme sahip değildir ancak iyi bir hayvan yemidir (Akınerdem, 2016). Bu çalışmadan elde edilen kuyruk uzunlukları deneme ortalaması 13,32 cm’dir. En uzun kuyruk uzunluğuna sahip çeşit 16,88 cm ile Terranova olup, en kısa kuyruk uzunluğu ise 11,20-12,61 cm’dir (Tablo 4). Yasaminshirazi ve ark. (2020) tarafından yürütülen bir çalışmada çeşitlerin kuyruk uzunlukları 5,00-6,67 cm arasında tespit edilmiş ve rakamlar arasında istatistiki anlamda önem arz etmemiştir. Fakat lokasyon ve yıl interaksyonları bakımından %1 düzeyinde önemli bulunmuştur. Araştırmacılar bunun izahını, özellikle toprak tipi gibi çevresel faktörlerin etkilediğini ve burada önemli olan hususun da hasatta kök gövdesi kuyruğunun pancardan ayrılma derecesinin olduğunu ifade etmişlerdir. Kırşehir koşullarında bazı şeker pancarı çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, kuyruk uzunlukları 11,26-17,00 cm olarak tespit edilmiştir (Şahiner, 2020). Çalışmada kuyruk uzunluklarına ilişkin ölçülen değerler; Şahiner (2020)’nin sınırları içerisinde olurken, Yasaminshirazi ve ark. (2020)’nin sınırlarının üstünde saptanmıştır.

**Tablo 4.** Konya lokasyonunda bazı şeker pancarı çeşitlerinin tarımsal ve kalite özellikleri ortalamaları-1

Çeşitler	Kök-gövde uzunluğu (cm)	Kök-gövde çapı (cm)	Kuyruk uzunluğu (cm)	Kök-gövde verimi (kg/da)	Yaş yaprak verimi (kg/da)
Bernache	34,77 abc	11,74 ab	14,33 abc	6520,17 b	2738,34 bcde
Bison	<b>30,77 c</b>	11,25 abc	<b>12,61 c</b>	<b>7817,83 a</b>	<b>4575,62 a</b>
Dancia	32,59 ab	11,79 ab	<b>12,27 c</b>	6980,52 ab	3960,90 abc
Eider	31,94 bc	11,73 ab	13,34 bc	5679,01 bc	2774,35 bcde
Ernestina	31,46 bc	<b>12,03 a</b>	13,10 bc	6159,67 b	3504,80 abcd
Esperanza	33,29 abc	<b>12,04 a</b>	13,79 abc	5648,83 bc	2930,38 abcde
Libellule	34,49 abc	11,62 ab	16,16 ab	6559,67 b	3575,10 abcd
Mohican	<b>30,56 c</b>	11,50 ab	<b>11,20 c</b>	5707,13 bc	4418,73 ab
Rodeo	<b>30,49 c</b>	<b>10,15 c</b>	<b>11,54 c</b>	<b>4588,20 c</b>	<b>1533,78 e</b>
Sentinel	33,16 abc	10,75 bc	<b>12,44 c</b>	6131,14 b	2090,19 de
Serenada	33,50 abc	11,07 abc	<b>12,24 c</b>	6187,11 b	2973,25 abcde
Terranova	<b>37,00 a</b>	11,08 abc	<b>16,88 a</b>	6474,62 b	2680,04 cde
<b>Ortalama</b>	<b>32,84</b>	<b>11,40</b>	<b>13,32</b>	<b>6204,49</b>	<b>3146,29</b>

**Kök gövde verimi (kg/da):** Bloch ve Hoffmann (2005) tarafından yürütülen bir çalışmada; şeker pancarında kök-gövde verimini doğrudan etkileyen unsurlardan birkaçı hasat zamanı ve genotip olarak belirtilmiş ve kuraklık vb. abiyotik stres faktörlerinin de kök-gövde verimini kısıtladığı ifade edilmiştir. Bir diğer yapılan bir çalışmada ise, şeker pancarı çeşitlerinde kök-gövde verimi ve şeker konsantrasyonu arasında negatif korelasyon bulunduğu belirtilmiştir. Bu durum; şeker pancarında Z, E, N, GR, NZ vb. gibi farklı tiplere göre şeker pancarı çeşitlerinin sınıflandırılmasına yol açmıştır (Hoffmann, 2010). Şeker pancarında toprak yapısı, kök-gövde verimini etkileyen diğer sebeplerden birisidir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada; toprak yapısı tuzluluk faktöründen daha güçlü etki göstermiş, tın üzerindeki ortalama verim killiye göre yaklaşık %35 oranında düşük tespit edilmiştir. Araştırmacılar bunun izahını; tınlı toprakta daha fazla havalandırma, daha iyi gelişmiş kök-gövde sistemi, daha yüksek iletkenlik ve neticede bitkiye daha iyi su sağlanması gibi nedenlerden kaynaklanabileceği yönünde birçok öngörde bulunmuşlardır (Katerji ve ark., 1997). Bu çalışmadan elde edilen kök-gövde verimleri deneme ortalaması 6204,49 kg/da olarak kaydedilmiştir. En yüksek kök-gövde verimi 7817,83 kg/da ile NZ tipi olan Bison çeşidinde tespit edilirken, en düşük kök-gövde verimi 4588,20 kg/da ile NZ tipi olan Rodeo çeşidinde belirlenmiştir (Tablo 4). Farklı çevre koşullarında benzer araştırmalar yapılmış ve araştırma sonuçları değişkenlik göstermiştir. Kırşehir’de yürütülen bir çalışmada çeşitlerin kök-gövde verimleri 7074,00-10390,33 kg/da arasında saptanmıştır (Şahiner ve Demir, 2020). Şanlıurfa’da kışlık yetiştirilen pancar çeşitlerinde ise bu değerler 6376-10039 kg/da’dır (Erbil, 2021). Çatal ve Akınerdem (2013) tarafından aynı lokasyonda ve farklı çeşitler üzerinde yürütülen çalışmalarında ise, çeşitlerin kök-gövde verim değerleri 5295-7220 kg/da olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada kök-gövde verim değerleri ile ilgili elde edilen sonuçlar; Şahiner ve Demir (2020) ve Erbil (2021)’in alt sınırına yakın, Çatal ve Akınerdem (2013)’in bulguları ile paralel bulunmuştur.

**Yaş yaprak verimi (kg/da):** Çalışmada elde edilen yaş yaprak verimi deneme ortalaması 3146,29 kg/da olarak belirlenmiştir. En yüksek yaş yaprak verimi 4575,62 kg/da ile Bison çeşidinde saptanırken, en düşük yaş yaprak verimi 1533,78 kg/da ile Rodeo çeşidinde belirlenmiştir (Tablo 4). Yaş yaprak verimi ile ilgili yapılan araştırmalarda; Çatal ve Aknerdem (2013), 3480 kg/da-4961 kg/da, Rychcik ve Zawislak (2002), 3600-3700 kg/da olarak kaydettiklerini bildirmişlerdir. Araştırmacıların bu bulguları ile bu çalışmanın yaş yaprak verimleri ile ilgili veriler paralel olmuştur. Çalışmadaki yaş yaprak, kök-gövde ve polar şeker verimleri arasında en yüksek ve en düşük değerler aynı çeşitlerde saptanmıştır. Bu sonuç, yaprakların kök-gövde ve polar şeker verimleri üzerinde müspet bir etki yaptığı görülmektedir (Tablo 4 ve Tablo 5). Başka bir çalışmada, yaprak alanı ve biyokütlesinin kök-gövde verimi ile pozitif ve önemli bir korelasyona sahip olduğu, aynı zamanda yaprak sayısının fotosentezdeki doğrudan rolü sayesinde brüt şeker ile de pozitif ve önemli bir korelasyon tespit edildiği rapor edilmiştir (Hajimobin ve ark., 2011). Araştırmacıların bu yöndeki bulguları; bu çalışmada kök-gövde, yaş yaprak ve polar şeker verimleri arasındaki ilişkinin izahını destekler niteliktedir.

**Tablo 5.** Konya lokasyonunda bazı şeker pancarı çeşitlerinin tarımsal ve kalite özellikleri ortalamaları-2

Çeşitler	Bitki başına kök gövde ağırlığı (g)	Bitki başına yaş yaprak ağırlığı (g)	Kuru madde oranı (%)	Polar şeker oranı (%)	Polar şeker verimi (kg/da)
Bernache	717,26 abcd	194,98 bcd	<b>23,90 a</b>	<b>18,82 a</b>	1226,11 ab
Bison	686,91 bcd	262,71 abc	22,67 ab	17,77 ab	<b>1388,96 a</b>
Dancia	816,86 ab	305,21 abc	21,83 abc	17,06 bc	1190,86 ab
Eider	782,43 abc	233,38 abcd	21,40 bcd	16,69 bcd	951,16 c
Ernestina	649,01 bcd	233,32 abcd	<b>19,47 d</b>	<b>15,05 e</b>	926,19 cd
Esperanza	698,51 bcd	228,41 abcd	<b>19,47 d</b>	<b>15,05 e</b>	849,83 cd
Libellule	<b>893,36 a</b>	317,48 ab	23,03 ab	18,08 ab	1185,91 ab
Mohican	589,97 cd	<b>354,09 a</b>	21,30 bcd	16,61 bcde	943,90 c
Rodeo	<b>533,33 d</b>	<b>111,21 d</b>	20,10 cd	15,59 cde	<b>715,55 d</b>
Sentinel	705,94 abcd	171,87 cd	22,03 abc	17,23 abc	1056,74 bc
Serenada	801,32 ab	267,25 abc	<b>19,37 d</b>	<b>14,96 e</b>	924,94 cd
Terrenova	755,84 abc	195,86 bcd	23,13 ab	18,16 ab	1173,88 ab
<b>Ortalama</b>	<b>719,23</b>	<b>239,65</b>	<b>21,48</b>	<b>16,75</b>	<b>1044,50</b>

**Kök-gövde ağırlığı (g/bitki):** Çalışmada bitki başına kök-gövde ağırlığı en yüksek 893,36 g ile Libellule çeşidi (a) grubunda yer almaktayken, 533,33 g ile Rodeo çeşidi (d) grubunda sınıflandırılmaktadır. Deneme ortalaması 719,23 g'dır (Tablo 5). Eskişehir lokasyonunda şeker pancarı çeşitlerinin performanslarını değerlendirmek amacıyla yürütülen bir çalışmada, çeşitlerin bitki başına kök-gövde ağırlığı 925 g ile 1330 g olarak değişkenlik göstermiştir (Kulan ve ark., 2016). Bu çalışmadan elde edilen bitki başına kök-gövde ağırlıkları Kulan ve ark. (2016) yaptıkları çalışmaya yakın tespit edilmiştir.

**Yaş yaprak ağırlığı (g/bitki):** Çalışmada elde edilen yaş yaprak ağırlığının deneme ortalaması 239,65 g iken, en yüksek 354,09 g ile Mohican çeşidinde tespit edilirken en düşük 111,21 g ile Rodeo çeşidinde belirlenmiştir (Tablo 5). Doğu Anadolu koşullarında 19 farklı deneme arazisinde vejetasyon süresinin

şeker pancarındaki verim ve kalite özelliklerini belirlenmesi amacıyla yürütülen bir çalışmada, yaprak ağırlığı Eylül'den Ekim ayı ortasına geciktirildiğinde şeker pancarında yaprak ağırlığının 370 g'dan 320 g'a azalma gösterdiği bildirilmiştir. Diğer bir ifadeyle, Temmuz ayından Eylül ayı ortasına kadar yaş yaprak ağırlığının arttığı saptanmıştır (Çakmakçı ve Tıngır, 2001). İki farklı lokasyonda farklı hasat zamanlarının şeker pancarı çeşitlerinde verim ve kalite özelliklerini değerlendirilmek üzere başlatılan bir çalışmada da, en yüksek yaş yaprak ağırlığı deneme ortalaması 287,29 kg/da ile Şefaati lokasyonundan alınmıştır. Yaprak ağırlıkları 3. ve 4. hasat zamanlarında en yüksek değere ulaşırken, 4. hasat zamanına doğru değerler azalışa geçmiştir. Sonuç olarak, hasat zamanlarına göre en yüksek yaş yaprak ağırlığı 306,25 kg ile 2. hasat zamanında tespit edilmiştir (Cesur, 2023). Ekim ayından hasat edilen bu çalışmanın yaş yaprak ağırlıkları ile ilgili verileri, atıf verilen araştırmacıların aynı ayda kaydettikleri değerleri ile yakınlık göstermektedir.

**Kuru madde oranı (%):** Çalışmada kuru madde oranları ile ilgili deneme ortalaması %21,48 olarak tespit edilmiş olup en yüksek kuru madde oranı %23,90 ile Bernache çeşidinde (Z tipi), en düşük kuru madde oranı 19,37 ile Serenada (Z tipi), %19,47 ile Ernestina (N tipi) ve Esperanza (N tipi) çeşitlerinde belirlenmiştir (Tablo 5). Şeker pancarında kuru madde içeriği genel olarak %23-24 oranındadır ve kuru maddenin %75'i şeker, %20'si çözünmeyen hücre duvarı bileşikleri, %5'i çözünebilir şeker dışı bileşenleri oluşturmaktadır (Hoffmann, 2005). Bitkinin yeşil aksamı ne kadar erken gelişirse kök-gövde daha fazla fotosentetik ürünleri bünyesinde depolayacağı için bitkiden daha yüksek sakkaroz miktarı elde edilebileceği genel bir görüştür (Theurer, 1979). Muş ekolojik koşullarında bazı pancar çeşitlerinin kuru madde oranları en yüksek %23,4 ile MA4071 çeşidinde, en düşük %19,4 ile Bernache çeşidinde kaydedildiği bildirilmiştir. Aynı zamanda araştırmacılar, kuru maddeden şeker oranının hesaplandığını, diğer bir ifadeyle kuru madde arttıkça polar şeker oranının da artacağını genel bir bilgi olarak ifade etmişlerdir (Yağmur ve Yaşar, 2023). Çalışmada kuru madde oranlarıyla ilgili veriler; polar şeker oranı, kök gövde boyutu parametreleriyle nispeten paralel olarak dağılım göstermiş olup araştırmacıların bulgularını destekler niteliktedir. Ayrıca kuru madde birçok faktöre göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu faktörler; toprak tipi ve verimliliği (toprağın organik madde içeriği, pH değeri vb.), sıcaklık, gün uzunluğu süresi, yağış miktarı gibi iklimsel değişiklikler, azot gübrelemesi, sulama yöntemleri ve suyun planlanması gibi gübreleme ve bakım farklılıkları olarak sıralanabilmektedir (Milford ve ark., 1988; Sánchez-Sastre ve ark., 2018; Su ve ark., 2024). Özellikle Bernache çeşidinin ve diğer çeşitlerin farklı lokasyonlarda farklı kuru madde içeriğine sahip olmaları bu faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Polar şeker oranı (%):** Harland ve ark. (2006) ve McGinnis (1982) tarafından rapor edildiği şekliyle; şeker pancarındaki sakkaroz içeriği taze ağırlık olarak %16-20 arasında değişkenlik göstermektedir. Şeker pancarının işlenmesinden elde edilen ürünler yaş pancar posası ve melastır. Şeker pancarından elde edilen sakkaroz miktarı; hasat edilen pancarın ağırlığına, pancardaki sakkaroz yüzdesine ve çıkarılabilir olan sakkaroz oranına göre değişkenlik göstermektedir. Na<sup>+</sup> ve K<sup>+</sup> gibi katyonlar ve glisin, betain, glutamin gibi küçük amino azot bileşikleri şekerin kristalleşmesini engellediklerinden dolayı



çıkarılabilen sakkaroz miktarı %20'den daha düşük olmaktadır. Ayrıca şeker pancarının kökleri sakkaroz haricinde 1/3 oranında selüloz, hemiselüloz, pektin ve az miktarda lignin ihtiva etmektedir (Panella ve Kaffka, 2010). Şeker pancarından alınan şeker miktarı; birim alandan hasat edilen kök pancarın ağırlığına, pancarlardaki toplam şeker varlığına ve alınabilir olan şeker miktarına göre değişkenlik göstermektedir (Altunbay ve ark., 2016). Çalışmadaki polar şeker oranları değerlendirildiğinde; en yüksek değer %18,82 ile Bernache çeşidinde (Z tipi) belirlenirken, en düşük değerlerin %15,05 ile Ernestina (N tipi) ve Esperanza (N tipi) ve %14,96 ile Serenada (Z tipi) çeşitlerinde kaydedilmiş ve aynı grubu (e) temsil etmişlerdir (Tablo 5). Yasar ve Ekinci (2021) farklı lokasyonlarda polar şeker oranlarını değişken aralıklarda saptadıklarını bildirmişlerdir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre; ortalama polar şeker oranları %16,74 (Çorum), %15,48 (Eskişehir), %17,25 (Kırşehir), %16,72 (Konya) olarak bulunmuştur. Polar şeker oranının; lokasyon, iklim koşulları, çevresel faktörlere göre değişim gösterdiği bilinmekle birlikte, Yasar ve Ekinci (2021)'nin bulguları bu genel görüşle birlikte bizim çalışmadaki polar şeker oranlarını destekler niteliktedir.

**Polar şeker verimi (kg/da):** Bu çalışmadaki şeker verimlerine ilişkin verilerin deneme ortalaması 1044,50 kg/da olup, en yüksek değeri 1388,96 kg/da ile Bison çeşidinde (NZ tipi) hesaplanırken, en düşük değeri 715,55 kg/da ile Rodeo çeşidinde (NZ tipi) bulunmuştur (Tablo 5). Terry (1968) tarafından yürütülen bir çalışmada, şeker pancarının radyasyondan etkilenmediği fakat sıcaklığın etki ettiği bildirilmiştir. Saksılarda yetiştirilen aynı kuru madde oranına sahip bitkilerde 24°C'den uzaklaşıldıkça daha büyük kök-gövde, daha küçük yaprak yüzeyi tespit edilmiş olup bitkilerin 17°C'de de en fazla yaprak alanına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda toplam şeker miktarları her iki sıcaklıkta aynıyken, 17°C'de şeker konsantrasyonları en yüksek olarak kaydedilmiştir. Araştırma sonucunda, şeker pancarının kök-gövdesindeki şeker konsantrasyonunun kök boyutuna bağlı olduğu, sıcaklığın bitkilerin gelişme hızı ve şeklini etkilediği sonucuna varılmıştır. Katerji ve ark. (1997) tarafından yürütülen bir çalışmada, toprakta tuz konsantrasyonu arttıkça şeker veriminin azaldığı ve killi toprak yapısının şeker veriminde bir etkiye sebep olmadığı, aynı zamanda toprak tekstürü şeker verimi üzerinde sistematik bir etki gösterdiği rapor edilmiştir. Muş'ta yapılan bir çalışmada ise, çeşitlerin özellikleri arasındaki ikili ilişkilerin tespitinde şeker verimi ile biyolojik verim, polar şeker oranı arasında %1 seviyesinde önemli bulunduğu ifade edilmiştir (Yağmur ve Yaşar, 2023). Yasar ve Ekinci (2021)'nin farklı lokasyonlarda yürütmüş oldukları çalışmalarında, şeker verimlerini 1037-1442 kg/da aralığında tespit etmişlerdir. Araştırmacıların bulguları ve saptadıkları değişkenlikler açısından bu çalışmadaki ilgili parametreye ait değerler paralellik göstermektedir.

**Temel bileşen analizi:** Temel Bileşen Analizi (PCA) sonucunda temel bileşen (PC) eksenleri, özdeğerler, varyasyon ve kümülatif varyasyon oranları elde edilmiştir ve özelliklere dayalı olarak ana bileşenlerin ağırlık değerlerini gösteren faktör katsayıları Tablo 6'da detaylı olarak sunulmuştur. Analiz sonucunda incelenen 10 özelliğe ilgili olarak 3 bağımsız ana bileşen ekseni elde edilmiştir. İlk 3 temel bileşenin özdeğerleri 1,50 ile 4,92 arasında bulunmuştur. Birinci ana bileşen ekseni, toplam varyasyonun

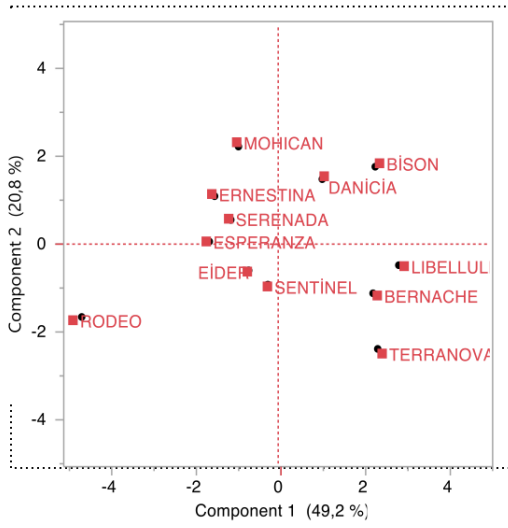
%49,22'sini açıklamaktadır. İkinci ve üçüncü ana bileşenler ise sırasıyla toplam varyasyonun %20,79 ve %15,01'ini kapsamaktadır (Tablo 6).

**Tablo 6.** Ana bileşen analizi sonucunda incelenen özelliklerin özdeğerleri, varyasyonları ve temel bileşen eksenleri

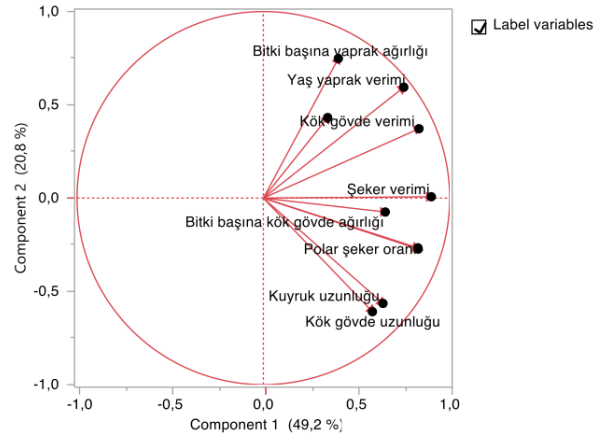
Özellikler	PC1	PC2	PC3
<b>Özdeğer</b>	4,92	2,08	1,50
<b>Varyasyon (%)</b>	49,22	20,79	15,01
<b>Kümülatif varyasyon (%)</b>	49,22	70,01	85,02
<b>Özellikler</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>
<b>Kök-gövde uzunluğu</b>	0,26	-0,42	0,32
<b>Kök-gövde çapı</b>	0,15	0,30	0,51
<b>Kuyruk uzunluğu</b>	0,29	-0,39	0,31
<b>Kök-gövde verimi</b>	0,38	0,25	-0,09
<b>Yaş yaprak verimi</b>	0,34	0,41	-0,17
<b>Bitki başına kök-gövde ağırlığı</b>	0,30	-0,05	0,45
<b>Bitki başına yaş yaprak ağırlığı</b>	0,18	0,52	0,21
<b>Kuru madde oranı</b>	0,38	-0,19	-0,31
<b>Polar şeker oranı</b>	0,37	-0,19	-0,32
<b>Polar şeker verimi</b>	0,41	0,01	-0,24

Tablo 6'da verilen değerler, ilk bileşenin verinin yaklaşık yarısını (%49,22), ikinci ve üçüncü bileşenlerin ise ek olarak %35,79'luk bir varyasyonu açıkladıklarını göstermektedir. Toplamda üç bileşen, verinin %85,02'sini açıklamaktadır, bu da temel bileşen analizi veri setindeki varyasyonun büyük bir kısmını açıkladığını belirtmektedir. Bu analiz sonucunda, PC1'in bitki verimi ile ilişkili ana bileşen olduğunu, PC2'nin yaprak verimi ile ve PC3'ün kök-gövde ile ilişkili olduğu söylenebilir. Temel bileşen analizi sonucunda ortaya çıkan bu bileşenler, incelenen özelliklerin temel değişkenlik kaynaklarını ve bu özellikler arasındaki ilişkileri anlamada önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu veriler, bitki yetiştiriciliği ve genetik araştırmalarda kullanılacak önemli bilgiler sunmakta ve özellikle verim ve kalite özelliklerini artırmak için bitki seleksiyonunda hangi özelliklerin öncelikli olarak ele alınması gerektiği konusunda yol gösterici olabileceği öngörülmektedir (Ringnér, 2008; Shlens, 2014).

Şekil 1'de gösterilen skor grafiği, genellikle temel bileşen analizi (PCA) veya benzer değişkenli analiz yöntemini görselleştirmek adına kullanılmakta olup, grafikteki iki ana bileşen (Component 1 ve Component 2) eksenlerinde verilerin dağılımını göstermektedir. Grafikteki her bir nokta, bir özelliği temsil etmekte ve eksenlerin kesiştiği noktalar genellikle ortalama değeri ifade etmektedir. Component 1 (x eksen) varyansı en çok açıklayan bileşen olup, Component 2 (y eksen) ise ikinci en fazla varyansı açıklayabilmektedir (Abdi ve Williams, 2010; Jolliffe ve Cadima, 2016).



Şekil 1. Skor grafiği



Şekil 2. Loading grafiği

Rodeo çeşidi bu bileşenler üzerinde ortalamadan daha düşük değerde kaydedilirken; Mohican, Ernestina, Bison, Danicia çeşitleri ise ortalamaya yakın değerlerde saptanmıştır. Terranova çeşidinin daha yüksek bir varyans gösterdiği Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil 2’de belirtilen loading plot PCA’daki incelenen özellikleri görsel olarak göstermekte olup Component 1 (en fazla varyansı açıklayan eksen) ve Component 2 (ikinci en fazla varyansı açıklayan bileşen) üzerindeki yüklerin büyüklüğü ilgili değişkenlerin bu bileşene ne kadar katkıda bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca aynı yöne bakan vektörler birbirleri ile pozitif korelasyon gösterirken, zıt yöne bakan vektörler negatif korelasyon olarak tanımlanmaktadır. Birbirleriyle dik açı yapan vektörler de birbirleri ile ilişkisi yok veya çok zayıf ilişkisi var olarak ifade edilmektedir (Abdi ve Williams, 2010; Jolliffe ve Cadima, 2016). Bu temel bilgiler göz önünde bulundurulduğunda Şekil 2’ye göre; bitki başına yaprak ağırlığı ve yaş yaprak verimi parametreleri birbirleri ile pozitif korelasyona sahip olduğu; kök-gövde verimi, şeker verimi ve polar şeker oranı arasında yüksek pozitif korelasyon tespit edildiği; diğer yandan kuyruk uzunluğu ile kök-gövde uzunluğunun negatif bir korelasyon gösterdikleri şeklinde izah edilebilir. Loading grafiği; değişkenlerin ana bileşenlerle ve birbirleriyle olan ilişkilerini anlamamızı sağlamaktadır. Değişkenlerin birbirleriyle olan pozitif veya negatif korelasyonlarını ve ana bileşenlerdeki katkılarını belirlemek, verinin yapısını ve temel özelliklerini anlamada kritik bir rol oynamakla birlikte bu grafikte görüldüğü gibi, bazı değişkenler birbirleriyle yüksek oranda ilişkili ve bu ilişkiler, PCA ile daha anlaşılır hale getirilmiştir.



**Şekil 3.** Denemeye ait görüntü

#### **4. Sonuç**

İklim faktörü; şeker pancarı için en önemli sınırlayıcı faktörlerdendir. Bu çalışma ile Konya ili ve benzer ekolojilere sahip lokasyonlar için uygun şeker pancarı çeşitlerinin tespiti büyük önem arz etmektedir. Farklı tipteki şeker pancarı çeşitleri arasında; en yüksek kök-gövde ağırlığı 893,36 g/bitki ile Libellule çeşidi (NZ), en yüksek kök-gövde verimi ise 7817,83 kg/da ile Bison çeşidinde (NZ) tespit edilmiştir. En yüksek polar şeker oranı Bernache (Z) çeşidinde %18,82 ve polar şeker verimi ise Bison çeşidinde (NZ) 1388,96 kg/da olarak hesaplanmıştır. Araştırma sonucunda Konya ve benzer ekolojilere sahip lokasyonlarda kök-gövde ve polar şeker verimi açısından Bison; kuru madde ve polar şeker oranı açısından ise Bernache çeşitleri ön plana çıkmaktadır. Tek yıllık olan bu çalışmadaki veriler, belli bir bilgi eksikliğine kaynak teşkil etmesinin yanında iki ve daha fazla yıl sürdürülen tarla çalışmalarıyla daha nihai sonuçların elde edilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca ülkemizde yerli çeşitler olmamasına rağmen, tohumluk ve yetiştiricilik sektörlerinde deneyimli insan gücümüz varlığı düşünüldüğünde yerli ıslah hatlarımızın iyi bir konuma gelmesi için agronomik çalışmalar büyük önem arz etmektedir. Türkiye şeker pancarı tohum üretiminde öncü ülkeler arasında olup yapılan bu çalışma sonuçlarına göre tavsiye edilen çeşit ya da çeşitlerin tespiti ile bundan sonra araştırma yapacak araştırmacılara, bölge üreticilerine ve çeşit geliştirme aşamasında olan bitki ıslahçılara da yön verecektir.

#### **Teşekkür**

Bu çalışmada denemeye tabii tutulan çeşitlerin kuru madde ve polar şeker oranlarının tespit edilmesinde Konya Şeker Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'ne teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

## Kaynakça

- Abdi H., Williams LJ. Principal component analysis. Wiley interdisciplinary reviews: Computational Statistics 2010; 2(4): 433-459.
- Akınerdem F. Nişasta şeker bitkileri ders notları. Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü Lisans Ders Notları (Basılmamış) 2016; 1-57.
- Altunbay SG., Kangal A., Gürel S. Şeker pancarından biyoetanol üretimi. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi 2016; 25(özel sayı-2): 334-339.
- Anonim. Şeker Pancarının Tarımı 2024; <https://konyaseker.com.tr/tr/icerik/detay/2250/seker-pancarinin-tarimi> (Erişim Tarihi: 12.05.2024).
- Bloch D., Hoffmann C. Seasonal development of genotypic differences in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and their interaction with water supply. Journal of Agronomy and Crop Science 2005; 191(4): 263-272.
- Cesur C. Farklı lokasyonlarda yetiştirilen şeker pancarı bitkisinin (*Beta vulgaris* L.) bazı morfolojik ve teknolojik karakterlerinin hasat zamanlarına göre değişiminin incelenmesi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi 2023; 5(2): 85-103.
- Çakmakçı R., Tıngır N. Vejetasyon periyodu uzunluğunun şeker pancarının gelişim, verim ve kalitesi üzerine etkisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2001; 32(1): 41-49.
- Çatal Mİ., Akınerdem F. Determination of yield and quality properties of some sugar beet varieties in conditions of Konya. Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences 2013; 27(2): 112-120.
- Çelikel B. Şeker pancarı çeşitlerinde verim ve verim unsurları üzerinde bir araştırma. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:42, Edirne, Türkiye, 1989.
- Erbil E. Şanlıurfa koşullarında kışlık olarak yetiştirilen bazı şeker pancarı (*Beta vulgaris saccharifera* L.) çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. Ziraat Mühendisliği 2021; 371: 41-50.
- Eştürk Ö. Türkiye’de şeker sektörünün önemi ve geleceği üzerine bir değerlendirme. Anadolu İktisat ve İşletme Dergisi 2018; 2(1): 67-81.
- Fitters TFJ., Bussell JS., Mooney SJ., Sparkes DL. Assessing water uptake in sugar beet (*Beta vulgaris*) under different watering regimes. Environmental and Experimental Botany 2017; 144: 61-67.
- Fitters TFJ., Mooney SJ., Sparkes DL. Impact of water availability on root growth of sugar beet varieties. Soil Use and Management 2022; 38(1): 1033-1043.

- Güneş Z., Kırtıl HE., Küçükata YŞ. Toprak B. Şeker pancarı ve yan ürünlerinden biyoyakıt (etanol) üretimi ve biyoetanolün endüstriyel kullanımının değerlendirilmesi. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2020; 2(2): 16-24.
- Hajimobin S., Rajabi A., Nasri M. Study on relationships of morphological traits with growth indices in monogerm cultivars of sugar beet. Plant Ecophysiology 2011; 3: 29-36.
- Harland JI., Jones CK., Hufford C. In Sugar Beet; Draycott, A. P., Ed.; Blackwell Publishing, Ltd.: Oxford, U.K., 2006; 443–463.
- Hoffmann CM. Changes in N composition of sugar beet varieties in response to increasing N supply. Journal of Agronomy and Crop Science 2005; 191(2): 138-145.
- Hoffmann CM. Changes in root morphology with yield level of sugar beet. Sugar Industry 2017; 142(7): 420-425.
- Hoffmann CM. Root quality of sugarbeet. Sugar Tech 2010; 12(3-4): 276-287.
- Jolliffe IT., Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 2016; 374(2065): 20150202.
- Kanat Z. Ürün raporu şeker pancarı ve şeker 2023. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, 2023; TEPGE Yayın No: 388.
- Katerji N., van Hoorn JW., Hamdy A., Mastroilli M., Karzel EM. Osmotic adjustment of sugar beets in response to soil salinity and its influence on stomatal conductance, growth and yield. Agricultural Water Management 1997; 34(1): 57-69.
- Kavas MF., Leblebici MJ. Kalite ve işletme kontrol laboratuvarları el kitabı, Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. Genel Müdürlüğü 2004; Ankara, 85-196.
- Kısaoglu N. Yeni üretim izni verilmiş şeker pancarı çeşitlerinin önemli zirai karakterleri üzerine araştırmalar. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:49, Ankara, Türkiye, 1987.
- Kulan EG., Kaya MD., Karaş E. Bazı şeker pancarı çeşitlerinin Eskişehir koşullarındaki performansları. Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi 2016; 25(özel sayı-2): 67-70.
- McGinnis RA. In Beet Sugar Technology; McGinnis, R. A., Ed.; Beet Sugar Development Foundation: Fort Collins, CO, 1982.
- Milford GFJ., Travis KZ., Pocock TO. Jaggard KW., Day W. Growth and dry-matter partitioning in sugar beet. The Journal of Agricultural Science 1988; 110(2): 301-308.
- Panella L., Kaffka SR. Sugar beet (*Beta vulgaris* L) as a biofuel feedstock in the United States. In Sustainability of the Sugar and Sugar-Ethanol Industries, American Chemical Society Symposium Series 2010; 163-175.
- Ringnér M. What is principal component analysis? Nature Biotechnology 2008; 26(3): 303-304.
- Rychcik B., Zawislak K. Yields and root technological quality of sugar beet grown in crop rotation and long-term monoculture. Rostlinná Výroba 2002; 48(10): 458-462.

- Sanaie Niri F., Sofalian O., Farzaneh S., Asghari A., Raeisi Sadati SY., Rajabi A. Evaluation quantitative and qualitative yield of some new sugar beet hybrids in Nir climatic conditions. *Plant Productions* 2024; 47(1): 85-100.
- Sánchez-Sastre LF., Martín-Ramos P., Navas-Gracia LM., Hernández-Navarro S., Martín-Gil J. Impact of climatic variables on carbon content in sugar beet root. *Agronomy* 2018; 8(8): 147.
- Shlens J. A tutorial on principal component analysis. arXiv 2014; arXiv:1404.1100.
- Su J., Zhou H., Wang K., Fan H., Hou Z. Effects of nitrogen fertilizer management on dry matter accumulation and yield of drip-irrigated sugar beet in arid areas. *Agronomy* 2024; 14(5): 1010.
- Şahiner A. Kırşehir ekolojik koşullarında bazı şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.) çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:57, Kırşehir, Türkiye, 2020.
- Şahiner A., Demir İ. Kırşehir ekolojik koşullarında bazı şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.) çeşitlerinin verim ve kalite özelliklerinin belirlenmesi. *Manas Journal of Agriculture Veterinary and Life Sciences* 2020; 10(2): 71-75.
- Terry N. Developmental physiology of sugar beet: I. the influence of light and temperature on growth. *Journal of Experimental Botany* 1968; 19(4): 795-811.
- Theurer JC. Growth patterns in sugar beet production. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists* 1979; 20(4): 343-367.
- Tsialtas JT., Maslaris N. Sugar beet root shape and its relation with yield and quality. *Sugar Tech* 2010; 12(1), 47-52.
- TÜİK. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr> 2024. (Erişim Tarihi: 02.05.2024)
- Yağmur H., Yaşar M. Investigation of yield and quality parameters of some sugar beet varieties in Muş ecological conditions. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences* 2023; 7(2): 436-447.
- Yasaminshirazi K., Hartung J., Groenen R., Heinze T., Fleck M., Zikeli S., Graeff-Hoenninger S. Agronomic performance of different open-pollinated beetroot genotypes grown under organic farming conditions. *Agronomy* 2020; 10(6): 812.
- Yasar M., Ekinci R. Stability analysis of sugar beet genotypes in terms of yield and sugar ratios (*Beta vulgaris* Var. *saccharifera* L.). *World Journal of Biology and Biotechnology* 2021; 6(1): 11-16.



## Muş Lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker)'nde Soğan ve Bitki Gelişimi Üzerine Seleksiyon İslahı Çalışmaları

Ahmet YENİKALAYCI<sup>1\*</sup>, Nazlı AYBAR YALINKILIÇ<sup>2</sup>, Ali BAYRAM<sup>3</sup>, Yaşar KARADAĞ<sup>4</sup>, Mahir ÖZKURT<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Muş Alparslan Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Bitkisel Üretim ve Teknolojileri Bölümü, 49250, Muş

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4955-5723>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7462-775X>

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4562-2861>

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0523-9470>

<sup>5</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0058-3026>

\*Sorumlu yazar: a.yenikalayci@alparslan.edu.tr

### Araştırma Makalesi

### ÖZ

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 30.05.2024

Kabul tarihi: 10.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

*Tulipa sintenisii*

Soğan ağırlığı

Soğan çapı

Soğan gelişimi

Yavru soğan sayısı

Bu çalışma; Muş Alparslan Üniversitesi Muş Lalesi Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü tarafından Muş lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker)'nde soğan ve bitki gelişimi özelliklerini seleksiyon ıslahı yolu ile iyileştirmek amacıyla 2020-2023 yılları arasında üç yıl süre ile yürütülmüştür. Araştırma sonuçlarına göre; Muş Lalesi genotiplerinde bitki boyu değerleri 9-34 cm, yaprak sayısı 2-8 adet/bitki, toplam soğan ağırlığı 6,10-47,37 g, ana soğan ağırlığı 1,40-46,79 g, toplam soğan sayısı 1-5 adet/bitki, ana soğan çapı 9,30-45,13 mm, ana soğan boyu 10,42-52,55 mm arasında bulunmuştur. Kullanılan soğanın ağırlığı ve büyüklüğü bir sonraki yıl elde edilecek bitkide soğan ve bitki gelişimini olumlu yönde etkilemiştir. Muş lalesi diğer lale türlerinden farklı olarak genelde bir ana soğandan 1 yavru soğan vermektedir, seleksiyon ıslahı çalışmaları ile yavru soğan verme potansiyeli 4-5 sayıya kadar çıkarılabilmektedir. Sonuç olarak, elde edilen veriler Muş Lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker)'nin diğer lale türleri gibi ticari olarak üretilmesine katkı sağlayacaktır.

## Selection Breeding Studies on The Bulb and Plant Development of The Mus Tulip (*Tulipa Sintenisii* Baker)

### Research Article

### ABSTRACT

#### Article History:

Received: 30.05.2024

Accepted: 10.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

*Tulipa sintenisii*

Bulb weight

Bulb diameter

Bulb development

Number of juvenile bulbs

This study was conducted by Muş Alparslan University Muş Tulip Application and Research Center Directorate for three years between 2020-2023 to improve the bulb and plant growth characteristics of Muş tulip (*Tulipa sintenisii* Baker) through selection breeding. According to the results of the research, plant height values of Muş Tulip genotypes were found between 9-34 cm, number of leaves 2-8 pieces/plant, total bulb weight 6,1-47,37 g, main bulb weight 1,4-46,79 g, total number of bulbs 1-5 pieces/plant, main bulb diameter 9,3-45,13 mm, main bulb length 10,42-52,55 mm. The weight and size of the bulb used had a positive effect on the growth of the bulb and the plants the following year. In contrast to other tulip species, the Muş tulip usually produces 1 young bulb from a mother bulb, but with the help of selection breeding studies, the potential to produce young bulbs could be increased up to 4-5. As a result, the data obtained will contribute to the commercial production of Mus Tulip (*Tulipa sintenisii* Baker) like other tulip species.

**To Cite:** Yenikalaycı A., Yalınkılıç NA., Bayram A., Karadağ Y., Özkurt M. Muş Lalesi (*Tulipa Sintenisii* Baker)'nde Soğan ve Bitki Gelişimi Üzerine Seleksiyon İslahı Çalışmaları. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 17-30.

## 1. Giriş

Lalenin gen merkezlerinden biri olan ülkemiz, doğal vejetasyonda kendiliğinden yetişen birçok lale türüne (*Tulipa* spp.) ev sahipliği yapmaktadır. Bu türlerden biri de endemik bir tür olan Muş lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker)'dir. Muş Lalesi'nin yayılış alanları, Muş ili başta olmak üzere; Erzurum, Gaziantep, Ağrı, Hakkari ve Siirt illeridir. En geniş popülasyon alanı olan Muş ovasında bahar mevsiminin gelmesiyle birlikte çiçeklenen laleler yaklaşık 15-20 günlük bir çiçeklenme periyoduna sahiptir (Yenikalaycı ve ark., 2023).

Çeşitli renklere sahip olan laleler ekonomik açıdan en önemli süs bitkileri arasında olup kesme çiçek, saksı bitkisi veya peyzaj alanlarının düzenlenmesinde kullanılmaktadır (Xing ve ark., 2017). Yapılan seleksiyon ve melezleme ıslahı çalışmaları ile süs bitkisi olarak kullanılabilen binlerce lale çeşidi geliştirilmiştir (Bermejo ve Sanchez, 2009; Kiani ve ark., 2012).

Lale dünyada en fazla üretilen ve ticareti yapılan kesme çiçek grubunda yer alır ve tohumla üretimi uzun zaman ve emek gerektirdiği için genellikle vejetatif olarak üretilmektedir. Lalede çiçeklenme aşamasının bitiminden yaprakların tamamen kurumasıyla birlikte soğanlarda fizyolojik olgunlaşma süreçleri başlamaktadır (İzgi Saraç ve ark., 2021). Fizyolojik olgunluk sürecinde lale soğanlarının içyapısında yaprak taslakları, dişi ve erkek organ taslağının oluşumları gerçekleşmektedir. 'G' gelişim aşaması olarak da bilinen lalenin fizyolojik oluşum aşamasının tamamlanması lale soğanlarının çiçeklenmesi için mutlak gerekli süreçlerdendir (De Hertogh ve Le Nard, 1993; Gürsan, 1996).

Türkiye'de 2023 yılı verilerine göre 47.150 dekar alanda 4.485.000 adet lale soğanı üretilmiştir (Anonim, 2024).

Dünyada tıbbi ve aromatik bitkilere ait çeşitlerin büyük çoğunluğu (% 70-80) popülasyonlardan, yerel çeşitlerden veya introdüksiyon materyallerinden teksel, klon yada toplu seleksiyonu gibi basit seleksiyon yöntemleriyle elde edilmiştir. Türkiye'de tescil edilmiş çeşitlerin çoğunluğunun bu metotlarla geliştirildiği değişik araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Arslan ve ark., 2010; Baydar ve Telci, 2015). Soğanlı bitkilerde tohumla çoğaltmada elde edilen genotiplerin heterozigot yapıya sahip olmaları, soğanların çiçek verecek büyüklüğe ulaşması için çok uzun zaman (3-6 yıl) gerekmesi ve tohumlarda dormansi bulunması nedeni ile daha çok vejetatif üretim yöntemi tercih edilmektedir (Alp, 2006).

Soğanlı bitkilerde çiçek büyüklüğü ve kalitesi direk olarak soğanın büyüklüğü ve ağırlığı ile ilgilidir (Baytop, 1997). Bu yönden soğan iriliği çok önemlidir. Soğanların iriliği; yetiştirilen toprağın verimliliği, yapılan gübreleme, sulama, yabancı ot kontrolü ve hastalıklarla etkili bir mücadele ile sağlanır. Bitkinin yaprakları koparırsa fotosentez olumsuz etkileneceği için soğanlar iyi gelişemeyeceği gibi, toprak altında henüz olgunlaşmadan sökülen soğanlar da yeterli büyüklüğe ulaşamaz. Soğanın büyüklüğüne yetiştirildiği iklim koşulları da etki etmektedir. Yüksek sıcak ve kurak bölgelerde soğanların gelişimi olumsuz etkilenirken, orta derecede serin yazlara sahip yörelerde

vegetasyon dönemini uzar ve bu durum soğan büyümesini teşvik ederek daha iri soğanların elde edilmesini sağlar. Lale üretiminde dikimi yapılan ana soğan büyüme sezonu içerisinde parçalanır ve bu ana soğandan yeni soğan ve soğancıklar oluşur. Bunlardan en büyüğü genellikle bir sonraki sezon çiçek verebilir. Ancak küçük olanların birkaç yıl daha büyümeleri gereklidir (Ürgeç, 1998).

Lale ıslahında, seleksiyon çalışmaları popülasyonun yapısının irdelenmesi açısından önemli faktörlerdendir. Seleksiyon ıslahı yoluyla ele alınan popülasyonun gen frekansı zamanla değiştiği için incelenen özellikler açısından üstün bireyler seçilerek çoğaltılabilmektedir (Balkaya ve ark., 2011). Lalenin seleksiyon çalışmalarında erken çiçek açmasının yanında soğan gelişiminin iyi olması, bitki boyu, yaprakların dizilimi ve sayısı, çiçeklerin vazo ömrü ve görünümü, çiçek sapının sağlamlığı ve kalınlığı gibi özellikler göz önünde bulundurulmaktadır. Lalede ıslah sürecinin kısaltılmasına yönelik bir çok çalışma yapılmıştır (Kuijpers ve ark., 1997; Ghaffoor ve ark., 2004).

*T.sintensis* türünün kardeş soğan verme kapasitesinin diğer lale türlerine göre çok düşük olduğu ve bu türün bitki boyunun 23,2-25,5 cm, çiçek uzunluğunun 4,06-4,61 cm, çiçek genişliğinin 2,52- 2,98 cm, soğan çevre genişliğinin 3,99-5,04 cm ve soğan ağırlığının 4,95-6,98 g arasında olduğu bildirilmiştir (Kızıl ve Sesiz, 2016).

Pakistan'da 10 ekzotik lale çeşidi ile yapılan çalışmada en uzun bitki boyu (32,5 cm) White Dream çeşidinde, en yüksek çiçek çapı (8,3 cm) ve soğan ağırlığı (16,3 g) Orange Angeliq çeşidinde, en yüksek bitki başına yaprak sayısı ve bitki başına soğan sayısı değerleri ise Don Quichotte ve Strong Gold çeşitlerinde sırasıyla 8,1-7,3 adet/bitki ve 6,3-5,3 adet/bitki olarak bildirilmiştir (Ali ve ark., 2015). *Tulipa gesneriana* türüne ait Queen of Night ve Negrita lale çeşitlerinde yapılan çalışmada; ana soğan çapı sırası ile 2,5-3 cm ve 3-3,5 cm, ana soğan boyu 3-4 cm ve 3-3,5 cm, ana soğan ağırlığı 10-15 g ve 13-16 g, kardeş soğan sayısı 2-4 ve 2-5 adet olduğu bildirilmiştir (Başkent, 2008). Ege Bölgesi'nde *T. gesneriana* türüne ait 20 değişik ticari lale türünde yapılan çalışmada çiçekte kalma süreleri 10-29 gün, bitki boyları 22,4 cm-61,3 cm, soğan verimi 2-5 adet/bitki aralığında belirtilmiştir (Salman ve ark., 2016).

Muş Alparslan Üniversitesi Muş Lalesi Uygulama ve Araştırma Merkez Müdürlüğü'nde 2019-2020 yılları yetiştirme sezonunda üç farklı lokasyondan toplanan lale soğanları ile yürütülen çalışmada ilk yıl sonuçlarına göre elde edilen değerler bitki boyunda 4-40 cm, yaprak sayısında 1-6 adet/bitki, toplam soğan ağırlığında 1,3-85,9 g/bitki, ana soğan ağırlığında 1,3-74,8 g/bitki, soğan sayısında (ana soğan dahil) 1-3 adet/bitki, ana soğan çapında 8,84-51,79 mm ve ana soğan boyunda 21,63-77,47 mm arasında saptanmıştır. Lokasyonlara göre en iyi sonuçlar Muş Alparslan Üniversitesi kampüs alanından alınan lale soğanları genotiplerinden elde edilmiştir, bunu Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi lokasyonundan elde edilen genotipler izlemiştir (Yenikalaycı ve ark., 2021).

Bu araştırma Muş ilinde yaygın olarak bulunan ancak son yıllarda doğa tahribatı, şehirleşme ve tarıma açılan yeni alanlar gibi nedenler ile giderek popülasyon yoğunluğu azalan Muş Lalesi'nin kültüre alınması, seleksiyon ıslahı ile bazı tarımsal özelliklerinin iyileştirilmesi, geliştirilmesi, koruma altına alınması ve ticari olarak yetiştirilebilmesi amacı ile yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Araştırmada kullanılan Muş Lale soğanları 2019 yılında Muş Alparslan Üniversitesi kampüs alanından 63 adet ve Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi arazisinden alınan 194 olmak üzere toplamda iki lokasyondan 257 adet soğan kullanılmıştır. Araştırma Muş Alparslan Üniversitesi tarafından güdümlü proje olarak desteklenen “Muş Lalesinde Seleksiyon İslahı İle Çeşit Geliştirilmesi Projesi” nin 2020-2023 yılları arasındaki 3 yıllık tarla çalışmalarını kapsamaktadır. Projede ilk yıl doğadan toplanarak 2019 sonbaharında dikilen ve 2020 yılı yaz döneminde hasat edilen soğanlardan 21 g üzerinde ağırlığa sahip olanlardan seçilen 61 adet Muş lale soğanları çalışmamızın ana materyalini oluşturmuştur. Seçilen 61 adet soğanın 36 tanesi Muş Alparslan Üniversitesi kampüs alanından, 25 tanesi de Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi arazisinden alınan ve üretilen soğanlardan oluşmuştur. Muş Lalesi seleksiyon ıslahı tarla çalışmalarından bir görüntü Şekil 1’de verilmiştir. Denemeden elde edilen veriler tesadüf parselleri deneme desenine göre JMP istatistik programı kullanılarak varyans analizi uygulanmış, ortamlar arasındaki farklılıklar ise LSD çoklu karşılaştırma testi ile belirlenmiştir.



Şekil 1. Muş Lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker) seleksiyon ıslahı tarla çalışmalarından bir görüntü.

### Muş Lalesi'nin Bitkisel Özellikleri

Muş Lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker)'in bitki boyu 10-30 cm arasında uzunluğa sahip, yaprakları 4-5 adet, tüysüz mat yeşil, kanallı, çoğunlukla dalgalıdır. Yumurtalık kısmı dikdörtgen mızrak şeklinde, 2-6 cm civarındadır. Çiçekler kırmızı-turuncu, soluk veya donuk, turuncu ya da pembemsidir, Genelde 1100-2440 m. yüksekliğe sahip tarım yapılan arazilerde bulunmaktadır (Davis, 1988). Muş Lalesinin soğanı ve bitkisinin genel görünüşü Şekil 2’de verilmiştir.

Araştırma Muş Lalesi Araştırma Merkezi Müdürlüğü uygulama arazisinde yürütülmüştür. İlk yıl Muş lalesi soğanlarının dikimi 11 Kasım 2020 tarihinde, hasadı 03 Haziran 2021 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Birinci yılın sonunda 61 lale soğanından 107 adet lale soğanı elde edilmiştir ve bu



soğanların dikimi 14 Ekim 2021 tarihinde hasatları ise 22 Temmuz 2022 tarihinde yapılmıştır. Projede asıl amaç; Muş Lalesi'nin seri üretimi ve ticarileştirilmesi olduğu için 2022 yılında Lale soğanları kardeş soğan verme özelliklerine göre sınıflandırılarak dikimleri yapılmıştır. Bu nedenle 2022 yılında çok kardeş veren soğanların hepsi ve tek kardeş veren soğanlardan ağırlığı fazla olanların seçimi ile toplamda 70 adet Muş lale soğanlarının (4 yavru soğan veren 7), (3 yavru soğan veren 12), (2 yavru soğan veren 24) ve (1 yavru soğan veren 18) dikimi 12 Ekim 2022 tarihinde yapılmıştır. 2023 yılı hasatları 06 Temmuz 2023 tarihinde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.** Muş Lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker) soğanı ve bitkisinin genel görünüşü.

Çalışmada Muş lale soğanları 25cm x 80 cm sıklığında ve 15 cm derinliğinde dikilmiştir. Deneme alanına saf 5 kg/da azot ve fosfor gelecek şekilde dikim öncesi 20-20-0 kompoze gübre uygulanmıştır. Her yıl hasat edilen soğanlar yaz döneminde 2 ay +8 °C'de soğuk hava deposunda muhafaza edilmiştir. Çiçeklenme dönemi sonunda soğan gelişimini artırmak için çiçekler koparılmıştır.

Projede denemelerin yürütüldüğü Muş Alparslan Üniversitesi Muş Lalesi Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü Uygulama Arazisinin toprak analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Muş Alparslan Üniversitesi Muş Lalesi Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü Uygulama Arazisi

Toprak Analiz Sonucu

Derinlik (cm)	Bünye Sınıfı	Suyla Doymun Toprakta EC(dSm <sup>-1</sup> )	Suyla Doymun Toprakta pH	Kireç (%)	Organik Madde (%)	Alınabilir Fosfor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (kg da <sup>-1</sup> )
0-30	Killi-tınlı	0,61	6,61	-	2,21	2,20

Muş Alparslan Üniversitesi Muş Lalesi Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürlüğü Uygulama Arazisi toprağı killi-tınlı yapıda olup organik madde içeriğı %2,21, pH değeri ise 6,61'dir. Sert karasal iklimin hüküm sürdüğü Muş ilinde yıllık yağış miktarı 1000 ile 350 mm arasında değişmekte ilde kış mevsimi soğuk ve uzun geçerken, yaz ayları ise sıcak ve kurak geçmektedir.

Araştırmada bitki boyu (cm), bitkide yaprak sayısı (adet/bitki), toplam soğan ağırlığı (g/bitki), ana soğan ağırlığı (g/bitki), soğan sayısı (ana soğan dahil hasat edilen soğan) (adet/bitki), ana soğan çapı (mm), ana soğan boyu (mm) özellikleri incelenmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Araştırmada 2020 yılında dikilen 61 adet Muş lale soğanından 2021 yılında toplamda 107 adet lale soğanı hasat edilmiştir. Hasat edilen tüm lale soğanları ayırım yapılmaksızın 2021 yılı sonbaharında dikilmiştir.

Araştırmada incelenen özelliklere ilişkin veriler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** 2021-2022 Yıllarında Muş Lalesinde İncelenen Özelliklere İlişkin Veriler

İncelenen Özellikler	2021 yılı					
	En Yüksek Değer		En Düşük Değer		Ortalama	
	M	T	M	T	M	T
Bitki Boyu (cm)	33,06	34,23	9,89	11,24	25,55	24,39
Yaprak Sayısı (adet/bitki)	8,00	7,00	2,00	3,00	4,98	4,86
Toplam Soğan Ağırlığı (g/bitki)	47,08	44,25	16,33	12,25	38,18	34,83
Ana Soğan Ağırlığı (g/bitki)	45,49	37,09	9,03	7,82	24,72	19,36
Toplam Soğan Sayısı (adet/bitki)	5,00	5,00	1,00	1,00	2,58	2,86
Ana Soğan Çapı (mm)	44,13	45,13	22,78	23,28	39,82	33,60
Ana Soğan Boyu (mm)	51,79	52,55	30,56	32,51	37,93	38,56
İncelenen Özellikler	2022 yılı					
	En Yüksek Değer		En Düşük Değer		Ortalama	
	M	T	M	T	M	T
Bitki Boyu (cm)	33,58	33,45	9,00	17,36	21,29	18,92
Yaprak Sayısı (adet/bitki)	8,00	5,00	3,00	3,00	4,37	4,14
Toplam Soğan Ağırlığı (g/bitki)	47,37	41,4	11,58	6,10	28,87	23,77
Ana Soğan Ağırlığı (g/bitki)	46,79	23,70	6,72	1,40	21,41	15,26
Toplam Soğan Sayısı (adet/bitki)	5,00	4,00	1,00	1,00	2,18	1,64
Ana Soğan Çapı (mm)	44,03	32,33	22,46	9,30	29,48	28,45
Ana Soğan Boyu (mm)	50,69	47,97	26,95	10,42	34,26	32,89

Lokasyonlar: M: Muş Alparslan Üniversitesi Kampüs Alanı, T: Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi Arazisi

Araştırmada 2022 yılında hasat edilen soğanlardan yavru soğan verme özelliğine göre seçilen 70 adet Muş lale soğanlarının dikimi 2022 sonbaharında yapılmıştır. Muş Lale soğanları 2023 yılında lokasyonlarda kardeş soğan verme özelliklerine göre değerlendirilmiştir. İstatistiki analiz lokasyonlarda bağımsız olarak kardeş soğan sayılarına göre yapılmıştır (Tablo 3).

**Tablo 3.** 2023 Yılında Muş Lalesinde Lokasyon ve Kardeş Soğan Sayısına Göre İncelenen Özelliklere İlişkin Veriler

İncelenen Özellikler	2023 yılı								*:LSD %5	
	1 Kardeş		2 Kardeş		3 Kardeş		4 Kardeş		M	T
	M	T	M	T	M	T	M	T		
Bitki Boyu (cm)	22,85 a	26,44 a	22,22 ab	23,16 b	20,33 b	18,22 a	16,33 c	14,77 a	4,08*	3,05*
Yaprak Sayısı (adet/bitki)	4,22	3,42	3,89	3,44	3,76	3,88	3,75	2,22	Ö.D.	Ö.D.
Toplam Soğan Ağ. (g/bitki)	36,66 a	27,33 a	26,79 b	19,55 b	26,76 b	18,55 b	25,53 b	16,68 b	5,47*	4,04*
Ana Soğan Ağ. (g/bitki)	31,66 a	20,22 a	23,66 b	17,33 b	23,46 b	14,11 ab	22,57 b	13,11 b	3,54*	3,21*
Toplam Soğan Sayısı (adet/bitki)	2,00	1,44ab	2,19	1,83c	2,20	2,22bc	2,28	2,88a	Ö.D.	2,65*
Ana Soğan Çapı (mm)	32,00 a	31,77	27,50 ab	29,22	26,95 b	28,88	25,12 b	27,68	3,87*	Ö.D.
Ana Soğan Boyu (mm)	45,33 a	45,77 a	38,45 b	42,27 b	38,05 b	38,88 ab	38,65 b	34,44 b	Ö.D.	4,13*

Lokasyonlar: M: Muş Alparslan Üniversitesi Kampüs Alanı, T: Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi Arazisi

### 3.1. Bitki Boyu (cm)

Tablo 2 incelendiğinde 2021 ve 2022 yıllarında yetiştirilen lale soğanlarında hasat öncesi ölçülen en yüksek bitki boyu değerleri Muş Alparslan Üniversitesi kampüs alanı (M) lokasyonundan alınan soğanlarda 2021-22 yıllarında sırası ile 33,06-33,58 cm, Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi (T) arazisinden alınan soğanlarda ise sırası ile 34,23-33,45 cm olarak tespit edilmiştir. En düşük bitki boyu M lokasyonunda yıllara göre sırası ile 9,89-9,00 cm, T lokasyonunda 11,24-17,36 cm olarak gerçekleşmiştir. Yıllara göre ortalama bitki boyu sonuçları M lokasyonunda 25,55-21,29 cm, T lokasyonunda 24,39-18,92 cm olarak bulunmuştur. Her iki yılda ortalama bitki boyu değerleri M lokasyonunda T lokasyonuna göre daha yüksek çıkmıştır.

Araştırmada 2023 yılı verilerine göre (Tablo 3) hasat edilen Muş Lalesinde bir ve birden çok kardeş veren genotiplerin lokasyonlara göre bağımsız yapılan istatistiki analizinde bitki boyu değerleri arasındaki farklar %5 düzeyinde önemli olmuştur. Bitki boyu değerleri M lokasyonunda 16,33-22,85 cm, T lokasyonunda 14,77-26,44 cm arasında değişmiştir. Kardeş sayısı arttıkça bitki boyunda kısalmalar görülmüştür. Bunun nedeni kardeş sayısı artışı ile soğanların ağırlığında ve büyüklüğünde düşmeler görülmesidir. Dikimde ağır ve büyük soğanların kullanılması bitki boyu gelişimini olumlu etkilemiştir. Kardeş sayısı ile bitki boyu arasında ters orantı vardır. Bunun nedeni kardeş sayısının



artması ile bitkinin fizyolojik olarak asimilant madde miktarlarını daha çok kardeş için harcaması ve bunun neticesinde de bitki boyuna yeteri kadar asimilant madde miktarları kalmaması söylenebilir. Bulgularımız Muş Lalesinde daha önce çalışan Kızıl ve Sesiz (2016) ve Yenikalaycı ve ark. (2021) ve de diğer lale tür ve çeşitlerinde çalışan Başkent (2008), Ali ve ark. (2015)'nin bulguları ile uyumlu, bazı araştırmacıların bulgularından ise (Salman ve ark., 2016; Salman ve Wallace 2020) düşüktür. Salman ve Wallace (2020), farklı lale çeşitlerinin bitki boyu açısından birbirlerinden önemli düzeyde farklılık gösterdiğini, Salman ve ark. (2016) ise lalelerde bitki boyunun çeşide ve çevre koşullarına bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir.

### **3.2. Yaprak Sayısı (adet/bitki)**

Araştırmada 2021 ve 2022 yıllarında yetiştirilen lale soğanlarında hasat öncesi ölçülen en yüksek yaprak sayısı her iki yılda M lokasyonunda 8 adet/bitki, T lokasyonunda 2021-2022 yılları için sırası ile 7-5 adet/bitki olarak tespit edilmiştir. En düşük yaprak sayısı ise yıllara göre sırası ile M lokasyonunda 2-3 adet olurken, T lokasyonunda 3-3 adet/bitki olmuştur. Ortalama yaprak sayısı değerleri 4,14-4,98 arasında değişmiştir, M lokasyonu çok az bir farkla üstünlük göstermiştir.

Bitkide yaprak sayısı 2023 yılında (Tablo 3) iki lokasyonun birbirinden bağımsız yapılan istatistiki analizinde önemli bulunmamıştır. Bitkide yaprak sayısı 2,22-4,22 arasında değişmiştir. Bitki boyunda olduğu gibi dikimde ağır ve büyük soğan kullanılması yaprak sayısı artışını sağlamıştır. Çünkü soğanların büyük olması neticesinde bitkilerin yeterli miktarda beslenmeleri için gerekli olan besin maddelerini de barındırdığı düşünüldüğünde büyük yumrulardan fazla miktarda yaprak çıkması beklenen bir durumdur. Yenikalaycı ve ark. (2021) Muş Lalesi'nin ıslahı ve kültüre alınması ile yaprak sayısında (6 adet/bitki) bir miktar artış olduğunu bildirmişlerdir. Balkaya ve ark. (2011) seleksiyon ıslahı ile ele alınan popülasyonun gen frekansı zamanla değiştiği için incelenen özellikler açısından üstün bireyler seçilerek çoğaltılabileceğini belirtmişlerdir.

### **3.3. Toplam Soğan Ağırlığı (g/bitki)**

Bitki başına hasat edilen toplam soğan ağırlığı en yüksek değerleri 2021-2022 yıllarında sırası ile M lokasyonunda 47,08-47,37 g, T lokasyonunda 44,25-41,4 g, en düşük ise M lokasyonunda 16,33-11,58 g, T lokasyonunda 12,25-6,10 g olarak tespit edilmiştir. Ortalama toplam soğan ağırlıkları yıllara göre sırası ile M lokasyonunda 38,18-28,87 g, T lokasyonunda 34,83-23,77 g düzeyinde gerçekleşmiştir. 2022 yılında 2021 yılına göre toplam soğan ağırlığı değerlerinin düşük çıkmasının nedeni 2021 yılında hasat edilen soğanlarda dikimde 21 g üstü ağırlığa sahip soğanlar kullanılmasından kaynaklanmaktadır. 2022 yılında bir önceki yıl seçilen 61 adet genotipten elde edilen 7,82-45,49 g arasında ağırlığa sahip 107 adet lale soğanları kullanılmıştır. Bu nedenle 2022 yılında dikilen lale soğanlarında ağırlık ortalaması düşüktür. Bu durum 2022 yılında hasat edilen lale soğanlarında incelenen özelliklerin ortalama değerlerinin düşük çıkmasına neden olmuştur.

Araştırmada 2023 yılında kardeş soğan verme özelliği dikkate alınarak yapılan dikimlerde Muş Lalesinde toplam soğan ağırlığı lokasyonların birbirinden bağımsız yapılan istatistiki analizine göre %5 seviyesinde önemli bulunmuştur. Toplam soğan ağırlığı her iki lokasyonda 16,68-36,66 g arasında değişiklik göstermiştir. Toplam soğan ağırlığı kardeş soğan artışı ile azalmıştır. Nitekim kardeş soğan sayısının artması ile birlikte soğan ağırlığının azalması da fizyolojik olarak beklenen bir durumdur. M lokasyonunda toplam soğan ağırlığı değerleri T lokasyonuna göre daha fazla bulunmuştur. Muş Lalesinde toplam soğan ağırlığı değerleri diğer araştırmacıların (Ali ve ark., 2015; Kızıl ve Sesiz, 2016) bildirdiği değerlerden yüksek çıkmıştır. Bu farklılığa özellikle iklim ve çevre koşullarının farklılığının neden olabileceği düşünülmektedir.

### **3.4. Ana Soğan Ağırlığı (g/bitki)**

Çalışmamızda en önemli kriterlerden olan ana soğan ağırlığı değerleri 2021-22 yıllarında 1,40-46,79 g arasında değişmiştir. En yüksek değerler M lokasyonundan elde edilmiştir. Ana soğan ağırlığı ortalamaları 2021-22 yıllarında sırası ile M lokasyonunda 24,72-21,41 g, T lokasyonunda 19,36-15,26 g bulunmuştur. Dikimdeki ana soğan ağırlığının fazla olması hasat edilen ana soğan ağırlığını olumlu etkilemiştir.

Araştırmada 2023 yılında ana soğan ağırlığı değerleri lokasyonların birbirinden bağımsız yapılan istatistiki analizinde %5 seviyesinde önemli bulunmuştur. Her iki lokasyonda ana soğan ağırlığı 13,11-31,66 g arasında tespit edilmiştir. M lokasyonunda ana soğan ağırlığı verileri T lokasyonuna göre daha yüksek çıkmıştır. Çalışmada ana soğan ağırlığının en az kardeşe sahip olan lale soğanlarında en yüksek olduğu ve kardeş sayısının artması ile lale soğanlarının ağırlığında düşüş olması dikkati çekmektedir. Kardeş sayısının artması ile ana soğan ağırlığının azalış göstermesi beklenen bir durumdur. Nitekim artan kardeş sayısının beslenmesi için gerekli olan fotosentez ürünleri yeterli miktarda olmayacağından dolayı doğal olarak soğan ağırlığının azalmasına neden olacaktır. Ana soğan ağırlığı değerleri Muş Lalesinde çalışan Kızıl ve Sesiz (2016) ile diğer lale tür ve çeşitlerinde çalışan Başkent, (2008), Ali ve ark., (2015) bulgularından yüksektir. Soğan ağırlığının çiçek büyüklüğü, çiçeklenme kabiliyeti ve kalitesinde önemli faktör olduğu bazı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Baytop, 1997; Muisers ve ark., 2001).

### **3.5. Toplam Soğan Sayısı (hasat edilen soğan sayısı/bitki)**

Muş Lalesinde hasatta bitki başına elde edilen soğan sayısı 1-5 arasında değişmiştir. M lokasyonunda hasat edilen soğan sayısı ortalama değerleri 2021-2022 yıllarında sırası ile 2,58-2,18 adet/bitki, T lokasyonunda 2,86-1,64 adet/ bitki olarak kaydedilmiştir. Araştırmada 2022 yılında ana soğan ağırlığı düşük soğanlarında çalışmada kullanılması ile yavru soğan verme oranları 2021 yılına göre daha düşük çıkmıştır. Yavru soğan verme oranı ana soğan ağırlığı düştükçe azalmıştır. Ancak bazı soğanlarda yavru soğan verme oranı ana soğan ağırlığı fazla bile olsa çok düşük çıkmıştır. Bu doğrultuda 2022 yılından sonraki çalışmalarımızda ana soğan ağırlığı yanında çok yavru soğan veren genotipler özellikle

incelemeye alınmıştır. Bunun Muş Lalesinde kalıtsal bir özellik mi, yoksa yetiştirme tekniği ile ilgili bir durum mu olduğuna yönelik araştırmalarımız yoğunluk kazanmıştır.

Araştırmada 2023 yılında toplam soğan sayısı değerleri arasındaki farklar lokasyonlara göre yapılan istatistiki analizde M lokasyonunda önemsiz, T lokasyonunda önemli tespit edilmiştir. Toplam soğan sayısı lokasyonlarda 1,44-2,88 adet/bitki arasında kaydedilmiştir. Çok kardeş veren soğanların çok kardeş verme eğiliminde olduğu görülmektedir. Çok kardeş veren soğanlarda ağırlığı düşük, küçük soğanlar kullanılmasına rağmen kardeş verme oranının her iki lokasyonda yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu bize yavru soğan verme özelliğinin kalıtsallığı hakkında bilgi vermektedir.

Lale soğanlarının gelişimleri ile ilgili yapılan bir çalışmada, lale ana soğanlarının ortalama 2-5 kardeş soğan verme potansiyelinde olduğu ve bu değerlerin çeşide, yetiştirme ortamına göre değişebileceği bildirilmiştir (Başkent, 2008). Başka bir araştırmada, ekonomik bağlamda lale üretiminin ana soğandan oluşan kardeş soğanların yavru bitki oluşturma potansiyeline dayandığı, lale soğanlarının yılda ortalama 2-3 kardeş soğan verdiği ve çiçeklenme yeteneği olan belirli büyüklükteki soğanların geliştirilmesi için gerekli olan zamanın en az 2-3 yıl olduğu bildirilmiştir (Dole ve Winkins, 1999).

### **3.6. Ana Soğan Çapı (mm)**

Araştırmada 2021-2022 yıllarında hasat edilen soğanlarda ana soğan çapı ölçümler sonucunda 9,30-45,13 mm arasında değişkenlik göstermiş ve ortalama değerler M lokasyonunda T lokasyonuna göre daha yüksek çıkmıştır.

Bir sonraki yıl olan 2023 yılında Muş Lalesinde lokasyonlara göre ana soğan çapı değerleri arasındaki farklar istatistiki olarak M lokasyonunda önemli, T lokasyonunda önemsiz bulunmuştur. Her iki lokasyonda değerler 25,12-32,00 mm arasında çıkmış, kardeş soğan sayısı azaldıkça soğan çapı artış göstermiştir. Artan kardeş sayısı doğal olarak ana soğan çapından besin ihtiyaçlarını da karşıladığından dolayı artan kardeş sayısı ile ana soğan çapının azalması beklenen bir durumdur. Ana soğan çapı değerleri kültürü yapılan soğan çeşitlerinde çalışma yapan Başkent, (2008)'in bildirdiği değerlere yakın çıkmıştır.

Ticari olarak değerlendirilen lale soğanlarının çap büyüklüklerine göre sınıflandırıldığı; saksı bitkisi olarak yetiştirilecek bitkiler için soğan çevresi büyüklüğünün en az 12-14 mm kesme çiçek olarak kullanılacakların ise soğan çevresinin en az 12 mm olması gerektiği bildirilmiştir (De Hertogh ve Le Nard, 1993). Başka bir araştırmada kritik büyüklüğün altında olan lale soğanlarının tek bir yaprak oluşturduğu ve sonraki yıllarda çiçek açmadığı, seleksiyon çalışmaları sonucunda soğan çevresinin 10-12 mm ve üzerinde olanların daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (De Hertogh, 1996).

### **3.7. Ana Soğan Boyu (mm)**

Muş lalesinde 2021-22 yıllarında hasat edilen soğanlarda ana soğan boyu 10,42-52,55 mm arasında bulunmuştur. Ortalama ana soğan boyu 2021-2022 yıllarında sırası ile M lokasyonunda 37,93-34,26 mm, T lokasyonunda 38,56-32,89 mm olarak ölçülmüştür. Lokasyonlarda ana soğan boyu değerleri

birbirine yakın çıkmakla birlikte 2022 yılında T lokasyonunda daha düşük boya sahip olanlar da tespit edilmiştir.

Araştırmada 2023 yılında ana soğan boyu M ve T lokasyonlarında yapılan bağımsız istatistiki analizlerde iki lokasyonda da %5 düzeyinde önemli bulunmuştur. Değerler 34,44-45,77 mm arasında olmuştur. Soğan çapında olduğu gibi bitkide kardeş soğan artışı ile soğan boyunda düşüşler görülmüştür. Muş Lalesinde ana soğan çapında olduğu gibi ana soğan boyu değerleri kültürü yapılan lale çeşitlerinde çalışan Başkent, (2008)'in belirttiği değerler aralığında olmakla birlikte kültürü yapılan çeşitlerden üstünlük gösterenler de olmuştur.

Projede 4 yıllık tarla çalışmaları ile Muş Lalesinde **kardeş soğan verme özelliği** ağır ve büyük soğanlar yanında çok kardeş veren soğanların seçimi ile geliştirilmiştir. Tablo 4'de projenin başlangıcından itibaren kardeş soğan verme özelliğinin değişimi verilmiştir.

**Tablo 4.** Muş Lalesi Soğanlarının 2020 - 2023 Yıllarında Kardeş Soğan Verme Oranları (%)

Yıllar	2020	2021	2022	2023
Kardeş Soğan Sayısı				
<b>1 Kardeş</b>	92,73	17,54	50,47	28,03
<b>2 Kardeş</b>	5,98	14,03	32,38	47,66
<b>3 Kardeş</b>	1,28	52,63	10,47	21,49
<b>4 Kardeş</b>	-	12,28	6,66	3,84

Tablo 4'de görüldüğü üzere ilk yıl 2019-2020 üretim sezonunda doğadan toplanan ve dikilen Muş lalesi genotiplerinde hasatlarda %92,73 oranında bir soğan, %5,98 oranında iki, %1,28 oranında ise üç soğan elde edilmiştir. İkinci yıl 21 g üzerinde ana soğanların seçimi ile hasatlarda kardeş soğan verme oranı artmıştır. Bir kardeş verme oranı %17,54'e düşmüş, iki kardeş verme oranı %14,03, üç kardeş verme oranı %52,63'e çıkmış ve dört kardeş veren genotipler de (%12,28) elde edilmiştir. Araştırmada, 2022 yılında bir önceki yıl seçilen 61 genotipten üretilen 107 materyallerin hepsinin soğan ağırlığına bakılmaksızın kullanımı ile bir kardeş verme oranı %50,47'ye çıkmış, iki kardeş verme oranı %32,38, üç kardeş verme oranı %10,47 ve dört kardeş verme oranı %6,66 olarak kaydedilmiştir. Düşük ağırlığa sahip genotipler de 2022 yılında kullanıldığı için hasatlarda bir yavru soğan veren genotiplerin oranında artış olmuştur. Ancak üç ve dört kardeş verme oranları da devam etmiştir. Araştırmanın 2023 yılında ise genotipler yavru soğan verme oranlarına göre sınıflandırılarak ayrı ayrı dikimleri yapılmıştır. Dikimde yavru soğan verme özelliğine göre dört yavru soğan veren 7, üç yavru soğan veren 12, iki yavru soğan veren 24 ve bir yavru soğan veren 18 olmak üzere toplamda 70 soğanın dikimi yapılmıştır. Özellikle 3-4 kardeş veren genotiplerin soğan ağırlığına bakılmaksızın bütün bireyleri dikimde kullanılmıştır. Hasat edilen soğanların geneline göre bir kardeş verme oranı %28,03, iki kardeş verme oranı %47,66, üç kardeş verme oranı %21,49 ve dört kardeş verme oranı %3,84 bulunmuştur. Çalışmada kardeş soğan

verme özelliğinin kalıtsal bir özellik gibi görüldüğü özellikle çok kardeş veren soğanların belli bir ağırlığa sahip olanlarında bu durumun dikkat çektiği, ancak çok küçük soğanların bu özelliği gösteremediği ve dolayısı ile çok kardeş verme oranını düşürdüğü tespit edilmiştir. Tek kardeş veren büyük soğanlarda bir sonraki yıl çok kardeş verme oranında artışlar olduğu da görülmüştür. Balkaya ve ark. (2011)'nin belirttiği gibi seleksiyon ıslahı ile alınan popülasyonun gen frekansı zamanla değiştiği için Muş Lalesinde kardeş soğan verme özelliği artırılabilmiştir.

#### **4. Sonuç**

Bu çalışma, Muş ili florasında kendiliğinden yetişen ve endemik bir tür olan Muş Lalesi'nde farklı lokasyonlardan toplanan lale soğanlarında soğan ve bitki gelişimlerini ayrıca kardeş soğan verme potansiyellerini iyileştirmek amacıyla 2020-2023 yıllarında yürütülmüştür.

Çalışmamızda 2021-2023 üç yıllık araştırma sonuçlarına göre, incelenen özellikler her iki lokasyondan alınan Muş Lalesi genotiplerinde bitki boyu değerleri 9,00-34,23 cm, yaprak sayısı 2-8 adet/bitki, bitki başına toplam soğan ağırlığı 6,10-47,37 g ana soğan ağırlığı 1,40-46,79 g, toplam soğan sayısı 1-5 adet/bitki, ana soğan çapı 9,30-45,13 mm, ana soğan boyu 10,42-52,55 mm arasında bulunmuştur. Kullanılan soğanın ağırlığı ve büyüklüğü bir sonraki yıl elde edilecek bitkide incelenen tüm özellikleri olumlu etkilemiştir. Nitekim 2021 yılında 21 g ve üzeri soğanların kullanılması ile incelenen özellikler 2022 yılından daha yüksek çıkmıştır.

Muş Lalesinde soğan ve bitki gelişimi bakımından seleksiyon ıslahı ile bir iyileşme olmuştur. Özellikle kardeş soğan verme oranında önemli bir artış sağlanmıştır. Muş Lalesi'nin doğada genelde bir ana soğandan bir yavru soğan verdiği dikkate alınırse seleksiyon ıslahı ile bu özelliğin geliştirilebileceği ve yavru soğan verme potansiyelinin 4-5 sayıya çıkarılabileceği tespit edilmiştir. Projede Muş Lalesi'nde ticari üretimi artırmak amacı ile daha çok kardeş soğan verme özelliği ve soğan ağırlığı üzerinde durulmuştur. Bu bakımdan dört yıllık araştırma sonucunda 4-5 kardeş soğan veren genotipler elde edilmiştir. Bu durumun ana soğanlar kullanıldığında kalıtsal olabileceğini söylemek mümkündür. Soğan ağırlığı, büyüklüğü ve bitki gelişimi bir önceki yıl kullanılan soğanın büyüklüğü ve ağırlığı ile doğrusal ilişki içerisindedir. Bu durumun ise iklim, çevre ve yetiştirme koşulları ile yakından ilgili olduğu söylenebilir. Muş Lalesi'nin ıslahı ve kültüre alınması konusunda fazla bir çalışma yapılmamıştır. Bu türün kültüre alınmasını kısıtlayan yavru soğan verme özelliği iyileştirilerek diğer lale türlerinde olduğu gibi seri üretimi yapılabilir. Bu konuda işçi ve mekanizasyon imkânları artırılarak çok kardeş veren genotipler ile geniş alanlarda ticari ve koruma amaçlı üretimi geliştirmek için çalışmalar yapılması gerekmektedir.

#### **Teşekkür**

Bu araştırmanın “Muş Lalesinde Seleksiyon Islahı İle Çeşit Geliştirilmesi Projesi” kapsamında güdümlü proje olarak yürütülmesini sağlayan ve destekleyen Muş Alparslan Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar A. Y., N. A. Y. ve A. B. tarla çalışmalarında, tüm yazarlar ise makalenin yazımında ve yorumlanmasında katkı sağlamışlardır.

## Kaynakça

- Ali M., Khattak AM., Ullah K., Ibrahim M. Performance of exotic *tulip* cultivars under agroclimatic conditions of Peshawar. J. Bioresource Manage 2015; 2(3): 1-8.
- Alp Ş. Doğal çiçek soğanları ve ters lale koruma önlemleri ve yetiştiriciliği. Doğal Çiçek Soğanları Derneği, Altınova-Yalova 2006, Yayın No: 2, ISBN:975-00731-1-8, s.1-44.
- Anonim. Türkiye İstatistik Kurumu, Bitkisel Üretim İstatistikleri, Erişim tarihi:22.05.2024.
- Arslan N., Baydar H., Kızıl S., Karık Ü., Şekeroğlu N., Gümüştü A. Tıbbi aromatik bitkiler üretiminde değişimler ve yeni arayışlar. Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi 2010; 492-503.
- Balkaya A., Cankaya S., Özbakir M. Use of canonical correlation analysis for determination of relationships between plant characters and yield components in winter squash (*Cucurbita maxima* Duch.) populations. Bulgarian Journal of Agricultural Science 2011; 17(5): 606-614.
- Başkent A. Rink (Yüzük) kültüründe farklı katı ortamların lale soğanı oluşumu ve özelliklerine etkileri. A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi 2008.
- Baydar H., Telci İ. Tıbbi ve aromatik bitkilerde ıslah. Tohumluk, Tescil ve Sertifikasyon, Türkiye Tohumcular Birliği Dergisi 2015; 4(15): 12-21
- Baytop T. Türkçe bitki adları sözlüğü. Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu Türk Dil Kurumu Yayınları 1997, 578, ISBN: 975-16-0542-3.
- Bermejo JEH., Sanchez EG. Tulips: An ornamental crop in the Andalusian Middle Ages. Economic Botany 2009; 63(1): 60-66.
- Davis PH. The flora of Turkey. Edinburgh at The University Edinburgh 1965-1988; 1-8.
- De Hertogh AA. Marketing and research requirements for liliium in Nort America. Acta Horticulture, Taejon 1996.
- De Hertogh AA., Le Nard M. Wold production and horticultural utilization of flower bulbs. Elsevier Science Publishers, Cap, 2., Amsterdam 1993.
- Dole JM., Wilkins HF Floriculture principles and species. Prentice Hall Inc., Printed USA 1999.
- Ghaffoor A., Maqbool I., Waseem K., Quraishi A. In vitro response of (*Tulipa gesteriana* L.) to various growth regulators. International Journal of Agriculture and Biological Sciences 2004; 6(1): 1168-1169.
- Gürsan K. Lale (*tulip*).Atatürk Bahçe Kültürleri Araştırma Enstitüsü, Yalova 1996.

- İzgi Saraç Y., Baklaya A., Deligöz I. Süs bitkileri ıslahı. S. Kazaz, YY. Mendi (ed) Süs Bitkileri Islahı Kitabı. Türler 2021; 9, 377-418. Ankara: Gece yayınları.
- Kızıl S., Sesiz U. Yarı kurak iklim koşullarında farklı dikim zamanlarının *Tulipa sintenisii* Baker'da bazı agronomik özellikler üzerine etkisi. VI. Süs Bitkileri kongresi, 19-22 Nisan 2016. Antalya.
- Kiani M., Memariani F., Zarghami H. Molecular analysis of species of *Tulipa* L. from Iran based on ISSR markers. Plant Systematics and Evolution 2012; (298): 1515-1522.
- Kuijpers AM., Langens-Gerrits M. Propagation of *tulip* in vitro. Acta Hortic 1997; (430): 321-324.
- Muisers JJM., Oeveren JC., Tuyl JM. Breeding as a tool for improving postharvest quality characters of lily and *tulip* flowers. Acta Horticulture 2001.
- Salman A., Wallace MY. Farklı ticari lale çeşitlerinin bayındır ekolojik koşullarındaki floristik özellikleri. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2020; 34 (Özel Sayı): 319-326.
- Salman A., Zeybekoglu E., Alp S., Ozzambak ME. Effects on plant growth and bulb growth of different planting times on *Tulip* Varieties, Bahce Journal of Atatürk Central Horticultural Research Institute 2016; 887-892 (in Turkish).
- Ürgeç Sİ. Ağaç ve süs bitkileri fidanlık ve yetiştirme tekniği. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, Fakülte Yayın No: 442, ISBN 975-404- 445-7, 1998, İstanbul.
- Xing G., Qu L., Zhang Y., Xue L., Su J., Lei J. Collection and evaluation of wild *tulip* (*Tulipa spp.*) resources in China. Genetic Resources and Crop Evolution 2017; (64): 641-652.
- Yenikalaycı A., Aybar Yalınkılıç N., Bayram A. Muş Lalesi (*Tulipa sintenisii* Baker)'nde farklı yetiştirme ortamlarının soğan gelişimi üzerine etkileri. Akademik Ziraat Dergisi 2023; 12(1): 15-20.
- Yenikalaycı A., Aybar Yalınkılıç N., Özkurt M., Karadağ Y. Muş Lalesi (*Tulipa Sintenisii* Baker)'nde seleksiyon ıslahı çalışmaları. Spec 6<sup>th</sup> International Conference On Agriculture, Animal Science And Rural Development May 16-18, 2021 Siirt, Turkey.



## Mikrogermeli Bir Akışkanın Halka Kesitli Kanalda Genelleştirilmiş Couette Akımına ait Analitik Çözümler

Mehmet Şirin DEMİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3965-4760>

\*Sorumlu yazar: demirms@iuc.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 21.04.2024

Kabul tarihi: 21.07.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Mikrogermeli akışkan  
Genelleştirilmiş Couette akışı  
Analitik çözüm  
Eş eksenli iki silindir

### ÖZ

Klasik sürekli ortamlar mekaniğinde akışkanı oluşturan parçacıkların maddesel nokta olduğu varsayılmaktadır. Ancak, karakteristik uzunluğun çok küçük olduğu mikrokanallarda ve/veya parçacık boyutlarının büyük olduğu, polimer eriyikler, süspansiyonlar ve biyolojik akışkanlar gibi birçok uygulamada bu varsayım geçerliliğini yitirmektedir. Bu durumlarda akışkan parçacıklarının dönmesi ve deformasyonu gibi mikro hareketleri önem kazanmakta ve akışkanın makro hareketine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, mikrogermeli bir akışkanın alan denklemleri halka kesitli bir kanalda, genelleştirilmiş Couette akımı için çözülmüş ve hız, mikro açısız hız ve mikro genleme alanlarına ait analitik çözümler elde edilmiştir. Hız, mikro açısız hız ve mikro genleme alanları için elde edilen çözümler; parametrelerin farklı değerlerinde grafik olarak sunulmuştur. Elde edilen çözümler, klasik Newtonian akışkan için geçerli hız alanı çözümlerini özel hal olarak içermektedir. Mikrogermeli akışkanlarda, hız alanı, Newtonian akışkanlara kıyasla daha yüksek değerler almaktadır. Mikropolar parametrelerin artması, hem hız hem de mikro açısız hız alanlarını artırırken, mikro genleme parametresinin artması da mikro genleme alanını artırmaktadır.

### Analytical Solutions to the Generalized Couette Flow of a Microstretch Fluid in an Annulus

#### Research Article

#### Article History:

Received: 21.04.2024

Accepted: 21.07.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Microstretch fluid  
Generalized Couette flow  
Analytical solution  
Coaxial cylinders

#### ABSTRACT

In classical continuum mechanics, fluid particles are assumed to be material points. However, this assumption may lose its validity in micro-channels where the characteristic length is very small and/or in many applications where particle sizes are large, such as in polymer melts, suspensions, and biological fluids. In these cases, micro-motions such as rotation and deformation of fluid particles contribute to the macro motion of the fluid. In this study, the field equations of microstretch fluids are solved for the generalized Couette flow in an annulus, and exact analytical solutions are obtained for velocity, microrotation, and microstretch fields. Results are presented graphically for velocity, microrotation, and microstretch at various values of the pertinent parameters. Present solutions include velocity field solutions for the classical Newtonian fluid as a special case. For microstretch fluids, the velocity field takes on larger values compared to a Newtonian fluid. Increasing the micropolar parameters increases the velocity and microrotation fields while increasing the microstretch parameter increases the microstretch field.

**To Cite:** Demir MŞ. Mikrogermeli Bir Akışkanın Halka Kesitli Kanalda Genelleştirilmiş Couette Akımına ait Analitik Çözümler. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 31-44.

## 1. Giriş

Bilim ve mühendislikte karşılaşılan süspansiyonlar, biyolojik akışkanlar, polimer eriyikler ve sıvı kristaller gibi büyük parçacıklardan oluşan akışkanlarda deneylerle de gözlemlenen ve klasik sürekli ortam teorileri ile açıklanamayan davranışlar gösterirler. Örneğin; Hoyt ve Fabula (1964) polimerik katkı içeren akışkanlarda, katı cidar yakınlarında yüzey gerilmesinin katkı içermeyen akışkanlara oranla daha az olduğunu deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Kan akışı deneylerinde gözlemlenen; hız profillerindeki farklılıklar, damar yarıçapındaki azalmanın görünür viskoziteyi azaltması ve kırmızı kan hücrelerinin damarın merkezine doğru hareket etmeleri (Fahreus-Linqvist etkisi) gibi olaylar Navier-Stokes teorisiyle açıklanamaz (Eringen, 1999).

Klasik akışkan teorisinin bu gibi durumları açıklamakta yetersiz kalmasının sebebi sürekli ortam yaklaşımıdır. Akışkan parçacıklarının boyutu, karakteristik uzunluğa kıyasla büyüdükçe sürekli ortam yaklaşımından uzaklaşır ve akışkan parçacığının mikro hareketleri (dönme ve deformasyon) önem kazanarak akışkanın makro hareketine katkıda bulunur (Eringen, 2001). Benzer durum mikrokanal akışı gibi uygulamalarda da görülür. Bu nedenle akışkan parçacıklarının boyutlarının büyüdüğü veya karakteristik uzunluğun küçüldüğü durumlarda akışkan parçacıkları maddesel nokta olarak düşünülmemeli ve üzerlerine gelen kuvvet, bir kuvvet ve kuvvet çiftine indirgenerek akışkan parçacıklarının mikro hareketleri hesaba katılmalıdır.

Tüm bu sebeplerden ötürü Eringen (1964) klasik sürekli ortam teorilerini kapsayan, akışkan parçacıklarının üzerine gelen momentleri de hesaba katan mikro akışkan teorilerini geliştirmiştir. Bu teorilerin en genel hali olan mikromorfik akışkanlarda, öteleme serbestliğinin yanı sıra dönme ve deformasyon ile birlikte serbestlik derecesi dokuza yükselir. Mikrogermeli akışkanlarda ise akışkan parçacığının sadece tek bir doğrultuda deformasyona uğradığı varsayılır ve böylece serbestlik derecesi yediye düşer. Mikro akışkan teorilerinin en basit hali olan mikropolar akışkanlarda ise; akışkan parçacıklarının rijit olduğu ve ötelemenin yanı sıra sadece dönme hareketi yaptıkları düşünülür. Mikro akışkan teorileri ile ilgili uygulamaların büyük çoğunluğu mikropolar akışkanlar üzerinedir. Literatürde mikromorfik ve mikrogermeli akışkanlar ile ilgili çalışmaların sayısı çok azdır. Bunun sebebi bu teoriler uygulanırken karşılaşılan matematiksel zorluklar ve malzemeye ait bilinmeyen katsayılarıdır.

Eringen (1964) mikro akışkan teorisini ortaya attıktan sonra akışkan modelinde bazı kısıtlamalara giderek mikrogermeli akışkanlar teorisini ortaya attı (Eringen, 1969). Bu gelişmenin ardından, mikrogermeli akışkan teorisi akışkanlar mekaniğinin temel problemlerine uygulanmaya başlanmıştır. Literatürdeki ilk uygulama Ariman (1970) tarafından yapılan, paralel iki plaka arasında Poiseuille akışına ait analitik çözümlerin bulunduğu çalışmadır. Ariman (1971) daha sonraki bir çalışmada ise mikrogermeli akışkan teorisini kullanarak kan akışını incelemiştir. Eringen (1990) teorisinin farklı uygulama alanlarını düşünerek, termo mikrogermeli akışkanlar teorisini geliştirmiş ve teorisini kabarcıklı akışkanlarda akustik dalga yayılımı problemlerine uygulamıştır. Bu çalışmayı takiben, Aydemir ve Venart (1990) bu teoriyi kullanarak paralel iki plaka arasında zamana bağlı akış ve ısı

transferi problemini incelemiştir. Bu teorinin sınır tabaka problemlerine ilk uygulanması ise Aydemir (1990) tarafından yapılmıştır. Kan akışında önemli bir yeri olan dairesel kesitli kanallarda darbeli akış problemi yine bu akışkan modeli kullanılarak Narasimhan (2003) tarafından incelemiştir. Moosaie ve Atefi (2009) ise içerisinde küresel parçacıklar bulunan bir sıvıyı bu teori ile modellemişler ve boru içerisinde akışını göz önüne almışlardır. Bu akışkan teorisi ile modellenebilen akışkanlar sınırlarda kaymama şartını sağlamayabilirler. Bunu göz önünde bulunduran Sherief ve ark. (2009; 2012) yaptıkları çalışmalarda mikrogermeli akışkan içerisinde dönen ve ötelen bir küreyi kayma sınır şartlarını kullanarak incelemiştir. Daha sonraki bir çalışmada ise, Demir (2017) yine kayma sınır şartlarını kullanarak mikrogermeli bir akışkanın paralel iki levha arasında kayma akışına ait analitik çözümlerini elde etmiştir. Teorinin ilginç bir uygulaması Sherief ve ark. (2018) tarafından yapılan, mikrogermeli bir akışkan içerisindeki damla etrafında akış problemidir. Zamana bağlı problemler ise ilk defa Slayi ve Ashmawy (2018) tarafından göz önüne alınmış ve mikrogermeli bir akışkanın paralel iki plaka arasında Couette ve Poiseuille akışlarını kayma sınır şartları altında incelenmiştir. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada ise El-Sapa (2021) manyetik alanın, mikrogermeli bir akışkan damlası etrafında akış problemine etkilerini incelemiştir.

Son yıllarda, mikro akışkan teorileri yeni uygulama alanları bulmaktadır. Bunlardan biri akışkan içerisine nanometre boyutlarında katı parçacıkların ilave edildiği nanoakışkanlardır. Bu parçacıklar, akışkanın ısı iletimini arttırmak suretiyle toplam ısı transferine katkıda bulunur. Nanoakışkanlar; ısı değiştiricileri, elektronik devre elemanlarının soğutulması gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılması mümkün görünmektedir (Patil ve ark., 2023). Yeni yapılan bir çalışmada ise Akbar ve ark. (2024) mikropolar bir nanoakışkanda mikro açısız hız alanının termal iletkenliği artırdığını ortaya koymuşlardır. Diğer bir uygulama alanı ise, akışkan içerisine manyetik alandan etkilenen parçacıkların ilave edilmesidir. Manyetik akışkanlar, fiziksel ve kimyasal bakımdan (optik, termal, manyetik vb.) ilginç özellikler göstermektedir. Mikro akışkan teorileri ile modellenebilen bu akışkanlar, biyomedikal teknoloji (kanser tedavisi, çeşitli medikal testler vb.), yapıştırma işlemleri, sıcaklık, pH vb. ölçümünde kullanılan sensörler gibi alanlarda potansiyel vaat etmektedir (Philip, 2023).

Bu çalışmada ise sıkıştırılmaz mikrogermeli bir akışkanın eş eksenli iki silindir arasında geliştirilmiş Couette akımı göz önüne alınmıştır. Eringen (2001) tarafından ortaya atılan alan denklemleri, uygun bir boyutsuzlaştırma yardımıyla, kaymama sınır koşulları altında çözümlenerek hız, mikro açısız hız ve mikro genleme alanlarına ait boyutsuz analitik çözümler elde edilmiştir. Parametrelerin çeşitli değerleri için elde edilen çözümler grafik olarak sunulmuştur. Böylece, mikrogermeli akışkanlar için geliştirilmiş Couette akımı problemi, ilgili boyutsuzlaştırma ile analitik olarak çözülmüş ve literatürdeki mevcut analitik çözümlere bir yenisi eklenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Mikrogermeli akışkanların alan denklemleri, ilgili bünye denklemlerinin korunum denklemlerinde yerlerine yazılması ile elde edilir. İzotermal mikrogermeli bir akışkanda dokuz bilinmeyen; yoğunluk ( $\rho$ ), mikro eylemsizlik ( $j$ ), hız vektörü ( $\mathbf{v}$ ), mikro açısız hız vektörü ( $\boldsymbol{\nu}$ ) ve mikrogerme alanı ( $\nu$ ) için toplam dokuz denklem yazılır. Bu bölümde mikrogermeli akışkanlar için alan denklemleri verilmiş, yapılan kabuller ve basitleştirmelerin ardından ilgili problem için elde edilen diferansiyel denklem sisteminin analitik çözümleri bulunmuştur.

İzotermal mikrogermeli bir akışkan için kütle korunumu denklemi aşağıdaki şekildedir (Eringen, 2001).

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

Burada  $D/Dt$  maddesel türev operatörünü,  $\nabla$  Nabla operatörünü,  $\rho$  yoğunluğu,  $\mathbf{v}$  ise hız vektörünü göstermektedir. Bu çalışmada; koyu harflerle yazılan bütün büyüklükler vektörel büyüklükleri göstermektedir.

Mikrogermeli akışkan teorisinde, akışkan parçacıklarına klasik kütle yoğunluğu ( $\rho$ ) yanında, pozitif tanımlanmış simetrik bir mikro eylemsizlik tansörü ( $j_{kl}$ ) tekabül ettirilir. Akışın mikro izotropik olduğu varsayımı altında mikro eylemsizlik tansörü  $j_{kl} = (1/3)j\delta_{kl}$  olarak yazılır ve mikro eylemsizlik ( $j$ ) olarak adlandırılan tek bir büyüklük ile temsil edilir. Mikro eylemsizlik ile ilgili denklem, Eringen (2001) tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilerek, alan denklemlerine ilave edilmiştir.

$$\frac{Dj}{Dt} - 2j\nu = 0 \quad (2)$$

Bu denklemde;  $\nu$  mikrogerme alanını göstermektedir. Mikrogermeli akışkanların diğer bir alan denklemi, bünye denklemlerinin lineer momentum denkleğine yazılması ile elde edilen aşağıdaki denklemdir.

$$(\lambda_v + 2\mu_v + \kappa_v)\nabla\nabla \cdot \mathbf{v} - (\mu_v + \kappa_v)\nabla \times \nabla \times \mathbf{v} + \kappa_v\nabla \times \boldsymbol{\nu} + \lambda_0\nabla \nu - \nabla\pi + \rho(\mathbf{f} - \frac{D\mathbf{v}}{Dt}) = 0 \quad (3)$$

Bu denklemde;  $\lambda_v, \mu_v, \kappa_v$  ve  $\lambda_0$  öteleme viskozite katsayılarını,  $\pi$  termodinamik basıncı,  $\mathbf{f}$  hacim kuvvetleri yoğunluğunu göstermektedir.  $\boldsymbol{\nu}$  ise mikro açısız hız vektörü olup, mikro akışkan teorilerinin Newtonian akışkanlardan en önemli farkıdır. Bu teoride; akışkan parçacıkları üzerine etkiyen kuvvet, bir kuvvet ve kuvvet çiftine indirgenir. Bu nedenle açısız momentum denkleği kendiliğinden sağlanmaz ve alan denklemlerine aşağıdaki şekilde ilave bir vektörel denklem olarak eklenir.

$$(\alpha_v + \beta_v + \gamma_v)\nabla\nabla \cdot \boldsymbol{\nu} - \gamma_v\nabla \times \nabla \times \boldsymbol{\nu} + \kappa_v\nabla \times \mathbf{v} - 2\kappa_v\boldsymbol{\nu} + \rho(\mathbf{1} - \boldsymbol{\sigma}) = 0 \quad (4)$$

(4) denkleminde;  $\alpha_v, \beta_v$  ve  $\gamma_v$  ise dönme için viskozite katsayılarını,  $\sigma$  dönme ataletini ve  $\mathbf{l}$  ise, hacim momenti yoğunluğunu göstermektedir. Dönme viskozite katsayılarına klasik Newtonian akışkanlarda rastlanmaz ancak, akışkan parçacıklarının üzerlerine etkiyen döndürme momentleri nedeniyle mikrogermeli akışkanların bünye denklemlerinde görünürler. Mikrogermeli akışkan teorisinin klasik Newtonian akışkanlardan bir diğer farkı; akışkan parçacıklarının öteleme ve dönme alanlarına ilave olarak, üzerlerine gelen mikro gerilmeler nedeniyle tek bir doğrultuda deformasyona (şişme/sönme) uğramalarıdır. Bu deformasyon ile ilgili kinematik büyüklük, bünye denklemlerinde ek bir denklem olarak görünür ve mikrogerme alanı ( $\nu$ ) olarak adlandırılır. Bu bünye denkleminin mikrogerme momentum denkleğine yazılması ile mikrogerme alanı için aşağıdaki alan denklemi bulunur (Eringen, 2001).

$$\alpha_0 \nabla^2 \nu + \pi_0 - \lambda_1 \nu - \lambda_0 \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho(l - \sigma) = 0 \quad (5)$$

Bu denklemde,  $\pi_0$  atalet mikro basıncını,  $l$  hacim mikrogerme yoğunluğunu,  $\sigma$  ise, mikrogerme ataletini göstermektedir. Dönme ataleti  $\sigma$  ve mikrogerme ataleti  $\sigma$  ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Eringen, 2001).

$$\sigma = \frac{D}{Dt}(j\nu), \quad \sigma = \frac{1}{2} j \left( \frac{D\nu}{Dt} + \nu^2 \right) - j\nu \cdot \nu \quad (6)$$

Öteleme ve dönme viskozite katsayıları genel halde  $\rho, j$  ve sıcaklığa bağlı olabilirler ancak doğrusal yaklaşımda sabit oldukları kabul edilir. Bu çalışmada akışın daimi olduğu ve mikrogermeli akışkanın sıkıştırılmaz olduğu varsayımı altında çözüm yapılmıştır. Bu durumda süreklilik denklemi (1) aşağıdaki şekilde yazılır ve termodinamik basınç  $\pi$ , bilinmeyen bir  $p$  basıncı ile değiştirilir.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

Mikro eylemsizliğin ( $j$ ) küçük olduğu durumlarda,  $c$  bir sabit olmak üzere, eylemsizlik mikro basıncı  $\pi_0$ ;

$$\pi_0 = cj \quad (8)$$

olarak ifade edilir (Eringen, 2001). Ayrıca, (6) numaralı denklemde lineer olmayan terimler ihmal edilir ve  $j$ 'nin sabit olduğu düşünülürse, dönme ataleti  $\sigma$  ve mikrogerme ataleti  $\sigma$  ise aşağıdaki şekilde yazılır (Eringen, 2001).

$$\sigma = j \frac{D\nu}{Dt}, \quad \sigma = \frac{1}{2} j \frac{D\nu}{Dt} \quad (9)$$

Tüm bu varsayımlar altında hacim kuvvetleri ve momentlerinin olmadığı durumda (2)-(5) alan denklemleri aşağıdaki şekilde basitleşir.

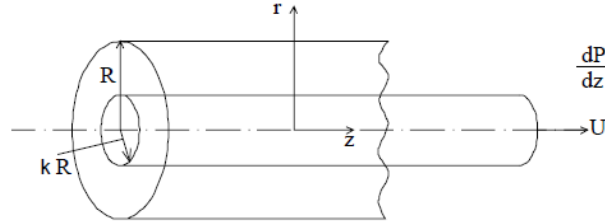
$$\mathbf{v} \cdot \nabla j - 2jv = 0 \quad (10)$$

$$-\nabla p + \lambda_0 \nabla v + (\mu_v + \kappa_v) \nabla^2 \mathbf{v} + \kappa_v \nabla \times \boldsymbol{\nu} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = 0 \quad (11)$$

$$(\alpha_v + \beta_v + \gamma_v) \nabla \nabla \cdot \boldsymbol{\nu} - \gamma_v \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{\nu} + \kappa_v \nabla \times \mathbf{v} - 2\kappa_v \boldsymbol{\nu} + \rho j (\mathbf{v} \cdot \nabla \boldsymbol{\nu}) = 0 \quad (12)$$

$$\alpha_0 \nabla^2 v + cj - \lambda_1 v + \frac{1}{2} \rho j (\mathbf{v} \cdot \nabla v) = 0 \quad (13)$$

Mikrogermeli bir akışkan; Şekil.1 de gösterilen iç içe geçmiş, sonsuz uzunlukta, eş eksenli iki silindirin arasında başlangıçta hareketsiz olarak durmaktadır. Dıştaki silindirin yarıçapı  $R$  olup içteki silindirin yarıçapı ise,  $\kappa R$  ( $\kappa < 1$ ) büyüklüğündedir. Dıştaki silindir hareketsiz tutulurken, akışkan içteki silindirin  $z$  ekseninin pozitif yönü doğrultusunda sabit bir  $U$  hızı ile çekilmesi ve aynı anda halka kesitli bölgeye  $z$  eksenini boyunca  $dP/dz$  büyüklüğünde bir basınç farkı uygulanması ile aniden harekete geçmektedir. Diğer doğrultularda harekete neden olacak bir etken bulunmamaktadır.



Şekil 1. Problemin geometrisi ve koordinat sistemi.

Yeteri kadar uzun bir süre geçtikten sonra akışın daimi hale ulaştığı ve tam gelişmiş olduğu durum için, hız  $\mathbf{v}$ , mikro açısal hız  $\boldsymbol{\nu}$ , mikro genleme  $v$  ve mikro eylemsizlik  $j$  aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{v} = \{0, 0, w(r)\}, \quad \boldsymbol{\nu} = \{0, \gamma(r), 0\}, \quad v = v(r), \quad j = j(r) \quad (14)$$

(14) denklemi (10)-(13) denklemlerinde yerlerine yazılarak akışkanın hız, mikro açısal hız ve mikro genleme alanlarını belirlemek için çözülmesi gereken diferansiyel sistemi;

$$(\mu_v + \kappa_v) \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) + \kappa_v \frac{d}{dr} (r\gamma) = r \frac{\partial p}{\partial z} \quad (15)$$

$$\gamma_v \frac{d}{dr} \left( \frac{d\gamma}{dr} + \frac{\gamma}{r} \right) - \kappa_v \frac{dw}{dr} - 2\kappa_v \gamma = 0 \quad (16)$$

$$\alpha_0 \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) - \lambda_1 v = -\pi_m \quad (17)$$

olarak bulunur. İlgili sınır şartları ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} w(\kappa R) &= U, & w(R) &= 0 \\ \gamma(\kappa R) &= 0, & \gamma(R) &= 0 \\ v(\kappa R) &= 0, & v(R) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Mikro açılma hız ve mikrogerme alanlarının kanal cidarında 0 değerini almaları sıkı yapışma koşulu olarak adlandırılır. Katı yüzeyler üzerinde farklı sınır şartları uygulamak mümkündür (Eringen, 2001) .

Bu denklemler;

$$\bar{r} = \frac{r}{R}, \quad \bar{w} = \frac{w}{U}, \quad \bar{\gamma} = \frac{\gamma}{U/R}, \quad \bar{v} = \frac{v}{\pi_m/\lambda_1} \quad (19)$$

boyutsuz büyüklükleri cinsinden ifade edilirse; aşağıdaki boyutsuz diferansiyel denklem sistemi elde edilir. Buradan itibaren kolaylık olması açısından boyutsuz büyüklükleri gösteren üst çizgi işareti kullanılmayacaktır.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) + \frac{\Delta_m}{(1 + \Delta_m)} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r\gamma) = p_b \quad (20)$$

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{d\gamma}{dr} + \frac{\gamma}{r} \right) - \lambda_m^2 \frac{dw}{dr} - 2\lambda_m^2 \gamma = 0 \quad (21)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) - \lambda_n^2 v + \lambda_n^2 = 0 \quad (22)$$

Burada,  $\Delta_m$  ve  $\lambda_m$  mikropolar parametreler,  $\lambda_n$  mikrogerme parametresi ve  $p_b$  boyutsuz basınç parametresi olup aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$\Delta_m = \frac{\kappa_v}{\mu_v}, \quad \lambda_m = \frac{\kappa_v R^2}{\gamma_v}, \quad \lambda_n = \frac{\lambda_1 R^2}{\alpha_0}, \quad p_b = \frac{R^2}{(\mu_v + \kappa_v)U} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (23)$$

Bu denklemlerle ilgili boyutsuz sınır şartları ise;

$$\begin{aligned}
w(\kappa) &= 1, & w(1) &= 0 \\
\gamma(\kappa) &= 0, & \gamma(1) &= 0 \\
\nu(\kappa) &= 0, & \nu(1) &= 0
\end{aligned} \tag{24}$$

şeklinde. (20)-(22) diferansiyel denklem sistemi, (24) sınır şartları altında çözümlenir;  $I_k$  ve  $K_k$  sırasıyla  $k$ . mertebeden I. tip ve II. tip değiştirilmiş Bessel fonksiyonları olmak üzere hız, mikro açısal hız ve mikro genleme alanları aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\begin{aligned}
w &= \frac{p_b}{2} \left[ -\frac{\Delta m}{2 + \Delta m} \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{\lambda} I_0(\lambda r) + \frac{\Delta m}{2 + \Delta m} \frac{A_4}{A_1} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda r) + \frac{1 + \Delta m}{2 + \Delta m} r^2 \right] \\
&+ c_1 \left[ -\frac{\Delta m}{2 + \Delta m} \frac{A_3}{A_1} \frac{1}{\lambda} I_0(\lambda r) + \frac{\Delta m}{2 + \Delta m} \frac{A_5}{A_1} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda r) + 2 \frac{1 + \Delta m}{2 + \Delta m} \ln(r) \right] + c_2
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\gamma = c_3 I_1(\lambda r) + c_4 K_1(\lambda r) - \frac{1 + \Delta m}{2 + \Delta m} \frac{p_b}{2} r - \frac{1 + \Delta m}{2 + \Delta m} \frac{c_1}{r} \tag{26}$$

$$\nu = \frac{I_0(\lambda_n r) [K_0(\lambda_n) - K_0(\lambda_n \kappa)] - K_0(\lambda_n r) [I_0(\lambda_n) - I_0(\lambda_n \kappa)]}{I_0(\lambda_n) K_0(\lambda_n \kappa) - I_0(\lambda_n \kappa) K_0(\lambda_n)} + 1 \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
\lambda &= \lambda_m \sqrt{\frac{2 + \Delta_m}{1 + \Delta_m}}, & A_1 &= I_1(\lambda \kappa) K_1(\lambda) - I_1(\lambda) K_1(\lambda \kappa), & A_2 &= \kappa K_1(\lambda) - K_1(\lambda \kappa), \\
A_3 &= \frac{K_1(\lambda)}{\kappa} - K_1(\lambda \kappa), & A_4 &= -\kappa I_1(\lambda) + I_1(\lambda \kappa), & A_5 &= -\frac{I_1(\lambda)}{\kappa} + I_1(\lambda \kappa), \\
A_6 &= -\frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_3}{A_1} \frac{1}{\lambda} I_0(\lambda \kappa) + \frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_5}{A_1} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda \kappa) + 2 \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m} \ln(\kappa), \\
A_7 &= -\frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{\lambda} I_0(\lambda \kappa) + \frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_4}{A_1} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda \kappa) + \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m} \kappa^2, \\
A_8 &= -\frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_3}{A_1} \frac{1}{\lambda} I_0(\lambda) + \frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_5}{A_1} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda), \\
A_9 &= -\frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{\lambda} I_0(\lambda) + \frac{\Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_4}{A_1} \frac{1}{\lambda} K_0(\lambda) + \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m}, \\
c_1 &= \frac{1 - (A_7 - A_9) \frac{p_b}{2}}{A_6 - A_8}, & c_2 &= 1 - A_7 \frac{p_b}{2} - A_6 c_1 \\
c_3 &= \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_2}{A_1} \frac{p_b}{2} + \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_3}{A_1} c_1, & c_4 &= \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_4}{A_1} \frac{p_b}{2} + \frac{1 + \Delta_m}{2 + \Delta_m} \frac{A_5}{A_1} c_1
\end{aligned} \tag{28}$$

I. tip ve II. tip değiştirilmiş Bessel fonksiyonlarına genelde silindirik geometriye sahip problemlerde karşılaşılır. Bu fonksiyonlar değiştirilmiş Bessel diferansiyel denkleminin

$$\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} - \left(1 + \frac{k^2}{r^2}\right) w = 0 \text{ çözümleridir (Abramowitz ve Stegun, 1948).}$$



### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, sıkıştırılmayan mikrogermeli bir akışkan için halka kesitli bir kanal içinde genelleştirilmiş Couette akımı ele alınmış ve hız, mikro açısız hız ve mikro genleme alanlarına ait tam analitik çözümler bulunarak, parametrelerin çeşitli değerleri için grafik olarak sunulmuştur.

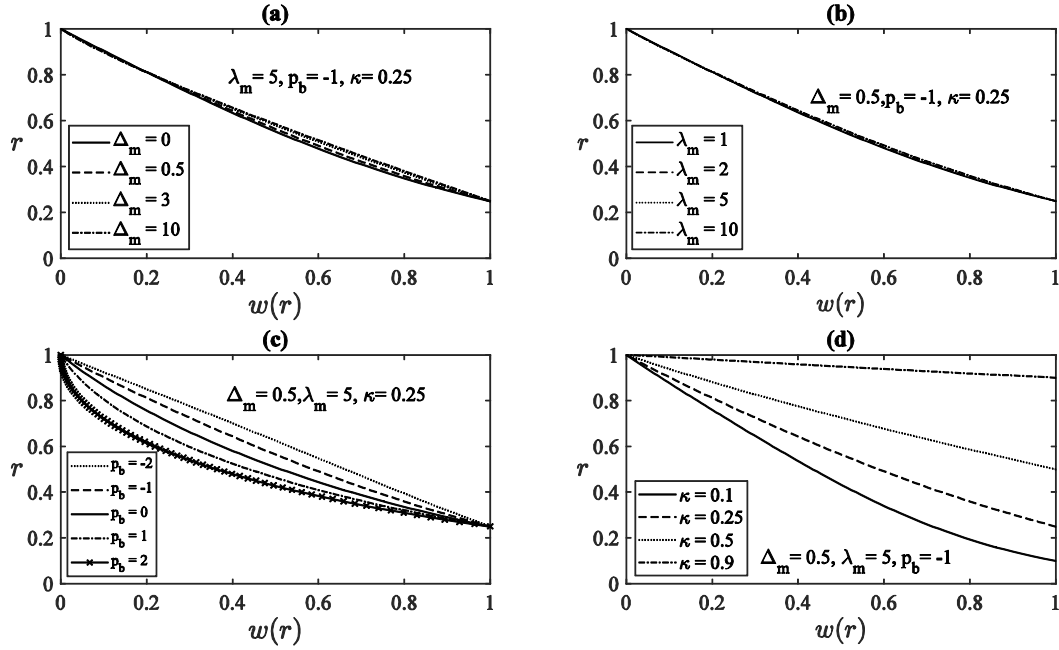
(25), (26) ve (27) numaralı denklemlerde  $\Delta_m = \lambda_m = \lambda_n = 0$  olarak alınırsa Newtonian bir akışkan için çözümler elde edilir.  $\lambda_n = 0$  durumu ise mikropolar bir akışkanın çözümlerine karşılık gelmektedir. Eringen (2001) küçük damarlar içinde kan akışını mikrogermeli bir akışkan kullanarak modellemiş ve sabit bir basınç farkı altındaki akışını incelemiştir. Elde etmiş olduğu teorik hız değerlerini Goldsmith ve Marlow (1979) tarafından yapılan deneysel çalışma ile mukayese etmiştir. Mevcut çalışmada benzer hız profilleri elde edilmesine karşın geometrinin farklı olması, boyutsuzlaştırmada kullanılan farklı karakteristik büyüklükler ve farklı akış parametreleri nedeniyle doğrudan bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Bununla beraber, halka kesitli bir kanalda, yazarın bilgisi dahilinde mikrogermeli akışkanlar ile ilgili deneysel çalışma bulunmamaktadır. Yine farklı bir geometride (paralel iki levha arasında) mikrogermeli bir akışkanın kayma akışı problemi Demir (2017) tarafından kayma sınır şartlarını kullanarak incelemiştir. Benzer sebeplerden dolayı mevcut çalışmayı yine doğrudan karşılaştırmak mümkün değildir. Ancak mevcut çalışma ve Demir (2017) tarafından yapılan çalışma karşılaştırıldığında; mikropolar parametreler  $\Delta_m$  ve  $\lambda_m$  nin arttıkça, her iki çalışmada da hem hız hem de mikro açısız değerlerinin arttığı, mikro genleme alanının ise mikro genleme parametresi  $\lambda_n$  ile arttığı sonucuna varılmıştır.

Şekil 2 hız alanının akış parametreleri ile değişimini göstermektedir. Şekil 2 (a)' da diğer parametreler sabit tutularak, mikropolar parametre  $\Delta_m$  in arttıkça çözümün Newtonian bir akışkan için olan çözümden ( $\Delta_m = 0$  durumu) gittikçe uzaklaştığı görülmektedir. Örneğin;  $r = 0.5$  değeri için,  $\Delta_m$  in arttıkça hız alanının da arttığı gözlemlenmektedir. Bu artış, mikro akışkanların klasik Newtonian akışkanlardan farklı davrandığını ve daha yüksek hız değerlerine ulaşabildiğini göstermektedir. Benzer durumun mikropolar parametre  $\lambda_m$  içinde geçerli olduğu Şekil 2 (b)' de görülmektedir. Mikropolar parametre  $\lambda_m$  arttıkça hız alanında arttığı gözlemlenmektedir. Mikropolar parametreler; denklem (23) te gösterildiği gibi, Eringen'in mikro akışkan teorilerinde karşılaşılan ilave viskozite katsayıları ile ilgili boyutsuz sayılardır. Literatürde bu katsayılarla ilgili deneysel çalışmalar mevcut değildir. Bu nedenle bu çalışmada da bu katsayılar için varsayımsal değerler kullanılmıştır. Ancak bu katsayıların sürekli ortam yaklaşımından ne kadar uzaklaştığını gösterdikleri açıktır. Bu parametreler büyüdükçe akışkanın mikro hareketlerinin makro hareketi üzerine etkilerinin arttığı ve klasik Newtonian akışkan teorisinden önemli ölçüde farklılıklar oluştuğu gözlemlenmektedir.

Şekil 2 (c) diğer parametreler sabit tutularak, hız alanının boyutsuz basınç parametresi  $p_b$  ile değişimini göstermektedir. Boyutsuz basınç parametresinin negatif değerlerinin akışkanın  $z$  ekseninin pozitif doğrultusunda hareket etmesine neden olduğu unutulmamalıdır.  $p_b = 0$  durumu ise; halka

kesitli kanalın iki ucu arasında basınç farkı olmadığı durumu göstermektedir. Bu durumda akışkanın hareketi yalnızca içteki silindirin çekilmesinden kaynaklanmaktadır. Basınç farkı mutlak değerce arttırıldıkça, negatif değerler için, plakanın  $z$  ekseninin pozitif doğrultusunda çekilmesi durumuna katkıda bulunarak hızı arttırmakta, pozitif değerler için ise hızı azaltmaktadır. Bununla birlikte, pozitif işaretli boyutsuz basınç parametresinin belirli bir değerinden sonra; basınç farkı, plakanın çekilmesine galip gelerek geri akımlara neden olmaktadır ( $p_b = 2$  durumu).

Şekil 2 (d) ise, diğer parametreler sabit tutularak hız alanının  $\kappa$  ile değişimini göstermektedir.  $\kappa$  içteki silindirin yarıçapının, dıştaki silindirin yarıçapına oranını göstermektedir.  $\kappa$  değeri büyüdükçe halka kesitli kanal daralmakta ve hız alanı doğrusal profile yaklaşmaktadır. Halka kesitli kanal daraldıkça hız değeri içteki silindirin hızına yaklaşarak daha yüksek değerler almaktadır ve dıştaki silindire yaklaştıkça kaymama şartına uygun olarak 0 değerine düşmektedir. Bu değişim yüksek  $\kappa$  değerlerinde daha hızlı olmaktadır.

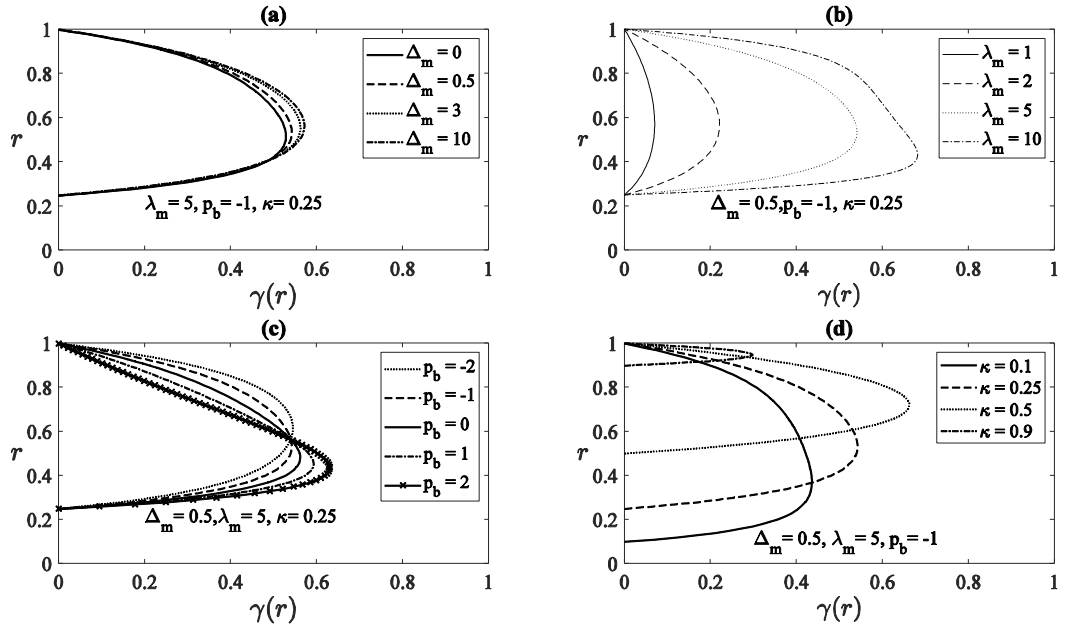


**Şekil 2.** Hız dağılımı: (a)  $\Delta_m$  ile değişimi (b)  $\lambda_m$  ile değişimi (c) boyutsuz basınç parametresi  $p_b$  ile değişimi (d) silindirlerin yarıçap oranı  $\kappa$  ile değişimi.

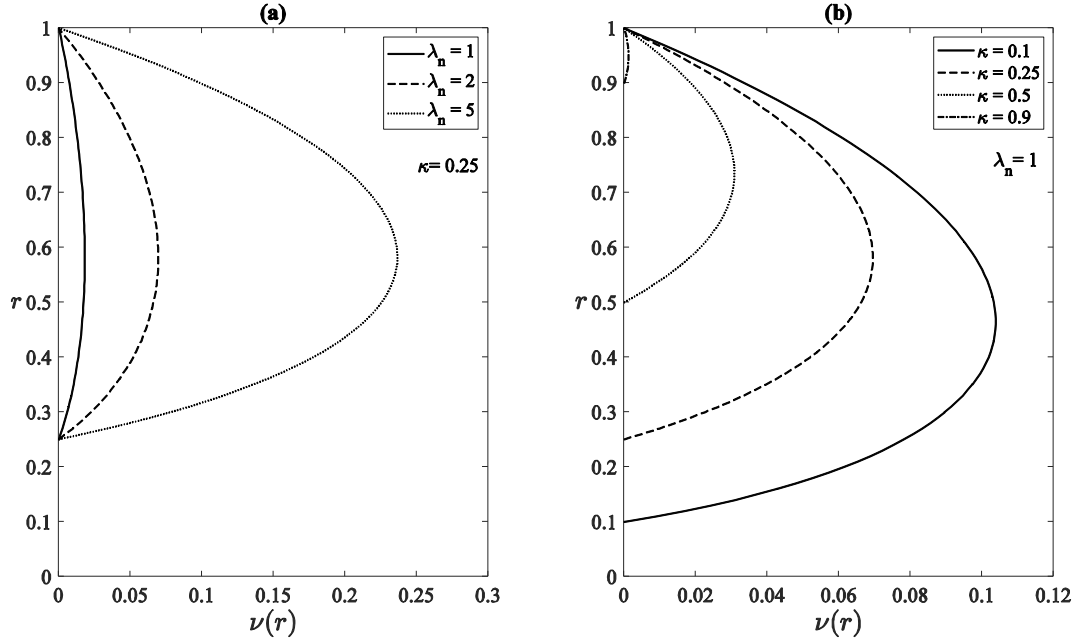
Şekil 3 mikro açısız hız alanının akış parametreleri ile değişimini göstermektedir. Mikro açısız hız alanı, akışkan parçacıklarının  $\theta$  doğrultusundaki mikroskobik dönme hızlarını göstermektedir. Şekil 3 (a) ve (b) de mikropolar parametreler  $\Delta_m$  ve  $\lambda_m$  in arttıkça mikro açısız hız alanının arttığı görülmektedir. Örneğin; Şekil 3 (a) da  $r=0.6$  değerinde, mikro açısız hız alanı en yüksek değerini  $\Delta_m = 10$  olduğunda, en düşük değerini ise,  $\Delta_m = 0$  olduğunda almaktadır. Şekil 3 (b) göz önüne alındığında ise, mikro açısız hız en küçük değerini  $\lambda_m = 1$  de alırken, en büyük değerini  $\lambda_m = 10$  olduğunda almaktadır. Mikro açısız hız kanalın orta bölgelerinde en yüksek değerini almakta ve kanal çeperlerinde sıkı yapılaşma koşuluna uygun olarak 0 değerini almaktadır.

Şekil 3 (c), mikro açısız hız alanının boyutsuz basınç parametresi  $p_b$  ile değişimini göstermektedir. Boyutsuz basınç parametresinin negatif değerlerinde, içteki silindire yakın bölgelerde basınç farkı arttırıldıkça mikro açısız hızın azaldığı, dıştaki silindire yakın bölgelerde ise, mikro açısız hızın arttığı gözlenmektedir. Yani, basınç farkı içteki silindire yakın bölgelerde akışkan parçacıklarının dönme hızlarını sınırlarken, dış silindire yakın bölgelerde dönme hızlarına katkıda bulunduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Boyutsuz basınç parametresinin pozitif değerlerinde ise, içteki silindire yakın bölgelerde mikro açısız hızın arttığı, dıştaki silindire yakın bölgelerde azaldığı gözlenmiştir.

Şekil 3 (d) ise,  $\kappa$  değeri büyüdükçe daralan kanalda mikro açısız hız alanının değişimini göstermektedir. Mikro açısız hız, halka kesitli kanal daraldıkça artmakta ancak belli bir  $\kappa$  değerinden sonra mikro açısız hızın azaldığı gözlemlenmektedir. Buradan kanalın daraldıkça akışkan parçacıklarının dönme hızlarını düşürdüğü sonucuna ulaşılır.



**Şekil 3.** Mikro açısız hız dağılımı: (a)  $\Delta_m$  ile değişimi (b)  $\lambda_m$  ile değişimi (c) boyutsuz basınç parametresi  $p_b$  ile değişimi (d) silindirlerin yarıçap oranı  $\kappa$  ile değişimi.



Şekil 4. Mikro genleme dağılımı: (a)  $\lambda_n$  ile değişimi (b) silindirlerin yarıçap oranı  $\kappa$  ile değişimi.

Şekil 4 mikro genleme alanının akış parametreleri ile değişimini göstermektedir. Şekil 4 (a)'da mikro genleme alanının mikro genleme parametresi  $\lambda_n$  ile arttığı görülmektedir. Mikro genleme alanı, akışkan parçacıklarının deformasyonu (şişme/sönme) ile ilgilidir (Eringen, 2001). Şekil 4 (a) mikro genleme parametresinin büyük olduğu durumlarda akışkan parçacıklarının daha çok deformasyona uğradıklarını göstermektedir.

Şekil 4 (b) ise,  $\kappa$  değeri ile mikro genleme alanı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Halka kesitli kanal daraldıkça mikro genleme alanının azaldığı yani akışkan parçacıklarının daha az deforme olduğu gözlenmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada mikrogermeli bir akışkanın halka kesitli bir kanaldaki akışı incelenmiştir. İlgili alan denklemleri yapılan kabuller altında uygun sınır şartları kullanılarak analitik olarak çözülmüştür. Hız, mikro açısız hız ve mikro genleme alanlarına ait analitik çözümler, fiziksel parametrelerin çeşitli değerleri için grafik olarak sunulmuştur. Mikropolar parametreler  $\Delta_m$  ve  $\lambda_m$  in arttıkça hız ve mikro açısız hız alanlarının arttığı, mikro genleme alanının da mikro genleme parametresi  $\lambda_n$  ile arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, akışkan parçacıklarının dönme ve deformasyonu gibi mikroskobik hareketlerinin akışkanın makroskobik hareketine katkıda bulunduğunu ve akışkanın hızında klasik Newtonian teori ile farklılıklar oluştuğunu göstermektedir. Bu farklılıklar mikropolar parametreler arttıkça yani; sürekli ortam yaklaşımından uzaklaşılıp daha önemli hale gelmektedir. Bu sebeple, sürekli ortam yaklaşımının geçerliliğini yitirmeye başladığı durumlarda akışkanın mikro hareketlerini göz önüne almak, deneyler ile daha uyumlu sonuçlar bulunabilmesine olanak

sağlayabilir. Ancak, mikro akışkan modellerinin teorik modeller olduğu göz önünde bulundurulmalı ve biyolojik akışkanlar, polimer eriyikler ve süspansiyonlar gibi karmaşık akışkanlar için mikro akışkan modellerinin geçerliliği deneysel verilerle desteklenmelidir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

### **Kaynakça**

- Abramowitz M., Stegun IA. (ed.) Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables. US Government printing office, 1948.
- Akbar NS., Rafiq M., Muhammad T., Alghamdi M. Electro osmotically interactive biological study of thermally stratified micropolar nanofluid flow for copper and silver nanoparticles in a microchannel. *Scientific Reports* 2024; 14(1): 518.
- Ariman T. Fluids with microstretch. *Rheologica Acta* 1970; 9: 542-549.
- Ariman T. On the analysis of blood flow. *Journal of Biomechanics* 1971; 4(3): 185-191.
- Aydemir NU., Venart JES. Flow of a thermomicropolar fluid with stretch. *International Journal of Engineering Science* 1990; 28(12): 1211-1222.
- Aydemir NU. Free-convection boundary-layer flow of a thermomicropolar fluid with stretch. *International Journal of Engineering Science* 1990; 28(12): 1223-1233.
- Demir MS. Shear flow of a microstretch fluid with slip. 3rd International Conference on Environmental Science and Technology (ICOEST), 19-23 Ekim 2017, sayfa no:85-89, Budapeşte.
- El-Sapa S. Effect of magnetic field on a microstretch fluid drop embedded in an unbounded another microstretch fluid. *European Journal of Mechanics-B/Fluids* 2021; 85: 169-180.
- Eringen AC. Simple of micro-fluids. *International Journal of Engineering Science* 1964; 2(2): 205-217.
- Eringen AC. Theory of micropolar fluids with stretch. *International Journal of Engineering Science* 1969; 7(1): 115-125.
- Eringen AC. Theory of thermo microstretch fluids and bubbly liquids. *International Journal of Engineering Science* 1990; 28(2): 133-143.
- Eringen AC. *Microcontinuum field theories I: Foundations and solids*. NY: Springer; 1999.
- Eringen AC. *Microcontinuum field theories II: Fluent media*. NY: Springer-Verlag; 2001.
- Goldsmith HL., Marlow JC. Flow behavior of erythrocytes, *Journal of Colloid and Interface Science* 1979; 71(2): 383-407.

- Hoyt JW., Fabula AG. The effect of additives on fluid friction. California: Technical report: US Naval Ordnance Test Station; 1964.
- Moosaie A., Atefi G. Microstretch continuum mechanical description of concentrated suspension flow. *Journal of Dispersion Science and Technology* 2009; 30(1): 124-130.
- Narasimhan MNL. A mathematical model of pulsatile flows of microstretch fluids in circular tubes. *International Journal of Engineering Science* 2003; 41(3-5): 231-247.
- Patil PM., Goudar B., Momoniat E. Magnetized bioconvective micropolar nanofluid flow over a wedge in the presence of oxytactic microorganisms. *Case Studies in Thermal Engineering* 2023; 49: 103284.
- Philip J. Magnetic nanofluids (Ferrofluids): Recent advances, applications, challenges, and future directions. *Advances in Colloid and Interface Science* 2023; 311: 102810.
- Sherief HH., Faltas MS., Ashmawy EA. Galerkin representations and fundamental solutions for an axisymmetric microstretch fluid flow. *Journal of Fluid Mechanics* 2009; 619: 277-293.
- Sherief HH., Faltas MS., Ashmawy EA. Fundamental solutions for axi-symmetric translational motion of a microstretch fluid. *Acta Mechanica Sinica* 2012; 28: 605-611.
- Sherief HH., Faltas MS., El-Sapa S. Slow motion of a slightly deformed spherical droplet in a microstretch fluid. *Microsystem Technologies* 2018; 24(8): 3245-3259.
- Slayi S., Ashmawy EA. Unsteady flow of a microstretch fluid through state space approach with slip conditions. *Applied Mathematics and Information Sciences* 2018; 12(4): 841-850.

## Sınır Noktasında Beta Türevli Sturm-Liouville Operatörlerinin Sınıflandırılması

Yüksel YALÇINKAYA<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Mathematics Teacher, Ministry of National Education, 32260 Isparta, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-1633-8343>

\*Sorumlu yazar: matyüksel@hotmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.03.2024

Kabul tarihi: 22.07.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Sınır noktası durumu

Tekil Sturm-Liouville operatörü

Beta-Sturm-Liouville problemi

Sınır noktası sınıflandırması

### ÖZ

Çalışmada tekil Beta-Sturm-Liouville operatörü

$$\Omega(y) = -T_{\beta}(f(t) T_{\beta} y(t)) + g(t)y(t), \quad [0, \infty)$$

ele alınmıştır. Bu operatör için Weyl'in sınır noktası sınıflandırmasına yönelik bir kriter verilmiştir. Bu amaçla öncelikle beta hesabının temel kavramları ve bazı teoremler verilmiştir. Everit yöntemi (1966) kullanılarak Beta-Sturm-Liouville denkleminin sınır noktası durumunda hangi koşullar altında olacağı gösterilmiştir.

## Classification of Sturm-Liouville Operators with Beta-Derivatives at the Limit-Point

### Research Article

#### Article History:

Received: 24.03.2024

Accepted: 22.07.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Limit-point case

Singular Sturm-Liouville operator

Beta-Sturm-Liouville problem

Limit-point classification

### ABSTRACT

The singular Beta-Sturm-Liouville operator

$$\Omega(y) = -T_{\beta}(f(t) T_{\beta} y(t)) + g(t)y(t) \text{ on } [0, \infty)$$

was taken into consideration in this study. A criterion for Weyl's limit-point classification was given for this operator. For this purpose, firstly the basic concepts of beta calculation and some theorems were given. using Everit's method (1966), it was shown under what conditions the Beta-Sturm-Liouville equation will be in its limit-point case.

**To Cite:** Yalçinkaya Y. Classification of Sturm-Liouville Operators with Beta-Derivatives at the Limit-point. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 45-56.

## 1. Introduction

It is known that fractional differential equations emerged as a result of the correspondence between Newton and Leibnitz towards the end of the 17th century. Today, it is used in fields such as bio-engineering, electromagnetic theory, mechanics, physics and control theory, and analytics (Miller and Ross, 1993; Oldham and Spanier, 1974; Ross, 1975; Podlubny, 1999). There are many studies in the literature about fractional derivatives, and new studies are still being conducted on the subject. Different in 1730, L. Euler first defined fractional derivatives using the gamma function, and later Reimann-Liouville and Caputo expanded this definition. Beta derivatives are a generalization of classical derivatives that arise in the context of fractional calculus. Fractional calculus deals with derivatives and

integrals of non-integer order, providing a powerful mathematical tool to describe systems with memory and long-range interactions. Beta derivatives find applications in various fields, including physics, engineering, signal processing, and finance. They provide a way to model complex phenomena involving memory effects and non-local interactions, offering a more accurate description of real-world systems compared to classical derivatives. Additionally, they extend the toolbox of fractional calculus, enabling the analysis of a broader class of problems. During this period, many researchers have carried out studies in this field (Levinson, 1949; Atangana et al., 2016; Martinez et al., 2018; Atangana and Algahtani, 2021; Fadhil et al., 2022).

In this context, Sturm-Liouville operators are differential operators typically encountered in the study of ordinary differential equations. These operators involve a second-order linear differential equation of the form:

$$L[y] = \frac{d}{dt}(p(t)\frac{dy}{dt}) + q(t)y = \lambda w(t) \quad (1)$$

where  $y$  is a function,  $p(t)$ ,  $q(t)$ , and  $w(t)$  are given functions, and  $\lambda$  is a parameter. These operators often arise in various fields of science and engineering, including physics, where they represent systems exhibiting wave-like behaviour, among others.

Baskaya (2024) calculated the asymptotic expansion of the eigenparameter by considering the single boundary condition Sturm-Liouville problem with an eigenparameter. He also showed that the problem also has a symmetric single-well potential, which is an important function in quantum mechanics. In the study by Kabatas (2023), the asymptotic behaviors of the solutions of Sturm-Liouville problems related to polynomially eigenparameter dependent boundary conditions were obtained when the potential function was a real-valued  $L_1$ -function in the range  $(0, 1)$ . Additionally, asymptotic formulas are given for the derivatives of the solutions. In this study, asymptotic estimates of eigenvalues are examined for regular Sturm-Liouville problems with eigenvalue parameters at all boundary conditions with a symmetric single-well potential that is symmetrical to the midpoint of the relevant interval and does not increase in the first half-region.

The term "limit-point classification" in this context likely refers to the study of the properties and classification of the limit points of solutions to Sturm-Liouville equations when the operators are extended to include beta-derivatives. Beta-derivatives are fractional derivatives generalizing the classical derivatives and have applications in various fields such as fractional calculus and mathematical physics.

The classification of limit points is crucial in understanding the behaviour of solutions to Sturm-Liouville equations. It plays a significant role in determining the existence and uniqueness of solutions, as well as in studying their qualitative properties. This area of research involves advanced techniques from functional analysis, spectral theory, and fractional calculus, among others, and it aims to provide a deeper understanding of the behaviour of solutions to differential equations with fractional derivatives.



Zhaowen et al. (2020), the classification of the limit point state and the limit circle was examined by examining the  $2\alpha$ -order coherent fractional Sturm-Liouville operator, two interval criteria of the limit-point state were obtained, and examples showing the main results were presented (Zhaowen Zheng and Huixin Liu). Braeutigam (2017), Sturm-Liouville matrix operators in  $L_n^2(I), I[0, \infty)$  space were examined and the conditions that enable the boundary point situation to be realized for the minimum closed symmetric operator produced by  $l^k[y]$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) on these matrices and the matrix-valued distribution. They obtained the boundary point conditions for Sturm-Liouville operators with their coefficients. Mirzoev (2014) the well-developed spectral theory of second-order quasi-differential operators was applied to Sturm-Liouville operators with dispersion coefficients to form the Titchmarsh-Weyl theory for such operators. In the study, coefficients that provide limit point or limit circle situations were found. In the study, we examine the eigenvalues of self-adjoint Sturm-Liouville problems for singular problems with a singular endpoint in the limit-point situation (Zhang et al., 2014). The Sturm-Liouville problem with a conformable fractional was studied by Allahverdiev et al. (2021), who also provided a criterion for classifying Sturm-Liouville conformable fractional operators in singular cases at the limit point.

In this work, the fractional beta Sturm-Liouville operator was examined and the criterion for limit-point classification in the singular case was given for this operator. Materials and methods of (Hardy et al., 1934; Everit, 1966; Everit, 1972; Allahverdiev et al., 2021) were used to prove our results. Limit-point and limit-circle situations are active research topics in singular Sturm-Liouville problems. Therefore, the results obtained in classical Sturm-Liouville problems should be examined in Beta-Sturm-Liouville problems. Using Everit's method (1966), Theorem 2.1 (below) shows under what conditions singular Beta-Sturm-Liouville problems will be in the limit-point case.

**Definition 1.1:** (Atangana et al., 2016; Martinez et al., 2018) Let  $\beta$  be a positive number and  $\beta \in (0, 1)$ . A function  $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  the  $\beta$  derivative of  $f(t)$  of order  $\beta$  is given

$$T_\beta f(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f\left(t + \varepsilon \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{1-\beta}\right) - f(t)}{\varepsilon}$$

and  $(T_\beta f)(t) = \frac{d^\beta f(t)}{dt^\beta}$ .

**Definition 1.2:** Let  $f: [a, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  be a function. Then the beta-integral of  $f$  is:

$$I_\beta^a(f(t)) = \int_a^t \left(x + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta-1} f(x) dx$$

where  $0 < \beta \leq 1$  and  $(T_\beta^b(f(t))) = \lim_{t \rightarrow b^-} (T_\beta^b(f(t)))$ .

**Theorem 1.3: (Martinez et al., 2018)** For  $t > 0$  and  $0 < \beta \leq 1$ , let  $f(t)$  and  $g(t)$  be  $\beta$ -differentiable functions. The following properties are talked about:

- i.  $T_\beta(\lambda f(t) + \delta g(t)) = \lambda T_\beta f(t) + \delta T_\beta g(t)$  for all  $\lambda, \delta \in \mathbb{R}$
- ii.  $T_\beta(f(t)g(t)) = f(t)T_\beta g(t) + g(t)T_\beta f(t)$
- iii.  $T_\beta\left(\frac{f(t)}{g(t)}\right) = \frac{f(t)T_\beta g(t) - g(t)T_\beta f(t)}{g^2(t)}$
- iv.  $T_\beta f(t) = \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{1-\beta} \frac{df(t)}{dt}$ .

**Theorem 1.4:** Let  $f, g: [0, b] \rightarrow \mathbb{R}$  be  $\beta$ -differentiable functions. Then, the following relation holds

$$\int_0^b f(t)T_\beta g(t)d_\beta t = f(t)g(t)|_0^b - \int_0^b g(t)T_\beta f(t) d_\beta t. \quad (2)$$

**Proof:** By Theorem 1.3, we obtain

$$\begin{aligned} & \int_0^b f(t)T_\beta g(t)d_\beta t + \int_0^b g(t)T_\beta f(t) d_\beta t \\ &= \int_0^b f(t) \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta-1} g'(t) d_\beta t \\ &+ \int_0^b g(t) \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta-1} f'(t) d_\beta t \\ &= f(t)g(t)|_0^b - \int_0^b g(t) \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta-1} f'(t) d_\beta t \\ &+ \int_0^b g(t) \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta-1} f'(t) d_\beta t \\ &= f(b)g(b) - f(0)g(0). \end{aligned}$$

Let

$$L_\beta^2(0, b) = \left\{ \begin{array}{l} f: \left(\int_0^b |f(t)|^2 d_\beta t\right)^{1/2} \\ \left(\int_0^b |f(t)|^2 \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta-1} d_\beta t\right)^{1/2} < \infty \end{array} \right\}$$

Then  $L_\beta^2(0, b)$  is a Hilbert space endowed with the inner product

$$\langle f, g \rangle = \int_0^b f(t)\overline{g(t)}d_\beta t, \quad f, g \in L_\beta^2(0, b).$$

The  $\beta$ -Wronskian of  $f$  and  $g$  is defined by

$$W_{\beta}(f, g)(t) = p(t)[f(t)T_{\beta}g(t) - g(t)T_{\beta}f(t)], \quad t \in [0, b].$$

**Definition 1.5:** (Martinez et al., 2018) Two functions  $f, g$  will be said to be effectively proportional if there are constants  $\theta_1, \theta_2$  not both zero, such that  $\theta_1 f(t) = \theta_2 g(t)$ . Basically, any function is proportional to a null function.

**Theorem 1.6:** i) If all the functions are effectively proportional and, if  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  are positive and  $\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n = 1$  then

$$\int |f^{\sigma_1} g^{\sigma_2} \dots I^{\sigma_n}| d_{\beta}t < \left( \int |f| d_{\beta}t \right)^{\sigma_1} \left( \int |g| d_{\beta}t \right)^{\sigma_2} \dots \left( \int |I| d_{\beta}t \right)^{\sigma_n}$$

unless one of the functions is null.

ii) If  $s > 1$  and  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = 1$  then

$$\int |f(t)g(t)| d_{\beta}t < \left( \int |f|^s d_{\beta}t \right)^{\frac{1}{s}} \left( \int |g|^{s'} d_{\beta}t \right)^{\frac{1}{s'}}$$

will result unless (a)  $f^s$  and  $g^{s'}$  are functionally proportionate or (b)  $fg$  is null.

**Proof:** (Martinez et al., 2018), because the proofs are unchanged except for a few minor notational adjustments.

**Theorem 1.7:** If  $\rho > 1$ ,  $f \in L_{\beta}^{\rho}(0, a)$  and

$$F(t) = \int_0^t |f(x)| d_{\beta}x,$$

then we have

$$F(t) = O \left[ \frac{\left( t + \frac{1}{\Gamma(\beta)} \right)^{\frac{\rho}{\rho'}}}{\beta} \right],$$

for small  $t$ .

**Proof:** Theorem 1.6 indicates that

$$F^\rho \leq \int_0^t |f(x)|^\rho d_\beta x \left( \int_0^t d_\beta x \right)^{\rho-1} = \frac{\left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\beta(\rho-1)}}{\beta} \int_0^t |f(x)|^\rho d_\beta x$$

and the second factor have a tendency toward 0.

**Theorem 1.8:** If  $\rho > 1$  and  $f \in L_\beta^\rho(0, a)$  then  $F(t) = O\left[\frac{\left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\frac{\beta}{\rho}}}{\beta}\right]$  both for small and for large  $t$ .

**Proof:** Theorem 1.7 yields the proof for small  $t$ . We demonstrate the outcome for large  $t$ . Select  $\tau$  such that

$$\int_\tau^\infty |f(x)|^\rho d_\beta x < \varepsilon^\rho$$

and suppose  $t > \tau$ . Then, we obtain

$$\begin{aligned} (F(t) - F(\tau))^\rho &= \left( \int_\tau^\infty |f| d_\beta x \right)^\rho \\ &\leq \frac{\left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)} - \tau\right)^{\beta(\rho-1)}}{\beta} \int_\tau^t |f(x)|^\rho d_\beta x \\ &< \frac{\varepsilon^\rho \left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)} - \tau\right)^{\beta(\rho-1)}}{\beta}, \\ F(t) &< F(\tau) + \varepsilon \frac{\left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\frac{\beta}{\rho}}}{\beta} \\ &< 2\varepsilon \frac{\left(t + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^{\frac{\beta}{\rho}}}{\beta} \end{aligned}$$

for sufficiently large  $t$ .

## 2. Main Results and Discussion

The fractional singular beta-Sturm-Liouville expression

$$\Omega(y) = -T_\beta \left( f(t) T_\beta y(t) \right) + g(t)y(t) \text{ on } [0, \infty) \quad (3)$$

given below, including real valued  $f$  and  $g$  functions, will be examined:

- i.  $g \in L_\beta^2[0, b]$  for all  $b > 0$ ,
- ii.  $f$  is absolutely continuous on  $[0, b]$  for all  $b > 0$ ,
- iii.  $f(t) > 0$  for all  $t \in [0, \infty)$ .

The set  $\mathcal{D}$  is defined by:  $y \in \mathcal{D}$  if

- i.  $y \in L_\beta^2[0, \infty)$ ,
- ii.  $T_\beta y$  is absolutely continuous on  $[0, b]$  for all  $b > 0$ ,
- iii.  $\Omega(y) \in L_\beta^2[0, \infty)$ ,
- iv.  $y(0) = 0$ .

By Theorem 1.4, for  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$  The Green's formula that we have is

$$\int_0^\infty \Omega(z_1)(t) \overline{z_2(t)} d_\beta t - \int_0^\infty z_1(t) \overline{\Omega(z_2)(t)} d_\beta t = [z_1, z_2](\infty) - [z_1, z_2](0), \quad (6)$$

where

$$[z_1, z_2](t) = f(t) \{ z_1(t) \overline{T_\beta z_2(t)} - T_\beta z_1(t) \overline{z_2(t)} \}, \quad t \in [0, \infty). \quad (7)$$

**Theorem 2.1:** *If the function  $g$  is bounded below on  $[0, \infty)$  and*

$$\int_0^\infty \{f(t)\}^{-\frac{1}{2}} d_\beta t < \infty, \quad (8)$$

*then the differential operator  $\Omega$  defined by (3) is in the limit-point case at infinity.*

**Proof:** It is known, (Everit, 1966 and Titchmarsh, 1962) that  $\Omega$  is the limit point at infinity if and only if

$$[z_1, z_2](\infty) = 0 \quad (9)$$

for all  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$ . Therefore, it suffices to demonstrate that, for every  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$  (where  $z_1$  and  $z_2$  are real-valued functions)

$$\lim_{b \rightarrow \infty} f(b)z_1(b)T_\beta z_2(b) = 0. \quad (10)$$

We can presume, without losing generality, that there exists a positive constant  $\xi$  such that

$$g(t) \geq \xi > 0 \text{ for all } t \in [0, \infty). \quad (11)$$

From (11), for all  $b > 0$  we get

$$G(b) = \int_0^b g(t) d_\beta t \geq \xi \frac{\left(b + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^\beta}{\beta} \quad (12)$$

implies that

$$[G(b)]^{-\frac{1}{2}} \leq \left[ \xi \frac{\left(b + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^\beta}{\beta} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (b > 0). \quad (13)$$

The result of integration by parts (2) is

$$\int_0^b \{f(t)T_\beta z_1(t)T_\beta z_2(t) + g(t)z_1(t)z_2(t)d_\beta t\} = f(t)z_1(t)T_\beta z_2(t)|_0^b + \int_0^b \Omega(z_2(t)z_1(t))d_\beta t \quad (14)$$

for all  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$  and for all  $b > 0$ .

If we take  $z_1 = z_2 \in \mathcal{D}$  in (14), then we get

$$\int_0^b \left\{ f(t) \left( T_\beta z_1(t) \right)^2 + g(t) z_1^2(t) \right\} d_\beta t = f(b) z_1(b) T_\beta z_1(b) + \int_0^b \Omega(z_1(t) z_1(t)) d_\beta t.$$

It follows from (4) and (11) that the left-hand integrand is non-negative.  $L_\beta^2[0, \infty)$  is the integrand on the right in equation (5). If  $f(t) \left( T_\beta z_1(t) \right)^2 + g(t) z_1^2(t) \notin L_\beta^1[0, \infty)$ , then  $f(b) z_1(b) T_\beta z_1(b) \rightarrow \infty$ , as  $b \rightarrow \infty$ . This is not possible because, for every large  $b$ ,  $T_\beta z_1(b)$  and  $z_1(b)$  would have the same sign, and  $z_1$  could not then belong to  $L_\beta^2[0, \infty)$ . This defies the hypothesis that  $z_1 \in \mathcal{D} \subset L_\beta^2[0, \infty)$ . Therefore, we conclude that

$$f(t)^{\frac{1}{2}} T_\beta z_1(t) \in L_\beta^2[0, \infty), \quad g(t)^{\frac{1}{2}} z_1(t) \in L_\beta^2[0, \infty) \quad (15)$$

for all  $z_1 \in \mathcal{D}$ . From (14), we deduce that, for all  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$

$$\lim_{b \rightarrow \infty} f(b) z_1(b) T_\beta z_2(b) \quad (16)$$

exists and is finite.

If  $\Phi \in L^2_\beta[0, \infty)$  then  $\Phi \in L^1_\beta[0, b]$ , it follows from Theorem 1.8 that

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \left( \frac{\left( b + \frac{1}{\Gamma(\beta)} \right)^\beta}{\beta} \right)^{-\frac{1}{2}\beta} \int_0^b |\Phi(t)| d_\beta t = 0. \quad (17)$$

For all  $b \geq 0$  define

$$F(b) = \int_0^b \{f(t)\}^{-\frac{1}{2}} d_\beta t. \quad (18)$$

By (8), we get

$$\lim_{b \rightarrow \infty} F(b) = M, \text{ where } 0 < M < \infty. \quad (19)$$

From (2), we conclude that

$$\int_0^b f(t)^{\frac{1}{2}} T_\beta z_2(t) d_\beta t = F(b) f(b) T_\beta z_2(b) + \int_0^b F(t) \Omega(z_2(t)) d_\beta t - \int_0^b F(t) g(t) z_2(t) d_\beta t.$$

If the result multiply by  $\{G(b)\}^{-\frac{1}{2}}$  take into account each of the individual terms. It follows from (13), (15) and (17) that

$$\begin{aligned} \{G(b)\}^{-\frac{1}{2}} \int_0^b f(t)^{\frac{1}{2}} T_\beta z_2(t) d_\beta t &= O \left( \left( \frac{\left( x + \frac{1}{\Gamma(\beta)} \right)^\beta}{\beta} \right)^{-\frac{\beta}{2}} \int_0^b f(t)^{\frac{1}{2}} |T_\beta z_2(t)| d_\beta t \right) \\ &= o(1) \text{ as } b \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Similarly, using (13), (15), and (17) as  $b \rightarrow \infty$  we get

$$\{G(b)\}^{-\frac{1}{2}} \int_0^b F(t) \Omega(z_2(t)) d_\beta t = O \left( M \left( \frac{\left( x + \frac{1}{\Gamma(\beta)} \right)^\beta}{\beta} \right)^{-\frac{\beta}{2}} \int_0^b |\Omega z_2(t)| d_\beta t \right) = o(1).$$

Let  $b' > 0$  be fixed. Then, for all  $b > b'$  we have

$$\begin{aligned}
\{G(b)\}^{-\frac{1}{2}} \int_0^b F(t) g(t) z_2(t) d_\beta t &= \{G(b)\}^{-\frac{1}{2}} \left\{ \int_0^{b'} F(t) g(t) z_2(t) d_\beta t + \int_{b'}^b F(t) g(t) z_2(t) d_\beta t \right\} \\
&= O\left(b^{-\frac{1}{2}}\right) + O\left(M \left\{ G(b)^{-1} \int_{b'}^b g(t) d_\beta t \int_{b'}^b g(t) z_2^2(t) d_\beta t \right\}^{\frac{1}{2}}\right) \\
&= o(1) + O\left(M \left\{ \int_{b'}^b g(t) z_2^2(t) d_\beta t \right\}^{\frac{1}{2}}\right).
\end{aligned}$$

The left-hand side approaches zero as  $b \rightarrow \infty$ , as (15) implies.

Hence by (19), we get, for all  $z_2 \in \mathcal{D}$

$$\lim_{b \rightarrow \infty} \{G(b)\}^{-\frac{1}{2}} f(b) T_\beta z_2(b) = 0. \quad (20)$$

Let us consider  $\{G(b)\}^{\frac{1}{2}} z_1$  where  $z_1 \in \mathcal{D}$ ; assume that

$$\liminf_{b \rightarrow \infty} \{G(b)\}^{\frac{1}{2}} z_1(t) > 0. \quad (21)$$

There is a constant  $\mu$ ,  $0 < \mu < \infty$ , such that for all  $t > b_0$  (say) we have  $|z_1(t)|^2 \geq \mu^2 \{G(t)\}^{-1}$ .

Let  $\eta$  be a positive constant depending on  $b_0$  and  $\xi > 0$ . If the equation is multiplied by the positive number  $g(t)$  and integrate over  $[b_0, b]$  and (12) is used,

$$\int_{b_0}^b g(t) |z_1^2(t)| d_\beta t \geq \mu^2 \int_{b_0}^b \frac{g(t)}{G(t)} d_\beta t = \mu^2 \left[ \ln G \left( \frac{\left(x + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^\beta}{\beta} \right) \right] \Big|_{b_0}^b \geq \eta \mu^2 \ln \xi \left( \frac{\left(x + \frac{1}{\Gamma(\beta)}\right)^\beta}{\beta} \right)$$

obtained. This implies that  $g^{\frac{1}{2}} z_1 \notin L_\beta^2[0, \infty)$ . This runs counter to (15). Then there is a series  $\{b_i, i \geq 1\}$ , for which

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \{G(b_i)\}^{\frac{1}{2}} z_1(b_i) = 0. \quad (22)$$



And such that  $b_i \rightarrow \infty$  as  $i \rightarrow \infty$ . From (20) and (22), we deduce that for each pair  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$  there exists a sequence  $\{b_i, i \geq 1\}$  such that

$$\lim_{i \rightarrow \infty} f(b_i)z_1(b_i)T_{\beta}z_2(b_i) = 0.$$

Now that (16) has been satisfied, (10) holds for any for  $z_1, z_2 \in \mathcal{D}$ . The proof is complete.

### 3. Conclusion

A criterion for the limit-point classification of singular cases of Beta-Sturm-Liouville operators was given in the work. To start, the fundamental ideas of beta computation and a few theorems applied in the research were presented. Next, we were provided a criterion for the Beta-Sturm-Liouville operator's limit-point categorization according to Weyl.

### Acknowledgement

I am grateful to the editor for his interest and the referees for their review and insightful comments on this work.

### Conflict of interest

The writer says they have no competing interests.

### References

- Allahverdiev BP., Tuna H., Yalçinkaya Y. Limit-point classification for singular conformable fractional Sturm-Liouville operators. *Turk. J. Math. Comput. Science* 2021; 13(1): 19-24.
- Atangana A., Alqahtani RT. Modelling the spread of river blindness disease via the Caputo fractional derivative and the beta-derivative. *Entropy* 2021; 18(2): 40: 2-14.
- Atangana A., Baleanu D., Alsaedi A. Analysis of time-fractional Hunter–Saxton equation: A model of neumatic liquid crystal. *Open Phys.*, 2016; 14(1): 145-149.
- Baskaya E. Asymptotics of eigenvalues for Sturm-Liouville problem including eigenparameter-dependent boundary conditions with integrable potential. *New Trends in Mathematical Sciences* 2018; 6(3).
- Başkaya E. On the asymptotics of eigenvalues for a Sturm-Liouville problem with symmetric single-well potential. *Demonstratio Mathematica* 2024; 57(1): 20230129.
- Braeutigam IN. Limit-point criteria for the matrix Sturm-Liouville operator and its powers. *Opuscula Mathematica*, 2017; 37(1): 5-19.
- Everitt WN. On the limit-point classification of second-order differential expressions. *J. London Math. Soc.*, 1966; 41: 531-534.
- Everitt WN. On the limit-circle classification of second-order differential expressions. *Quart. J. Math.*, (Oxford) 1972; 2(23): 193-196.

- Fadhal E. Akbulut A., Kaplan M., Awadalla M., Abuasbeh K. Extraction of exact solutions of higher order Sasa-Satsuma equation in the sense of beta derivative. *Symmetry* 2022; 14(11).
- Hardy GH., Littlewood JE., Polya G. *Inequalities*. Cambridge University Press, New York, 1934.
- Kabatas A. Sturm-Liouville Problems with polynomially eigenparameter dependent boundary conditions. *Sakarya University Journal of Science* 2023; 27(6): 1235-1242.
- Levinson N. Criteria for the limit-point case for second-order linear differential operators. *Pest. Mat. Phys.*, 1949; 74: 17-20.
- Martinez YP., Gomez-Aguilar JF., Baleanu D. Beta-derivative, and sub-equation method applied to the optical solitons in medium with parabolic law nonlinearity and higher order dispersion. *Optik* 2018; 155: 357-365.
- Miller KS., Ross B. *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equation*. Wiley Interscience, New York, 1993.
- Mirzoev KA. New limit-point criteria for Sturm-Liouville operator. *Proceeding of the Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan* 2014; 40(Special Issue): 290-299.
- Oldham KB., Spanier J. *The fractional calculus*. Academic Press, New York, 1974.
- Podlubny I. *Fractional differential equations*. Mathematics in Science and Engineering. vol. 198, Academic Press, New York, London, Tokyo and Toronto, 1999.
- Ross B. *Fractional calculus and its applications*. Springer, New York, 1975.
- Titchmarsh EC. *Eigenfunction expansions associated with second-order differential equations. Part I*. Second Edition Clarendon Press, Oxford, 1962.
- Zhang M., Sun J., Zetl A. Eigenvalues of limit-point Sturm-Liouville. *J. Math. Anal. Appl.*, 2014; 419: 627-642.
- Zhaowen Z., Huixin L., Jinming C., Yanwei Z. Criteria of limit-point case for conformable fractional Sturm-Liouville operators. *Math. Meth. Appl. Sci.*, 2020; 43: 2548–2557.

## Samaryum (III) Koordinasyon Polimerinin Etkin Yük Transfer Mekanizmasıyla Görünür Bölge Lüminesansının İncelenmesi

Umur GÜZEL<sup>1\*</sup>, Görkem OYLUMLUOĞLU<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Moleküler ve Nanomalzeme Laboratuvarı, Fizik Bölümü, 48000, Muğla

<sup>2</sup>Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 48000, Muğla

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0048-1743>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-7398-4018>

\*Sorumlu yazar: umutguzel@posta.mu.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 13.06.2024

Kabul tarihi: 07.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Lantanit-MOF

Samaryum

Sm-MOF

Hidrotermal

Lüminesans

Anten Etkisi

### ÖZ

Bu çalışmada; çevre dostu olan hidrotermal yöntem kullanılarak 2-sulfotereftalik asit (2-stp) ligand kullanılarak yeni samaryum metal organik çerçeve (Sm-MOF) sentezlenmiş  $\{[\text{Sm}(2\text{-stp}).3(\text{H}_2\text{O})].(\text{H}_2\text{O})\}$ , elde edilen Sm-MOF kompleksinin kristal yapısı ile görünür bölge lüminesans karakteristiklerinin kullanıldığı, 2-stp ligandan Sm(III) iyonlarına enerji aktarım süreçleri araştırılmıştır. Köprü görevi gören organik ligandlar ve karakteristik koordinasyon yeteneğine sahip lantanit iyonlarıyla sentezlenen, Sm-MOF gibi gözenekli yapıdaki yeni lantanit MOF'lar (Ln-MOF); iyi lüminesans ve manyetik özellikleri, ayarlanabilir gözenekli yapıları sayesinde artan bir ilgiye sahiptir. Sentezlenen Sm-MOF kompleksinin Fourier Transfer Infrared Spektroskopisi ve XRD kristal yapı analizleri yapılmıştır. Ayrıca Sm-MOF yapı katı halde, 349 nm lazer ile UV bölgede uyarılmış, yapıdaki Sm(III) metalinin görünür bölgede yaydığı karakteristik lüminesans analizleri yapılmış, ardından 2-stp ligandın absorpsiyon ile SM-MOF'un uyarılma grafikleri, görünür bölgede elde edilmiştir. 2-stp ligandın emisyonunun yanında, Sm(III)'ün keskin emisyonuna bağlı yoğun piklerin gözlemlenmesi, 2-stp serbest ligandın absorpsiyon spektrumları ile Sm-MOF kompleksinin uyarma spektrumları arasındaki örtüşme ve Sm(III) iyonlarının güçlü lüminesans yeteneği, 2-stp ligandan Sm-MOF kompleksine etkili bir enerji transferini ve ligandın anten etkisini açıkça göstermiştir.

## Luminescence in Visible Region by Effective Charge Transfer Mechanism in Samarium (III) Coordination Polymer

### Research Article

#### Article History:

Received: 13.06.2024

Accepted: 07.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Lanthanide-MOF

Samarium

Sm-MOF

Hydrothermal

Luminescence

Antenna Effect

### ABSTRACT

In this work, novel samarium metal organic framework (Sm-MOFs) containing 2-sulfotereftalic acid (2-stp) ligand  $\{[\text{Sm}(2\text{-stp}).3(\text{H}_2\text{O})].(\text{H}_2\text{O})\}$  was synthesized by using the environmentally friendly hydrothermal method. The crystal structure and visible region luminescence characteristics of the obtained Sm-MOF complex was used to investigate the energy transfer processes from 2-stp ligand to Sm(III) ions. Novel lanthanide MOFs (Ln-MOFs) synthesised with organic ligands acting as bridges and lanthanide ions with characteristic coordination ability, such as Sm-MOFs, are of increasing interest due to their good luminescence and magnetic properties and tunable porous structures. Fourier Transfer Infrared Spectroscopy and XRD crystal structure analyses of the Sm-MOF complex was performed. In addition, the Sm-MOF structure was excited in the UV spectrum with a 349 nm laser in the solid state, characteristic luminescence analyses of the Sm(III) metal in the visible zone were performed, and then the absorption spectra of the 2-stp and the excitation spectra of SM-MOF were obtained in the visible

zone. The observation of sharp peaks due to the dominant emission of Sm(III) despite the emission of the 2-stp ligand, the overlap between the absorption spectra of the 2-stp and the excitation range of the Sm-MOF complex and the strong luminescence ability of Sm(III) ions clearly showed an efficacious energy transfer from the 2-stp to the Sm-MOF complex and the antenna effect of the 2-stp.

---

**To Cite:** Güzel U., Oylumluoğlu G. Samaryum (III) Koordinasyon Polimerinin Etkin Yük Transfer Mekanizmasıyla Görünür Bölge Lüminesansının İncelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 57-66.

## 1. Giriş

Koordinasyon polimerlerinin iyi morfolojik, fizikokimyasal ve fotofiziksel karakteristikler sergilemesi, özellikle sensörler, ürün etiketleme gibi lüminesans alanları, ışık yayan diyotlar, katı hal lazerleri, bilgi depolama, gaz depolama-filtreleme gibi uygulama alanları, lantanit bazlı metal koordinasyon polimer çalışmalarına olan ilginin gittikçe artmasını sağlamıştır (Lucky ve ark., 2011; Şahiner ve ark., 2017). Organik köprü molekülleri tarafından bağlanan, ligand, metal iyon veya yığınları içeren, kristal yapıda koordinasyon polimerlerinin alt sınıfı olarak kabul edilen ve 2 veya 3 boyutlu Metal Organik Çerçevesel (MOF'lar) yapıları dolayısıyla gözenekli koordinasyon polimerleri olarak da isimlendirilmiştir (Chen ve Qian, 2014).

Lantanitlerin merkezlerinin esnek koordinasyon ortamına ve yüksek koordinasyon sayısına sahip olması sayesinde üstün topolojik çerçeveler oluşturulabilmekte, organik ligand seçimine göre farklı yapılar ve üstün özellikler sergileyen çeşitli lantanit kompleksleri elde edilebilmektedir (Thomas ve Ambili, 2015). Periyodik cetvelde 57-71 arasındaki atom numaralarını temsil eden ve nadir toprak elementleri sınıfında yer alan gözenekli yapıya sahip lantanitlerle, MOF yapıların bir araya getirildiği lantanit metal organik çerçeveler (Ln-MOF'lar), sahip oldukları karakteristik lüminesans özelliklerinden dolayı bilim insanlarının ilgisini çekmiştir. Ligandlarla katkılандığında, Ln(III) iyonlarının ışığı absorbe etme kabiliyetini, dolayısıyla lüminesans özelliklerini artırarak anten etkisi gösteren Ln-MOF'larda, donör-aktivatör etkileşimine bağlı olarak enerji aktarım verimi ayarlanabilir, konuk moleküllere duyarlı lüminesans özellikler sergileyen çeşitli malzemeler geliştirilebilir (Su ve ark., 2018). Ln(III) iyonlarının düşük absorpsiyon sergilemesini sağlayan Parite (Laporte) seçim kurallarının yasaklamış olduğu f-f geçişlerinden dolayı, iyonların direkt uyarılması neredeyse olanaksızdır. Bundan dolayı, literatürde lantanit komplekslerinin, ışık ışınlarını ultraviyole alanda yoğun olarak absorbe ederek uyarılma enerjisini ligandın iyonlarından lantanitinkilere transfer ederek anten etkisi göstermesini sağlayan organik ligandlarla katkılanması tavsiye edilmiştir (Coban, 2017). Ayrıca anten etkisinin, geniş Stokes kaymaları, koordinasyon sayısının yüksek olması, iyi derecede renk saflığı ve yasaklı f-f geçişlerinin yol açtığı fosforesansın da dahil olduğu mükemmel optik özellikler gibi avantajları da sağladığı bilinmektedir (Dang ve ark., 2013). Lantanitlerin fotolüminesans yeteneği ilgili çok sayıda araştırma mevcut olmasına rağmen; evropiyum, disprozyum, terbiyum, holmiyum, samaryum gibi lantanit kompleksleri yoğun bir şekilde çalışılmaktadır (Coban, 2017; Oylumluoğlu ve ark., 2017; Acar ve ark., 2020; Coban ve ark., 2020; Madkhali ve ark., 2023).

Elektronik geçişler; örneğin 4f-4f iç kabuk geçişleri, metalden liganda veya ligandan metale yük aktarımı gibi yük transfer geçişleri lüminesansın verimini artırmaktadır. Lantanit iyonlarından; Eu(III) kırmızı, Tm(III) mavi, Tb(III) yeşil, Er(III), Nd(III) ve Yb(III) yakın kızılötesi lüminesans emisyonlarına sahipken Sm(III) iyonlarınınki turuncudur (Fordham ve ark., 2014).

Nadir toprak elementlerinden 62 atom numarasına sahip Sm lantaniti; aydınlatma, sağlık gibi sektörlerde, nötron yakalamada, kanser tedavisi gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Şahiner ve ark., 2017).

Bu çalışmada Sm(III) iyonunun anten etkisi ile lüminesans özelliği kazanması amaçlanmıştır. Bunun için Sm-MOF kompleksi, (Samaryum(2-sülfoterefitalat).(H<sub>2</sub>O)), çevre dostu hidrotermal yöntemle sentezlenerek yeni Sm-MOF kompleksi elde edilmiştir. Üretilen tek kristallerin kristal yapı analizleri yapılarak kristal yapıları belirlenmiştir. Ardından ultraviyole alanda, katı fazda, 349 nm dalga boyundaki lazerle uyarılmış, Sm-MOF içerisindeki Sm iyonlarının verdiği, görünür aralıktaki fotolüminesans özellikler incelenmiş, Sm-MOF kompleksinin uyarma ve 2-stp ligandın absorpsiyon verileri görünür aralıklarda elde edilmiş, 2-stp ligandan Sm tuzu iyonlarına enerji transfer yeteneği araştırılmıştır (Güzel, 2019).

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyaller ve Karakterizasyonlar

Sm-MOF kompleksinin üretiminde kullanılan tüm materyaller TCI America ile Sigma-Aldrich'ten alınmış, saflaştırmadan kullanılmış, distile su ile çözülmüştür. Tek kristal XRD ölçümü Agilent Xcalibur Eos marka cihaz kullanılarak elde edilmiştir. Kristallerin yapıları OLEX2, SHELXTL, Mercury programları kullanılarak çözülmüştür. FTIR spektrum ölçümleri Perkin-Elmer Spectrum 65 cihazı ile 4000–600 cm<sup>-1</sup> aralığında alınmıştır. Sentezlenen samaryum kompleksi ve 2-stp organik ligandın fotolüminesans verileri, oda sıcaklığında, toz halinde, 349 nm dalga boyunda lazerle uyarılarak, hava soğutmalı CCD detektörlü 3 mJ enerjili Nd:YLF lazer kullanılan ANDOR SR500i-BL ile görünür bölgede alınmıştır. Hidrotermal sentez için Memert marka sıcaklık kontrollü etüv kullanılmıştır.

### 2.2. Sm-MOF Kompleksin {[Sm(2-stp).3(H<sub>2</sub>O)].(H<sub>2</sub>O)} Hazırlanması

Organik ligand 2-stp (2-sülfoterefitalik asit) ve Samaryum (Sm) lantanit tuzu (Sm(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O), 1'e 1 (1'er mmol) olacak şekilde hassas tartıda ayrı ayrı tartılmış, ayrı beher kaplarına aktarılmış, ultra saf suda çözdürülüp manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra 30 ml'ye tamamlanan ultra saf su içerisinde birleştirilerek Sm-MOF çözeltisi elde edilmiş, çözeltilerin pH değerleri NaOH çözeltisiyle ayarlanmıştır. Öncelikle çözeltinin başlangıç pH değeri pH metre ile ölçülmüş, pastör pipetine koyulan NaOH çözeltisi, pH=4 değerine sabitlenene kadar damlatılmak suretiyle ilave edilmiştir. Çözeltinin nihai pH değeri 4.0'a ayarlandıktan sonra elde edilen çözelti otoklava aktarılmış ve etüvün içine yerleştirilmiştir. Sıcaklık ATMO Control programı kullanılarak; 2 saatte 20 °C'den 120 °C'ye yükseltilecek şekilde ayarlanmış, 50 saat boyunca 120 °C'de bırakılarak, ardından 20 °C'ye 15 saatte

soğutulacak biçimde programlanmıştır. Sm-MOF'un (turuncu) kristalleri elde edilmiş ve distile suyla yıkanmıştır.

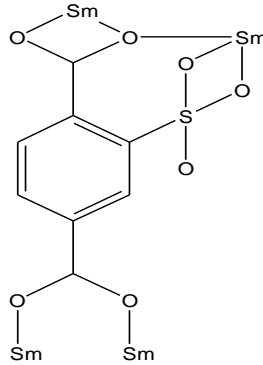
### 2.3. Kristal Yapı Çözümü ve Arıtımı

Sm-MOF kompleksi için X-ışını tek kristal verileri, Xcalibur, Eos difraktometresinde, MoK $\alpha$  radyasyonu kullanılarak oda sıcaklığında (293 K) elde edilmiştir. Kristallerin yapı çözümlemesi için OLEX2 (Dolomanov ve ark., 2009; Coban, 2017), SHELXTL ve Mercury bilgisayar programları kullanılmıştır (Sheldrick ve ark., 2007; Coban, 2017).

## 3. Bulgular ve Tartışma

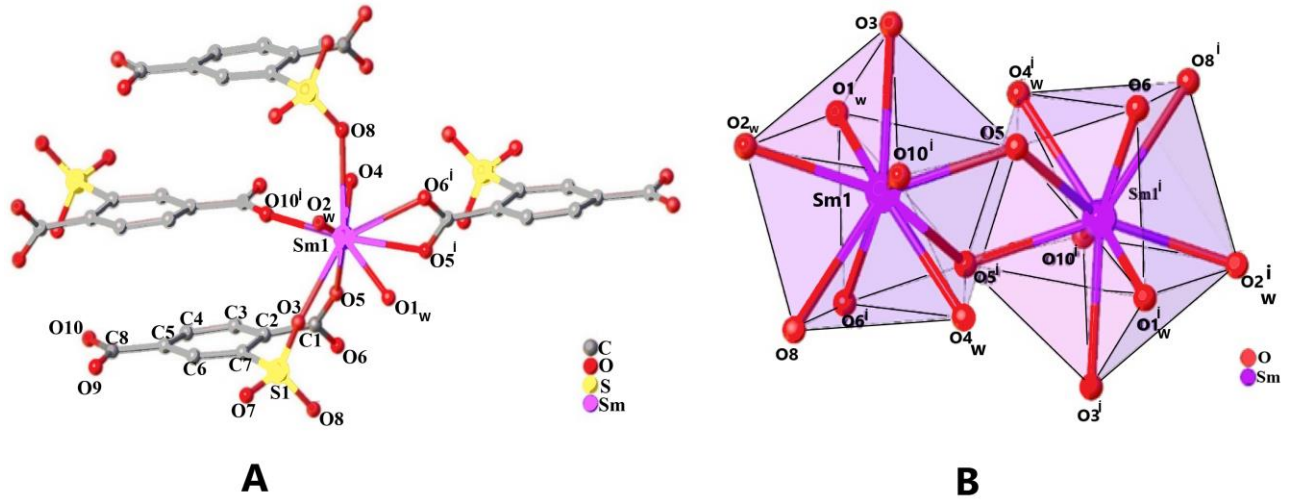
### 3.1. Sm-MOF Kompleksinin Kristal Yapısı

Sm-MOF kompleks; tek kristal XRD analiz verileri kullanılarak (C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>O<sub>10</sub>SSm·H<sub>2</sub>O) şeklinde (CCDC numarası: 1912696) formülize edilmiştir. Ayrıca kristal yapı analizine göre, monoklinik, P2<sub>1</sub>/n uzay grubuyla 2 boyutlu kristal oluşturduğu görülmüştür. Sm-MOF kompleksinin ligandlar ile koordinasyon bağlantılarının şematik gösterimi Şema 1'de görülmektedir. Ayrıca, Sm-MOF kompleksine ait kristalografik veriler ve yapı arıtım parametreleri Güzel (2019)'da verilmiştir.



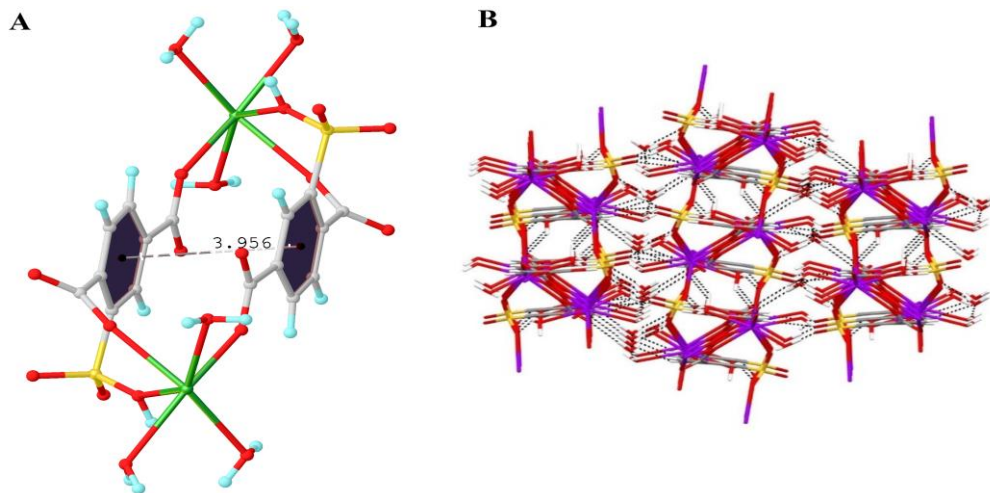
**Şema 1.** Samaryum- MOF'un ligandlar ile koordinasyon bağlantılarının Mercury programı ile elde edilen şematik gösterimi verilmiştir.

Asimetrik Sm(III) iyonlarının her biri, altısı koordine ve üçü örgü su molekülünden oluşan toplamda 9 koordinasyona sahiptir. Şekil 1A'da Sm-MOF kompleksteki Sm(III) iyonlarının koordinasyon ortamının perspektif görünümü, Şekil 1B'de ise Sm(III) atomlarının koordinasyon polihedronu verilmiştir.



**Şekil 1.** A) Sm-MOF kompleksteki Sm(III) iyonlarının koordinasyon ortamının perspektif görünümü. Kafes su molekülü ve hidrojen atomları netlik sağlamak amacıyla çıkarılmıştır. B) Sm(III) atomlarının koordinasyon polihedronu. Şekiller Mercury programıyla elde edilmiştir.

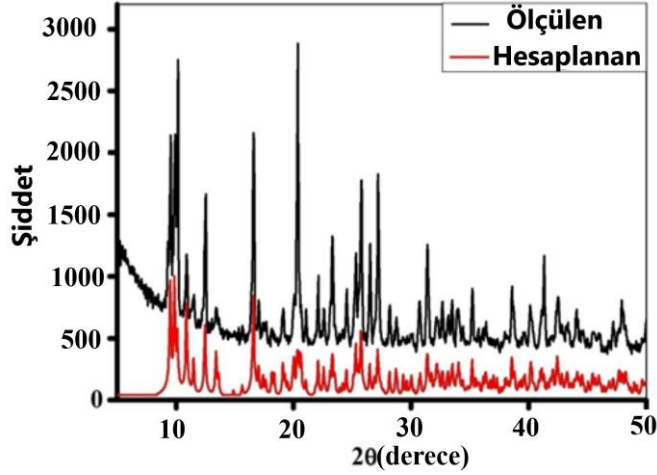
Şekil 1A'dan; 9 koordinasyonun; farklı iki 2-stp organik ligandından; dört oksijen atomunun karboksil, 3'ünün bağlı su molekülünden, geri kalan ikisinin de aynı şekilde diğer 2-stp ligandının sülfonat grubundan geldiği, görülmektedir. Şekil 1B'de verilen polihedron yapısı ise, bozulmuş, üç başlı antiprizmatik kare düzlem dizilimi sergilemektedir. 1 boyutlu zincirlerdeki  $\pi$ - $\pi$  etkileşiminin bir görünümü Şekil 2A'da ve 3 boyutlu hidrojen bağlarına sahip çerçevenin ab düzleminde uzanarak, c eksenine doğru paketlenişinin görüldüğü görünüm de sırasıyla Şekil 2B'de verilmiştir. 2-stp ligandının Sm(III) iyonuna altı dişli modunda, dört bağlantı ile, üç boyutlu MOF yapısında koordinasyon sağladığı görülmüştür. Ayrıca, zayıf hidrojen bağ yapısı ile  $\pi$ - $\pi$  etkileşimler de MOF yapının kararlılığında artış sağlamıştır. Yapıdaki tüm 2 boyutlu dalga benzeri katmanlar, hidrojen bağ etkileşimi yoluyla birbirine bağlanarak 3D mimariyi oluştururlar (Şekil 2B) (Coban, 2017).



**Şekil 2.** A)  $\pi$ - $\pi$  etkileşiminin görünümü, B) Hidrojen bağ etkileşimleri ile stabilize edilmiş 3 boyutlu çerçevenin ab düzleminde uzanarak, c eksenine doğru paketlenişinin bir görünümü. Şekiller Mercury programıyla elde edilmiştir.

### 3.2. Kompleksin Toz Kristal Ölçümleri

Sm-MOF'un toz fazdaki kristal ölçümden alınan verilerle, ölçümü yapılan ve Mercury programıyla hesaplanarak oluşturulan görseller karşılaştırmalı bir şekilde Şekil 3'teki grafikte verilmiştir.

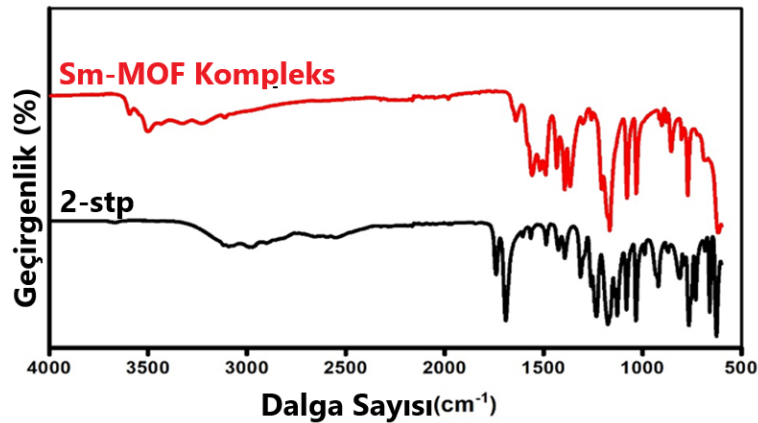


Şekil 3. Sm-MOF kompleksinin ölçülen ve hesaplanan toz kristal verilerinin karşılaştırmalı grafikleri

Hesaplanan ve ölçülen verilerin karşılaştırılmasıyla elde edilen grafiklerin örtüşmesi kompleksin saf olduğunu göstermektedir.

### 3.3. FTIR analizi

Sm-MOF kompleksi ve 2-stp organik ligandının FTIR spektrumu  $4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$  aralığında incelenmiş olup FTIR grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Sm-MOF kompleksi ile 2-stp ligandın FTIR grafikleri.

2-stp ligandı ile Sm-MOF kompleksinin pikleri benzer bölgelerde gözlemlenmiştir. 2-Stp'nin  $1691 \text{ cm}^{-1}$  ile  $1740 \text{ cm}^{-1}$ 'de yoğun karakteristik pikler sergilemesi, yapısında bulunan sülfonat ve karboksilat gruplarıyla ilişkilendirilmiştir. Sm-MOF kompleksinde sülfonat ve karboksil gruplarının O-H piklerinin görülmemesi bu grupların XRD yapı incelemesine uygunluğu kabul edilen protondan arındırılmış olduğunu düşündürülebilir. Sm-MOF kompleksinin  $1557$  ve  $1397 \text{ cm}^{-1}$  aralığında gözlenen



karboksilat karakteristik gerilme pik değerlerinin farkı  $160 \text{ cm}^{-1}$  olup,  $200 \text{ cm}^{-1}$ 'den düşük olması karboksil grubunun Sm(III) iyonlarına bağlanması ile ilişkilendirilebilir (Mukhtar Sirati ve ark., 2024). FTIR analizi, tüm karakteristik piklerin kristal yapılarla uyumlu olduğunu göstermiştir (Güzel 2019; Kara ve ark., 2020).

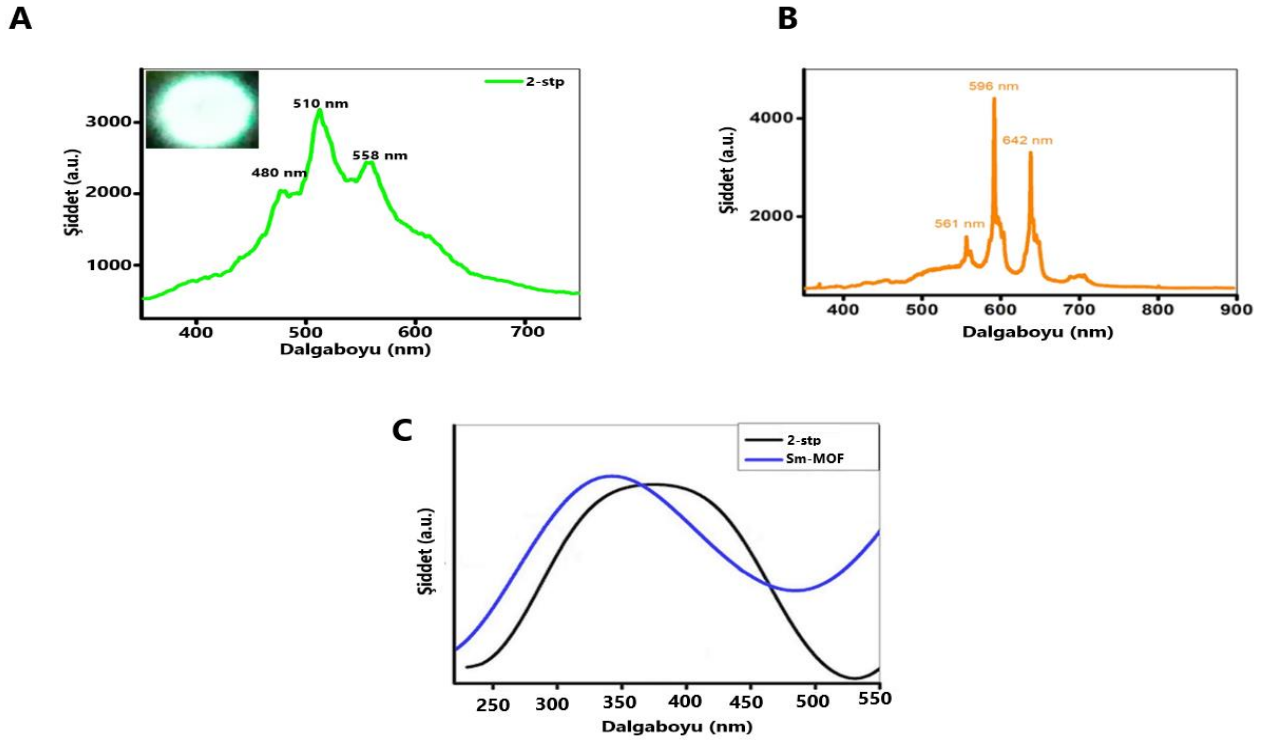
#### 3.4. Fotolüminesans Özellikler

Şekil 5A'da 2-stp'nin oda sıcaklığında ve katı fazdaki fotolüminesans grafiği verilmiştir. İç ektteki görsel, 2-stp'nin 349 nm dalga boyunda uyarılması sırasında mobil telefon ile elde edilen fotolüminesans görünümüdür. Sm-MOF'un görünür aralıkta alınan emisyon grafiği Şekil 5B'de görülmektedir. Sm-MOF kristallerinde sarımsı-turuncu ışımaya gözlenmiştir. Anten etkisini gösteren Sm-MOF kompleksi için uyarılma spektrumu ve 2-stp ligandının katı hal absorpsiyon spektrumları Şekil 5C'de verilirken Şekil 6'da ise Sm-MOF kompleksinin Jablonski enerji diyagramı yer almaktadır.

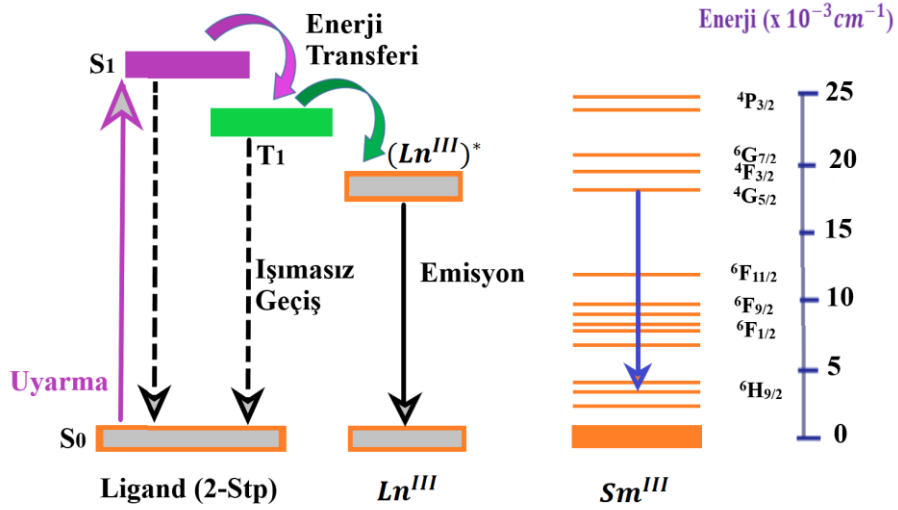
2-Stp ligandı; 480 nm, 510 nm ile 558 nm dalga boylarında,  $\pi \rightarrow \pi^*$  ile  $n \rightarrow \pi^*$  elektron geçişleriyle uyumlu, geniş emisyonuna sahip ligand içi yük transfer geçişleri sergilemiştir (Şekil 5A). Şekil 5B ve Şekil 6'da görüldüğü üzere, katı Sm(III) kompleksinin fotolüminesans spektrumunda; 596 nm'de  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$  manyetik dipol geçişi ve 561 nm'de  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{5/2}$  ve 642 nm'de  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{9/2}$  elektrik-dipol geçişleriyle uyumlu üç adet karakteristik zirve görülmüştür. Bu geçişlerden  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{9/2}$  elektrik dipol geçişi, ardından gelen  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$  manyetik dipol geçişinden de duyarlı, şiddetli ve en yoğun geçiştir. Bu aşırı duyarlı ve 642 nm'de turuncu rengin gözlemlendiği emisyon bandı 596 nm'de sarı ışımaya yapan  $^4G_{5/2} \rightarrow ^6H_{7/2}$  geçişinden çok daha şiddetli olduğundan dolayı Sm-MOF kompleksinin turuncu renkte lüminesans yapmasını sağlamıştır.

Ayrıca 2-stp ligandın emisyon yapmasının yanında, Sm(III)'ün yoğun emisyonuna bağlı şiddetli zirvelerin gözlemlenmesi, 2-stp serbest ligandın absorpsiyon spektrumları ile Sm-MOF kompleksinin uyarılma spektrumları arasındaki örtüşme ve Sm(III) iyonlarının güçlü lüminesans yeteneği, 2-stp ligandan Sm-MOF kompleksine etkili bir enerji transferini ve ligandın anten etkisini açıkça göstermiştir (Şekil 5C).

2-stp'nin enerji seviyeleri, Sm (III) iyonlarına enerji aktarımı yapabilecek seviyededir. Bundan dolayı ligandan metale enerji aktarımı verimli bir şekilde gerçekleşmiştir (Dexter, 1953) (Şekil 5C).



**Şekil 5.** **A**) 2-stp'nin oda sıcaklığında ve katı fazdaki fotoluminesans grafiği (İç ektteki görsel, 2-stp'nin 349 nm dalga boyunda uyarılması sırasında mobil telefon ile elde edilen ışığa görünümüdür), **B**) Sm-MOF'un görünür aralıkta alınan emisyon grafiği, **C**) Sm-MOF kompleksi için uyarılma spektrumu ve 2-stp ligandının katı hal olarak absorpsiyon spektrumları.



**Şekil 6.** Sm-MOF kompleksinin Jablonski enerji diyagramı.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, yeni Sm(III) bazlı koordinasyon polimeri (Sm-MOF), 2-sulfotereftalik asit (2-stp) ligandı kullanılarak hidrotermal koşullar altında başarıyla sentezlenmiş, yapısal özellikleri araştırılmıştır. Sm-MOF'un kristal yapısı, tek kristal XRD analizi, FTIR ve toz kristal ölçümü ile karakterize edilmiştir. Sm-MOF'un yapısal analizi, farklı iki 2-stp'den; dört oksijen atomunun karboksil grubundan, 3'ü bağlı su molekülünden, geri kalan ikisinin de aynı şekilde diğer 2-stp ligandının sülfonat grubundan geldiğini göstermiştir. Polihedron yapısı ise, bozulmuş, üç başlı antiprizmatik kare düzlem dizilimi sergilemiştir.

Katı hal fotolüminesans özellikleri, UV-Görünür ortamda oda sıcaklığında araştırılmıştır. 2-stp ligandı ve Sm-MOF kompleksi için yapılan fotolüminesans ölçümü, f-f elektronik geçişlerine atfedilen Sm-MOF için turuncu emisyon sergilemiştir. Ayrıca 2-stp ligandın absorpsiyon spektrumları ile Sm-MOF kompleksinin uyarma spektrumları arasındaki örtüşme ve Sm(III) iyonlarının güçlü lüminesans yeteneği, 2-stp ligandan Sm-MOF kompleksine etkili bir enerji transferini ve ligandın anten etkisini açıkça göstermiştir. Bu çalışma ile, karakteristik lüminesans özelliklerinden dolayı medikal teşhis ve kanser tedavisi gibi sağlık alanlarında, optik, haberleşme gibi teknolojik alanlarda etkin potansiyel uygulamalara sahip olan yeni Sm-MOF lüminesans malzemelerin üretimi ve geliştirilmesi için kullanışlı bir yaklaşım sunulmuştur.

### **Teşekkür**

Yazarlar, 18/067 numaralı BAP projesi ile yapılan bu araştırmayı destekleyen MSKU Rektörlüğü BAP birimine ve MSKU Moleküler ve Nanomalzeme Laboratuvarı'na desteklerinden dolayı çok teşekkür eder.

### **Bilgi**

Bu makale yazar Umut Güzel'in yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makale yazımına eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

### **Kaynakça**

- Acar Y., Coban MB., Gungor E., Kara H. Two new NIR luminescent Er(III) coordination polymers with potential application optical amplification devices. *Journal of Cluster Science* 2020; 31: 117-124.
- Chen B., Qian G. *Metal-organic frameworks for photonics applications*. Springer 2014; 157: 1-26.
- Coban MB. Synthesis and photophysical properties of new Eu(III) complex. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2017; 19(3): 7-15.
- Coban MB., Acar Y., Gungor E., Kuru Alpaslan F., Kara Subasat H. Eu@PMMA and Sm@PMMA nanofibers prepared by electrospinning: structural, morphology, photoluminescence and magnetic properties. *CrystEngComm* 2020; 22: 6116-6127.
- Dang S., Min X., Yang W., Yi FY., You H., Sun ZM. Lanthanide metal-organic frameworks showing luminescence in the visible and near-infrared regions with potential for acetone sensing. *Chemistry A European Journal* 2013; 19(50): 17172-17179.

- Dolomanov OV., Bourhis LJ., Gildea RJ., Howard JAK., Puschmann H. OLEX2: A complete structure solution, refinement and analysis program. *Journal of Applied Crystallography* 2009; 42(2): 339–341.
- Fordham S., Wang X., Bosch M., Zhou HC. Lanthanide metal-organic frameworks: syntheses, properties, and potential applications. In: Cheng, P. (ed.) *Structure and Bonding*. Springer 2014; 163: 1-27.
- Güzel U. Samaryum (III) koordinasyon polimerinin etkin yük transfer mekanizmasıyla görünür bölge ve yakın kızıl ötesi lüminesansı. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 73, Muğla, Türkiye, 2019.
- Kara H., Oylumluoglu G., Coban MB. Photoluminescence properties of a new Sm(III) complex/PMMA electrospun composite fibers. *Journal of Cluster Science* 2020; 31: 701-708.
- Lucky MV., Sivakumar S., Reddy MLP., Paul AK., Natarajan S. Lanthanide luminescent coordination polymer constructed from unsymmetrical dinuclear building blocks based on 4-((1H-benzo[d]imidazol-1-yl)methyl)benzoic acid. *Crystal Growth & Design* 2011; 11(3): 857-864.
- Madkhali O., Kaynar ÜH., Alajlani Y., Coban MB., Garcia Guinea J., Ayvacikli M., Pierson, JF., Can N. Structural and temperature dependence luminescence characteristics of RE (RE=Eu<sup>3+</sup>, Dy<sup>3+</sup>, Sm<sup>3+</sup> and Tb<sup>3+</sup>) in the new gadolinium aluminate borate phosphor. *Ceramics International* 2023; 49(12): 19982-19995.
- Mukhtar Sirati M., Sirati S., Amara U., Hussain A., Hussain D., Hanif M., Mahmood K., Asif HM., Khalid M., Tariq M., Siddique F., Yaqub M., Ahmad I. Samarium-based metal organic frameworks as high performance electrocatalyst for alkaline water splitting. *Fuel* 2024; 362: 130812.
- Oylumluoglu G., Coban MB., Kocak C., Aygun M., Kara H. 2-and 1-D coordination polymers of Dy(III) and Ho(III) with near infrared and visible luminescence by efficient charge-transfer antenna ligand. *Journal of Molecular Structure* 2017; 1146: 356-364.
- Sheldrick GM. A short history of SHELX. *Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography* 2007; 64(1): 112-122.
- Su Y., Yu J., Li Y., Phua SFZ., Liu G., Lim QW., Yang X., Ganguly R., Dang C., Yang C., Zhao Y. Versatile bimetallic lanthanide metal-organic frameworks for tunable emission and efficient fluorescence sensing. *Communications Chemistry* 2018; 1(12).
- Şahiner M., Akgök YZ., Arslan M., Ergin MH. Dünyada ve Türkiye’de nadir toprak elementleri (NTE). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. [https://mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada\\_ve\\_turkiyede\\_nadir\\_toprak\\_elementleri.pdf](https://mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada_ve_turkiyede_nadir_toprak_elementleri.pdf) (Erişim Tarihi: 17.07. 2024). 2017.
- Thomas J., Ambili KS., Synthesis, crystal structure and luminescent properties of a new samarium-fluorescein metal-organic framework. *Journal of Molecular Structure* 2015; 1098: 167-174.

## Ateş Dikeni (*Pyracantha coccinea*) Meyve ve Yaprak Ekstrelerinin, Antienzim, DNA Koruma/Kırılma ve Antimikrobiyal Aktivitesinin Araştırılması

Merve BALABAN<sup>1</sup>, Şule Azime YENİÇERİ<sup>2</sup>, Ebru AKKEMİK<sup>3\*</sup>, Bülent HALLAÇ<sup>4</sup>, Mehmet FİDAN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Siirt. Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 56100, Siirt

<sup>2</sup>Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Gıda İşleme Bölümü, 56100, Siirt

<sup>3,4</sup>Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 56100, Siirt

<sup>5</sup>Siirt Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 56100, Siirt

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4188-1110>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4014-5274>

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4177-4884>

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6948-1565>

<sup>5</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0255-9727>

\*Sorumlu yazar: eakkemik@siirt.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 09.05.2024

Kabul tarihi: 12.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Tirozinaz

Glutasyon-S transferaz

Enzim aktivitesi

### ÖZ

Ateş dikeni (*Pyracantha coccinea*) bitkisi sahip olduğu sekonder metabolitler sayesinde birçok hastalığın tedavisinde kullanıma potansiyeli taşımaktadır. Ancak literatürde *P. coccinea*'nin farmakolojide kullanımı ile ilgili çok az sayıda çalışma vardır. Yapılan çalışmada *P. coccinea*'nin meyve ve yaprak metanol ekstreleri hazırlanarak antienzim aktivitesi *in vitro* şartlarda araştırılmıştır. Bu sebeple kanser tanı ve tedavisi ile ilişkisi olduğu literatürlerce bilinen Glutasyon-S transferaz (GST) ve Tirozinaz (TYR) enzim aktiviteleri üzerine *P. coccinea*'nin yaprak ve meyve ekstrelerinin etkisi belirlenmiştir. İlk kez *P. coccinea*'nin meyve ve yaprak metanol ekstrelerinin DNA koruma/kırılma etkisi ve her iki ekstrelerin *Bacillus subtilis* (ATCC 6633), *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29242), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Candida albicans* (ATCC 10231) mikroorganizmalarına karşı antimikrobiyal etkinliği araştırılmıştır. *P. coccinea*'nin yaprak ekstrelerinin GST'yi mikromolar düzeyde inhibe ettiği tespit edilmiştir. Her iki ekstrelerin TYR enzim aktivitesi üzerinde yeterli etki göstermediği belirlenmiştir. Ayrıca ekstrelerin DNA kırılmasına yol açmadığı ve 1 mg/mL konsantrasyonda koruma etkisine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ekstreler çalışılan tüm mikroorganizmalara karşı antimikrobiyal etkinliğe sahip olmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak *P. Coccinea* bitkisinin aday ilaç çalışmaları için doğal kaynak olabileceğini buna karşın ilave prelinik ve klinik çalışmalarla bitkinin tam potansiyelinin ortaya çıkarılması gerektiği düşünülmektedir.

## Investigation of Antienzyme, DNA Protection/Breaking and Antimicrobial Activity of Firethorn (*Pyracantha coccinea*) Fruit and Leaf Extracts

### Research Article

#### Article History:

Received: 09.05.2024

Accepted: 12.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Tyrosinase

Glutathione-S transferase

Enzyme activity

### ABSTRACT

Firethorn (*Pyracantha coccinea*) plant has the potential to be used in the treatment of many diseases thanks to its secondary metabolites. However, there are very few studies in the literature on the use of *P. coccinea* in pharmacology. Therefore, in this study, we aimed to investigate the antienzyme activity of *P. coccinea* under *in vitro* conditions by preparing fruit and leaf methanol extracts. The effect of *P. coccinea* leaf and fruit extract on Glutathione-S transferase (GST) and Tyrosinase (TYR) enzyme activities, which are known in the literature to be related to cancer diagnosis and treatment, was investigated. In this study, for the first time, the DNA

protection/breaking effect of fruit and leaf methanol extracts of *P. coccinea* was investigated. Additionally, the antimicrobial activity of both extracts against *Bacillus subtilis* (ATCC 6633), *Staphylococcus aureus* (ATCC 29213), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29242), *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Candida albicans* (ATCC 10231) microorganisms was investigated. It was determined that *P. coccinea* leaf extract inhibited GST at micromolar level. It was determined that both extracts did not have a sufficient effect on TYR enzyme activity. It was determined that the extracts did not cause DNA breakage and had a protection effect of 1 mg/mL concentration. However, it did not show antimicrobial activity against all microorganisms studied. As a result, we think that *P. coccinea* plant can be a natural source for candidate drug studies, but the full potential of the plant should be revealed with additional preclinical and clinical studies.

**To Cite:** Balaban M., Yeniçeri ŞA., Akkemik E., Hallaç B., Fidan M. Ateş Dikeni (*Pyracantha coccinea*) Meyve ve Yaprak Ekstrelerinin, Antienzim, DNA Koruma/Kırılma ve Antimikrobiyal Aktivitesinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 67-81.

## 1. Giriş

Çin, Himalayalar (Popoviciu ve ark., 2020), İtalya ve Türkiye'de farklı rakımlarda 3 m yüksekliğe kadar yetişen dikenli bir çalı olan ateş dikeni (*Pyracantha coccinea*), halk arasında tavşan elması, köpek elması, kuş alıcı gibi isimler ile bilinmektedir. *Rosaceae* familyasına ait olan bu çalı, süs bitkisi olarak kullanılmasının yanı sıra, çay, marmelat, reçel, jöle, yemeklik sos olarak pişirilebilen küçük, parlak kırmızı meyvelere sahiptir (Fico ve ark., 2000). Antioksidan ve antimikrobiyal özelliklere sahip olduğu belirtilen bitkinin, ayrıca meyvelerinin başta kalp-damar sağlığı olmak üzere geleneksel tıpta kullanılabileceği belirtilse de yapılan çalışmalar istenen düzeyde değildir (Sarikurkcu ve Tepe, 2015). Farmakolojide kullanım potansiyeli taşıyan Ateş dikeni meyvesinin bu özelliği içeriğindeki Se ve vitamin türevlerine bağlı olduğu düşünülmektedir (Çöteli ve Karataş, 2017). Ancak ilave prelinik çalışmalar ile mekanizmaların ve farmakolojik süreçlerin aydınlatılması gerekmektedir.

Prelinik çalışmaların başında antienzim çalışmaları önem taşımaktadır çünkü enzimler birçok metabolik yolağı ve süreci doğrudan veya dolaylı olarak etkilerler. Bu nedenle enzimlerin aktiviteleri gen seviyesinde veya protein seviyesinde düzenlenerek metabolizmanın dengede kalması sağlanmaktadır. Günümüzde piyasada ilaç olarak kullanılan kimyasalların birçoğu aynı zamanda farklı enzimlerin spesifik inhibitörü veya aktivatörü olarak işlev görmektedir (Stamper ve ark., 2009; Aslam ve Gupta., 2023). Enzimlerin aktivitelerinin dengede kalmasını sağlamak için potansiyel inhibitörler/aktivatörler sentezlenmekte veya bitki ekstreleri yoluyla araştırılmaktadır (Akkemik ve ark., 2019; Akkemik ve ark., 2024). Araştırmalara konu olan enzimlerden biri kanser ile olan ilişkisi nedeniyle Glutasyon S-Transferaz (GST; EC 2.5.1.18) enzimidir.

GST enzimleri, hücrenin farklı kısımlarında bulunan ve çok sayıda izoenzieme sahip olan eşsiz enzimlerdir. Sitoplazmik GST'ler, detoksifikasyon metabolizmasının bir parçası olan faz II enzimleri olarak bilinir ve en az 8 gruba ayrılır: [alfa (A), kappa(K), mu (M), omega (O), pi (P), sigma(S), teta(T) ve zeta (Z)] (Luo ve ark., 2011). GST'lerin işlevselliği (i) katalitik aktiviteleri–oksidatif stres, (ii) protein-protein etkileşimlerindeki rolü ve (iii) substrat olmayan ligandların GST'ler tarafından bağlanması olmak üzere üç kategoriye ayrılmıştır (Booth ve ark., 1961). GST'ler, elektrofil substratları

glutasyon ile konjuge ederek, ajanların inaktivasyonunu ve organizmadan atılmasını sağlamaktadır. Ancak bu süreç, sağlıklı organizmalarda sorunsuz ilerlerken kanser hastalarında tedavi direncine yol açan bir sürece dönüşebilir. Çeşitli kanser türleri ve dokuları üzerinde yapılan çalışmalar, GST'nin çeşitli izoenzimlerinin katı kanserlerde ilaç direncini artırdığını göstermiştir. Özellikle akciğer, yumurtalık ve mide kanserleri, kemoterapik ilaçlara karşı yüksek direnç göstermektedir (Singh ve Reindl, 2021; Özaslan, 2024). Ayrıca GST izoenzimlerinden biri olan GSTP1-1'in farklı insan tümörlerinde aşırı eksprese edildiği rapor edilmiştir (Tew, 1994; Hamada ve ark., 1994; Yang ve ark., 2006; Özaslan, 2024). Tüm bu veriler ışığında özellikle kanser hastalarında GST'lerin aktivitelerinin durdurulması veya azaltılması kanser tedavisinde umut verici olabilmektedir. (Hayes ve ark., 2005; Tew ve Townsend, 2012; Boardve Menon, 2013; Özaslan, 2024). Bu nedenle araştırmacılar söz konusu enzimin yeni inhibitörlerini araştırmaya devam etmektedir (Özaslan, 2024). Ancak tasarlanan sentetik inhibitörlerin ilaç olarak kullanılabilmesi yüksek bir maliyet ve zaman gerektiren süreçleri içermektedir (Anonim, 2024). Bu bağlamda, enzimin doğal inhibitörlerinin bulunması, hastalığın tedavisi sırasında takviye gıda olarak kullanım kolaylığı sağlayabilir ve yeni inhibitörlerin tasarımı için araştırmacılara rehberlik edebilir.

Araştırmalara konu olan diğer bir enzim ise tirozinaz (TYR; EC 1.14.18.1) enzimidir. Enzim polifenol oksidaz, monofenol oksidaz, fenolaz veya katekolaz isimleri ile de bilinmektedir. Doğada oldukça yaygın olan (Cooksey ve ark., 1997; Calay, 2010) tirozinaz başta bitkiler olmak üzere neredeyse tüm canlılarda bulunmaktadır (Parvez ve ark., 2007; Khan, 2006; Calay, 2010). Enzim bir biyopolimer olan melanin sentezinde görev almaktadır (Riley, 1997; Smit ve ark., 2003; Hałdys ve ark., 2020; Baber ve ark., 2023). Aktif merkezinde bakır iyonu ve histidin amino asidi içeren tirozinaz melanin üretiminde hız sınırlayıcı basamaklarda görev aldığı için anahtar enzimdir (Seo ve ark., 2003; Chang, 2009; Gasparetti ve ark., 2012; Zaidi ve ark., 2014; Yu ve ark., 2018; Matoba ve ark., 2018; Baber ve ark., 2023). Bu nedenle tıp, kozmetik ve tarım endüstrisinde oldukça önemlidir. Melanin, insanlarda UV ışınlarına karşı koruma sağlayan gözlerde, saçlarda ve ciltteki pigmentasyondan sorumludur (Brenner ve Hearing, 2008; Baber ve ark., 2023). TYR'nin aşırı aktivitesi veya aşırı ekspresyonu, hiperpigmentasyon bozukluklarla ve melanomlarla ilişkilendirilmiştir. Dahası meyve ve sebzelerde TYR aktivitesi enzimatik esmerleşmeye veya olgunlaşmaya sebep olmaktadır. Buda gıdaların raf ömrünü kısaltan bir etkidir. Bu nedenle TYR inhibitörleri, gıdaların korunmasında veya melanin birikimiyle ilişkili bozuklukların ve hastalıkların tedavisinde potansiyel tıbbi ajanlar olarak değerlendirilebilir (Chang, 2009; Deering ve ark., 2016; Baber ve ark., 2023). Çok sayıda çalışma TYR'nin hem sentetik hem de doğal inhibitörlerini tanımlamıştır (Baber ve ark., 2023). Ancak, birçok TYR inhibitörü, etkinlik eksikliği ve/veya kanserojenlik, sitotoksikite gibi toksisite nedeniyle yaygın kullanım görmemiştir (Baber ve ark., 2023). Dolayısıyla enzimin yeni doğal inhibitörlerinin araştırılması oldukça önemli bir hale gelmiştir.

Klinik öncesi çalışmaların önemli bir ayağını da DNA koruma etkisi ve antimikrobiyal aktivite oluşturmaktadır. DNA'da meydana gelebilecek bir hasar protein seviyesinde veya gen seviyesinde bir

mutasyona sebep olmaması için replikasyon, transkripsiyon ve translasyon gibi normal hücrel mekanizmalar ile onarılmaktadır. Ancak her zaman bu mümkün olmamaktadır (de Almeida ve ark., 2015; Ramadan, 2019). Çünkü biyolojik, kimyasal ve toksik materyaller ile oluşan bazı DNA hasarları normal hücrel mekanizmaları engeller, bunun sonucunda genetik ve kanserli hastalıkların oluşumuna zemin hazırlanmış olur (de Almeida ve ark., 2015; Ramadan, 2019). Sonuç olarak ilaç adayı olarak üretilen birçok kimyasalın muhtemel yan etkisi DNA hasarına sebep olabilir. Bu bağlamda, sentezlenen veya ekstrakte edilen ilaç adaylarının potansiyel yan etkileri, özellikle DNA hasarına neden olma riski göz önünde bulundurularak değerlendirilmelidir. Bu nedenle, DNA koruma etkisi veya DNA hasarı çalışmaları, aday ilaçların ve tedavi yöntemlerinin güvenliğini ve etkinliğini belirlemek için önemlidir. Bununla birlikte Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından 21. yüzyılın en büyük halk sağlığı tehditlerinden biri olarak kabul edilen mikrobiyal hastalıklar özellikle düşük, orta-alt gelirli ülkeler için büyük bir tehdit oluşturmaktadır (World Health Organization, 2020; Murray ve ark., 2020; Bhattarai ve ark., 2021). 2019 yılında meydana gelen ölümlerin yaklaşık %12'si bulaşıcı hastalıklar nedeniyle gerçekleşmiştir (GBD, 2019; Bhattarai ve ark., 2021). Bu durumun güncel verilerin işlenmesine bağlı olarak Covid 19 salgın hastalığının da verilere dahil edilmesi ile daha dramatik bir tabloya dönüşeceği düşünülmektedir. Bu etkenler ışığında patojen mikroorganizmalara karşı başta antibakteriyel ilaç tasarımları olmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Belirtilen gerekçeler neticesinde Ateş dikenini (*Pyracantha coccinea*)'nin meyve ve yaprak ekstraktı hazırlanarak, antienzim, DNA koruma ve antimikrobiyal analizleri *in vitro* şartlarda gerçekleştirilmiştir. Böylece ekstraktların çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanılabilme potansiyeli ve elde edilen verilerin ilaç tasarımı yapan araştırmacılara yol gösterici bir kaynak oluşturması amaçlanmıştır.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1. Materyal**

pBR322 plazmit DNA Thermo Scientific firmasından, metanol, etanol, DMSO (Dimetil sülfoksit), 1,2-Dihydroxybenzene, 1-kloro-2,4- dinitrobenzene, GSH, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, askorbik asit, FeCl<sub>3</sub>, EDTA, Tris, K-Fosfat, Etanol, Borik asit Sigma Aldrich Firmasından elde edilmiştir. Muz (*Musa acuminata*) tirozinaz (Yeniçerive ark., 2023), ve Shabut (*Barbus grypus*) balık Glutatyon S transferaz (Balaban M., ve Akkemik E., (2021)) enzimleri daha önceki çalışmalarımızdan elde edilmiştir.

### **2.2. Metot**

#### **2.2.1 *Pyracantha coccinea* bitki ekstraktının hazırlanması**

*Pyracantha coccinea* meyvesi ve yaprakları Siirt Üniversitesi, Kezer Yerleşkesinden temin edilmiştir (Şekil 1).





**Şekil 1.** *Pyracantha coccinea* bitkisi (Siirt Üniversitesi, Kezer Yerleşkesi, 01.11.2023)

Türün tespitini Siirt Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mehmet Fidan yapmıştır. Ekstraksiyon için doku örnekleri uygun koşullarda laboratuvarımıza taşınmıştır. Bitkilerin ekstraksiyonu Karacaer (2023)'in uyguladığı yöntem modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. 5 gram bitki tartılıp üzerine 50 mL çözücü (metanol %100) eklenip homojenize (IKA/T18) edilerek erlenmayere aktarılmıştır. Çalkalayıcı inkübatörde 200 rpm hızda oda sıcaklığında gece boyunca inkübe (Selecta Rotabit) edilmiştir (Şekil 2).



**Şekil 2.** *Pyracantha coccinea* yaprak ve meyve bitki ekstresi

Ardından elde edilen çözelti filtre kâğıdı ile süzildükten sonra, süzüntü 40°C vakum altında evapore (Heidolph/Heizbad-heivap) edilerek çözücüsü uzaklaştırılmıştır. Elde edilen kuru madde DMSO (% 10, v/v) ile yeniden çözülmüş, konsantrasyon 1 mg/mL olacak şekilde ayarlanmıştır ve gerekli seyreltmeler saf su ile yapılmıştır. Tüm çalışma +4°C'de yürütülmüştür.

### 2.2.2. Enzim İnhibisyonu

Örneklerin tirozinaz enzim aktivitesi tayini için (Duckworth ve Coleman, 1970; Şakiroğlu, 1994) literatürdeki yöntemler laboratuvar şartlarımıza göre modifiye edilerek kullanılmıştır. Enzim aktivitesi A420 nm'de bir dakikada 25°C'de pH 7,5'te 1,2-Dihydroxybenzene içeren 3 mL'lik reaksiyon ortamında 0,001 absorbans artışının ölçülmesi ile 420 nm'de spektrofotometrik (VWR UV/VIS Spektrofotometre VWR UV-1600PC) belirlenmiştir. Bir ünite enzim aktivitesi, absorbansta dakikada 0,001 değişime neden olan enzim miktarı olarak tanımlanmıştır (Wong ve ark., 1971). Glutasyon S-transferaz enzim aktivitesi ölçümünde Habig ve ark., (1974)'ün yöntemi laboratuvar şartlarımıza göre modifiye edilerek kullanılmıştır. Buna göre pH 7,0'de 0,5 mM 1-kloro-2,4- dinitrobenzene (CDNB) ve 1 mM GSH içeren 1 mL'lik reaksiyon ortamına enzim ilave edilmesi ile absorbans artışı 3 dakika boyunca 340 nm'de spektrofotometrik (VWR UV/VIS Spektrofotometre VWR UV-1600PC) olarak ölçülmüştür. Ekstraktların enzim aktivitesi üzerine etkisinin belirlenmesi için reaksiyon ortamlarına en az 5 farklı konsantrasyonda *P. coccinea* yaprak ve meyve ekstraktları eklenip absorbans değerleri kaydedilmiştir. %Aktiviteye karşı konsantrasyon grafiği çizilerek IC<sub>50</sub> değerleri hesaplanmıştır. Ekstrakt ilave edilmeyen reaksiyon ortamında enzim aktivitesi %100 olarak kabul edilmiştir (Akkemik ve ark., 2022).

### 2.2.3. *Pyracantha coccinea* yaprak ve meyve ekstraktlarının DNA koruma/kırılma etkisi

Akkemik ve ark., (2022) yöntemi kullanılarak *P. coccinea* yaprak ve meyve ekstraktları Fenton çözeltisinin pBR322 plazmit DNA üzerine zararlı etkilerini korumak için kullanılmıştır. Ayrıca bu ekstraktların DNA kırılma etkisi de araştırılmıştır. Her bir bitki doku ekstraktı için iki farklı konsantrasyon (0,5 mg/mL ve 1 mg/mL) uygulanarak deney tasarımı için negatif (sadece plazmit DNA) ve pozitif kontrol (Fenton + plazmit DNA) grupları oluşturulmuştur. Buna göre inkübe edilecek reaksiyon karışımları 3 µL pBR322 plazmit DNA, 5 µL Fenton solüsyonu (30 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 50 mM askorbik asit ve 80 mM FeCl<sub>3</sub>) ve farklı konsantrasyonlardan 5 µL (0,5 mg/mL ve 1 mg/mL) bitki ekstraktları alınarak son hacim distile su ile 20 µL'ye tamamlanmıştır. Daha sonra bu karışım 37°C'de 30 dakika inkübe edilmiştir. İnkübasyonun ardından reaksiyon karışımına 3 µL 6x yükleme boyası ilave edilerek oluşan karışımdan 10 µL alınıp EtBr ile işaretlenerek %0,8'lik agaroz jeline yüklenmiştir. Agaroz jeli elektroforezi (Major Science) 100 voltta 60 dakika yürütülmüştür. Daha sonra jel görüntüleme cihazı (Major Science) ile jel görüntüsü alınmıştır.

### 2.2.4. *Pyracantha coccinea* yaprak ve meyve ekstraktlarının Antimikrobiyal etkisi

Antimikrobiyal etkinin (*Bacillus subtilis* ATCC 6633, *Staphylococcus aureus* ATCC 29213, *Enterococcus faecalis* ATCC 29242, *Escherichia coli* ATCC 25922, *Candida albicans* ATCC 10231) belirlenmesinde Agar kuyu difüzyon yöntemi kullanılmıştır (Temiz 2010). Her bir bakteri ve maya hücresi aktifleştirildikten sonra 0,5 McFarland standardına göre ayarlanmış 0,6 cm çapındaki

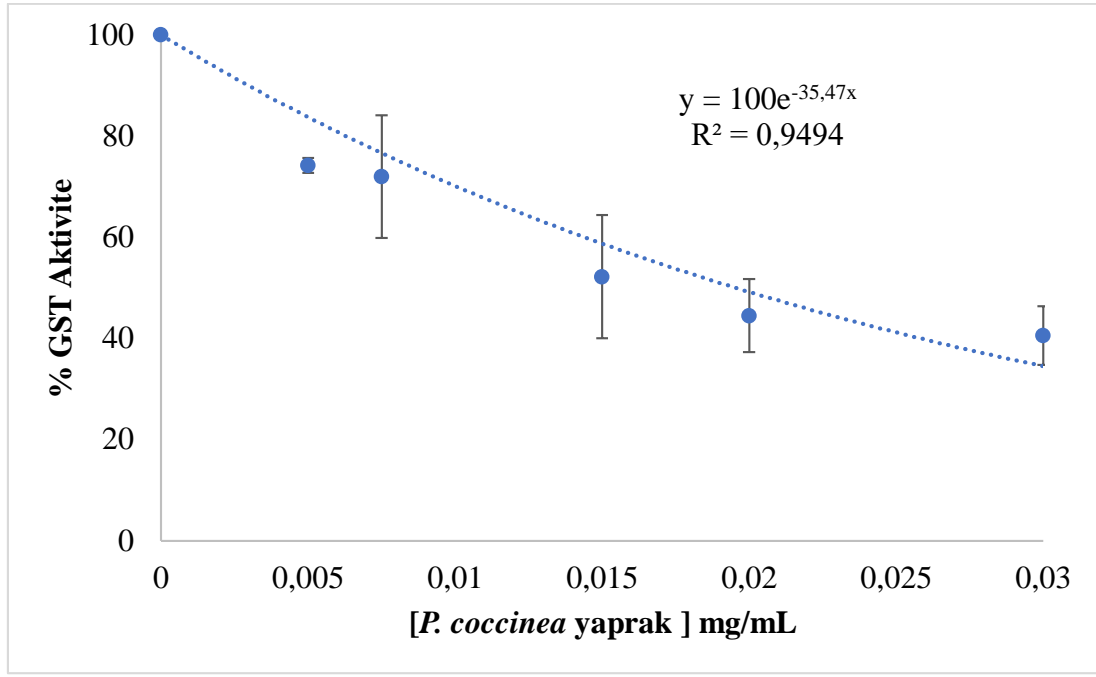
kuyucuklara 1 mg/mL konsantrasyondaki örnek 30 mikrolitre ilave edildikten sonra 37°C'de 18-24 saat aerob koşullarda inkübe edilmiştir (Yeniçeri ve ark., 2023).

### 2.2.5. İstatistik Analiz

Tüm deneyler üç tekrarlı olacak şekilde yapıldı. Elde edilen verilerin istatistiksel analizi için Microsoft Excel programı kullanıldı. Tüm verilerin ortalama değerleri ve standart hataları hesaplandı.

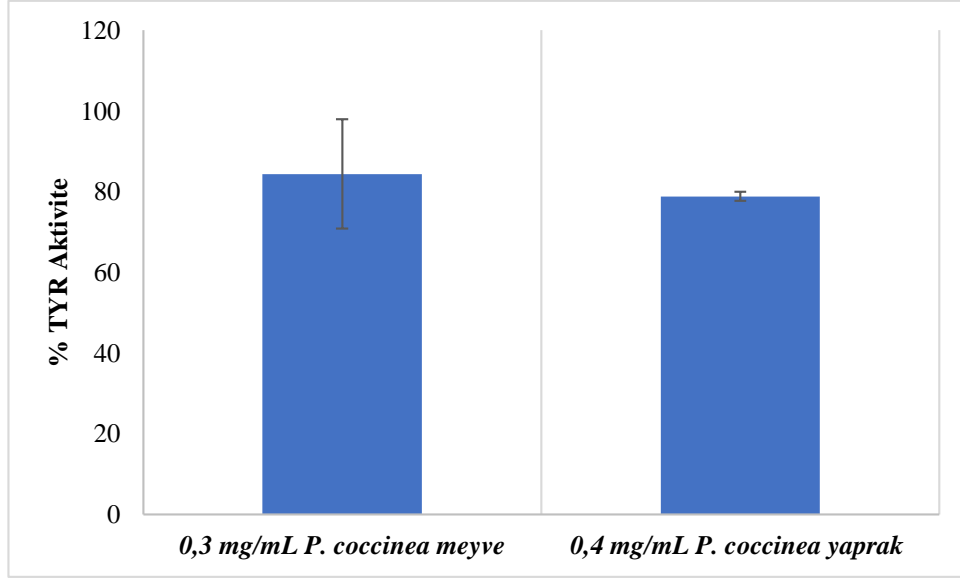
## 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmamızın ilk adımını antienzim aktivite analizleri oluşturmaktadır. *P. coccinea*'nın meyve ve yaprak ekstralarının GST ve TYR enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri *in vitro* şartlarda belirlenmiştir. *P. coccinea*'nın yaprak ekstresi GST enzim aktivitesi üzerinde inhibisyon etkisi gösterirken IC<sub>50</sub> değeri 19,587±3,320 µg/mL olarak tespit edilmiştir (Şekil 3). *P. coccinea*'nın meyve ekstresi ise GST enzim aktivitesi üzerinde yaklaşık %22,736 inhibisyon etkisi göstermiştir. *P. coccinea*'nın meyve ve yaprak ekstralarının GST enzim aktivitesi üzerindeki etkisi ilk kez ekibimiz tarafından çalışılmıştır. Yaprak ekstresinin mikro düzeyde inhibisyon etkisi, ilaç tasarımı çalışmaları için umut verici bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Ancak ileri çalışmalarda yaprak ekstresinin içeriği ve etken maddelerinin belirlenmesi, özellikle ilaç tasarımı çalışmaları için önemlidir. Dahası bugüne kadar çalışmamızla benzer şekilde GST enzim aktivitesi üzerine çeşitli bitki ekstralarının inhibisyon etkisi araştırılmıştır. Siyah havuç'un (*Daucus carota L. ssp*) metanol ekstresinin GST (IC<sub>50</sub>12,84 mM), asetil kolinesteraz (AChE; IC<sub>50</sub> 15,07 mM), ve Alfa-glikozidaz ( $\alpha$ - Gly IC<sub>50</sub>11,75 mM) enzim aktiviteleri üzerinde *in vitro* şartlarda inhibisyon etkisi gösterdiği ifade edilmiştir (Atalar ve ark., 2021).AChE ve GST enzim aktiviteleri üzerine *R. acetosella*metanol ekstresinin *in vitro* şartlarda inhibisyon etkisi gösterdiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada GST için IC<sub>50</sub> değeri 9,10mg/mL, AChE için 9,23 mg/mL olarak tespit edilmiştir (Irteğün Kandemir ve ark., 2024). Her iki çalışmanın sonuçları ile çalışmamız kıyaslandığında *P. coccinea*'nın yaprak ekstresinin GST enzim aktivitesi üzerindeki etkinliğinin daha fazla olduğunu söyleyebiliriz. Ancak *P. coccinea*'nın meyve ekstresinin inhibisyon etkinliğinin daha az olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar neticesinde bitkilerin sahip oldukları sekonder metabolitler sayesinde yaprak, meyve, kök gibi farklı kısımlarından hazırlanan ekstraların inhibisyon etkinliğinin ayrı ayrı analiz edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.



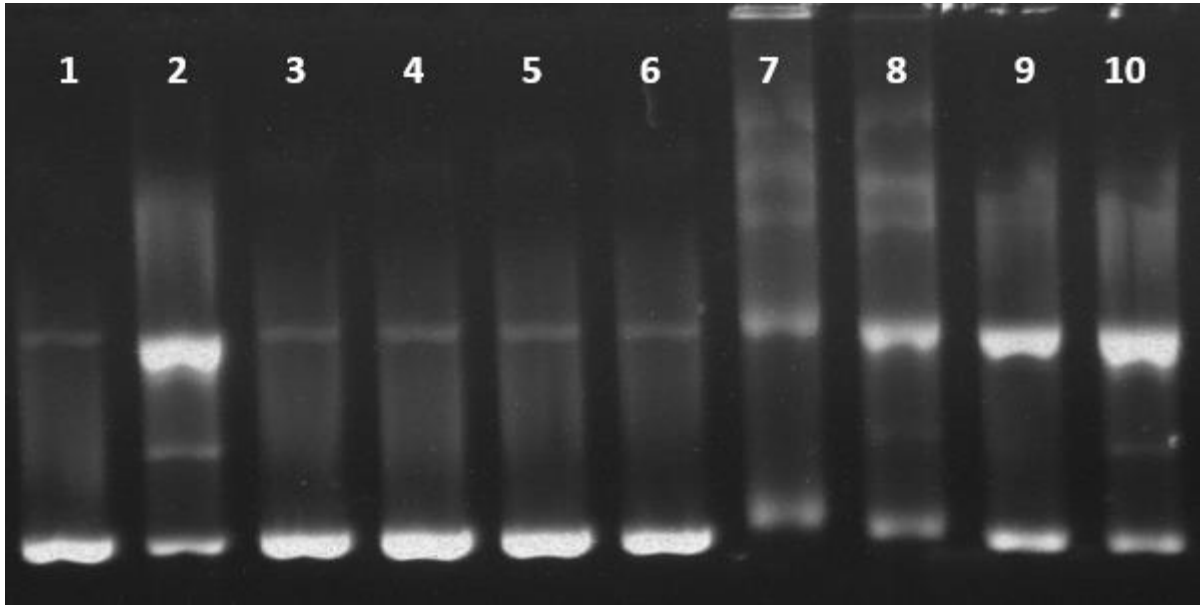
**Şekil 3.** *P. coccinea* yaprak ekstraktının GST enzim aktivitesi üzerindeki *in vitro* etkisi

*P. coccinea*'nin meyve ve yaprak ekstrelerinin TYR enzim aktivitesi üzerindeki etkisi *in vitro* şartlarda araştırılmıştır. 0,3 mg/mL *P. coccinea* meyve ekstresi yaklaşık %15,655'lik bir inhibisyon sergilerken 0,4 mg/mL *P. coccinea* yaprak ekstresi yaklaşık %21,175'lik bir inhibisyon etkisi göstermiştir (Şekil 4). Her iki ekstrenin TYR enzim aktivitesi üzerinde istenen düzeyde bir inhibisyon profili sergilemediği tespit edilmiştir. Buna karşın literatürde *P. coccinea* meyvenin etanol ve su ekstresinin asetilkolinesteraz, bütirikolinesteraz,  $\alpha$ -amilaz,  $\alpha$ -glukosidaz ve tirozinaz enzim aktiviteleri üzerinde inhibisyon profilinin incelendiği çalışmada elde edilen ekstraktların asetilkolinesteraz ve bütirikolinesteraz üzerinde oldukça zayıf inhibitör aktivite gösterdiği en yüksek inhibisyonu etanol ekstresinin  $\alpha$ -glukosidaz üzerinde yaptığı (9,94 mg ACE/g taze meyve) bunu tirozinaz (3,72 mg kojik asid equivalent/g taze meyve) ve  $\alpha$ -amilaz (2,24 mg akarboz equivalent/g taze meyve)'in takip ettiği belirtilmiştir (Sarıkurucu ve Tepe., 2015). Yaptığımız çalışma ile benzer sonuçlar elde edilmesine karşın *P. coccinea* meyve etanol ve su ekstresinin tirozinaz üzerinde yüksek bir inhibisyon profili sergilemediği görülmektedir. 0,3 mg/mL *P. coccinea* meyve ekstresi uygulandığında TYR'nin aktivitesi %84,345 $\pm$ 13,544 iken, 0,4 mg/mL *P. coccinea* yaprak uygulandığında TYR aktivitesi %78,825 $\pm$ 1,153'dür. Dahası çalışmamızda metanol ekstresi kullanıldığı için *P. coccinea* meyve ekstresinin içerisinde çözücüye bağlı olarak çözünen sekonder metabolitler değişeceği için farklı inhibisyon profili sergilediği düşünülmektedir. Ayrıca *P. coccinea* yaprak ekstresi GST de olduğu gibi TYR'de de daha iyi bir inhibisyon profili sergilemiştir. Çalışmamız kendi içerisinde tutarlı sonuçlar üretmiştir.



**Şekil 4.** *P. coccinea* yaprak ve meyve ekstraktlarının TYR enzim aktivitesi üzerindeki *in vitro* etkisi

*Pyracantha coccineay* yaprak ve meyve ekstraktlarının DNA koruma/kırılma etkisi incelendiğinde (Şekil 5) çalışılan ekstraktların her iki konsantrasyonun da DNA üzerinde kırılmaya veya hasara yol açmadığı görülmektedir. Dahası ortamda Fenton çözeltisi varlığında da yaprak ve çiçek 1 mg/mL konsantrasyonun DNA üzerinde koruma etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. *Pyracantha coccineay* yaprak ve meyve ekstraktlarının DNA koruma/ kırılma etkisi ilk kez ekibimiz tarafından incelenmiştir.



**Şekil 5.** *P. coccinea* yaprak ve meyve ekstraktlarının DNA koruma/kırılma aktivitesine ait jel agaroz görüntüsü. 1. Negatif kontrol (pBR322 plazmit DNA), 2. Pozitif kontrol (pBR322 plazmit DNA+Fenton reaktifi), 3-4. *P. coccinea* yaprak (1-0,5 mg/mL), 5-6. *P. coccinea* meyve (1-0,5 mg/mL), 7-8. *P. coccinea* yaprak (1-0,5 mg/mL)+Fenton reaktifi, 9-10. *P. coccinea* meyve (1-0,5 mg/mL)+Fenton reaktifi.



Şekil 6. *P. coccinea* yaprak ve meyve ekstraktlarının antimikrobiyal etkinliği

*P. coccinea* yaprak ve meyve ekstraktlarının incelenen patojen bakteri ve maya hücrelerine karşı antimikrobiyal etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 6). Tunç ve arkadaşları (2020), *Pyracantha coccinea* meyvesi etanolik ekstraktlarının (6,4 mg/mL) antimikrobiyal aktivitesini disk difüzyon yöntemiyle *Bacillus subtilis* ATCC 6633, *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Escherichia coli* ATCC 8739, *Staphylococcus aureus* ATCC 29213, *Enterococcus faecalis* ATCC 29212, *Staphylococcus epidermidis* ATCC 12228, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027, *Candida albicans* ATCC 1029 suşları üzerinde pozitif kontrol olarak Gentamisin ve Amfoterisin B kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada bu suşlar üzerinde antimikrobiyal etki gözlemlenemediklerini bildirmişlerdir. Benzer şekilde Uçar-Türker ve ark. (2012) da *Pyracantha coccinea* meyve özütünde herhangi bir antimikrobiyal aktivite tespit edememişlerdir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda *Pyracantha coccinea* meyve ekstraktının doğal bir antimikrobiyal ajan olarak etkisinin zayıf olduğu söylenebilir. Bir başka çalışmada etanol, dietil eter ve sıcak su gibi farklı çözücüler kullanılarak elde edilen *Pyracantha coccinea* meyve özütlerinin agar kuyu difüzyon yöntemiyle *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* ve *Candida albicans* test mikroorganizmaları üzerinde antimikrobiyal aktiviteleri pozitif kontrol olarak Gentamisin kullanılarak test edildiği çalışmada *Bacillus cereus* ve *Pseudomonas aeruginosa*'ya karşı üç özütün de antimikrobiyal aktivite sergilediği, en yüksek etkinin sıcak su özütünden sağlandığı bildirilmiştir (Karacaer, 2023). Turu ve ark., (2020), 45 bakteri (standart suş, gıda kökenli, klinik izolat, çoklu ilaç direnci gösteren) ve 3 maya (standart suş ve klinik izolat) olacak şekilde 48 farklı mikroorganizma üzerine *P. coccinea* etanolik meyve ekstraktının antimikrobiyal aktivitesini disk difüzyon yöntemi kullanarak test etmişlerdir. Disklere 50, 100 ve 200 µL emdirilen ekstraktlarda antimikrobiyal

aktivitenin konsantrasyonla doğru orantılı olarak arttığı belirlendiği bildirilmiştir. Araştırmacıların bu çalışmadan elde ettikleri bulgulara göre *B. cereus*, *E. faecium*, *S. hominis*, *S. warneri* ve *S. aureus* gibi Gram pozitif bakterilerin de yer aldığı 22 mikroorganizmaya karşı antimikrobiyal aktivite gözlemlenmiştir. Özellikle tıbbi yoğun bakım ünitelerindeki enfeksiyonlardan sorumlu *S. aureus*'a karşı *P. coccinea*'nın aktif bir etkisi olduğunu savunmuşlardır. Bitkilerde var olan fenolikler, flavonoidler, organik asitler gibi ikincil metabolitler antioksidan görevi görürler. Bilindiği üzere antioksidanlar reaktif oksijen türlerini temizleyerek bunların oluşumunu engeller. Böylece canlı organizmalardaki hasarların onarılması ve canlılar üzerindeki enfeksiyonlara karşı koruma sağlamış olurlar (Sadeghi ve ark., 2015). Ayrıca anti-kanser, anti-inflamasyon ve anti-aging gibi birçok biyolojik fonksiyona sahiptirler (Zou ve ark., 2016). Ancak bitkilerin sahip olduğu sekonder metabolitlerin cinsi, çeşidi ve konsantrasyonu yetiştikleri topraklara göre değişmektedir. Bunun sonucunda da mikroorganizmalar üzerinde farklı etkiler sergilemektedirler. Ayrıca yukarıdaki kaynaklar ve çalışmamızda elde ettiğimiz veriler neticesinde *P. coccinea*'nın mikroorganizmaya göre de antimikrobiyal etkinliğinin değiştiği söylenebilir.

## 5. Sonuçlar

*P. coccinea*'nın meyve ve yaprak metanol ekstraktları hazırlanarak ilk kez *in vitro* şartlarda GST enzim aktivitesi üzerindeki etkisi araştırıldı. Yaprak ekstresinin mikromolar seviyede inhibisyon etkisi göstermesi kanser tedavisinde kullanılabilir bir potansiyel taşıdığını sergilemiştir. Ancak *P. coccinea*'nın klinik ve faz çalışmalarının yapılması ekibimizce önerilmektedir. Bununla birlikte özellikle GST enzim aktivitesi üzerindeki etkiyi yaratan etken maddenin tespit edilmesi gerektiğini düşünmekteyiz. TYR enzim aktivitesi üzerindeki etki düzeyi her iki ekstre için istenen düzeyde olmasa da yaprak ekstresinin nispeten inhibisyon etkisinin daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda da bitkinin yaprak içeriğinin meyve içeriğinden fenolik ve flavonoidlerce daha zengin olduğunu düşünmekteyiz. *P. coccinea*'nın meyve ve yaprak metanol ekstraktları DNA koruma/kırılma etkisi ilk kez ekibimiz tarafından çalışılmıştır. *P. coccinea*'nın DNA üzerinde bir hasar oluşturmadığı gibi 1 mg/mL konsantrasyonda fenton çözeltisinin hasar oluşturmaya engel olduğu tespit edilmiştir. Toksik bileşiklerin oluşturacağı zararı en aza indirmek ve ilaç tasarımında oluşabilecek yan etkileri tolere etmek için *P. coccinea*'nın iyi bir potansiyele sahip olduğunu söyleyebiliriz. Son olarak *P. coccinea*'nın meyve ve yaprak metanol ekstraktlarının 1 mg/mL konsantrasyonu çalıştığımız mikroorganizmalar üzerinde antimikrobiyal etkinliğe sahip olmadığı belirlenmiştir. Ancak çok sayıda patojen bakteri, virüs ve mantar olduğunu düşünürsek bitkinin mikroorganizmalar üzerindeki etkinliğinin araştırılmasının devam etmesi gerektiği kanaatindeyiz.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları olarak aramızda herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederiz.



## Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### Kaynakça

- Akkemik E., Aybek A., Felek İ. Effects of cefan melon cucumis melo l seedextracts on human erythrocyte carbonicanhydrase i-ii enzymes. *Applied Ecology And Environmental Research* 2019; 17(6): 14699-14713.
- Akkemik E., Fidan M., Balaban M., Inal B. ICP-OES And LC-ESI-MM/MM analyses, enzyme inhibition and DNA protection potential of pelargonium quercetorum agnew. *Studia Universitatis Babes-Bolyai, Chemia* 2022; 67(4).
- Anonim. <https://www.pfizer.com.tr/pfizerde-Bilim/Arge/Ar-Ge-Ana-Sayfa>. 2024.
- Aslam S., Gupta V. Carbonic anhydrase inhibitors. [Updated 2023 Apr 17]. In: Statpearls [Internet]. Treasure Island (FL): Statpearls Publishing; 2024 Jan-. Available From: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/nbk557736/>
- Atalar MN., Aras A., Türkan F., Barlak N., Yildiko Ü., Karatas OF., Alma MH. The effects of daucus carota extract against pc3, pnt1a prostate cells, acetylcholinesterase, glutathione s-transferase, and  $\alpha$ -glycosidase; an in vitro–in silico study. *Journal of Food Biochemistry* 2021; 45(12): E13975.
- Baber MA., Crist CM., Devolve NL., Patrone JD. Tyrosinase inhibitors: a perspective. *Molecules* 2023; 28, 5762.
- Balaban M., Akkemik E. Investigation of natural inhibitors of liver glutathione s-transferase enzyme of shabut (barbus grypus) fish. *International Siirt Conference on Scientific Research Siirt University, November 5-7 2021, 144s. Siirt, Türkiye*
- Bhattarai S., Sharma BK., Subedi N., Ranabhat S., Baral MP. Burden of serious bacterial infections and multidrug-resistant organisms in an adult population of Nepal: A comparative analysis of minimally invasive tissue sampling informed mortality surveillance of community and hospital deaths. *Clin Infect Dis.* 2021; S415-S421.
- Board PG., Menon D. Glutathione transferases, regulators of cellular metabolism and physiology, *biochim. Biophys. Acta* 2013; 1830, 3267-3288.
- Booth J., Boyland E., Sims AP. An enzyme from rat liver catalysing conjugations with glutathione. *Biochem. J.*, 1961; 79, 516.
- Brenner M., Hearing VJ. The protective role of melanin against uv damage in human skin. *Photochem Photobiol* 2008; 84, 539-549.
- Calay Ö., Tirozinaz enziminin bazı tıbbi bitkiler tarafından inhibisyonu. İstanbul Üniversitesi, Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü; Biyokimya ABS, 73s İstanbul, Türkiye, 2010.
- Chang TS. An updated review of tyrosinase inhibitors. *Int. J. Mol. Science* 2009; 10, 2440-2475.



- Cooksey CJ., Garratt PJ., Land EJ., Pavel S., Ramsden CA., Riley PA. Evidence of the indirect formation of the catecholic intermediate substrate responsible for the autoactivation kinetics of tyrosinase, *Journal of Biological Chemistry* 1997; 272: 26226-26235.
- Çöteli E., Karataş F. Ateş dikeninin (*pyracantha coccinea roemer var. lalandi*) kırmızı meyvelerindeki A, E, C vitamini,  $\beta$ -karoten, likopen, glutatyon ve malondialdehit miktarlarının araştırılması. *Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi* 2017; 29(1): 41-46.
- De Almeida SM., Lafayette EA., Da Silva LP., Amorim CA., De Oliveira TB., Ruiz AL., De Carvalho JE., De Moura RO., Beltrão EI., De Lima MC., De Carvalho JL. Synthesis, dna bnding, and antiproliferative activity of novel acridine-tiosemikarbazon derivatives. *Int J Mol Science* 2015; 16(6): 13023-13042.
- Deering RW., Chen J., Sun J., Ma H., Dubert J., Barja JL., Seeram NP., Wang H., Rowley DC. N-acyl dehydrotyrosines, tyrosinase inhibitors from the marine bacterium *thalassotalea* sp. Pp2-459. *J. Nat. Prod.* 2016; 79, 447-450.
- Duckworth HW., Coleman JE. Sigma quality control test procedure, enzymatic assay of tyrosinase (*Ec* 1.14. 18. 1). *J. Biol. Chem.* 1970; 245, 1613-1625.
- Gasparetti C., Nordlund E., Jänis J., Buchert J., Kruus K. Extracellular tyrosinase from the fungus *trichoderma reesei* shows product inhibition and different inhibition mechanism from the intracellular tyrosinase from *agaricus bisporus*. *Biochim. Biophys. Acta Bba Proteins Proteom.* 2012; 1824, 598-607.
- GBD. Demographics collaborators. global age-sex-specific fertility, mor- tality, healthy life expectancy (hale), and population estimates in 204 countries and territories, 1950–2019: a comprehensive demographic analysis for the global burden of disease study 2019. *Lancet* 2020; 396: 1160-203.
- Haldys K., Goldeman W., Jewgi 'Nski M., Woli 'Nska E., Anger-Góra N., Rossowska J., Latajka R. Halogenated aromatic thiosemikarbazones as potent inhibitors of tyrosinase and melanogenesis. *bioorg. Chem.* 2020; 94, 103419.
- Hamada SI., Kamada M., Furumoto H., Hirao T., Aono T. Expression of glutathione s-transferase- $\pi$  in human ovarian cancer as an indicator of resistance to chemotherapy, *gynecol. Oncol.*, 1994; 52, 313-319.
- Hayes JD., Flanagan JU., Jowsey IR. Glutathione transferases, *Ann. Rev. Pharmacol. Toxicol.*, 45, 51-88.
- Irtegin Kandemir S., Aktepe N., Baran A. Determination of chemical composition and antioxidant, cytotoxic, antimicrobial, and enzyme inhibition activities of *rumex acetosella* L. *Plant Extract. Chem. Pap.* 2024.
- Karacaer NT. The medicinal effects of different solvent extracts of *pyracantha coccinea roem.* fruits: heavy metal content, antioxidant, and antimicrobial properties. *Bezmialem Science* 2023; 11(1).

- Khan AA., Akhtar S., Husain Q. Direct immobilization of polyphenol oxidases on celite 545 from ammonium sulphate fractionated proteins of potato (*solanum tuberosum*). *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 2006; 40(1-2): 58-63.
- Luo W., Kinsey M., Schiffman JD., Lessnick SL. Glutathione s-transferases in pediatric cancer. *Front. Oncol.*, 2011; 1, 39.
- Matoba Y., Kihara S., Bando N., Yoshitsu H., Sakaguchi M., Kayama K., Yanagisawa S., Ogura T., Sugiyama M. Catalytic mechanism of the tyrosinase reaction toward the tyr 98 residue in the caddie protein. *Plos Biol.* 2018; 16(12): E3000077.
- Murray Cjl., Abbafati C., Abbas KM. Five insights from the global burden of disease study 2019. *Lancet* 2020; 396: 1135-1159.
- Özaslan MS. Investigation of potential effects of some indole compounds on the glutathione s-transferase enzyme. *Biochemistry Moscow* 2024; 89, 553-561.
- Parvez S., Kang M., Chung HS., Bae H. Naturally occurring tyrosinase inhibitors: Mechanism and applications in skin health. *Cosmetic and Agriculture Industries, Phytotherapy Research*, 2007; 21, 805-816.
- Popoviciu Dr., Negreanu-Pirjol T., Motelica L., Negreanu-Pirjol BS. Carotenoids, flavonoids, total phenolic compounds content and antioxidant activity of indigenous *pyracantha coccinea* M. roem. *Fruits. Rev Chim* 2020; 71: 258-266.
- Ramadan Mohamed AG. Izatin türevlerinin dna koruma, etkileşim ve antimikrobiyal aktivitesinin analizleri ve seftriakson-fenilalanin kombinasyonunun sinerjistik etkilerinin değerlendirilmesi. Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi Genetik Ve Biyomühendislik Ana Bilim Dalı, 105s, Kastamonu, Türkiye, 2019.
- Riley PA., Melanin. *Int J. Biochem. Cell Biol.* 1997; 29, 1235-1239.
- Robert LS., Marc FL., Michael VD. Chapter 26 - Carbonic anhydrase inhibitors, editor(s): robert l stamper, marc f lieberman, michael v drake, becker-shaffer's diagnosis and therapy of the glaucomas (eighth edition), Mosby, 2009, Pages 407-419.
- Sadeghi Z., Valizadeh J., Azizian Shermeh O., Akaberi M. Antioxidant activity and total phenolic content of *boerhavia elegans* (choisy) grown in baluchistan, Iran. *Avicenna Journal of Phytomedicine* 2015; 5(1): 1-9.
- Seo SY., Sharma VK., Sharma N. Mushroom tyrosinase: Recent prospects. *J. Agric. Food Chem.* 2003; 51, 2837-2853.
- Şakiroğlu H. Kuşburnu meyvasından izole edilen polifenol oksidaz enziminin kinetik ve elektroforetik özelliklerinin incelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyokimya ABD, 121s, Erzurum, Türkiye, 1994.
- Sarikurkcü C., Tepe B. Biological activity and phytochemistry of firethorn (*pyracantha coccinea* m.j. roemer). *J Funct Foods* 2015; 19: 669-675.
- Singh RR., Reindl KM. Glutathione s-transferases in cancer. *Antioxidants* 2021; 10, 701.

- Smit N., Vicanova J., Pavel S. The hunt for natural skin whitening agents. *Int. J. Mol. Sci.* 2009; 10, 5326–5349.
- Temiz A. Genel mikrobiyoloji uygulama teknikleri (5. Baskı). HatiboğluYayınevi, Ankara, Türkiye, 2010.
- Tew KD. Glutathione-associated enzymes in anticancer drug resistance, *Cancer Res.*, 1994; 54, 4313-4320.
- Tew KD., Townsend DM. Glutathione-S-transferases as determinants of cell survival and death. *Antioxid. Redox Signal.*, 2012; 17, 1728-1737.
- Tunç K., Semerci AB., Okur I. Antioxidant activity of the fruits of *pyracantha coccinea* using ethanolic extract method. *Food And Health* 2020; 6(1): 35-40.
- Turu D., Bozyel ME., Candan K., Yakan MA., Benek A., Canli K. In vitro antimicrobial and antioxidant activities of *pyracantha coccinea* fruits ethanol extract. *Vitro* 2020; 4, 89-93.
- Ucar-Türker A., Birinci-Yildirim A., Pehlivan-Karakas F. Antibacterial and antitumor activities of some wild fruits grown in turkey. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 2012; 26(1): 2765-2772.
- Wong TC., Luh BS., Whitaker JR. Isolation and characterization of polyphenol oxidase isozymes of clingstone peach. *Plant Physiology* 1971; 48(1): 19-23.
- World Health Organization. The top ten causes of death. 2020. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>. Accessed 25 April 2021.
- Yang P., Ebbert JO., Sun Z., Weinshilboum RW. Role of the glutathione metabolic pathway in lung cancer treatment and prognosis: A review. *J. Clin. Oncol.*, 2006; 24, 1761-1769.
- Yeniçeri ŞA., Balaban M., Hallaç B., Akkemik E. Investigation of the antienzyme and antimicrobial properties of the fruit extracts of the oleaster (*elaegnus angustifolia* l.) under in vitro conditions, proceedings of IKTS 2023 - 2nd International Karatekin Science and Technology Conference, 21-22 December 2023,281s, Çankırı, Türkiye
- Yu F., Pan Z., Qu B., Yu X., Xu K., Deng Y., Liang F. Identification of a tyrosinase gene and its functional analysis in melanin synthesis of *pteria penguin*. *Gene* 2018; 656, 1–8.
- Zaidi KU., Ali AS., Ali SA., Naaz I. Microbial tyrosinases: promising enzymes for pharmaceutical, food bioprocessing, and environmental industry. *Biochem. Res. Int.* 2014; 2014, 854687.
- Zou Z., Xi W., Hu Y., Nie C., Zhou Z. Antioxidant activity of citrus fruits. *Food Chemistry* 2016; 196, 885-896.

## Suya Daldırma ve Donma-Çözülme Döngülerinin Betona Yapıştırılan FRP Epoksinin Çekme Dayanımına Etkisi

Metehan ÇALIŞ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Türk Standardları Enstitüsü, Yangın ve Akustik Laboratuvarı, 34953, Tuzla/İstanbul

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-1169-6413>

\*Sorumlu yazar: mcalis@tse.org.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 01.06.2024

Kabul tarihi: 12.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Fiber takviyeli polimer

Donma ve çözülme

Suya daldırma

Pull-off

Yapısal güçlendirme

Yapı malzemeleri

### ÖZ

Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozitlerin çeşitli çevresel koşullar altında beton yapıların güçlendirilmesindeki dayanıklılığı, uzun vadeli etkinlikleri için çok önemlidir. Bu çalışma, suya daldırma ve donma-çözülme döngülerinin epoksi bağlı FRP beton plakaların çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemekte ve sahil yapılarında yaygın olan koşulları temsil etmektedir. Beton plakalar, Duratek® AV21 epoksi reçinesi kullanılarak Bazalt (BFRP), Cam (GFRP) ve Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) levhalarla güçlendirilmiş ve suya daldırma ve donma-çözülme döngüsü testlerine maruz bırakılarak şartlandırılmıştır. Çekme testleri, kontrol numunelerinde beton için 3.26 N/mm<sup>2</sup> ve epoksi reçine için 3.97 N/mm<sup>2</sup> ortalama çekme mukavemetleri ile beton alt tabakada kohezif arızalar olduğunu ortaya koymuştur. Suya daldırma, CFRP ve GFRP için çekme mukavemetinde hafif düşüşlere neden olurken, BFRP'de artışa neden olmuştur. Donma-çözülme döngüsü tüm FRP tiplerinde çekme mukavemetini arttırmıştır. Sonuçlar, EN 12004-2 standardına göre seçilen suya daldırma ve donma-çözülme koşullarının FRP-beton bağının sağlamlığını gösteren gerekli 2.5 MPa'nın üzerinde kalan tüm test sonuçları ile FRP takviyeli betonun çekme mukavemetini minimum düzeyde etkilediğini göstermektedir. Çalışma, zorlu ortamlarda yapısal takviye için FRP kompozitlerinin kullanılmasını desteklemekte ve olumsuz koşullar altında kullanım esnekliklerini vurgulamaktadır.

## Effect of Water Immersion and Freeze-Thaw Cycles on Pull-off Strength of FRP Epoxy Bonded on Concrete

### Research Article

#### Article History:

Received: 01.06.2024

Accepted: 12.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

FRP

Freeze and thaw

Water immersion

Pull-off

Structural strengthening

Construction materials

### ABSTRACT

Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites' durability in reinforcing concrete structures under various environmental conditions are crucial for their long-term effectiveness. This study examines the effects of water immersion and freeze-thaw cycles on the pull-off strength of epoxy-bonded FRP concrete slabs, representing conditions common in waterfront structures. Concrete slabs were reinforced with Basalt (BFRP), Glass (GFRP), and Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) sheets using Duratek® AV21 epoxy resin and exposed to water immersion and freeze-thaw cycling tests. Pull-off tests revealed cohesive failures in the concrete substrate, with average pull-off strengths of 3.26 N/mm<sup>2</sup> for concrete and 3.97 N/mm<sup>2</sup> for epoxy resin in control samples. Water immersion caused slight decreases in pull-off strength for CFRP and GFRP, while BFRP increased. Freeze-thaw cycling increased pull-off strength across all FRP types. The results suggest that the selected water immersion and freeze-thaw requirements according to the EN 12004-2 minimally impact the pull-off strength of FRP-reinforced concrete, with all test results remaining above the required 2.5 MPa, demonstrating the FRP-concrete bond's robustness. The study supports using FRP composites for

structural reinforcement in harsh environments, emphasizing their resilience under adverse conditions.

---

**To Cite:** Çalış M. Effect of Water Immersion and Freeze-Thaw Cycles on Pull-off Strength of FRP Epoxy Bonded on Concrete. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 82-99.

## **1. Introduction**

The conservation of natural resources has become a pressing issue because of rapid urbanization and industrial growth. The construction sector significantly influences sustainable resource management. Construction processes, ranging from new developments to the upkeep and refurbishment of existing buildings, have a significant impact on the environment. The industry is a substantial consumer of natural resources, including water, minerals, and timber, and contributes considerably to environmental degradation through deforestation, pollution, and waste production. Therefore, it is crucial to implement strategies that mitigate these effects and promote resource conservation.

The conservation of natural resources and extension of building lifespans are critical considerations in the construction industry. Tran et al. (2023) highlighted the need for an integrated framework to assess building sustainability, emphasizing the importance of environmental, economic, and social aspects in the decision-making process. Ayoub et al. (2022) presented a framework for evaluating the application of sustainable construction principles in government-building projects, focusing on environmental, economic, and social sustainability throughout the project's life cycle. Renovation of existing structures conserves resources by reducing the need for new materials and waste production. This approach preserves cultural heritage, extends building lifespans, and mitigates environmental impact. Sustainable development is further promoted by maintaining and retrofitting older buildings and ensuring their functionality and resilience to harsh conditions. Regular maintenance and timely repair prolong building life, contribute to resource conservation, and reduce the ecological footprint of the construction industry. Numerous elements can damage or reduce the strength and durability of civil structures. In addition to design loads, environmental factors such as harsh conditions and additional loads during the lifespan of a structure can have negative impacts. The advancement of composite materials and their integration into construction has garnered significant attention from researchers and industries in recent years. Fiber-reinforced polymer composites have gained popularity for structural repair and retrofitting of reinforced concrete buildings. Composite systems are frequently used to enhance the ductility, rigidity, and strength of reinforced concrete structures that lack these qualities. To strengthen these structures, fiber-reinforced polymer (FRP) systems are well-suited for specialized civil engineering applications. FRP composites are composed of high-strength fibers embedded in a polymer matrix, such as epoxy, vinyl ester, or polyester thermosetting plastic. However, epoxy resins are the most commonly used matrices. The polymer matrix, which is typically stiff but weak, is combined with a high-tensile reinforcing material to create a final product that exhibits the desired mechanical or material properties such as high strength and elasticity.

Several studies have evaluated the FRP-concrete bond degradation under hygrothermal conditions. Zheng et al. simulated the hygrothermal climate characteristics of a region in South China and CFRP-

bonded concrete specimens exposed to six different temperature and humidity conditions (Zheng et al. 2016). In their study, two types of tests were conducted: pull-off and single-shear. The results showed that the bond behavior decreased up to 27.9% after exposure to high temperatures and humidity (5°C to 50°C, 70%RH to 95% RH) for a period of 14 days. Lai et al. performed a long-term durability study on CFRP–concrete direct shear pull-off tests, and the specimens were immersed in water at 25°C, 40°C, and 60°C for 5, 15, 30, and 50 weeks (Benzarti et al. 2011). The test results showed a reduction of up to 30% in load-bearing capacity. Benzarti et al. (2011) studied the bonding strength of CFRP on concrete with a longer period of exposure to 95% RH at 40°C. The decrease in the pull-off test results was approximately 58%. Dai et al. (2010) studied the effect of moisture on the bond behavior of FRP to concrete interfaces (Dai et al., 2010). The main focus of this study was the effects of moisture at the time of FRP installation and the effect of moisture on service life. Pull-off tests were conducted at the beginning and again after 8 months, 14 months and 2 years of wet-dry and thermal cycling. The marginal effect was on up to 90% RH-cured concrete surfaces, and FRP composites adversely affected the bonding performance of the FRP-concrete interfaces.

In addition to humidity and temperature effects, FRP system behavior at low temperatures is also important, especially for applications in cold climate conditions. Green et al. (2006) studied the behavior of large- and small-scale FRP-confined concrete columns under extreme conditions (Green et al. 2006). Small-scale test samples of concrete cylinders wrapped with FRP and exposed to temperatures as low as -40°C or up to 300 freeze-thaw (-18°C to 15°C). GFRP and CFRP sheets were used to confine the concrete cylinders, and the compressive strengths of the exposed and unexposed test samples were compared. The results of this study showed that FRP-confined concrete columns have adequate compressive strength under several extreme conditions. Freeze-thaw cycling did not reduce the compressive strength significantly, and at low temperatures, it showed an increase in strength. In addition to laboratory studies, the long-term durability of externally bonded FRP systems via field assessments is important. Yun and Wu's study aimed to investigate the durability of the FRP-concrete bond interface under freeze-thaw cycling, considering exposure conditions, concrete grade, and the number of freeze-thaw cycles as parameters (2010). The behavior of the carbon FRP (CFRP)–concrete bond interface was evaluated through single-face shear tests. Similarly, Bisby and Green conducted flexural tests on 39 small-scale flexural beams reinforced in tension with externally bonded FRP sheets (2002). The study presented the results of an experimental and theoretical investigation into the effects of freeze-thaw cycling on the FRP-concrete bond.

Yaman et al. (2022) investigated the performance of C16 and C25 concrete samples reinforced with BFRP under freeze–thaw cycles and elevated temperatures. Cylindrical samples were exposed to temperatures of 25°C, 60°C, 100°C, and 150°C for 12 h and subjected to 30, 60, 90, and 120 freeze/thaw cycles. Changes in the compressive strength, relative masses, resonance frequencies, and dynamic modulus of elasticity were compared with those of the reference samples. The results showed that the BFRP reinforcement increased the compressive strength compared with the non-reinforced samples.

However, the performance decreased with increasing freeze/thaw cycles and temperature, although the BFRP-reinforced samples maintained a higher strength than the non-reinforced samples, even under harsh conditions. Allen and Atadero's study was collecting pull-off strength data in situ, where FRP repair had been applied eight years before the study on an arch bridge (Allen and Atadero, 2012). Tests were conducted according to ASTM D7522 (2009), and this study also considered a newer version of the standard ASTM D7522 (2021). According to this study, because of the difficulties on site measurements, the pull-off results varied drastically for locations within close proximity, and there was no clear conclusion regarding which material was deteriorating: the substrate, filler resin, or FRP.

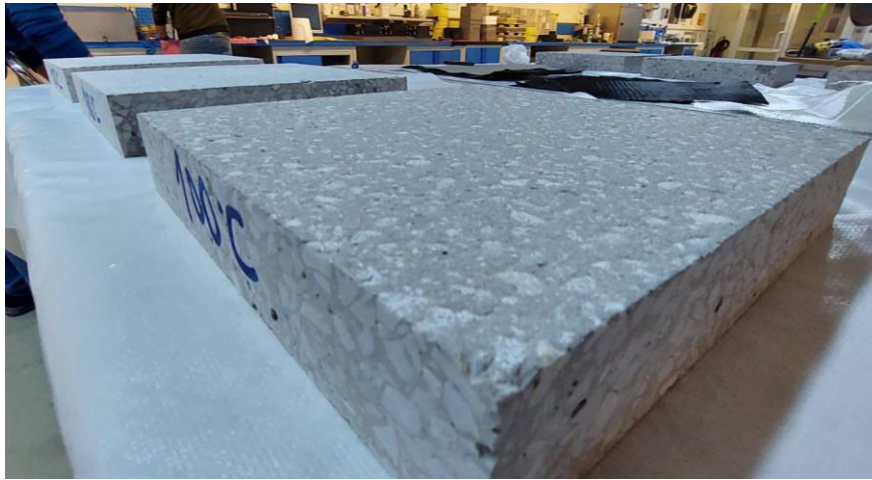
In this study, the effects of water immersion and freeze-thaw cycles on epoxy-bonded FRP concrete slabs were investigated. The significance of this study is heightened by the growing demand for a robust and long-lasting infrastructure in the face of increasing environmental challenges. Enhancing the endurance and dependability of FRP-concrete bonds can substantially reduce the maintenance expenses and bolster the security of buildings subjected to adverse weather conditions. Furthermore, this study expands the existing body of knowledge by providing empirical data on the durability of FRP-concrete bonds, which can inform guidelines and standards for the use of FRPs in construction. By bridging the knowledge gap regarding the behavior of these materials under freeze-thaw and water immersion conditions, this study supports the creation of a more resilient infrastructure, thereby contributing to the sustainability and safety of the built environment. The findings of this research can aid engineers and policymakers in making well-informed decisions regarding the utilization of FRPs in various applications, ensuring that structures can withstand the rigors of environmental exposure without compromising performance. The results will also elucidate the behavior of the pull-off performance of FRP systems used to strengthen waterfront concrete structures, such as piles, beams, and decks.

## **2. Materials and Methods**

### *2.1. Materials*

#### *2.1.1. Concrete Substrate*

According to the standard products and systems for the protection and repair of concrete structures, part 4: structural bonding EN 1504-4 (2005), the reference concrete for pull-off testing is described as MC (0.40) in the EN 1766 (2017) reference concrete for testing (Figure 1). Type MC (0.40) is concrete with a water/cement ratio of 0.40 and contains 455/470 kg/m<sup>3</sup> cement in the mix. The reference concrete has a median bonding strength determined by pull-off testing according to EN 1542 with a value of greater than 2.5 MPa (N/mm<sup>2</sup>). The pull-off test results for the concrete substrates are listed in Table 1.



**Figure 1.** Reference Concrete Substrate Type MC (0,40)

The concrete substrates used for testing had dimensions of 300 mm × 300 mm × 50 mm, differing from the standard thickness of 100 mm. The surface has a roughness created by grit blasting equipment, as described in the standard, which helps the cover layer bond to the concrete surface better.

**Table 1.** Pull-off Strength of Concrete Substrate

Test Sample No	Value (N/mm <sup>2</sup> )
No:1	3.125
No:2	3.256
No:3	3.089
No:4	3.475
No:5	3.358
Average	<b>3.26</b>

### 2.1.2. Epoxy Resin Adhesive

Duratek® AV21 epoxy-based lamination system was used as an adhesive between the concrete and the FRP. The epoxy kit had two components (A: main component epoxy and B: hardener) with an A/B mixing ratio of 73/27 by weight. The contents of container B were added to container A and the two components were mixed for 2-5 min until a homogeneous appearance was achieved. The working environment temperature range was between 10°C and 30°C, and the test samples were prepared under standard laboratory conditions at 23±2°C. Before the fiber sheet was applied, the concrete surface was impregnated. Duratek® AV21 epoxy lamination resin has CE marking according to EN 1504-4 and the features of the product are listed in Table 2.

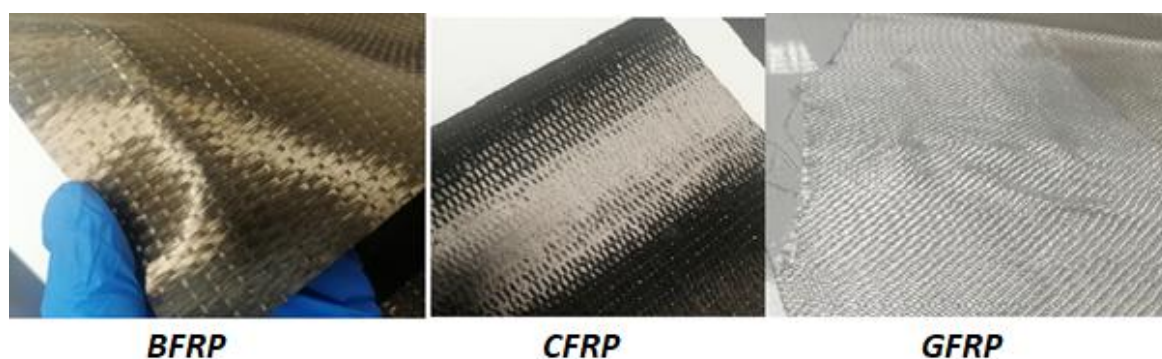


**Table 2.** Epoxy Resin (AV21) Technical Specification

Feature	Unit	Standart	Specimen (Epoxy + Hardener)
Density	kg/l	EN ISO 2811-1	1.10±0.05
Viscosity(@23°C)	mPas	ISO 2884-1	500-800
Pot Life (@23°C)	Min	EN 9514	450
Drying time	Min	TS 4317	
Touch Duration	Hour		24
Full Hardening (@23°C, %55 RH)	Week		1
Thermal Transition Temperature	°C	EN 12614	>50
Shrinkage (@23°C, 7 days)	%	EN 12617-1	<%0.1
Thermal Expansion Coeff.	10 <sup>-6</sup> /K	EN 1770	<100
Compressive Strength	N/mm <sup>2</sup>	EN 12190	103.6±0.5
Adhesion Strength	N/mm <sup>2</sup>	EN 12188	>14
Shear Strength	N/mm <sup>2</sup>	EN 12188	>60
Modulus of Elasticity	N/mm <sup>2</sup>	EN 13412	>2500
Reaction to fire	-	EN 13501-1	D-s2/d0

### 2.1.3. Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheets

Basalt, glass, and carbon fiber fabrics with epoxy resin were used on the concrete slab for reinforcement purposes. Ten test samples were prepared in total. The samples were first cut to a size of 30 x 30 cm, which was the same as the surface size of the concrete slab (Figure 2). The technical specifications of the FRP fabrics are listed in the following tables (Table 3-4).

**Figure 2.** FRP Sheet Preparation (30cmx30cm)**Table 3.** CFRP and BFRP Technical Specification

Spesification	CFRP	BFRP
Areal Weight (g/m <sup>2</sup> )	300±5%	300±5%
Weave Style (-)	Unidirectional	Unidirectional
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.80	2.63
Tensile Style (MPa)	5500	3000
E-Modulus (GPa)	250	90
Thread Count Warp (ends/10cm)	36.5±5%	12.5±5%
Thread Count Weft (ends/10cm)	10.0±5%	10.0±5%

**Table 4.** GFRP Technical Specification

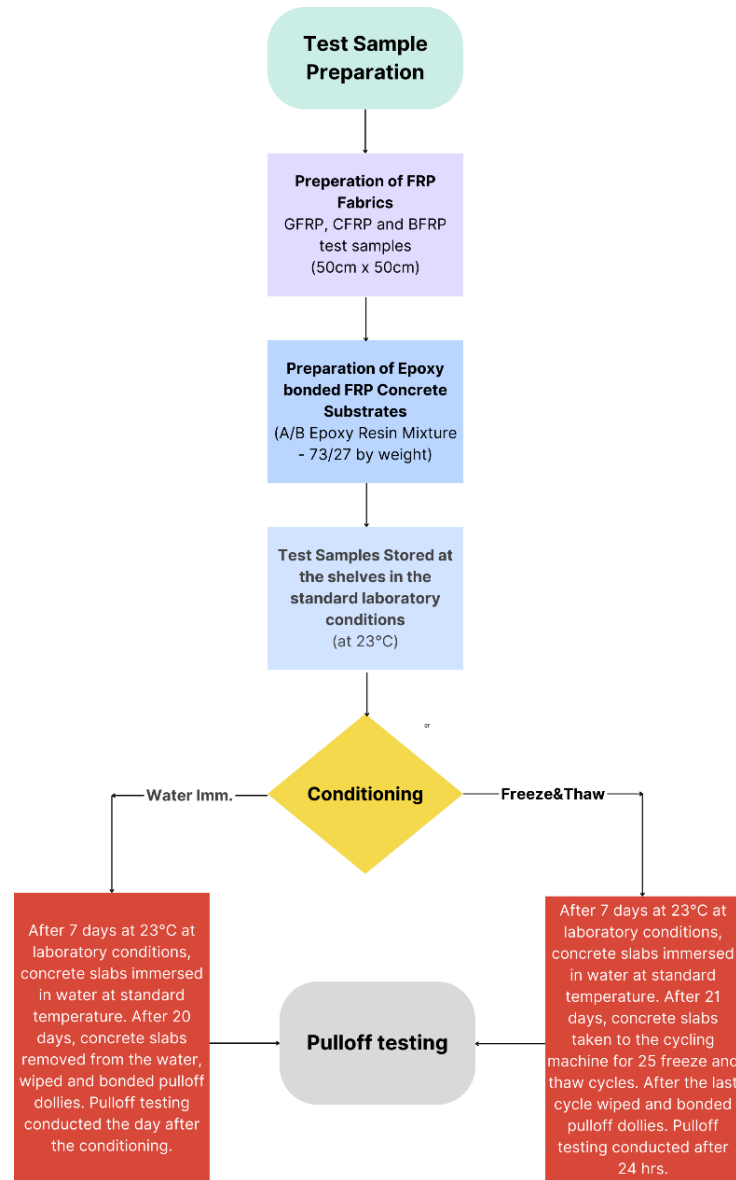
Spesification	Value
Areal Weight (g/m <sup>2</sup> )	300±5%
Density Warp (y/cm)	22±2%
Density Weft (y/cm)	21.4±2%
Weave Style	Satin 8
Glass Type (warp-weft)	e-glass
Tensile Strength Warp (N/cm)	587
Tensile Strength Weft (N/cm)	571

### 2.2. Test Sample Preparation and Test Methods

First, the FRP fabrics were cut using a 30 × 30 cm metal template. The concrete slabs were maintained in a standard laboratory environment (23±2°C, 50±5% RH) for at least 24 h and marked with a board pen to describe the experiments. Before starting the epoxy resin application, the fabric weights were measured and the amount of epoxy used was calculated based on the measured weight. Within the framework of the epoxy manufacturer's instructions, approximately 2.5-3 times the FRP surface weight of epoxy resin was used for each FRP type.

After mixing epoxy resins A and B at a specified ratio, the first layer was applied to the concrete slabs. In the first layer, slightly more than half of the consumption value of epoxy resin was used. This can be attributed to the fact that concrete absorbs some amount of resin from the surface and the effect of the epoxy resin applied to the substrate on the main adhesion strength. After the first layer was applied using a brush, FRP fabric was applied to the surface within 2 min. A force was applied both horizontally and vertically with a ribbed metal paddle roller (consolidation roller) to ensure that there was no air gap between the concrete surface and FRP fabric. This ensured that the FRP fabric adhered better to the surface and that the epoxy resin entered between the tows and fibers of the FRP fabric. After the application of the metal paddle roller, some epoxy resin reached the surface between the BFRP and CFRP fabrics. The GFRP fabric was directly incorporated with the epoxy resin and integrated with the epoxy resin to create a monolithic appearance.

After FRP fabric application, the remaining part of the calculated consumption amount was applied to the FRP fabric within 2 min. The surface was smoothed with a brush to avoid ripples and roughness. Afterwards, they were placed on test sample shelves and stored under laboratory conditions (23±2°C, 50±5% RH). The experimental flow applied to concrete slabs bonded with FRP fabrics is shown in Figure 3.



**Figure 3. Testing Flow Chart**

To determine the epoxy application amount according to the declaration of the epoxy resin manufacturer, weight measurements of the 30 × 30 cm FRP fabrics were performed, and the areal weight measurements of the FRP fabrics to be applied were within the declared values (g/m<sup>2</sup>) of the FRP fabric manufacturers.

The standard, “EN 1542:1999 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods- Measurement of bond strength by pull-off” is mainly used for concrete repair and protection systems, mortars, grouts, and the concrete itself (EN 1542, 1999).

The ASTM D 7522 Standard Test Method for Pull-off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates was used to determine the adhesion performance of the FRP laminate systems on concrete.

Both standards require a drill diameter and barrel dimensions of 50±10 mm and the depth of the drill through the concrete substrate should be 15±5 mm. An adhesive was applied to the surface of the drilled

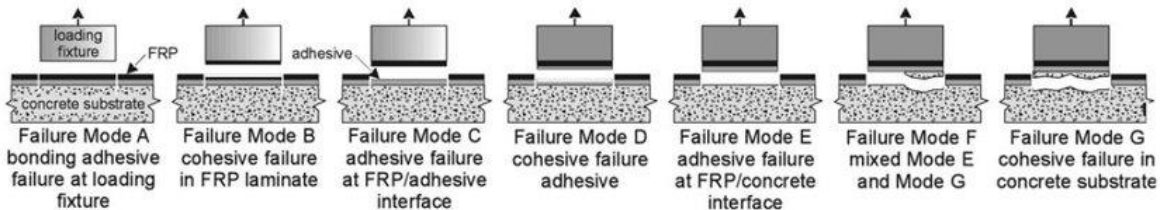
part of the test specimen and allowed to harden, in accordance with the manufacturer’s instructions. The rate of the load applied on the dolly for pull-off testing according to EN 1542 must be continuous and at 0.05±0.01 MPa/s constant speed until failure occurs, but for ASTM D7522, limiting the rate of stress applied to the FRP-substrate interface being tested to less than or equal to 1 MPa/min (equal to 0.0167 MPa/s).

Another difference between these two standards is the method used to determine the failure modes. The failure modes according to ASTM D7522 are shown in Figure 4. The types of failure according to EN 1542 are listed in Table 5.

**Table 5.** Failure Modes according to EN 1542

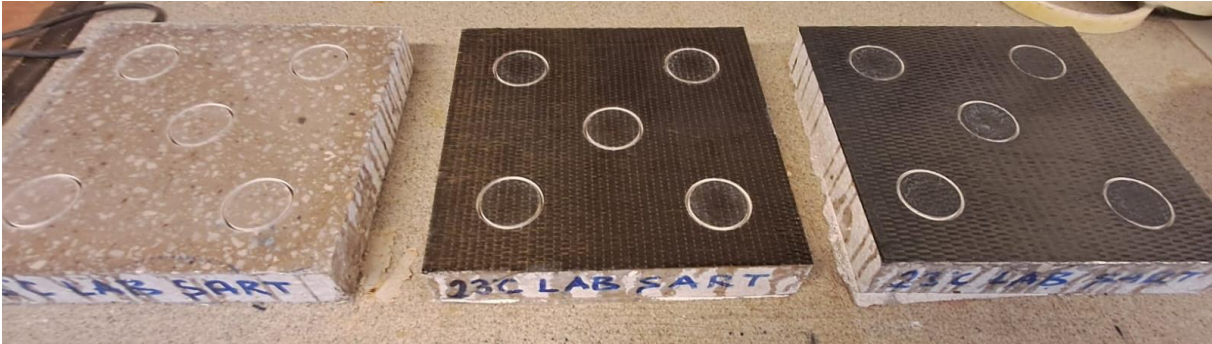
A	Cohesion failure in the concrete substrate
A/B	Adhesion failure between the substrate and the first layer (e.g. primer, bonding slurry or mortar)
B	Cohesion failure in the first layer
B/C	Adhesion failure between the first and second layer
C	Cohesion failure in the second layer
-/Y	Adhesion failure between the last layer and adhesive layer (e.g. C/Y in a two-layer repair system)
Y	Cohesion failure in the adhesive layer
Y/Z	Adhesion failure between the adhesive layer and the dolly (which is Z)

If there is a combination of given failure modes, a visual inspection for the percentage of each type of failure must be conducted, for example;  
A : A/B : B = % 40 : % 10 : % 50

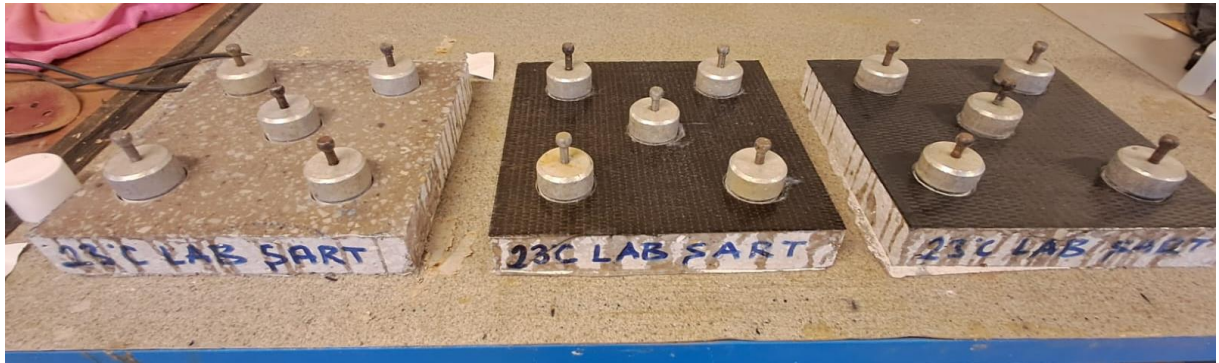


**Figure 4.** Failure Modes according to ASTM D 7522

For both standards, although the figures and names differ, three failure modes are commonly described: adhesive, cohesive, and substrate modes. Adhesive failure is undesirable, whereas cohesive and substrate failure modes are desirable as a result of the conducted tests. The drill holes and bonded dollies used for pull-off testing are shown in Figure 5-6.



**Figure 5.** Sample Drilled



**Figure 6.** Orientation of Dollies on Pull-off Test Sample

### 2.3. Testing Procedure and Conditioning

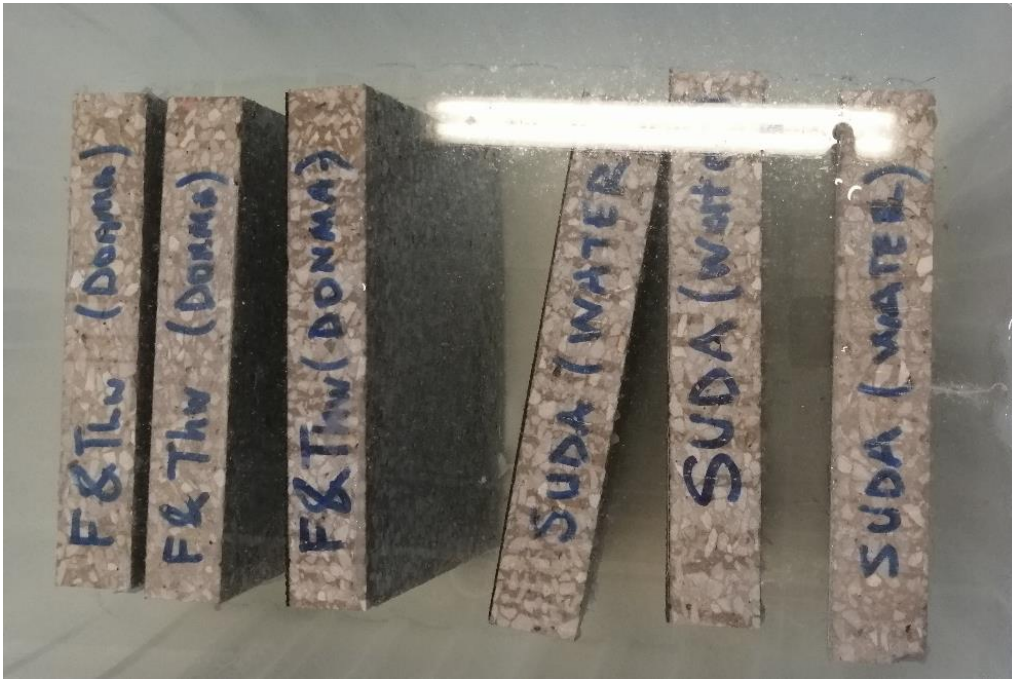
Tests were conducted according to EN 1542 and for the tests conducted in this research the preload value is taken as 3,0 N and the test speed was 0,05 N/mm<sup>2</sup>s using ZWICK Z100 model universal tensile and compression testing machine.

In addition to conditioning the prepared samples under normal laboratory conditions, the methods used for tile adhesives in the EN 12004-2 (2017) standard for water immersion (Figure 7) and freeze-thaw cycling (Figure 8) were considered. It is assumed that the exposure conditions of the ceramics coated on reinforced concrete are the same as those of the FRP fabrics under the environmental conditions specified in the standard. Test samples were exposed to 25 freeze–thaw cycles, as declared in the standard.

For each freeze–thaw cycle, the following steps were followed and repeated 25 times (EN 12004-2, 2017):

- 1) remove the test units from the water and place in a cold chamber to achieve a steady cabinet temperature of  $(-15 \pm 3) ^\circ\text{C}$  within  $2 \text{ h} \pm 20 \text{ min}$ ;
- 2) maintain the test units at  $(-15 \pm 3) ^\circ\text{C}$  for  $2 \text{ h} \pm 20 \text{ min}$ ;
- 3) immerse the test units in water at  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$  and raise the temperature to  $(15 \pm 3) ^\circ\text{C}$ ;
- 4) maintain the test units at  $(15 \pm 3) ^\circ\text{C}$  for a minimum 2 h before commencing the next freeze–thaw cycle.





**Figure 7.** Water Immersion of Test Samples



**Figure 8.** Test Samples placed in Freeze-Thaw Cycle Testing Machine

The table specifying the test plans for various temperature levels, and the corresponding numbers of test samples are presented in Table 6.

**Table 6.** Test Sample Plan for each Temperature

FRP Type	CFRP	BFRP	GFRP	Epoxy Resin
Lab. Conditions (23°C)	√	√	√	√
Water Immersion	√	√	√	-
Freeze - Thaw Cycling	√	√	√	-
# of Concrete Slabs	3	3	3	1
Total # of Concrete Slabs	10			

### 3. Results and Discussion

The average pull-off test results are presented in Tables 7 and Table 10–11. As shown in the figures, the failure modes were the same for all tests and were called cohesive failures from the substrate (Figure 9-10). The failure mode was denoted as “A” according to EN 1542 and as “G” according to ASTM D 7522.

**Table 7.** Pull-off Strength of Epoxy resin

Test Sample No	Value (N/mm <sup>2</sup> )
No:1	3.333
No:2	3.616
No:3	4.125
No:4	3.820
No:5	4.932
Average	<b>3.97</b>

**Table 8.** Water Absorption amount for Freeze and Thaw Testing Samples (21 days)

FRP Type	Unit	Initial Weight	Final Weight	Value
CFRP	kg	11.05	11.17	0.12
BFRP	kg	10.98	11.10	0.12
GFRP	kg	10.85	10.95	0.10

**Table 9.** Water Absorption amount for Water Immersion Testing Samples (21 days)

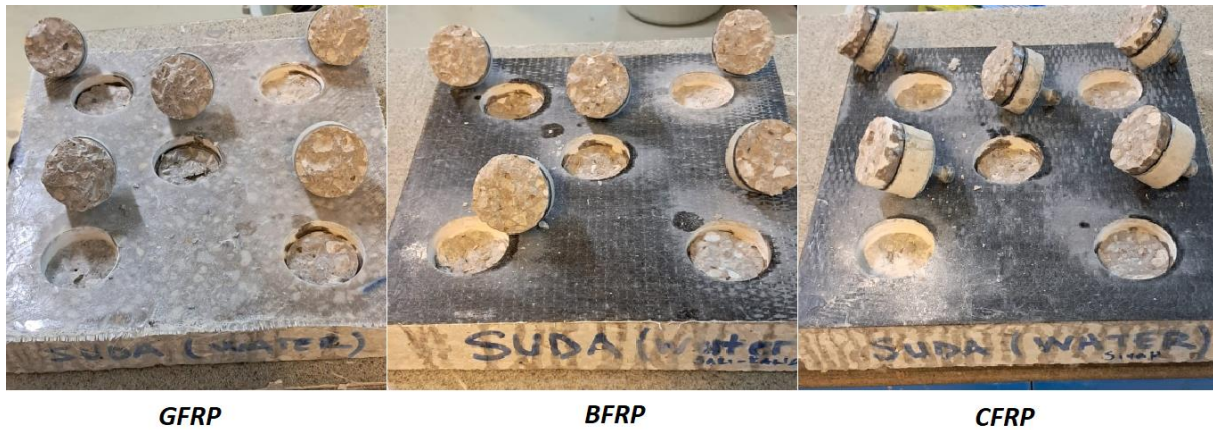
FRP Type	Unit	Initial Weight	Final Weight	Value
CFRP	kg	11.07	11.15	0.08
BFRP	kg	10.90	11.00	0.10
GFRP	kg	10.80	10.90	0.10

The water absorption amounts for both the water immersion and freeze-thaw cycle test samples were approximately the same at approximately 0,10 kg per concrete slab (Table 8-9). In other words, the effect of water absorption on pull-off test results can be neglected.

**Table 10.** Pull-off Strength of Water Immersion Concrete Slabs

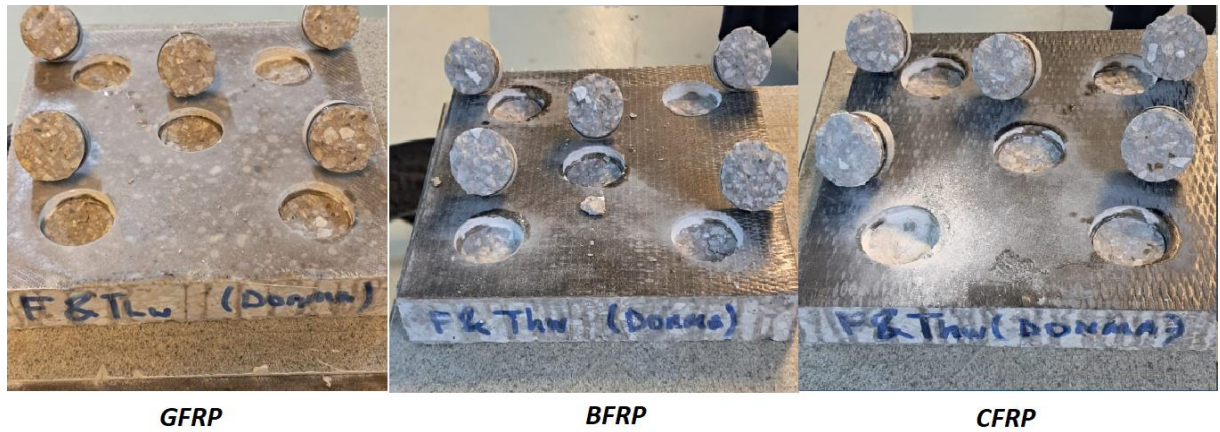
Test Sample No	GFRP (N/mm <sup>2</sup> )	BFRP (N/mm <sup>2</sup> )	CFRP (N/mm <sup>2</sup> )
No:1	3.196	3.303	3.685
No:2	3.517	3.639	3.385
No:3	4.043	4.134	<b>5.125*</b>
No:4	3.165	4.029	3.988
No:5	3.544	3.272	3.056
Average	<b>3.49</b>	<b>3.97</b>	<b>3.53</b>

\* These values were omitted because they were more than %25 above or below average. The new average value was calculated, and is presented in table.

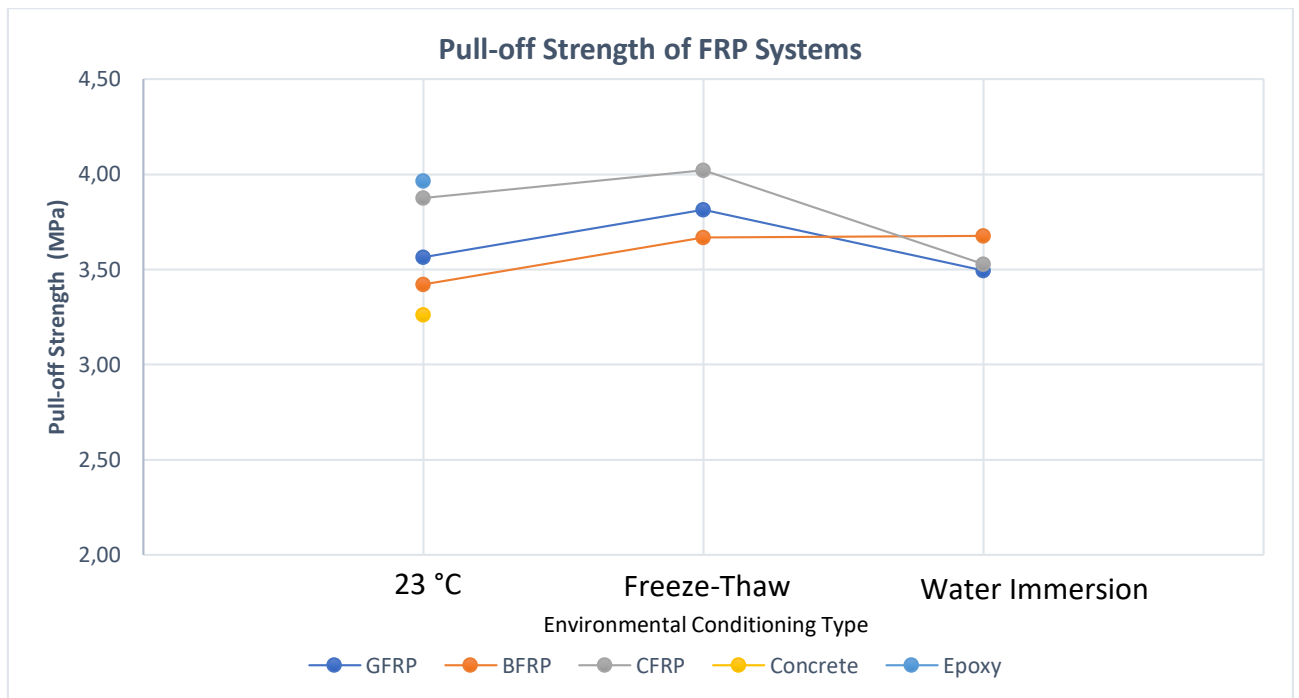
**Figure 9.** Pull-off Failure Pattern for Water Immersion**Table 11.** Pull-off Strength of Freeze-Thaw Concrete Slabs

Test Sample No	GFRP (N/mm <sup>2</sup> )	BFRP (N/mm <sup>2</sup> )	CFRP (N/mm <sup>2</sup> )
No:1	4.086	3.442	3.990
No:2	3.729	3.580	4.178
No:3	4.261	4.418	4.254
No:4	3.390	3.437	3.605
No:5	3.599	3.465	4.080
Average	<b>3.81</b>	<b>3.67</b>	<b>4.02</b>





**Figure 10.** Pull-off Failure Pattern for Freeze-Thaw Cycle



**Figure 11.** Pull-off Strength for Each Environmental Conditioning Type

As seen on the Figure 11,

- The water immersion pull-off test results were lower than the freeze–thaw cycle test results. With respect to the literary analysis, it is not possible to make a direct comparison between the two test results.
- All the initial, water immersion, and freeze-thaw cycle pull-off test results for all FRP types lie between the pull-off test results of epoxy (without FRP) and the concrete slab itself. Essentially, the effect of environmental conditioning on the degradation of pull-off test outcomes was negligible.
- All FRP types showed an increase in the pull-off test results after 25 freeze-thaw cycles when compared to the initial pull-off test results. This increase was approximately 7%, 7,3%, and 3,75% for GFRP, BFRP, and CFRP, respectively. The curing process of the adhesive under

standard laboratory conditions followed by exposure to low temperatures may potentially enhance its bonding capability by further hardening the adhesive.

- Only BFRP exhibited an increase in the average pull-off strength for both freeze-thaw cycles and water immersion. This result might be due to the mechanical properties of BFRP (stiffer and harder to bend) when compared to GFRP and CFRP. The inherent flexibility of BFRP, owing to its lower modulus of elasticity, might allow it to better accommodate the expansion and contraction of concrete during freeze-thaw cycles without cracking or debonding.
- Water immersion for 21 d had an adverse effect on the CFRP and GFRP. The decrease was approximately 9% for CFRP and 2% for GFRP compared to the initial pull-off test results. The Differential expansion due to water absorption may be the reason for this difference in the results. Both CFRP and GFRP might absorb more moisture than BFRP, leading to swelling and the creation of internal stresses that weaken the bond between the composite and concrete. Additionally, swelling of the matrix owing to water absorption can induce microcracks or delamination at the fiber-matrix interface, reducing the pull-off strength.

In contrast to the results obtained in this study, Yun and Wu (2010) reported a decrease in bond strength, stiffness, and interfacial fracture energy, as well as an increase in cracking and effective bond length with more freeze-thaw cycles. The main difference between this research was the test method and the number of test cycles, as well as the testing type (shear pull-off). Bisby and Green (2002), however, indicated little to no damage from freeze-thaw cycling on the FRP-concrete bond, similar to the results of this study. Similarly, Green et al. (2006) suggested that the bond between carbon FRP strips and concrete was not significantly damaged by up to 300 freeze-thaw cycles. Interestingly, while some studies report a deterioration in bond strength due to freeze-thaw cycling (Yun and Wu, 2010), others show minimal impact (Bisby and Green, 2002; Green et al., 2006). In contrast to the results of this research, Benzarti et al. reported that the bonding strength of CFRP on concrete with a longer period of exposure to 95% RH at 40°C showed a 58% decrease in the pull-off test results (2011).

The reason for this general result is that some adhesives may perform better at lower temperatures than others do. For example, certain epoxy resins can exhibit increased stiffness and strength at lower temperatures, which may contribute to the higher pull-off results. Moodi et al. (2023) indicated that the presence of water, especially under water-filled conditions, deteriorates the bond characteristics of epoxy resins. However, this study also found that lower temperatures prolong the curing process, which could imply that bond strength development may be affected by the temperature during the curing phase. If the adhesive underwent a curing process under standard laboratory conditions and was then exposed to low temperatures, the transition might have further hardened the adhesive and enhanced its bonding capability. Both the FRP material and adhesive may become stiffer and stronger at lower temperatures. This increased stiffness can lead to a better load transfer and improved interfacial bond strength.

The results of the study conducted by Allen and Atadero (2012) on in situ pull-off strength testing of an arch bridge showed a significant variation, although the test method was similar to that employed in this

study. The reasons for this variation are not clear and may be attributed to various factors, such as the application quality, environmental conditions, and chosen bonding materials.

## **5. Conclusions**

The effects of water immersion and freeze-thaw cycling on the bond strength of fiber-reinforced polymer (FRP) composites are critical for assessing the durability of structures reinforced with these materials. Studies have shown varying effects on the FRP-concrete bond interface when subjected to these conditions. The primary reasons for these discrepancies in results are the differences in the sources of the standard methods employed, properties of the fabric or adhesive utilized in the experiments, and specifics of the environmental conditions (such as the number of cycles and temperature points) that were applied. Nevertheless, it is evident that a small number of freeze-thaw cycles, which correspond to approximately 50 years, do not significantly reduce the adhesion strength of FRP fabrics. This suggests that FRP fabrics remain effective in protecting structures against earthquakes for an extended period even when subjected to severe conditions. The following conclusions were drawn from the results of the pull-off tests of this study performed as a preliminary investigation:

1. 21 days of water immersion after seven days of FRP application to the concrete slab did not have an adverse effect on the reinforced concrete structures. Each test result was still higher than the required pull-off strength of 2.5 MPa.
2. Similar to the results of Green et al.'s study on the effect of low temperature, an increase in the compressive strength and freeze-thaw cycling affected the pull-off strength positively in this study.
3. Studies show that even with long-term exposure to extreme moisture or freeze-thaw cycling, the low performance cannot be directly attributed to epoxy resin, FRP sheets, concrete, or labor.

In addition to this study, it is recommended that further studies be conducted to evaluate the long-term performance of water immersion testing and more than 25 freeze-thaw cycles with thermocouples inside the concrete slab, between the FRP Sheet and concrete slab surface. In this way, it is also possible to evaluate the thermal gradient inside the concrete slabs so that we can have a better understanding of whether the FRP system behaves as a thermal shield for concrete.

## **Acknowledgements**

The author is sincerely grateful to the Turkish Standards Institution for allowing the use of the laboratory infrastructure and Eng. A. Fazıl KARA and Mr. Osman AYDOĞDU for their collaboration in conducting the laboratory tests at the Turkish Standards Institution (TSE).

## **Statement of Conflict of Interest**

The author declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests:

Metehan CALIS reports equipment, drugs, or supplies (only epoxy resins) was provided by DURATEK. If there are other authors, they declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### **Author's Contributions**

Metehan ÇALIŞ: Writing–Reviewing and Editing, Visualization, Conceptualization, Investigation, Data curation, and resources.

### **References**

- Allen DG., Rebecca AA. Evaluating the long-term durability of externally bonded FRP via field assessments. *Journal of Composites for Construction* 2012; 16(6): 737-746.
- ASTM D7522. Standard test method for pull-off strength for FRP laminate systems bonded to concrete or masonry substrates. ASTM International, 2021.
- Ayoub H., Sweis G., Abu-Khader W., Sweis R. A framework to evaluate sustainable construction principles in government building projects: the case of Jordan. *Engineering, Construction and Architectural Management* 2022; 30(9): 4080–4098.
- Benzarti K., Sylvain C., Marc Q., Céline M., Christophe A. Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays. *Construction and Building Materials* 2011; 25(2): 523–538.
- Bisby L., Green M. Resistance to freezing and thawing of fiber-reinforced polymer-concrete bond. *ACI Structural Journal* 2002; 99(2): 215-223.
- Dai JG., Hiroshi Y., Mitsuyasu I., Ema K. Experimental investigation of the influence of moisture on the bond behavior of FRP to concrete interfaces. *Journal of Composites for Construction* 2010; 14(6): 834-844.
- EN 1504-4. Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity- Part 4: Structural bonding, 2005.
- EN 1542. Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Test methods- Measurement of bond strength by pull-off, 1999.
- EN 1766. Products and systems for the protection and repair of concrete- Test methods- Reference concretes for testing, 2017.
- EN 12004-2. Adhesives for ceramic tiles- Part 2: Test methods, 2017.
- Green MF., Luke AB., Amir ZF., Venkatesh KRK. FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions. *Cement and Concrete Composites* 2006; 28(10): 928–937.
- Lai WL., Kou SC., Poon CS., Tsang WF., Lee KK. A durability study of externally bonded FRP-concrete beams via full-field infrared thermography (IRT) and quasi-static shear test. *Construction and Building Materials* 2013; 40: 481-491.

- Moodi F., Bagheri M., Dashti P., Ramezaniapour AA. Mechanical properties and durability of injected SCC panels by epoxy against freezing and thawing. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2023; 124: 103380.
- Tran DB., Nguyen VT., Tran VT., Pham XA. A General framework for sustainability assessment of buildings: A life-cycle thinking approach. *Sustainability* 2023; 15(14): 10770.
- Yaman Z., Öztürk İŞ., Emiroğlu M. Donma/çözülme ve sıcaklığın BFRP kompozitlerle güçlendirilmiş betonların davranışlarına etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2022; 5(2): 551-569.
- Yun Y., Wu YF. Durability of CFRP–concrete joints under freeze–thaw cycling. *Cold Regions Science and Technology* 2010; 65(3): 401-412.
- Zheng XH., Huang PY., Guo XY., Huang JL. Experimental study on bond behavior of FRP-concrete interface in hygrothermal environment. *International Journal of Polymer Science* 2016; 2016(5): 1–12.

## Aslantaş Barajı Göl Alanının Mevsimsel Değişiminin Google Earth Engine ve Uzaktan Algılama Teknikleri ile Belirlenmesi

Kamil KARATAŞ<sup>1\*</sup>, Celal BIÇAKCI<sup>2</sup>, Selim Serhan YILDIZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray

<sup>2</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 80000, Osmaniye

<sup>3</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 80000, Osmaniye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5174-7153>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-4743-2391>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0001-6221-7035>

\*Sorumlu yazar: kkaratas42@gmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 14.02.2024

Kabul tarihi: 26.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Google Earth Engine

Uzaktan algılama

Değişim analizi

NDWI

Aslantaş Barajı

### ÖZ

Yaşamın devamlılığı için en önemli unsurlardan biri sudur. Artan nüfusa rağmen yeryüzündeki su kaynaklarının sabit kalması suya olan ihtiyacı her geçen gün arttırmaktadır. Türkiye'deki su kaynaklarının sürdürülebilirliği için etkin bir su yönetimi büyük önem arz etmektedir. Su kaynaklarında ve rezervlerinde zaman içinde meydana gelen değişikliklerin incelenmesi su yönetimine büyük katkı sağlamaktadır. Sulak alanların dinamiklerinin haritalanması ve analizi için Uzaktan Algılama (UA) teknikleri ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) hızlı ve etkili yöntemlerdir. Baraj gölü alanının zamansal değişiminin belirlenmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, çevre koruması, baraj faaliyetlerinin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahip olduğundan bu çalışmada; Osmaniye ili sınırları içerisinde bulunan Aslantaş Baraj Gölünün 2019, 2020, 2021, 2022 ve 2023 yıllarına ait mevsimsel alan değişimi belirlenmiştir. Çalışmada her bir yıl için Şubat, Mayıs, Ağustos ve Kasım aylarına ait Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Baraj gölüne ait su yüzeyi alanlarının belirlenmesinde literatürde de sıklıkla kullanılan ve başarılı sonuçlar elde edilen, normalleştirilmiş su fark indeksi (NDWI) kullanılmıştır. Uydu görüntülerine NDWI uygulaması Google Earth Engine (GEE) platformunda gerçekleştirilmiştir. NDWI sonuçları CBS ortamına aktarılarak su yüzey alanları belirlenmiş ve baraj gölü alanının yıl içindeki mevsimsel değişimi analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulgulara göre; en büyük alansal azalışın 2021 yılının ilkbahar-yaz mevsimleri arasında 12,27 km<sup>2</sup> olarak gerçekleşmiş olduğu, en büyük artışın ise 2020 yılının sonbahar-kış mevsimleri arasında 8,95 km<sup>2</sup> olduğu belirlenmiştir. Ayrıca baraj gölü su alanında İlkbahar-Yaz ve Yaz –Sonbahar mevsimleri arasında azalış; Sonbahar – Kış ve Kış- İlkbahar mevsimleri arasında artış olduğu belirlenmiştir. Su yüzeyi alanındaki artış ve azalışların yoğun olarak baraj gölünün kuzeyinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## Determination of Seasonal Change of Aslantaş Dam Lake Area Using Google Earth Engine and Remote Sensing Techniques

### Research Article

#### Article History:

Received: 14.02.2024

Accepted: 26.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

### ABSTRACT

One of the most important elements for the continuity of life is water. Despite the increasing population, water necessity increases day by day as the water resources on earth remain constant. Effective water management is of great importance for the sustainability of water resources in Türkiye. Examining the changes that occur in water resources and reserves over time makes a great

contribution to water management. Remote Sensing (RS) techniques and Geographic Information Systems (GIS) are fast and effective methods for mapping and analyzing the dynamics of wetlands. Since determining the temporal change of the dam lake area is of critical importance for the sustainable management of water resources, environmental protection and sustainability of dam activities, in this study; the seasonal area change of Aslantaş Dam Lake, located within the borders of Osmaniye province, for the years 2019, 2020, 2021, 2022 and 2023 was determined. In the study, Sentinel-2 satellite images for February, May, August and November for each year were used. Normalized water difference index (NDWI), which is frequently used in the literature and has achieved successful results, was used to determine the water surface areas of the dam lake. NDWI application to satellite images was carried out on the Google Earth Engine (GEE) platform. NDWI results were transferred to GIS, water surface areas were determined and seasonal changes in the reservoir area throughout the year were analyzed. According to the result of the analysis; the largest area decrease 12.27 km<sup>2</sup> between the spring and summer seasons of 2021, and the largest increase was 8.95 km<sup>2</sup> between the autumn and winter seasons of 2020. In addition, there is a decrease in the water area of the dam lake between the Spring-Summer and Summer-Autumn seasons; It was determined that there was an increase between the Autumn-Winter and Winter-Spring seasons. It has been concluded that the increases and decreases in the water surface area are mostly in the north of the dam lake.

---

**To Cite:** Karataş K., Bıçakçı C., Yıldız SS. Aslantaş Barajı Göl Alanının Mevsimsel Değişiminin Google Earth Engine ve Uzaktan Algılama Teknikleri İle Belirlenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 100-115.

## 1. Giriş

Toplumsal ve ekolojik aktivitelerin ayrılmaz bir parçası olan su, yaşamın kaynağıdır (Kaya ve Kaplan, 2021). Enerji üretimi, milli güvenlik, ekolojik aktiviteler, ekonomik gelişim ve insanlar tarafından çeşitli amaçlara yönelik olarak kullanılması vb. birçok alanda suya ihtiyaç duyulmaktadır (Aksungur ve Firidin, 2008). Suyun kaynağını yıl içerisindeki yağış miktarına bağlı olarak havzalarda biriken sular oluşturur (Mugabe ve ark., 2003). Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre Türkiye’de 1991-2020 yılları arasında yıllık ortalama alansal yağış miktarı 573,4 mm olmasına rağmen 2022 yılında azalarak alansal yağışı 503,8 mm olarak gerçekleşmiştir. Yağışlarda, 2021 yılı yağışlarına göre %4 azalma meydana gelmiştir (MGM, 2023). Türkiye yarı kurak iklime sahip olmasından kaynaklı yıl içerisinde yağışlar belirli mevsimlerde gerçekleşmektedir. Düzensiz yağış rejimi bulunan ve son yıllarda kuraklığın etkin olduğu Türkiye’de hızla artan içme ve kullanma suyu gereksinimine karşılık küresel ısınma ve iklim değişikliğiyle birlikte su kaynaklarının hızla azalması sürdürülebilir su kaynaklarının yönetiminin gerekliliğinin önemini ortaya koymaktadır (Çağlayan ve ark., 2020; Kaplan ve ark., 2020). Ülkemizde, az ve sınırlı su kaynaklarının sadece verimli bir şekilde değerlendirilmesi değil aynı zamanda suyun kontrol altında tutularak yönetilmesi de büyük bir önem arz etmektedir (Özmen, 2015). Su ve su kaynaklarını en uygun şekilde kullanmak ve yararlanmak, sel ve taşkın gibi sudan kaynaklı zararlardan korunmak için uygun bir su yönetim politikası oluşturulmalıdır. Oluşturulan politikaya göre bir planlama yapılması ve bu planlamaların uygulamaya geçmesi gerekmektedir (Selek ve Arslan, 2019).

Günümüzde önemli su kaynaklarından olan sulak alanların planlanması, yönetilmesi ve korunmasında haritalama çalışmaları önemli bir rol oynamaktadır (Ashok ve ark., 2021). Uzay teknolojisinin

gelişmesiyle, su kaynaklarının araştırılması, çevresel izleme, bölgesel analiz vb. birçok alanda Uzaktan Algılama (UA) teknolojisi gelişmiş yöntemler sunmaktadır (Pekel ve ark., 2016; Shiklomanov ve ark., 2019). UA teknolojileri kullanılarak su alanlarının ve kıyı çizgilerinin değişimlerinin belirlenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır (Çiçekli ve Özkan, 2016; Gülci ve ark., 2019; Ashok ve ark., 2021; Kaya ve Kaplan, 2021; Jumaah ve ark., 2022; Roca ve ark., 2022). Çiçekli ve Özkan (2016), Landsat-8 uydu görüntüleri ile 2015 yılının her ayına yönelik Adana Seyhan Baraj Gölü'nün alanını kontrollü sınıflandırma ile belirlemiştir. 2015 yılının her ayına ilişkin baraj gölü alanı karşılaştırılarak Seyhan Baraj Gölü'nün kıyı değişimini elde etmiştir. Gülci ve ark. (2019), Aslantaş Baraj Gölü su yüzeyi ve çevresinde 1989-2017 yılları arasında meydana gelen zamansal değişimi Landsat uydu görüntüleri kullanarak modifiye edilmiş normalize fark su indeksi (MNDWI) ve normalleştirilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI) ile belirlemiştir. Ashok ve ark. (2021), Google Earth Engine (GEE) platformunu kullanarak Hindistan'ın Himaçal Pradeş eyaletinde yer alan Renuka sulak alanın 2013 – 2019 yılları arasındaki değişimini Landsat-7 ve 8 görüntüleri kullanarak NDVI ve NDWI ile hesaplamıştır. Kaya ve Kaplan (2021), Burdur Gölü'nün 2009-2019 yılları arasındaki alansal değişimini UA teknikleri kullanılarak incelemiştir. Sentinel-2, Landsat-8 ve Landsat-7 uydu görüntüleri ile NDWI kullanılarak sınıflandırma yapmıştır. Çalışma sonucunda sınıflama doğruluğunun en yüksek Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak elde edildiği belirlenmiştir. Jumaah ve ark. (2022), Irak'taki Al-Razzazah Gölü'nün 1989 - 2020 periyodunda kıyı şeridindeki ve yüzey suyu alanındaki değişiklikleri izlemek ve analiz etmek için UA teknikleri ve CBS kullanmıştır. Her yıl için bir adet olmak üzere toplamda altı adet Landsat görüntüsü temel alınarak değişiklikleri değerlendirmiş ve haritalamıştır. Yüzey suyu alanını sınıflandırmak ve çıkarmak için kontrollü ve kontrolsüz sınıflandırma yöntemlerini kullanmıştır. Roca ve ark. (2022), Sentinel-2 ve GEE kullanarak Guadiaro Halicindeki kum değişkenliğini izlemiştir. GEE platformunda Sentinel-2 uydu görüntüleri ve NDWI kullanılarak deniz-kara haritalarını oluşturmuştur. Peker ve ark. (2023), 1984-2023 yılları arasındaki Burdur Gölü yüzey alanındaki değişimi izlenmiştir. Çalışmalarında, Google Earth Engine platformunda bulutluluk oranı %5'ten az olan Landsat ve Sentinel-2 görüntüleri kullanılmıştır. Burdur Gölü'nde su kaplı alanın belirlemek için NDWI kullanılmıştır.

Literatürde su alanlarını belirlemek için birçok farklı spektral indeks kullanılmıştır (Feyisa ve ark., 2014; Fisher ve ark., 2016; Nguyen ve ark.,2019). Gerçekleştirilen çalışmaların birçoğunda su alanlarını belirlemek için NDWI kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Yang ve ark., 2017; Gülci ve ark., 2019; Ashok ve ark., 2021; Kaya ve Kaplan,2021). NDWI analizinde yakın kızılötesi (NIR) ve yeşil bantlar kullanılarak su yüzey alanları belirlenebilmektedir (Demiroğlu ve Ernst, 2022).

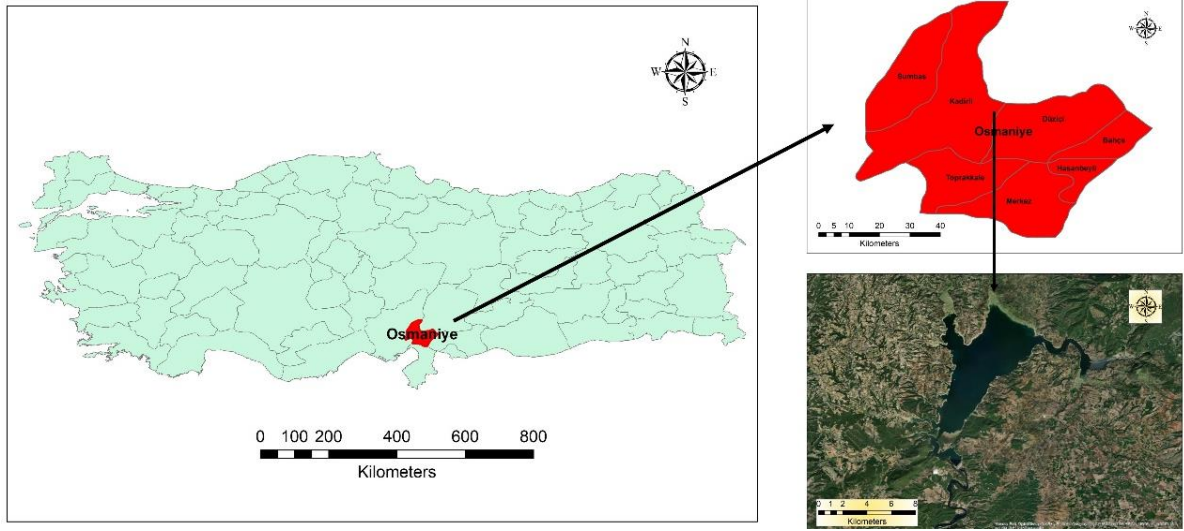
Bu çalışmada Aslantaş Baraj Gölünün 2019, 2020, 2021, 2022 ve 2023 yıllarına ait mevsimsel alan değişimi incelenmiştir. Aslantaş Barajı, enerji üretiminin yanında çok geniş alanda tarımsal arazilerin sulanması ve yerleşim birimlerine içme suyu sağlanması hizmeti vermektedir. Bu nedenle baraj gölünün zamansal değişiminin belirlenmesi baraj faaliyetlerinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda çalışmada GEE platformunda Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak



çalışma bölgesindeki su alanları NDWI ile belirlenmiştir. Bu işlemden sonra NDWI sonuçları CBS ortamına aktarılarak su yüzey alanları belirlenmiş ve baraj gölü alanının yıl içindeki mevsimsel değişimi tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular çalışma alanı için planlanacak olan su yönetimi çalışmalarına bir veri niteliği taşımaktadır.

## 2. Çalışma Alanı

Aslantaş Barajı ve Hidroelektrik Santrali, Ceyhan Nehri üzerinde, sulama, taşkın önleme ve elektrik enerjisi üretimine yönelik olarak Osmaniye ili sınırları içerisinde inşa edilmiştir. Ceyhan Havzasında olup Osmaniye il merkezine ve Kadiri ilçeye 30 km uzaklıkta bulunan Aslantaş Barajı ve Hidroelektrik Santralinin inşasına 1975 yılında başlanmış ve 1984 yılında yapımı tamamlanarak hizmete girmiştir (Ultra Enerji, 2024). Çalışmanın gerçekleştirildiği bölge, Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı

Baraj gövdesinin yüksekliği 95,00 m olup göl hacmi 1150,00 hm<sup>3</sup> ve normal su kotunda göl alanı 49,00 km<sup>2</sup>'dir (Şekil 2). Baraj, yaklaşık 149,89 ha büyüklüğünde çok geniş bir alana tarımsal sulama hizmeti vermekte, bununla birlikte 138 MW güç kapasitesindeki Aslantaş Barajı ve Hidroelektrik Enerji Santrali (HES) yılda 569 GWh elektrik enerjisi üretmektedir (Ultra Enerji, 2024).



Şekil 2. Aslantaş Barajı (Elektrik üretim A.Ş., 2024)

MGM'nin 1987-2022 yılları arası verilerine göre, çalışma alanının bulunduğu Osmaniye İlinin ortalama sıcaklığı 18,7 °C ve ortalama yağış miktarı ise 68,68 mm'dir (Meteoroloji genel müdürlüğü, 2024).

### 3. Materyal

GEE kullanıcılarına hazır kod kullanma ve kod yazma imkânı sunarak uydu görüntüleri üzerinde işlem yapabilen web tabanlı bir platformdur (Condeça ve ark., 2022; Yaman, 2023). Ayrıca GEE, coğrafi verilerin işlenebildiği, analizlerin çok kısa sürede gerçekleştirilebildiği bir platform olarak hızlı analiz olanağı sunmaktadır (Aghlmand ve ark., 2021). Bu platformda yapılan işlemler depolama ihtiyacı bulunmaksızın, hızlı ve ücretsizdir. GEE, özellikle ağaçlık, orman ve su alanlarının belirlenmesi ve arazi kullanımındaki değişikliklerin tespiti için kullanabilmektedir. Web tabanlı bir uygulama olan GEE, geçmiş 40 yıla dönük küresel ölçekli birçok veriyi sunmaktadır (Koskinen ve ark., 2019; Mirelva ve Nagasawa, 2019).

GEE, Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat 8 ve MODIS vb. birçok uyduya ilişkin verilere ulaşım imkânı sunmaktadır. Kullanıcıya hazır halde sunulan uydu verilerine yönelik herhangi bir ön işlem yapılmadan analizlerde kullanılabilir (Aghlmand ve ark., 2021). Bu çalışmada su alanlarının belirlenmesinde Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır.

Sentinel-2, bitki örtüsü, toprak ve su alanlarının gözlenmesini sağlayan ve Copernicus arazi gözlem çalışmalarını destekleyen çok spektrumlu bir uydudur (Aghlmand ve ark., 2021). Sentinel-2 uydusunun bant özelliklerine ilişkin teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir (Kaplan ve Avdan, 2017).

**Tablo 1.** Sentinel-2 uydusunun bant özellikleri (Kaplan ve Avdan, 2017)

<b>Sentinel-2 (Bant)</b>	<b>Merkezi dalga boyu (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Çözünürlük (m)</b>
Bant-1 Kıyı Aerosolü	0,433	60
Bant-2 Mavi	0,490	10
Bant-3 Yeşil	0,560	10
Bant-4 Kırmızı	0,665	10
Bant-5 Vejetasyon kırmızı kenar	0,705	20
Bant-6 Vejetasyon kırmızı kenar	0,740	20
Bant-7 Vejetasyon kırmızı kenar	0,783	20
Bant-8 NIR	0,842	10
Bant-8B Vejetasyon kırmızı kenar	0,865	20
Bant-9 Su buharı	0,945	60
Bant-10 SWIR - Cirrus	1,375	60
Bant-11 SWIR	1,610	20
Bant-12 SWIR	2,190	20

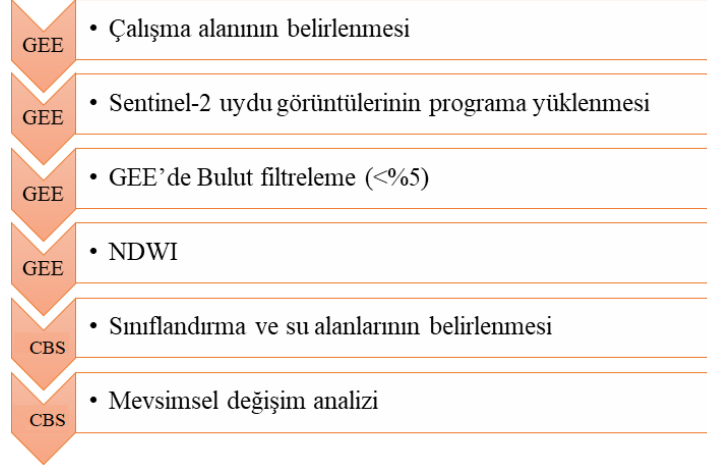
Aslantaş Baraj Gölü alanındaki mevsimsel değişimi belirlemek amacıyla ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış mevsimlerini temsil eden aylar literatürden belirlenmiştir (Sever, 2011). Mevsimsel değişiklikleri daha iyi tespit edebilmek için her mevsimin son ayına ait görüntüler çalışmada kullanılmıştır. 2019 yılı Mayıs ayına ait uydu görüntülerinde bulut oranının fazla olması nedeni ile Haziran ayına ait uydu görüntüleri, 2020 yılı Şubat ayına ait uydu görüntülerinde bulut oranının fazla olması nedeni ile Ocak ayına ait uydu görüntüleri kullanılmıştır. Belirlenen aylara ilişkin Sentinel-2 uydu görüntülerinde kullanılan bantlar ve çözünürlükleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kullanılan uydu görüntülerinin seçilmiş 2022 ayları ve bantları

<b>Mevsim</b>	<b>Yıl/Ay</b>	<b>Kullanılan bantlar</b>	<b>Çözünürlük (m)</b>
İlkbahar	2020-2021-2022-2023 Mayıs, 2019 Haziran	Bant-3 ve Bant-8	10
Yaz	2019-2020-2021-2022-2023 Ağustos	Bant-3 ve Bant-8	10
Sonbahar	2019-2020-2021-2022-2023 Kasım	Bant-3 ve Bant-8	10
Kış	2019-2021-2022-2023 Şubat, 2020 Ocak	Bant-3 ve Bant-8	10

#### 4. Metot

Aslantaş Barajı gölü su alanının mevsimsel değişiminin UA yöntemi ile belirlenmesi amacıyla mevsimleri temsil eden aylara ait Sentinel-2 uydu görüntülerine, Şekil 3'te gösterilen 6 temel adım uygulanmıştır.



**Şekil 3.** Yöntem akış şeması

Çalışmanın I. adımında GEE platformunda çalışma alanı belirlenmiş ve mevsimleri temsil eden aylara ait Sentinel-2 uydu görüntüleri yüklenmiştir. Kullanılan uydu görüntülerinde su alanlarının daha hassas ve doğru şekilde tespit edilebilmesi için bulutluluk oranı %5'den küçük olmasına dikkat edilmiştir. GEE platformunda veriler doğrudan kullanılabilirdiğinden Sentinel-2 verileri için radyometrik ve atmosferik düzeltmelere gereksinim duyulmamıştır.

GEE platformunda Sentinel-2 uydu görüntülerine NDWI analizi uygulamasına yönelik yeşil (Bant-3) ve NIR (Bant-8) bantları kullanılarak Eşitlik (1) uygulanmıştır. Her bir mevsimi temsil eden aylara ilişkin sonuç görüntüleri elde edilmiştir.

$$NDWI = \frac{Yeşil - NIR}{Yeşil + NIR} \quad (1)$$

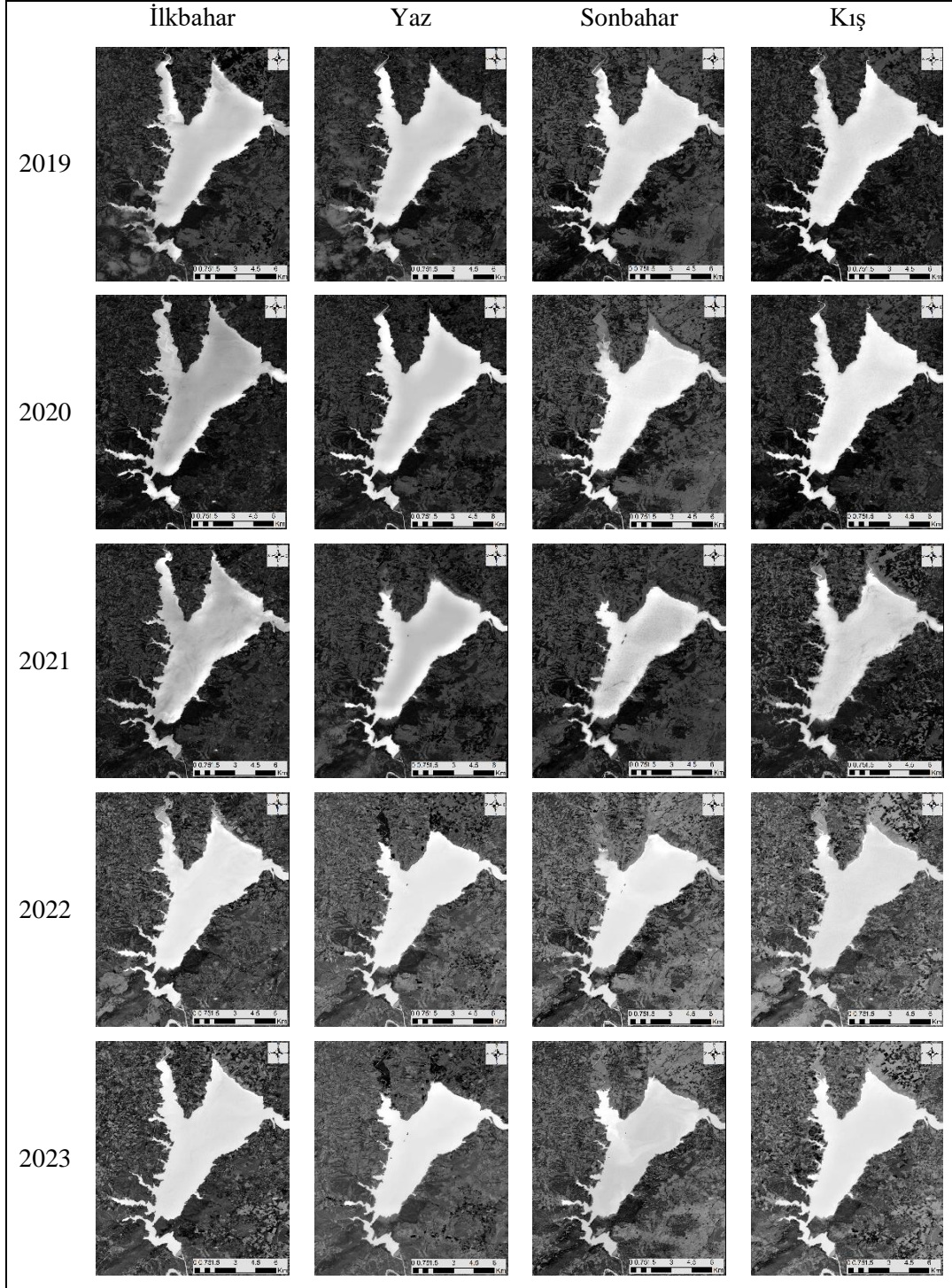
NDWI sonuçlarının elde edilmesinden sonra, her bir piksele ait NDWI değerleri kullanılarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirmek için NDWI sonuçları CBS ortamına aktarılmıştır. Baraj gölü alanının belirlenmesinde NDWI değerleri kullanılarak su ve diğer alanlar olmak üzere iki sınıf atanmış ve sınıflandırma yapılmıştır.

Mevsimsel değişim analizinin yapılmasında, mevsimleri temsil edecek şekilde seçilmiş aylara ilişkin sınıflandırılmış görüntüler kullanılarak baraj gölü alanına ait su sınırları belirlenmiş ve baraj gölü alanının yıl içindeki mevsimsel değişimi analiz edilmiştir.

## 5. Bulgular

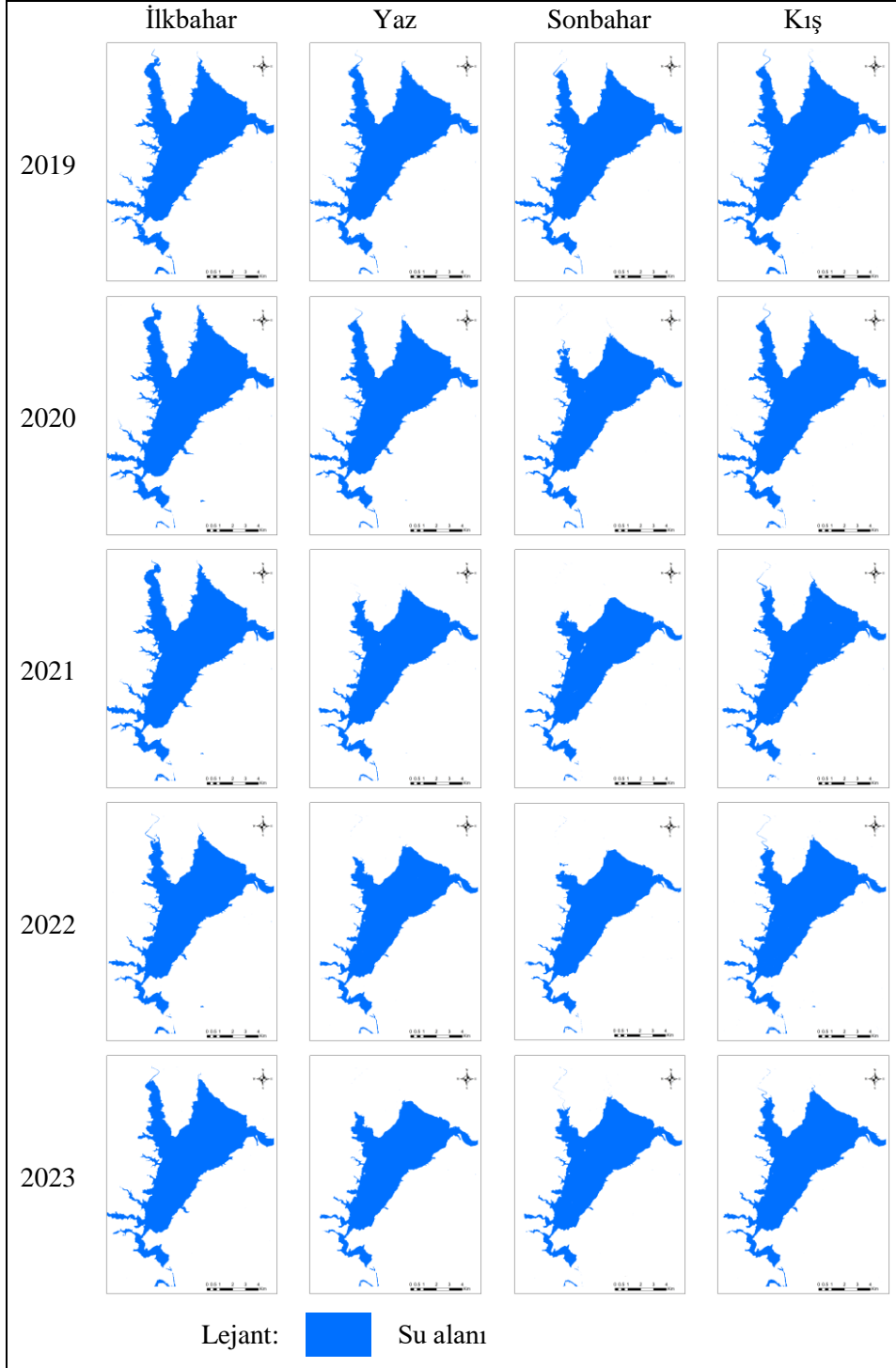
Çalışma alanının 2019,2020,2021,2022 ve 2023 yıllarının dört mevsimine ilişkin NDWI analizi gerçekleştirilerek su alanları belirlenmiştir (Şekil 4) . NDWI analizi sonucunda her bir piksel bir değer almıştır ve pozitif değerlere sahip pikseller su alanlarını göstermiştir. Şekil 4’de açık renkle gösterilen alanlar NDWI analizi sonucunda su alanları olarak bulunmuştur.





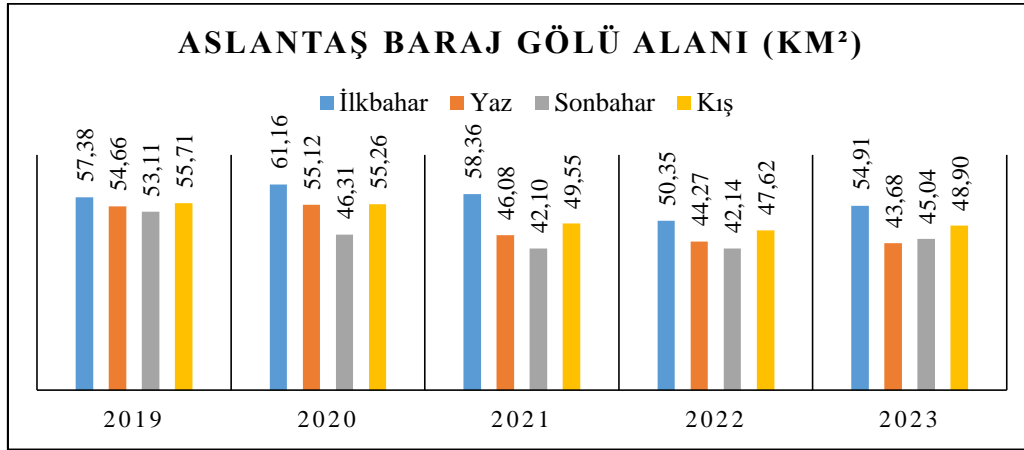
Şekil 4. Aslantaş Baraj Gölü NDWI analizi sonuçları

NDWI ile elde edilen sonuçlar, baraj gölü alanı belirlemek ve alansal miktarı hesaplamak için CBS ortamında su ve diğer alanlar olmak üzere iki sınıf olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 5). Sınıflandırma sonucunda baraj gölüne ilişkin su alanı ortaya çıkmıştır.



Şekil 5. Mevsimlere ilişkin Aslantaş Baraj Gölü alanı sınıflandırılmış haritalar

Sınıflandırılmış haritalardan elde edilen mevsimlere ilişkin su alan değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Aslantaş Baraj Gölünün yıllara ve mevsimlere ilişkin su alan değerleri

## 6. Sonuçlar

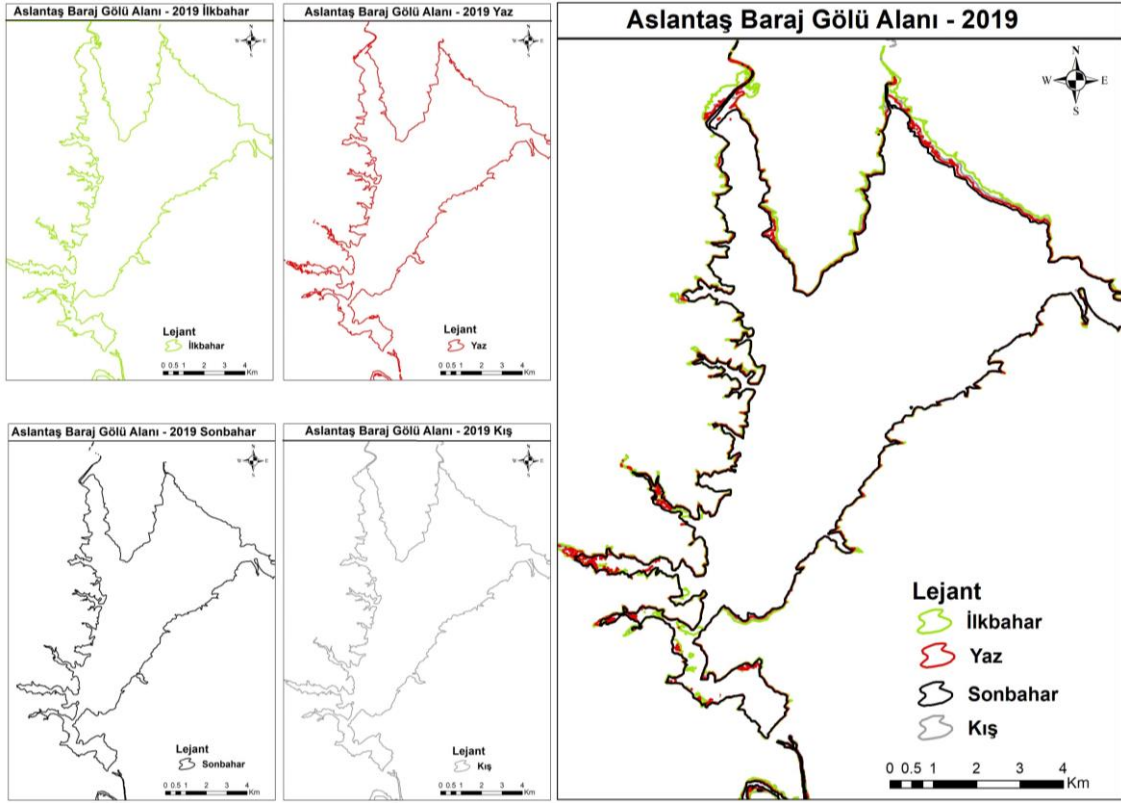
Aslantaş Baraj Gölü alanının 2019, 2020, 2021, 2022 ve 2023 yıllarına ait mevsimsel alan değişim analizinin yapılmasında, mevsimleri temsil edecek şekilde seçilmiş aylara ilişkin sınıflandırılmış görüntüler CBS kullanılarak su yüzey alanının km<sup>2</sup> biriminden değeri ve sınırları belirlenmiştir. CBS yardımıyla ilkbahar-yaz, yaz-sonbahar, sonbahar-kış ve kış-ilkbahar mevsimleri arasında baraj gölü su alanındaki değişimler analiz edilmiştir. Analiz sonucunda baraj gölü su yüzeyi alanında meydana gelen değişiklikler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Mevsimlere göre baraj gölü su yüzey alanı değişimi

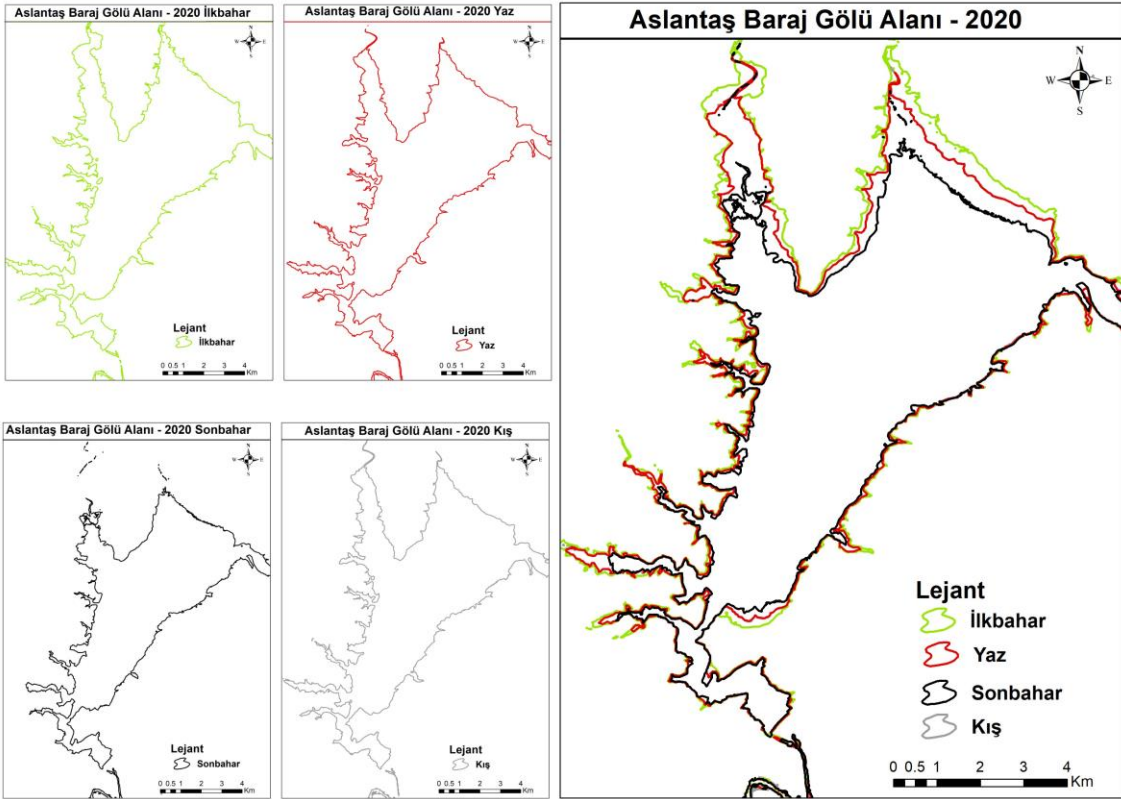
Yıl / Mevsim	Alan değişimi (km <sup>2</sup> )					Alan değişimi (%)				
	2019	2020	2021	2022	2023	2019	2020	2021	2022	2023
İlkbahar- Yaz	-2,71	-6,04	-12,27	-6,09	-11,23	-4,73	-9,88	-21,03	-12,09	-20,45
Yaz-Sonbahar	-1,55	-8,80	-3,98	-2,13	1,36	-2,84	-15,97	-8,64	-4,81	3,12
Sonbahar-Kış	2,60	8,95	7,45	5,49	3,86	4,89	19,33	17,69	13,02	8,58
Kış- İlkbahar	1,67	5,89	8,81	2,73	6,00	3,00	10,66	17,78	5,73	12,27

Son 5 yıl içerisinde baraj gölü su yüzey alanındaki değişimler incelendiğinde en büyük alansal azalışın 2021 yılının ilkbahar-yaz mevsimleri arasında 12,27 km<sup>2</sup> olarak gerçekleşmiş olduğu anlaşılmaktadır. En büyük artışın ise 2020 yılının sonbahar-kış mevsimleri arasında 8,95 km<sup>2</sup> olduğu belirlenmiştir. Ayrıca baraj gölü su yüzey alanında İlkbahar-Yaz ve Yaz-Sonbahar mevsimleri arasında azalışın, Sonbahar – Kış ve Kış- İlkbahar mevsimleri arasında artışın olduğu belirlenmiştir. Su yüzeyi alanındaki artış ve azalışların yoğun olarak baraj gölünün kuzeyinde olduğu görülmektedir. Baraj gölünün son beş

yıla ilişkin mevsimsel su yüzeyi sınırları ve değişimleri Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.

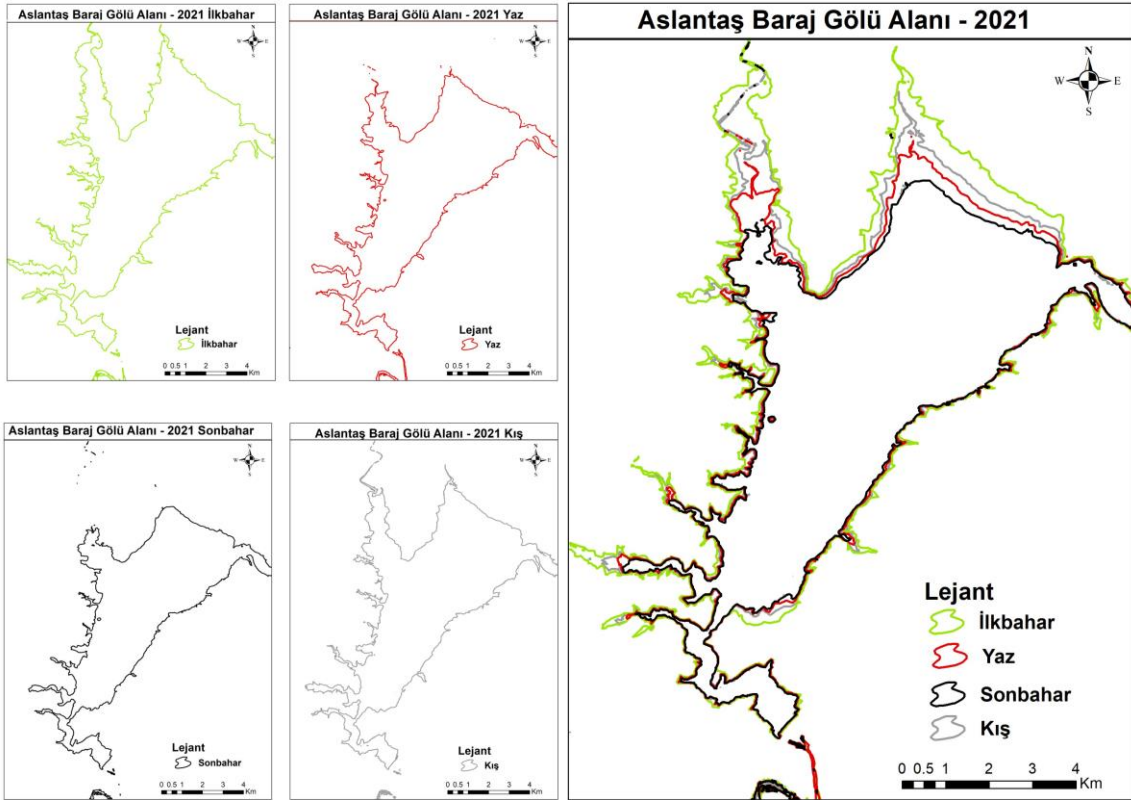


Şekil 7. Aslantaş Baraj Gölü 2019 yılı mevsimsel su yüzeyi sınırları ve değişimleri

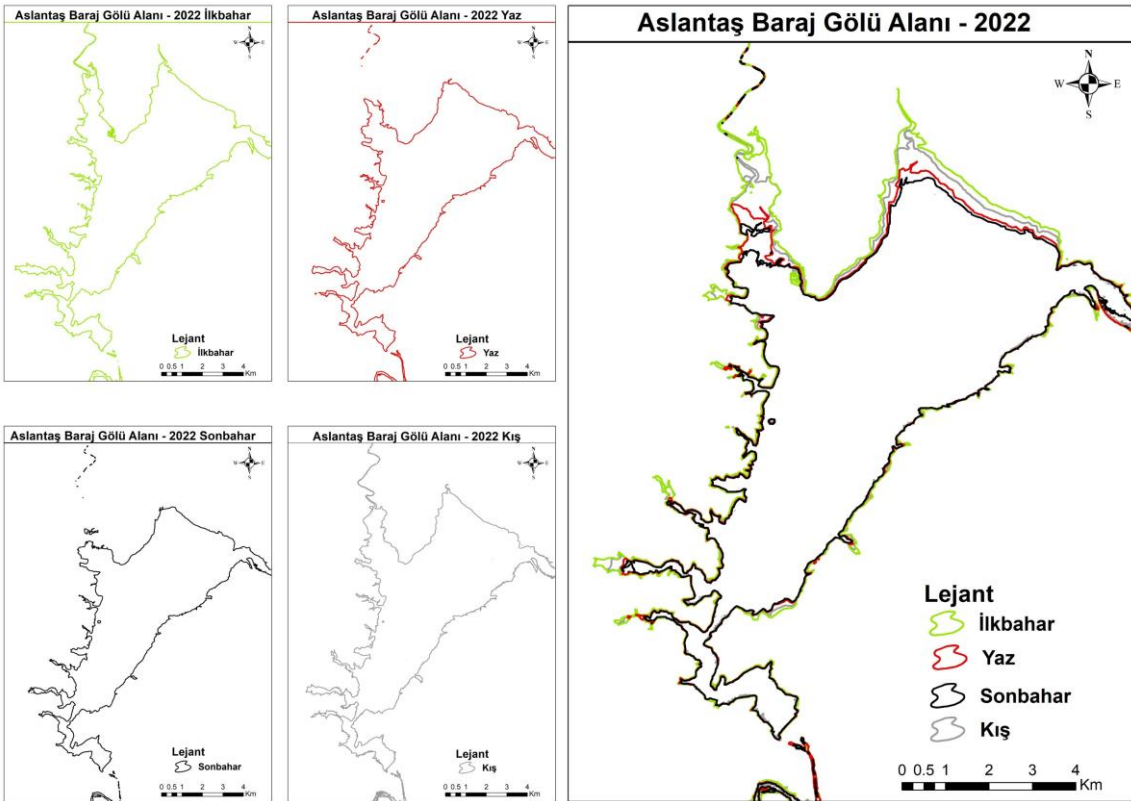


Şekil 8. Aslantaş Baraj Gölü 2020 yılı mevsimsel su yüzeyi sınırları ve değişimleri

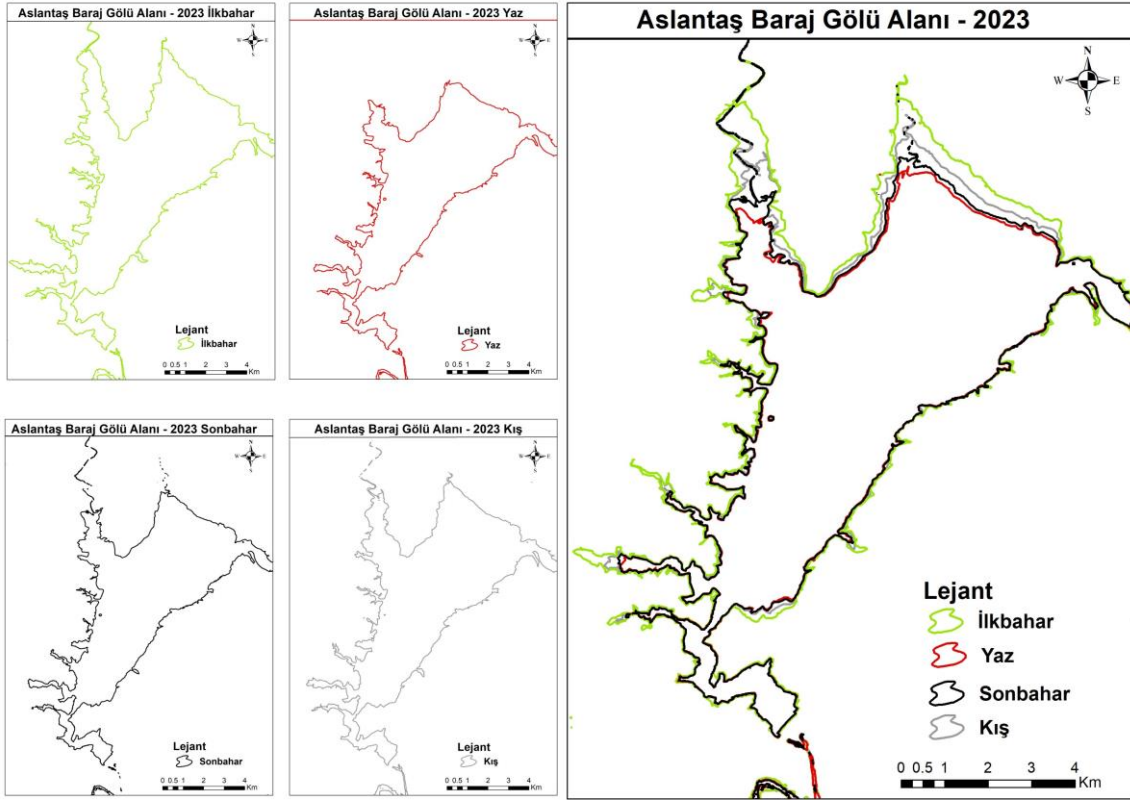




Şekil 9. Aslantaş Baraj Gölü 2021 yılı mevsimsel su yüzeyi sınırları ve değişimleri



Şekil 10. Aslantaş Baraj Gölü 2022 yılı mevsimsel su yüzeyi sınırları ve değişimleri



**Şekil 11.** Aslantaş Baraj Gölü 2023 yılı mevsimsel su yüzeyi sınırları ve değişimleri

Aslantaş Barajı'nın normal su kotunda göl alanı 49,00 km<sup>2</sup> olup, kış mevsiminde 48,68 km<sup>2</sup> su yüzey alanı ile normal su kotuna göre en yakın yüzey alanına ulaşmaktadır.

Aslantaş Barajı'nın bulunduğu Osmaniye ilinin sahip olduğu tipik Akdeniz iklim özelliklerinden kaynaklı olarak ilkbahar ve özellikle yaz aylarında sıcaklıklar yüksek olup yaz mevsimi kurak geçmektedir. Bu durum, özellikle yaz mevsiminin sıcak ve kurak olmasının yanında artan şekilde tarımsal sulama ve içme suyu vb. faaliyetlerde kullanılmasından dolayı ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimleri arasında baraj gölü su yüzey alanının azalmasına yol açmıştır. Bölgede sonbahar ve kış aylarında sıcaklığın düşük olması, yağışın fazla olması ve tarımsal sulama faaliyetlerinin daha az olmasından dolayı baraj gölü su yüzey alanı sonbahar, kış ve ilkbahar mevsimleri arasında artış gerçekleşmiştir.

UA uygulamaları, klasik yöntemlere göre daha hızlı ve ekonomiktir. Çok büyük alanlara ait konumsal verilerin arazide klasik yöntemlerle elde edilmesi zorlu arazi koşullarında uzun zaman alan ve ekonomik olmayan bir süreçtir. Bu nedenle büyük alanların zaman içinde meydana gelen konumsal değişikliklerini tespit etmek için uydu görüntülerinin ve uzaktan algılama yöntemlerinin kullanılması bir çok konumsal veriye hem hızlı hemde ekonomik ulaşmayı sağlamaktadır.

UA yöntemlerinin geliştirilmesiyle birlikte yeni bir platform olan GEE ile verilere ve sonuçlara hızlı bir şekilde ulaşmayı sağlamaktadır. GEE platformunun, uydu görüntülerine ön işlem, düzeltme yapmadan görüntüler üzerinde doğrudan işlem yapma olanağı sağlamasıyla ve verileri depolama ihtiyacı gerekmeden işlemlere devam edilebilmesi, GEE platformunu diğer uzaktan algılama programlarından

üstün kılmaktadır. GEE ve CBS yazılımları kullanılarak su kaynaklarının daha etkin yönetimi mümkün olmaktadır.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağladıklarını beyan eder.

### **Kaynakça**

- Aghlmand M., Kalkan K., Onur Mİ., Öztürk G., Ulutak E. Google Earth Engine ile arazi kullanımı haritalarının üretimi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 10(1): 38-47.
- Aiswarya J., Kamala J., Vaithyanathan D. Analysis of surface water extraction and change detection over Barur Lake. Indian Journal of Pure and Applied Physics 2021; 59: 239-243.
- Aksungur N., Firidin Ş. Su kaynaklarının kullanımı ve sürdürülebilirlik. Aquaculture Studies 2008; 2008(2): 9-11.
- Ashok A., Rani HP., Jayakumar KV. Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery. Remote Sensing Applications: Society and Environment 2021; 23, 100547.
- Condeça J., Nascimento J., Barreiras N. Monitoring the storage volume of water reservoirs using Google Earth Engine. Water Resources Research 2022; 58(3): e2021WR030026.
- Çağlayan EB., Erel F., Samur EB., Deniz M., Mobariz MA., Kaplan G. Uzaktan algılama teknikler ile Akşehir Gölü'ndeki alansal değişiminin izlenmesi. Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi 2020; 2(2): 70-76.
- Çiçekli SY., Özkan C. Landsat 8'in Adana Seyhan baraj gölü kıyı çizgisinin aylık değişiminin belirlenmesinde kullanılması. Uzaktan Algılama - CBS Sempozyumu, 5-7 Ekim 2016, sayfa no: 1078-1082, Adana.
- Demiroğlu İ., Ernst F. Uzaktan algılama teknikleri kullanılarak Zerne Barajı'nın alansal, hacimsel ve kıyı değişimlerinin zamana bağlı analizi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi 2022; 7(1): 15-26.
- Elektrik üretim A.Ş. [www.euas.gov.tr/santraller/aslantas-hes](http://www.euas.gov.tr/santraller/aslantas-hes) (Erişim tarihi: 12.01.2024)
- Feyisa GL., Meilby H., Fensholt R., Proud, SR. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote sensing of environment 2014; 140: 23-35.
- Fisher A., Flood N., Danaher T. Comparing landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. Remote Sensing of Environment 2016; 175: 167-182.

- Gülci S., Gülci N., Yüksel K. Aslantaş Baraj Gölü ve çevresinin su yüzey alanı ve arazi örtüsü değişiminin Landsat uydu görüntüleri kullanılarak izlenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology* 2019; 9(1): 100-110.
- Jumaah HJ., Ameen MH., Mohamed GH., Ajaj QM. Monitoring and evaluation Al-Razzaza lake changes in Iraq using GIS and remote sensing technology. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 2022; 25(1): 313-321.
- Kaplan G., Avdan U. Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing* 2017; 50(1): 137-143.
- Kaplan G., Avdan ZY., Avdan U., Jovanovska T. Uzaktan algılama verileri ile uluslararası suların izlenmesi. *Dirençlik Dergisi* 2020; 4(1): 77-88.
- Kaya ÖA., Kaplan G. Uzaktan algılama yöntemleri ile Burdur Gölü'ndeki alansal değişiminin belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi* 2021; 7(1): 1-12.
- Koskinen J., Leinonen U., Vollrath A., Ortmann A., Lindquist E., d'Annunzio R., Pekkarinen A., Käyhkö N. Participatory mapping of forest plantations with Open Foris and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2019; 148: 63-74.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. 2022 yılı yağış değerlendirmesi. Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2023, Ankara.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. [www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=OSMANIYE](http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=OSMANIYE) (Erişim tarihi: 15.01.2023)
- Mirelva PR., Nagasawa R. Application of sentinel-1 data for classifying croplands using Google Earth engine. *International Journal of Geoinformatics* 2019; 15(3): 21-31.
- Mugabe FT., Hodnett MG., Senzanje A. Opportunities for increasing productive water use from dam water: a case study from semi-arid Zimbabwe. *Agricultural Water Management* 2003; 62(2): 149-163.
- Nguyen UN., Pham LT., Dang TD. An automatic water detection approach using Landsat 8 OLI and Google Earth Engine cloud computing to map lakes and reservoirs in New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment* 2019; 191: 1-12.
- Özelkan E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from landsat-8 OLI. *Polish Journal of Environmental Studies* 2020; 29(2): 1759-1769.
- Özmen MT. Sel – Taşkın Türkiye ve Antalya. Antalya: 2015.
- Pekel JF., Cottam A., Gorelick N., Belward, AS. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 2016; 540(7633): 418-422.
- Peker EA., Sağır Ç., Yılmaz KK., Süzen ML. Burdur Gölü yüzey alanının zamansal değişimi ve iklimsel parametrelerle ilişkisi. *HİDRO'2023: Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu*, 25-27 Mayıs 2023, sayfa no: 37-44, Trabzon.
- Roca M., Navarro G., García-Sanabria J., Caballero I. Monitoring sand spit variability using Sentinel-2 and Google Earth Engine in a Mediterranean estuary. *Remote Sensing* 2022; 14(10): 2345.

- Selek Z., Arslan C. Entegre su kaynakları yönetiminde WEAP modelinin kullanılması: Burdur gölü havzası örneği. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2019; 5(1): 54-64.
- Sever R. Coğrafya öğretim programlarında doğal mevsim kavramı. *Doğu Coğrafya Dergisi* 2011; 10(13): 117-133.
- Shiklomanov AN., Bradley BA., Dahlin KM., Fox AM, Gough CM., Hoffman FM., Middleton EM., Serbin SP., Smallman L., Smith, WK. Enhancing global change experiments through integration of remote-sensing techniques. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2019; 17(4): 215-224.
- Ultra Enerji. [www.ultraenerji.com/hidroelektrik/hidroelektrik-santraller/aslantas-baraji-ve-hidroelektrik-enerji-santrali.html](http://www.ultraenerji.com/hidroelektrik/hidroelektrik-santraller/aslantas-baraji-ve-hidroelektrik-enerji-santrali.html) (Erişim tarihi: 15.01.2024)
- Yaman Ş. Orman sağlığının Google Earth Engine ile izlenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, Türkiye, 2023.
- Yang X., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L. Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening. *Remote Sensing* 2017; 9(6): 596.

## Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Mevcut bir Köprünün Yapısal Performans Davranışının Belirlenmesi

Özlem ÇAVDAR<sup>1\*</sup>, Osman SARIGÜN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı, Gümüşhane

<sup>2</sup>Karayolları 101. Şube Şefliği, Gümüşhane

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5459-0769>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9470-8610>

\*Sorumlu yazar: ozlemcavdar@gumushane.edu.tr

### Araştırma Makalesi

### ÖZ

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 01.02.2024

Kabul tarihi: 21.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Malzeme deformasyonları

Öngerme kiriş

Sonlu eleman analizi

Üstyapı tasarım esasları

Yapım aşaması

Türkiye’de öngermeli kirişlerin hesap ve tasarım esaslarında; kabul gören uluslararası Köprü Tasarım Yönetmeliği (American Association of State Highway and Transportation Officials\_ AASHTO), Türkiye Cumhuriyeti Karayolları Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi ve TS 3233 (1979) yönetmeliği kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında bu yönetmelikler çerçevesinde üstyapı tasarım esaslarıncı model güvenilirliği belirlenen Gümüşhane İli Şiran İlçesi’nde yer alan üç açıklıklı, öngerme kirişli, betonarme yapıya sahip Çirmiş Köprüsü model olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın amacı; öngerme kiriş yöntemiyle inşa edilen karayolu köprüsünün yapısal davranışına yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonları etkisini belirlemektir. Bu amaçla gerçekleştirilecek olan sonlu eleman analizleriyle yapı elemanlarında ortaya çıkacak olan kesit tesirleri karşılaştırılacaktır. Ayrıca, doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemi ile tasarımı yapılan köprünün, deprem altındaki performansı incelenmiştir. Yapının performans analizi, Karayolları Genel Müdürlüğü Sanat Yapıları Daire Başkanlığı’nın Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri için Mayıs ayı Taslak raporundaki kriterlere göre belirlenmiştir. Statik ve doğrusal olmayan yapım aşamalı analizler neticesinde köprü tabliye uzunluğu ve ayak yüksekliğince elde edilen normal kuvvet, kesme kuvveti, eğilme momenti ve yer değiştirme değerleri karşılaştırılarak zamana bağlı malzeme deformasyonlarının ve inşa süresinin önemi ele alınarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda öngerme kiriş yöntemiyle inşa edilen köprü tasarımlarının sadece servis durumunu dikkate alacak şekilde değil yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının da dikkate alınarak çözümlenmesi gerektiği belirlenmiştir.

## Determination of Structural Performance Behavior of an Existing Bridge Considering Construction Stages

### Research Article

#### Article History:

Received: 01.02.2024

Accepted: 21.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Material deformations

Prestressing beam

Finite element analysis

Superstructure design

The construction phase

### ABSTRACT

In the calculation and design principles of prestressed beams in Turkey; The internationally accepted Bridge Design Regulation (American Association of State Highway and Transportation Officials\_ AASHTO), the Republic of Turkey Technical Specification for Highways and Road Bridges and the TS 3233 (1979) regulation are used. Within the scope of the study, the three-span, pre-stressed beam, reinforced concrete Çirmiş Bridge located in Gümüşhane Province Şiran District, whose model reliability is determined by the superstructure design principles within the framework of these regulations, was determined as the model. The purpose of this study; To determine the effect of construction stages and time-dependent material deformations on the structural behavior of the highway bridge built with the prestressing beam method. With the finite element analyzes to be carried out for this purpose, the cross-sectional effects that will

occur in the structural elements will be compared. Additionally, the performance of the bridge, which was designed using the non-linear static pushover analysis method, under earthquake was examined. The performance analysis of the structure was determined according to the criteria in the May Draft report for Highway and Railway Bridges and Viaducts of the General Directorate of Highways, Department of Artistic Structures. As a result of static and non-linear construction phase analyses, the normal force, shear force, bending moment and displacement values obtained by the bridge deck length and pier height were compared and the importance of time-dependent material deformations and construction period were examined. As a result of the study, it was determined that bridge designs constructed with the prestressing beam method should be analyzed not only by taking into account the service condition, but also by taking into account the construction stages and time-dependent material deformations.

**To Cite:** Çavdar Ö., Sarıgün O. Yapım Aşamaları Dikkate Alınarak Mevcut bir Köprünün Yapısal Performans Davranışının Belirlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 116-144.

## 1. Giriş

Yapısal çözümleme yöntemlerinin tasarım için gereklilik arz etmesi ve buna bağlı olarak teknolojinin ilerlemesiyle birlikte önemli gelişmeler elde edilmiştir. Geleneksel yapı çözümlerinde köprüler gibi teknik yapıların değişkenlik gösteren yükler altındaki davranışlarının saptanmasında sonlu eleman analizlerinden faydalanılmaktadır. Ancak sonlu elemanlar analizinde, yapının yapım aşamaları ve bu işlem sırasında ve sonrasında meydana gelen malzeme deformasyonları dikkate alınmadan, yapının anlık olarak inşa edildiği ve tamamlandığı kabul edilmektedir. Ancak, bu tür teknik yapıların inşası uzun zaman almaktadır. Ayrıca yapıya etkileyen yükler inşaat aşamasında ve sonrasında değişmektedir. Zamana bağlı olan malzeme özellikleri; beton için basınç dayanımı, yaşlanması, sünmesi ve büzülmesi, çelik için gevşemesidir. Örneğin beton döküldükten sonra zamanla mukavemet kazanacağı için 7 günlük, 14 günlük, 28 günlük veya daha fazla gün değişiminin dikkate alınması gerekmektedir. Betonun yaş halinden ekonomik ömrünü doldurmasına kadar yapısında meydana gelen değişimler göz önünde bulundurularak gelecekte oluşabilecek hatalar önlenmeye çalışılabilir.

İnşaat aşamalarının da dikkate alınması yapıyı meydana getiren elemanların iç kuvvetlerini ve yer değiştirmelerini önemli ölçüde etkiler. Bu etkinin meydana getirdiği farklılıklar; söz konusu elemanın türü ve konumu dışında, malzeme tipine, geometrisine, yüklerin uygulama sırası ve türüne ve de mevsimsel koşullara bağlıdır.

Literatürde geçmişten günümüze karayolu köprülerinin yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alındığı pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Cruz ve ark., (1998) çalışmalarında üç açıklıklı, öngermeli, betonarme, kutu kirişli köprü modeli tasarlayıp köprünün adım adım inşa aşamaları ile yapısal malzemenin zamansal etkilerini de ele alarak çözümlerini yapmışlardır. Wang ve ark., (2004) dengeli konsol tekniği ile inşa edilen kablolu köprülerin yapım aşamalarını göz önüne alarak yapısal davranışlarını belirlemişlerdir. Karakaplan ve ark., (2009) yapısal çözümlerinin daha hassas sonuçlar verebilmesi için yapı analizlerinde klasik yapı çözümleri ile inşa aşamaları sırasında meydana gelen geometri ve malzeme dayanım değişimlerinin göz önüne alınarak analiz edilen gelişmiş yapı çözümleri arasındaki farklılıkları belirtmişlerdir. Altunışık ve ark., (2010) dengeli konsol yöntemi ile inşa edilen otoyol köprülerinin yapım aşaması analizi üzerine

çalışmışlardır. İnşa aşamaları olmadan yapılan analizlerin güvenilir çözümler sunmayacağını belirtmişlerdir. Çavdar ve ark., (2010) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kablolar ile yapılmış uzun açıklıklı köprülerin stokastik sismik analizi, pertürbasyon tabanlı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM) ve Monte Carlo simülasyonu (MCS) yönteminin avantajlarının birleştirilmesi yoluyla incelemişlerdir. Martins ve ark., (2015) yapısal analizin, yapım aşamasına bağlı yük geçmişini, geometri değişikliklerini ve betonun sünme, büzülme ile birlikte yaşlanmasına bağlı gerçekleşen zamansal etkiler içerdiğini söylemişlerdir. Bu amaçla modelledikleri 144 m uzunluğunda, 14 m genişliğinde, 16 adet kabloya sahip betonarme köprüye dair gerçekleştirilen analizler ile hem inşaat aşamalarını hem de zamana bağlı etkileri göz önünde bulundurmanın önemini ortaya koymuşlardır. Traykov ve Boiadjieva (2015) zamana bağlı malzeme özellikleri ve inşaat aşamalarının dikkate alınması gerekliliği üzerine 6 ve 7,20 m açıklıklarına sahip, 3 m kat yüksekliği olan bir yapı modellemişlerdir. Analizlerinin sonucunda sıradan bir düzlem çerçevesi ele alınarak modellenen bir yapıda dahi inşaat aşamaları sırasında yapı elemanlarında tasarlandığından daha yüksek olan büyüklükte yer değiştirme ve iç kuvvet değerleri verdiği için dolayı yapı tasarımlarında zamana bağlı malzeme özelliklerini de içeren yapım aşamalarının dikkate alınması gerektiğini ortaya çıkarmışlardır. Çavdar ve ark., (2015) Türkiye'nin doğusunda Elazığ-Malatya karayolunun 51. km'sinde bulunan Kömürhan Köprüsü sayısal örnek olarak seçmiş oldukları çalışmalarında, 1992 Erzincan depremi, köprü'nün yakınında meydana geldiğinden yer hareketi olarak kabul edilmiştir. Malzeme özellikleri rastgele değişkenler olarak kabul edilmiştir. Stokastik analiz sırasında, söz konusu köprü'nün yer değiştirmeleri ve iç kuvvetleri, pertürbasyon tabanlı stokastik sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılarak verilmiştir. Leite ve ark., (2016) öngerme kiriş yöntemi ile inşa edilen iki açıklıklı bir köprü tasarlayıp gerçekleştirdikleri analizler sonucu inşaat aşamaları göz önüne alındığında özellikle eğilme momentlerinin büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Hatta negatif eğilme momentlerinde %60'dan büyük farklılıklar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Wang ve ark. (2020) asma köprülerin yapım süreçleri boyunca sıcaklık, basınç, anlık deformasyon gibi doğrusal olmayan davranışların yapıya temas etmesinden dolayı sürekli yüklemelere maruz kaldığını söylemişlerdir. Belwal ve ark. (2023) denge konsol yöntemiyle inşa edilen kutu kirişli köprü'nün yapım aşamalarını, sıcaklık değişimini ve yapıya etkiyen ölü ve hareketli yükleme koşullarını dikkate alarak analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapım aşamalı analizin, inşaat süresinin uzun olması ve yük değerlerinin süre boyunca değişebilmesi nedeniyle geleneksel analitik yöntemlere göre daha güvenilir sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Çavdar ve Şener (2022) çalışmalarında AASHTO'ya göre dengeli bir konsol köprü tasarlamışlardır. Tasarımını yaptıkları dengeli konsol köprü'nün malzeme deformasyonlarını dikkate alarak yapım aşamalı analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda yapım aşamalı analiz sonuçları statik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapım aşaması ele alınarak gerçekleştirilen çözüm metodunda meydana gelen sonuçlar %14 daha yüksek eğilme momenti ortaya çıkarmıştır. Orgnoni ve ark. (2022) Cenova'da bulunan, şehrin simgelerinden biri olan 51 yıllık Morandi Köprüsü'nün yıkılmasından sonra köprü'nün çökme anında



yapının ömrü boyunca maruz kaldığı gerilme ve yükleme durumunun anlaşılabilmesi için öncelikle hem yapım sırasının hem de yükleme yükünün yeniden oluşturulması gerektiğini söylemişlerdir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Uygulama Modeli (Karayolu Köprüsü)

Çalışmada Gümüşhane İli Şiran İlçesi ile Giresun İli Alucra İlçesi'ni Çirmiş suyu ile birleştiren karayolunun kesiştiği noktada geçişi sağlayan Çirmiş Köprüsü model olarak seçilmiştir. Köprü konumu Şekil 1'de görseli ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Köprü'nün malzeme ve geometrik özellik verileri Karayolları Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir. Köprü üstyapısı tabliyeler ve öngermeli kirişlerden oluşmaktadır. Açıklıkları 32 metre olan köprü'nün toplam uzunluğu 96 metredir. Köprü genişliği ise 18 metredir. Köprü 1x2 şeritli (çift yönlü yol) trafik akışını sağlamaktadır. Platform genişliği 12 metre olup her iki platform yanında 3 metre tretuvar vardır. Köprü kenar ayakları 5,72 m yüksekliğe sahip olup perde tipindedir. Kenar ayakları, kesit alanı  $25 \times 10 \text{ m}^2$  ve derinliği 1,5 m olan betonarme kütle betonudur. Ayrıca köprü'nün 8 ayak ve 2 kenar ayağı olmak üzere 10 ayağı tabliyenin ana taşıyıcı sistemlerini oluşturmaktadır. P1 ekseninde yer alan 4 adet ayak 6,60 m yüksekliğinde, P2 ekseninde yer alan 4 adet ayak ise 5,60 m yüksekliğindedir. Ayaklar  $2,5 \times 1 \text{ m}^2$  kesit alanına sahip, temeller ise  $25 \times 8 \text{ m}^2$  kesit alanına ve 1,5 m derinliğe sahip kütle betonudur. Ayaklar inşa edildikten sonra öngerilmeli betonarme kirişleri yerine koymak için inşa edilen başlık kirişleri, kesit alanı  $1,5 \times 1,10 \text{ m}^2$  ve uzunluğu 18 m olan kütle betonudur (Şekil 3).

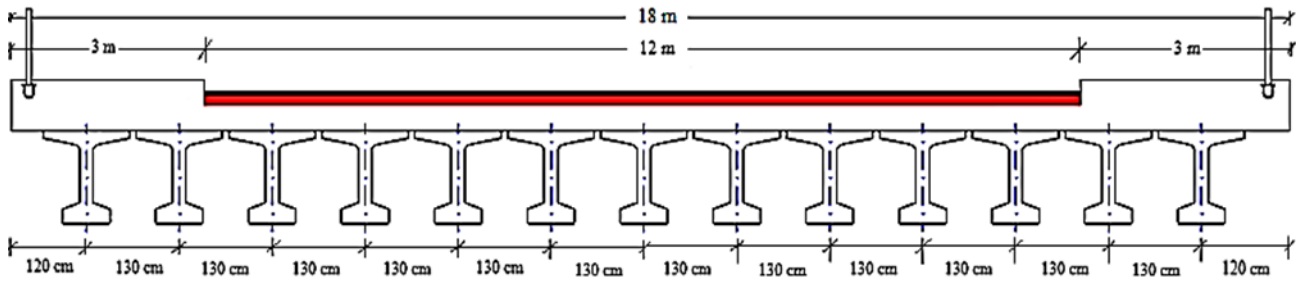
Köprü üstyapısındaki ön üretimli köprü kirişleri I-profillerden oluşmaktadır. Köprü kirişleri, köprü'nün bir ucundan diğer ucuna uzunlamasına bir yönde sürekli olarak uzanır. Profilin üst başlığının kalınlığı 10 cm, alt başlığın kalınlığı 20 cm'dir. Profil yüksekliği 130 cm, üst başlığın genişliği 127,5 cm ve alt başlığın genişliği 70 cm'dir. Her platformda 13 kiriş bulunmaktadır. İlgili ayrıntılar Şekil 4'te gösterilmektedir. Tabliye için 25 cm kalınlığında döşeme betonu tamamlanarak 6 cm asfalt kaplama yapılacaktır. Ayrıca Şekil 5'te görüldüğü gibi başlık kirişi ile öngerilmeli kirişlerin bağlantısı elastomer mesnetler ile sağlanmaktadır.



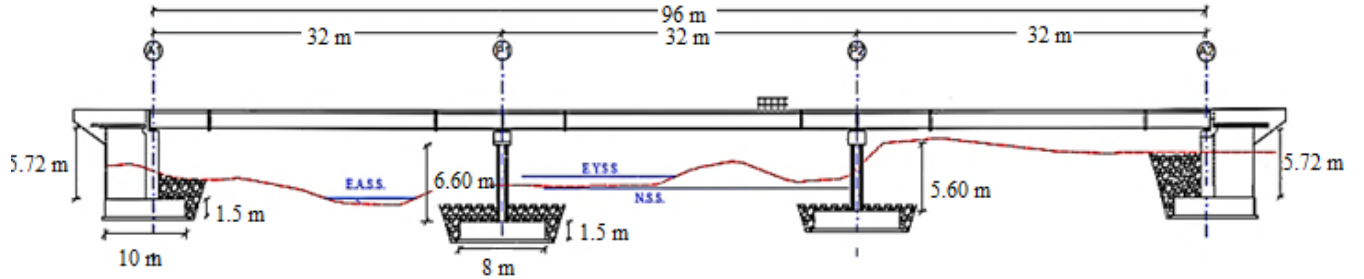
Şekil 1. Köprü Konumu



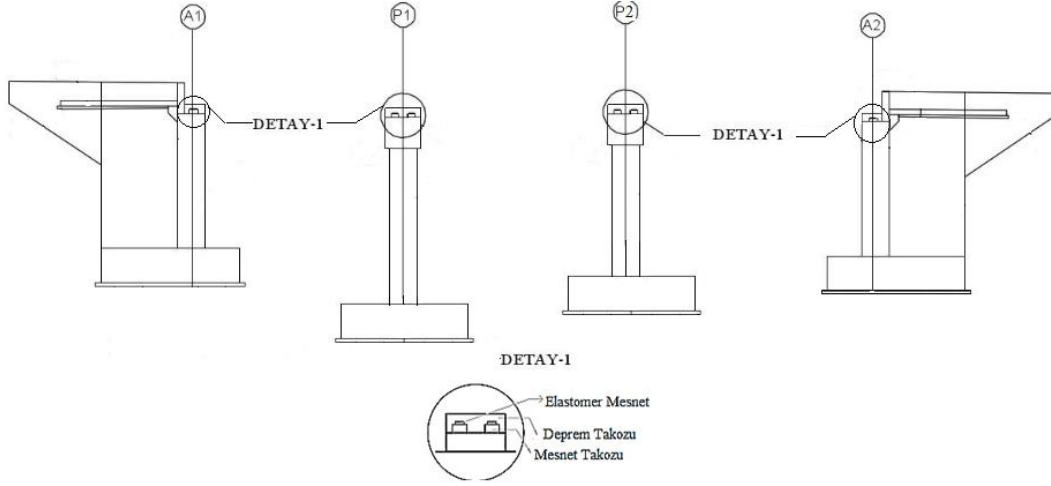
Şekil 2. Çirmiş Köprüsü



Şekil 3. Köprü Enkesiti



Şekil 4. Köprü Boykesiti



Şekil 5. Elastomer Mesnet Yerleşimi

## 2.2. Üstyapı Tasarım Esasları

Ülkemizde hâlihazırda köprü tasarımına dair geniş kapsamlı bir yönetmelik bulunmadığından dolayı karayolu köprülerinin tasarımında, “American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)” tarafından yayınlanmış, “Standard Specifications for Highway Bridges” adlı yönetmelik kullanılmaktadır.

### 2.2.1. Kiriş geometrik özellikleri

Öngermeli kirişlerin boyutlandırılıp köprü üstyapı hesaplarının yapılabilmesi için öncelikli olarak projelendirilecek kirişin enkesit alanı, ağırlık merkezi, atalet ve mukavemet momentleri gibi bazı kesit

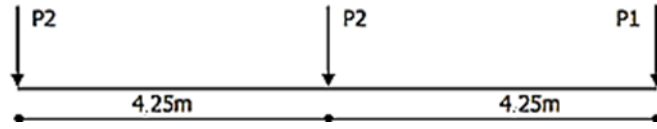
özelliklerinin hesaplanması gerekmektedir. Köprü üstyapısını meydana getiren öngermeli kirişler ve köprü tabliyesi köprüye etkileyen yükleri yükleme aşamalarına göre öngermeli kirişler tek başına veya köprü tabliyesi ile birlikte taşımaktadır. Bu durumda öngermeli kirişin yalnızca çalıştığı kesite ön üretimli kesit, tabliye ile çalıştığı kesite ise kompozit kesit adı verilmektedir. Tablo 1 'de ön üretimli kiriş ve kompozit kirişe ait geometrik özellikler verilmiştir.

**Tablo 1.** Ön Üretimli Kiriş ve Kompozit Kiriş Geometrik Özellikleri

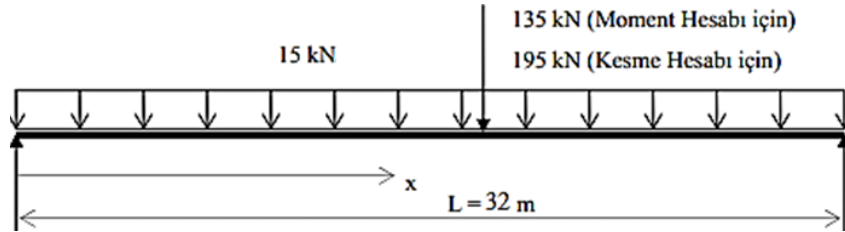
Kiriş Tipi	Enkesit Alanı	Ağırlık Merkezi		Atalet Momenti		Mukavemet Momenti	
	(cm <sup>2</sup> )	(cm)		(cm <sup>4</sup> )		(cm <sup>3</sup> )	
	A	y <sub>alt</sub>	y <sub>üst</sub>	I <sub>xb</sub>	I <sub>yb</sub>	W <sub>b</sub>	W <sub>t</sub>
Ön Üretimli	0,5538	0,7048	0,5952	0,12470	0,03018	0,17692	0,20951
Kompozit	0,8190	0,9380	0,6120	0,21909	0,05505	0,23356	0,60527

### 2.2.2. Kirişte oluşan kesit tesirleri

Öngermeli kirişlerin, tasarım hesaplarında basit bir mesnet olarak çalıştığı kabul edilmiştir. Bu durumda köprü üstyapısına etkileyen kiriş zati ağırlığı, tabliye ağırlığı ve de kaplama, korkuluk gibi ek ağırlıklar düzgün yayılı yük olarak etkilmiştir. Hareketli yükler ise Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterildiği gibi tesir ettirilerek kesit tesirleri hesaplanmalıdır. Şekil 4'te standart kamyon yük sınıfı olarak H30-S24 kamyon yükü alınmıştır. P1 ön teker yükü 56,22 kN, P2 arka teker yükü ise 224,90 kN olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 6.** Standart Kamyon Yükü Uygulanması (AASHTO, 2015).



**Şekil 7.** Eşdeğer Şerit Yükü Uygulanması (AASHTO, 2015).

### 2.2.3. Öngerme Kablo Sayısı

Kirişe yerleştirilecek öngerme kablo miktarının tespiti servis yüklemesi altında kiriş açıklık ortasında ve kiriş alt kenarındaki gerilmeler göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Servis yüklemesi ise kirişe uygulanan bütün yüklerin mevcut olduğu durumu ifade etmektedir. AASHTO 9.15.2.2'ye göre açıklık ortasında izin verilen çekme gerilmesi Denklem 1'de verilen bağıntıyla +3,354 MPa ile sınırlanmıştır.

Kiriş açıklık ortası alt kenarında kayıplardan sonra öngerme kablolarınca alınacak kuvvet Denklem 2’de gösterilirken, öngerme kablo sayısının formülasyonu Denklem 3’te verilmiştir.

$$\frac{M1(\text{zati}) + M2(\text{tabliye})}{W_b} + \frac{M3(\text{ilave}) + M4(\text{max,hareketli})}{W_{cb}} + \sigma_b \leq + 3,354\text{Mpa} \quad (1)$$

Bu denklemde, M1 kiriş zati ağırlığından meydana gelen moment tesirlerini, M2 tabliye ağırlığından meydana gelen moment tesirlerini, M3 ilave yüklerden (kaplama, bordür, korkuluk ve yaya yükleri) meydana gelen moment tesirlerini, M4 maksimum hesaplarda kullanılacak hareketli yüklerden meydana gelen moment tesirlerini,  $W_b$  kiriş alt noktasına göre mukavemet momentini,  $W_{cb}$  kompozit kiriş alt noktasına göre mukavemet momentini ifade etmektedir.

$$\sigma_b = - \frac{P_s}{A} - \frac{P_s \times e}{W_b} \quad (2)$$

Bu denklemde,  $\sigma_b$  tüm kayıplardan sonra kiriş alt lifinde gerekli öngerme gerilmesini,  $P_s$  kiriş açıklık ortası alt kenarında kayıplardan sonra öngerme kablolarınca alınacak kuvveti,  $e$  kablo eksantrisitesini,  $A$  kesit alanı ifade etmektedir.

$$N = \frac{P_s}{P1 \times (1-\text{Kayıp Oranı})} \quad (3)$$

Bu denklemde  $N$  kablo sayısını,  $P1$  müsaade edilen ilk öngerme kuvvetini ifade etmektedir.

Bu denklemler kullanılarak gerekli öngerme kablosu sayısı ( $N$ ), 32 adet olarak belirlenmiştir.

#### 2.2.4. Öngerme Kayıpları

Öngermeli ön üretimli kirişlerde meydana gelen öngerme kayıplarının hesapları AASHTO 9.16.2'ye göre yapılacaktır. Toplam kayıp ( $f_s$ ) Denklem 4’te verilmiştir.

$$f_s = SH + ES + CR_c + CR_s \quad (4)$$

Burada,  $f_s$  Toplam öngerme kaybını,  $CR_c$  betonun sünmesinden meydana gelen öngerme kayıplarını,  $CR_s$  öngerme çeliğinin gevşemesinden meydana gelen öngerme kayıplarını,  $ES$  betonun elastik kısılmasından meydana gelen öngerme kayıplarını,  $SH$  betonun rötresinden meydana gelen öngerme kayıplarını gösterir.

Yukarıda verilen bütün kayıplar meydana geldiğinde toplam kayıp ( $f_s$ ), % 22,84 olarak bulunmuştur.

#### 2.2.5. Gerilme kontrolleri ve öngerme kablolarının kılıflanması

Öngermeli kirişlerde betona öngerme kuvveti aktarıldıktan sonra başlangıç öngerme kuvveti ve kayıplardan sonra gerçekleşecek efektif öngerme kuvvetleri bulunduktan sonra mesnet eksenini ve açıklık ortasındaki gerilmeler hesap edilip öngerme kablolarının kılıflanmasına karar verilecektir. Başlangıç

öngerme kuvveti Denklem 5'te, kayıplardan sonra oluşan efektif öngerme kuvveti Denklem 6'da gösterilmiştir.

$$P_i = \text{Toplam Kablo Sayısı} \times P_1 \times (1 - \text{Elastik Kısılma Kaybı}) \quad (5)$$

$$P_e = \text{Toplam Kablo Sayısı} \times P_1 \times (1 - \text{Toplam Kayıp}) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde,  $P_i$  başlangıç öngerme kuvvetini,  $P_e$  kayıplardan sonra oluşan efektif öngerme kuvvetini göstermektedir.  $P_i$  başlangıç öngerme kuvveti 5767,64 kN,  $P_e$  kayıplardan sonra oluşan efektif öngerme kuvveti 4827,38 kN olarak hesaplanmıştır.

### 2.2.6. Kesit gerilmelerinin kontrolü

Kesit gerilmeleri kirişin yükleme aşamalarına göre dört aşamada tahkik edilecektir.

1. Yükleme durumu, öngerme kuvvetinin uygulandığı aşamadır. Sadece kiriş zati ağırlığı mevcuttur. Kayıplar minimum düzeydedir ve kayıplardan sonra kesitlerde meydana gelen gerilmeler, Denklem 7'de alt lifteki ve Denklem 8'de üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M_1}{W_b} < 20250 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M_1}{W_t} > -3602 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

2. Yükleme durumu, 1. aşamaya ilaveten döşeme betonu ağırlığı da ön üretimli kiriş tarafından taşınmaktadır. Kayıplar maksimum düzeyde olup kesit gerilmeleri, Denklem 9'da alt lifteki ve Denklem 10'da üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M_1 + M_2}{W_b} < 18000 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M_1 + M_2}{W_t} > -\frac{3354,1 \text{ kN}}{\text{m}^2} \quad (10)$$

3. Yükleme durumunda hareketli yükler dışındaki tüm yükler var olup kiriş ve tabliye ağırlıklarının ön üretimli kesit, ilave zati yüklerin ise kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilmiştir. Kayıplar maksimum düzeyde olup kesit gerilmeleri, Denklem 11'de alt lifteki ve Denklem 12'de üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{\text{alt}} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M_1 + M_2}{W_b} - \frac{M_3}{W_{cb}} < 18000 \text{ kN/m}^2 \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{üst}} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M_1 + M_2}{W_t} + \frac{M_3}{W_{cb}} > -3354,1 \text{ kN/m}^2 \quad (12)$$

4. Yükleme durumu en son aşamadır. Hareketli yük dahil tüm yükler mevcuttur. Kiriş ve döşeme ağırlıklarının ön üretimli kesit, ilave zati yüklerin ise kompozit kesit tarafından taşındığı kabul edilmiştir.

Kayıplar maksimum düzeyde olup kesit gerilmeleri, Denklem 13'te alt lifteki ve Denklem 14'te üst lifteki koşulları sağlamalıdır.

$$\sigma_{alt} = \frac{P_i}{A_p} + \frac{P_i \times e_p}{W_b} - \frac{M1+M2}{W_b} - \frac{M3+M4}{W_{cb}} < 18000 \text{ kN/m}^2 \quad (13)$$

$$\sigma_{üst} = \frac{P_i}{A_p} - \frac{P_i \times e_p}{W_t} + \frac{M1+M2}{W_t} + \frac{M3+M4}{W_{cb}} > -3354,1 \text{ kN/m}^2 \quad (14)$$

Öngermeli kirişin 4 yükleme durumuna göre kılıflama yapıldıktan sonra ön üretimli kesitte meydana gelen gerilme tahkikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Öngermeli kirişte kılıflamadan sonra oluşan kesit gerilmeleri

<b>Öngermeli kirişte kılıflamadan sonra oluşan kesit gerilmeleri</b>							
x (metre) =	0L	H/2	0,1L	0,2L	0,3L	0,4L	0,5L
	0,00	0,65	3,20	6,40	9,60	12,80	16,00
Yük Değerleri							
M1 (kNm)	0	140,68	637,93	1134,10	1488,51	1701,15	1772,03
M2 (kNm)	0	87,95	398,78	708,94	930,48	1063,40	1107,71
M3 (kNm)	0	58,64	265,88	472,68	620,39	709,02	738,56
M4 (kNm)	0	134,93	631,58	115,97	1453,16	1643,46	1791,16
<b>Yükleme Durumu - 1</b>							
Alt Lifte < 20250 kN/m <sup>2</sup>							
$P_i / A_p$	5858,94	6509,15	6509,15	7810,98	9112,82	10414,66	10414,66
$P_i \times e_p / W_b$	10362,00	11674,96	11674,96	14303,34	16687,25	18810,36	18810,36
$M1 / W_b$	0,00	795,16	3605,75	6410,24	8413,46	9615,36	10016,00
$\Sigma\sigma$	16220,93	17388,95	14578,36	15704,07	17386,60	19609,66	19209,02
<b>Yükleme Durumu - 1</b>							
Üst Lifte > -3602 kN/m <sup>2</sup>							
$P_i \times e_p / W_t$	8750,15	9858,88	9858,88	12078,40	14091,49	15884,34	15884,34
$M1 / W_t$	0,00	671,47	3044,87	5413,11	7104,72	8119,66	8457,97
$\Sigma\sigma$	-2891,21	-2678,25	-304,85	1145,68	2126,05	2649,98	2988,29
<b>Yükleme Durumu - 2</b>							
Alt Lifte < 18000 kN/m <sup>2</sup>							
$P_i \times e_p / W_b$	10362,00	11674,96	11674,96	14303,34	16687,25	18810,36	18810,36
$M1 + M2 / W_b$	0,00	1292,28	5859,77	10417,36	13672,79	15625,99	16277,07
$\Sigma\sigma$	16220,93	16891,83	12324,34	11696,95	12127,28	13599,03	12947,94
Üst Lifte > -3354,1 kN/m <sup>2</sup>							
$P_i \times e_p / W_t$	8750,15	9858,88	9858,88	12078,40	14091,49	15884,34	15884,34
$M1 + M2 / W_t$	0,00	1091,26	4948,26	8796,91	11545,94	13195,31	13745,12
$\Sigma\sigma$	-2891,21	-2258,46	1598,54	4529,48	6567,27	7725,63	8275,44
<b>Yükleme Durumu - 3</b>							

Alt Lifte < 18000 kN/m <sup>2</sup>							
$P_i \times e_p / W_b$	10362,00	11674,96	11674,96	14303,34	16687,25	18810,36	18810,36
$M1 + M2 / W_b$	0,00	1292,28	5859,77	10417,36	13672,79	15625,99	16277,07
$M3 / W_{cb}$	0,00	251,07	1138,38	2023,81	2656,23	3035,71	3162,19
$\Sigma\sigma$	16220,93	16640,76	11185,96	9673,15	9471,04	10563,32	9785,76
Üst Lifte > -3354,1 kN/m <sup>2</sup>							
$P_i \times e_p / W_t$	8750,15	9858,88	9858,88	12078,40	14091,49	15884,34	15884,34
$M1 + M2 / W_t$	0,00	1091,26	4948,26	8796,91	11545,94	13195,31	13745,12
$M3 / W_{ct}$	0,00	96,88	439,28	780,94	1024,98	1171,41	1220,22
$\Sigma\sigma$	-2891,21	-2161,58	2037,81	5310,42	7592,25	8897,05	9495,66
Yükleme Durumu - 4							
Alt Lifte < 18000 kN/m <sup>2</sup>							
$P_e / A_p$	4905,76	5448,01	5448,01	6537,62	7627,22	8716,82	8716,82
$P_e \times e_p / W_b$	8676,22	9771,67	9771,67	11971,58	13966,84	15743,82	15743,82
$M1 + M2 / W_b$	0,00	1292,28	5859,77	10417,36	13672,79	15625,99	16277,07
$M3 + M4 / W_{cb}$	0,00	828,78	3842,52	2520,34	8878,02	10072,27	10831,14
$\Sigma\sigma$	13581,98	13098,63	5517,39	5571,49	-956,75	-1237,62	-2647,57
Üst Lifte > -3354,1 kN/m <sup>2</sup>							
$P_e \times e_p / W_t$	7326,61	8251,65	8251,65	10109,36	11794,25	13294,81	13294,81
$M1 + M2 / W_t$	0,00	1091,26	4948,26	8796,91	11545,94	13195,31	13745,12
$M3 + M4 / W_{ct}$	0,00	319,81	1482,74	972,54	3425,83	3886,66	4179,49
$\Sigma\sigma$	-2420,85	-1392,57	3627,36	6197,71	10804,74	12503,98	13346,62

Yükleme durumlarında verilen denklemler ile yapılan kontroller sonucunda, kılıflamadan sonra ön üretimli kirişte tüm yükleme durumlarında beton basınç gerilmeleri mesnet ekseninden kiriş orta noktasına kadar yer alan tüm bölgelerde emniyet gerilmelerinden daha küçük çıkmaktadır. Kiriş son durumdaki gerilmeler bakımından emniyetlidir.

### 2.2.7. Eğilme taşıma gücü kontrolü

Eğilme mukavemeti kontrolleri AASHTO 9.17'ye göre yapılacaktır. Ön üretimli ve kompozit kiriş için taşıma gücü açıklık ortası için hesaplanmıştır. Taşıma kapasitesi hesaplarında kesit içindeki betonarme donatılarının katkısı ihmal edilmiştir. Öngermeli kirişlere sahip köprülerde eğilme taşıma gücü, ön üretimli kesit ve kompozit kesit için ayrı ayrı olmak üzere her iki durum içinde hesaplanmalıdır. Ayrıca bir kesit için hesabı yapılan moment, normal kuvvet ve kesme kuvvetine dair taşıma gücü aşağıda belirtilen azaltma katsayıları ile çarpılarak boyutlandırmaya tabi taşıma gücü elde edilir. Eğilme taşıma gücü kontrolleri sonucunda eşdeğer basınç bloğu yüksekliğinin, tabla içinde kalıp kalmamasına göre kiriş kesiti, dikdörtgen ya da tablalı kesit olarak dikkate alınacaktır.

Boyutlandırmaya esas taşıma gücü, bir kesit için hesabı yapılan moment, normal kuvvet ve kesme kuvvetine dair taşıma gücünün aşağıda verilen azaltma katsayıları ile çarpılmasıyla ifade edilir. Taşıma



gücü azaltma katsayısı ( $\Phi$ ), öngermeli elemanların kesme taşıma gücü hesabında  $\Phi = 0,90$ , öngermeli elemanların eğilme taşıma gücü hesabında  $\Phi = 1,00$  olarak alınabilir (Aktaş, 2010).

AASHTO 9.17.4.1'e göre sınır yük durumunda öngörme kablosundaki ortalama gerilme,  $f_{su}^*$  Denklem 15'te hesaplanır. Ayrıca öngörme çeliği alanının beton alanına oranı Denklem 16'da verilmiştir.

$$f_{su}^* = f_s' \times [1 - (g^* / \beta_1) \times (p^* \times f_s' / f_c')] \quad (15)$$

$$p^* = A_s^* / (b \times d) \quad (16)$$

Bu denklemlerde,  $A_s^*$  öngörme donatıları toplam alanını,  $\beta_1$  beton mukavemet faktörünü,  $b$  etkili tabla genişliğini,  $b'$  ön üretimli kiriş gövde kalınlığını,  $d$  faydalı yüksekliği,  $f_s'$  öngörme çeliği kopma dayanımını,  $g^*$  öngörme çeliği tip faktörünü,  $f_c'$  28 günlük beton basınç dayanımını,  $p^*$  öngörme çeliği alanının beton alanına oranını,  $x$  öngörme kabloları merkezinin kiriş alt kenarına mesafesini ifade etmektedir. Dikdörtgen kesit hesabı için sağlanması gereken şart Denklem 17'de verilmiştir.

$$(A_s^* \times f_{su}^*) / (0.85 \times f_c' \times b) < t \quad (17)$$

Bu eşitlikte,  $t$  tabla yüksekliğini ifade etmektedir. Dikdörtgen kesit için moment taşıma kapasitesi Denklem 18'de belirtilmiştir.

$$\Phi M_n = [A_s^* \times f_{su}^* \times d \times (1 - 0.60 \times (p^* \times f_{su}^*) / f_c')] \times \Phi \quad (18)$$

Bu eşitlikte  $\Phi$ , taşıma kapasitesi azaltma katsayısı AASHTO 9.14'e göre öngermeli kirişler için 1,00'dır. Zati yükler ve hareketli yük birleşimlerinden oluşan faktörlü moment Denklem 19 ile ifade edilir.

$$M_u = 1.3 \times (M_{DL} + 1.67M_{LL}) \quad (19)$$

Bu eşitlikte,  $M_{DL}$  kiriş zati ağırlığı, tabliye, enleme kirişi yüklerinden dolayı oluşan momentlerin toplamını,  $M_{LL}$  araç yükünden dolayı açıklık ortasında oluşan momenti belirtmektedir.

Kompozit ve ön üretimli kiriş kesitleri için eğilme taşıma gücü kontrolleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Moment taşıma kapasitesi, zati ve hareketli yüklerin birleşiminden oluşan faktörlü momentten büyük olmasından dolayı kesit yeterlidir.

### 2.2.8. Sehîm hesapları

Sehîm tahkikleri maksimum sehîmin meydana geleceği açıklık ortası için yapılacaktır. Zamana bağımlı tahkik edilen sehîm hesapları PCI yayınlarında ifade edilen katsayı metoduna uygun vaziyette yapılacaktır. Zamana bağımlı davranışın neticesi olarak meydana gelecek sehîmlerin hesaplanması için hesabı gerçekleştirilen elastik sehîmler Tablo 3'te seçilen uygun katsayılarla çarpılacaktır. AASHTO 9.11.3.1'e göre, üstyapıya etkileyen hareketli yükler ve bu yüklerden kaynaklanan dinamik etki altında, köprü üstyapısında meydana gelen maksimum sehîm, açıklığın 1/800'den küçük olmalıdır.

**Tablo 3.** Tipik Elemanlarda Uzun Zamanda Oluşacak Sehim ve Ters Sehimlerin Hesabında Kullanılacak Katsayılar (PCI, 1985).

	Sehim	Kompozit Başlıksız Kesit	Kompozit Başlıklı Kesit
Montajda	(Montaj) 1-Sehim (↓) Çarpanı: Öngerme anında kiriş zati ağırlığından dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.	1,85	1,85
	(Montaj) 2-Ters Sehim (↑) Çarpanı: Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.	1,80	1,80
Serviste	(Servis) 3-Sehim (↓) Çarpanı: Öngerme anında kiriş zati ağırlığından dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.	2,70	2,40
	(Servis) 4-Ters Sehim (↑) Çarpanı: Öngerme anında öngerme kuvvetinden dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.	2,45	2,20
	(Servis) 5-Sehim (↓) Çarpanı: Kirişe gelen ilave yüklerden dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.	3,00	3,00
	(Servis) 6-Sehim (↓) Çarpanı: Kompozit başlıktan dolayı oluşan elastik sehimde uygulanır.	-	2,30

Tablo 3’te verilen katsayılar yardımıyla hesaplanan ilk öngerme kuvvetinden meydana gelen sehim (Başlangıç Dönemi), efektif öngerme kuvvetinin oluşturduğu sehim (İnşaat Dönemi) ve ek yüklerin oluşturduğu sehime (İşletme Dönemi) dair tek tek koşullar sağlanmıştır. Ayrıca toplam yüklerden dolayı oluşan sehim:

$$\Delta_{\text{sonuç}} = \Sigma \Delta + \Delta l = 0,764 < 4,00 \text{cm} (L / 800), \text{koşul sağlanmıştır.}$$

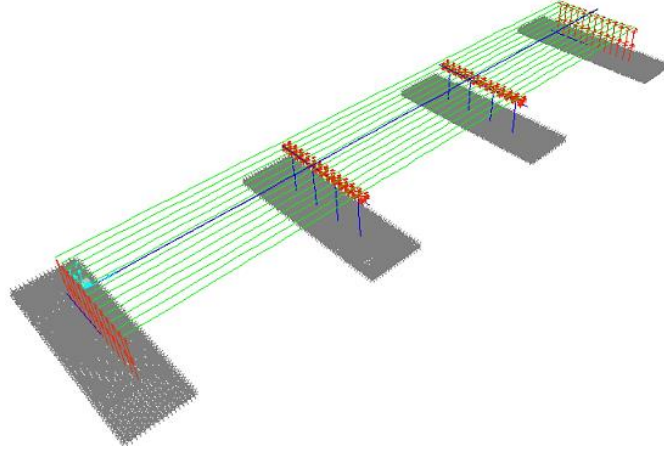
### 2.3. Sonlu Eleman Modeli

Çirilmiş Köprüsü'nün statik davranışını belirlemek amacıyla SAP2000 sonlu elemanlar programında köprünün üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Köprü sonlu elemanlar modeli oluşturulurken aşağıdaki modelleme ölçütleri göz önünde bulundurulmuştur.

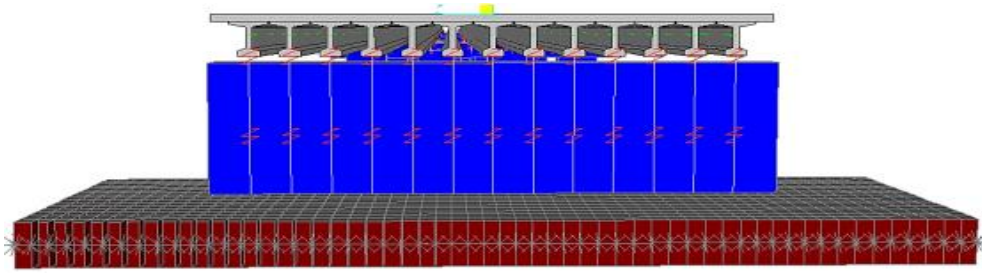
Köprü üstyapısı, bitişik bir düzende ön üretimli I kirişlere sahip olacak şekilde modellenmiştir. Köprü kirişleri ve ayakları çubuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca köprünün ayakları köprü temelleri tarafından taşınabilecek şekilde tasarlanmıştır. Köprü temelleri alan elemanlarla tanımlanır. Köprünün orta açıklığı ve kenar ayak destekleri, yüksek rijitliğe sahip yaylarla tanımlanmıştır. Kenar ve diğer ayaklar, köprü kirişleri elastomer mesnetler üzerine yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır.

Ön üretimli köprü kirişlerini yerine oturtmak için elastomer mesnetlere yerleştirilmek üzere tasarlanmıştır. Elastomer mesnetler planda verilen düzende başlık kirişleri üzerine yerleştirilmiştir. Ayrıca elastomer mesnetlerin ayaklardaki yerleşim derinliği uygun koordinatlarda yapılmıştır. Elastomer yatak rijitliği hesaplamaları sonucunda elde edilen değerler programa aktarılmıştır. Öngerme kabloları, yapısal bir eleman olan tendonlar kullanılarak simüle edildi ve proje verilerinde belirtilen başlangıç ve bitiş konumlarında üstyapı segment uçlarına bağlandı. Modellenen köprünün sonlu

elemanlar modeli Şekil 8’de, köprünün üç boyutlu tabliye kesiti ve ön üretimli kirişlerin görünümü Şekil 9’da verilmiştir.



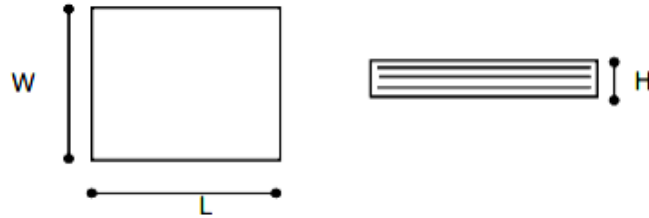
Şekil 8. Köprünün Sonlu Elemanlar Modeli



Şekil 9. Tabliye Kesiti ve Ön Üretimli Kirişler

### 2.3.1. Elastomer Mesnet Rijitlik Hesapları

AASHTO LRFD 2017 Bölüm 14.7.5’e göre rijitlik hesapları gerçekleştirilmiştir. Mesnet rijitliklerin hesabı için 7 katmanlı ve boyutları Şekil 10’da, malzeme özellikleri Tablo 4’te ifade edilen elastomer mesnet kullanılmıştır. Elastomer mesnetin efektif kayma modülü ( $G_{eff}$ ) AASHTO LRFD 2017 şartnamesinde tanımlandığı gibi  $1000 \text{ kN/m}^2$  olarak alınmıştır.



Şekil 10. Elastomer Mesnet Boyutları

**Tablo 4.** Elastomer Mesnet Özellikleri

Özellik	Ölçü	Birim
Elastomer mesnet sayısı ( $n_{bp}$ )	13	adet
Kayma modülü ( $G_{eff}$ )	1	MPa
Mesnet uzunluğu (L)	300	mm
Mesnet genişliği (W)	400	mm
Mesnet alanı (A)	120000	mm <sup>2</sup>
Elastomer tabaka kalınlığı ( $h_{ri}$ )	8	mm
Tabaka sayısı ( $n_{tabaka}$ )	7	adet
Toplam elastomer kalınlığı ( $h_{bp}$ )	72	mm
Çelik levha kalınlığı ( $h_s$ )	2	mm
Çelik levha sayısı	8	adet
Dış elastomer kalınlığı ( $h_{os}$ )	5	mm
Toplam elastomer yüksekliği (H)	82	mm
Atalet momenti (I)	124699	cm <sup>4</sup>
Elastisite modülü ( $E_c$ )	688,22	MPa
Şekil katsayısı (S)	10,71	

Elastomer mesnet rijitlik hesaplarında kullanılacak eşitlikler Denklem 20-24'te verilmiştir.

$$K_h = \frac{G_{eff} \times A}{h_{bp}} \quad (20)$$

$$K_v = \frac{E_c \times A}{h} \quad (21)$$

$$K_{\Theta} = 0,8 \times \frac{E_c \times I}{h_{bp}} \quad (22)$$

$$E_c = 6 \times G \times S^2 \quad (23)$$

$$S = \frac{L \times W}{2 \times h_{ri} \times (L+W)} \quad (24)$$

Bu denklemlerde ifade edilen semboller Tablo 4'te açıklanmıştır. Elastomer mesnetlerin köprü eksenindeki ve köprü eksenine dik rijitlikleri bu formüller yardımı ile hesaplanıp aşağıda verilmiştir.

X yönündeki yatay rijitliği ( $K_h$ ): 1666,67

Y yönündeki enine rijitliği ( $K_y$ ): 1666,67

Z yönündeki düşey rijitliği ( $K_v$ ): 1007151,22

Dönme rijitliği ( $K_{\Theta}$ ): 9535,66

### 2.3.2. Köprü Performans Hedefi ve Yapı Elemanlarında Hasar Sınırlarının Belirlenmesi

Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Tasarım Esasları Bölüm 3.2.1’de standart karayolu köprüleri deprem anında ve deprem sonrasında kendilerinden beklenen performans ve önem düzeyi açısından üç ana sınıfa ayrılmıştır. Çalışmaya konu olan Çirimiş Köprüsü’nün kurpta yer almaması, en fazla üç açıklıklı olması, toplam açıklığı 100 m’den ve ayak yüksekliği ise 10 m’den azdır. Bu sebeplerden dolayı köprü önem düzeyi 3. sınıftır.

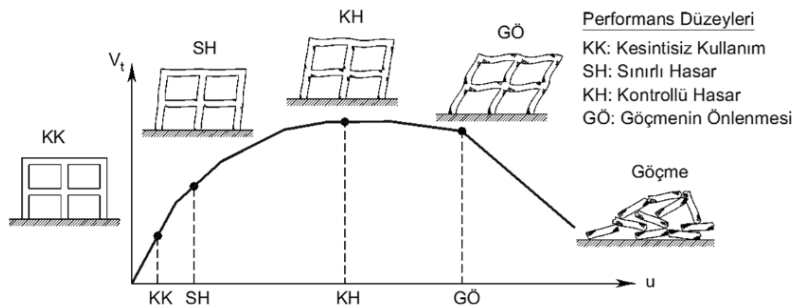
Köprü yapısal performans düzeyleri ilgili rapordaki Bölüm 3.6’ya göre, özel ve standart köprüler için geçerli olmak üzere dört adet olarak tanımlanmıştır.

- Kesintisiz Kullanım (KK) Performans Düzeyi:** Köprü ana taşıyıcı sistemini oluşturan yapı elemanlarında yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı duruma karşı gelmektedir.
- Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi:** Köprü ana taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı ve kolayca onarılabilecek hasar düzeyine karşı gelmektedir.
- Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi:** Köprü ana taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan kontrollü hasar düzeyine karşı gelmektedir.
- Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi:** Köprü ana taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi duruma karşı gelmektedir.

Köprü önem sınıfına göre ve deprem davranış kategorisine göre performans hedefi, ilgili rapordaki Bölüm 3.6’ya göre Tablo 5’te verilmiştir. Şekil 11’de yapı için performans düzeyleri görülmektedir. Tablo 5’e göre, SAP 2000 programında modellenen köprünün 3. önem sınıfına sahip olmasından dolayı kesintisiz kullanım (KK) performans seviyesinde kalınması hedeflenmektedir.

**Tablo 5.** Köprü Performans Hedefi

Köprü Performans Hedefi			
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	Köprü Önem Sınıfı		
	KÖS = 1	KÖS = 2	KÖS = 3
DD – 3	—	KK	KK
DD – 2a	KK	—	—
DD – 1	KH	GÖ	—



**Şekil 11.** Yapı performans düzeyleri

Köprü ve viyadüklerin nonlineer davranışlarının modellenmesinde, geleneksel plastik mafsallık hipotezinden yararlanılması öngörülmektedir. Bu hipotez plastik şekil değiştirmelerin yapı elemanlarının belirli bölgelerinde “yığılı (konsantre)” biçimde oluşacağı ve bu bölge boyunca sabit olarak alınabileceği varsayımına dayanır. Plastik mafsallık olarak adlandırılan noktasal eleman ise bu bölgenin tam ortasına yerleştirilir. Plastik mafsallık hipotezi, gerek binalarda, gerekse köprü ve viyadüklerde deprem etkisi altında yapılan nonlineer analiz ile şekil değiştirmeye göre performans değerlendirmesi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Aydınoglu 2005).

Köprü kolonlarına plastik mafsallık atanması için ayaklara etkiyen eksenel kuvvet değerleri göz önünde bulundurularak moment-eğrilik bağıntılarını elde etmek için SAP 2000 programında “Section Designer” arayüzü kullanılmıştır. Ayağın çekirdek bölgesinde sargılı beton kullanılırken çekirdek dışında kalan bölgede ise sargısız beton modeli kullanılmıştır. Ayaklarda eksenel kuvvet değerleri dikkate alınarak kesitlerin moment-eğrilik bağıntıları saptanmış olup akma yüzeyleri ise 0° ve 90° açı değerleri için elde edilmiştir. Ayaklarda akma yüzeyinin belirlenmesi için eksenel kuvvet değerine göre değişen moment değerlerini gösteren P-M2-M3 (Normal kuvvet-enine moment-boyuna moment) diyagramı düzenlenmiştir. Belirli açılar için düzenlenen P-M2-M3 etkileşim diyagramı SAP 2000 programına plastik mafsallık atamasını gerçekleştirmek için tanımlanmıştır P-M2-M3 diyagramı orta ayak kesitleri için 0° ve 90° açı için oluşturulmuştur. M2 ve M3 moment değerleri ilk ve son noktalarda sıfır olacak şekilde düzenlenmiştir. Belirtilen etkileşim diyagramının tüm M2 moment değerleri sıfırdan büyük ve tüm M3 moment değerleri sıfır olmalıdır. Tüm bu şartları 90° altında düzenlenen P-M2-M3 diyagramının sağlanması sebebiyle bu değerler SAP2000 programına aktarılmıştır (Çavdar,2016).

Karayolu ve Demiryolu Köprü ve Viyadükleri Raporu Bölüm 5.6’ya göçmenin önlenmesi (GÖ) performans düzeyine göre ve yığılı plastik davranış modeline göre yapılan değerlendirmede performans hedeflerine göre izin verilen dönme sınırları Denklem 25 ve Denklem 26’da tanımlanmıştır.

$$\theta_p^{GÖ} = (0,67 \times \Phi_u - \Phi_y) \times L_p \quad (25)$$

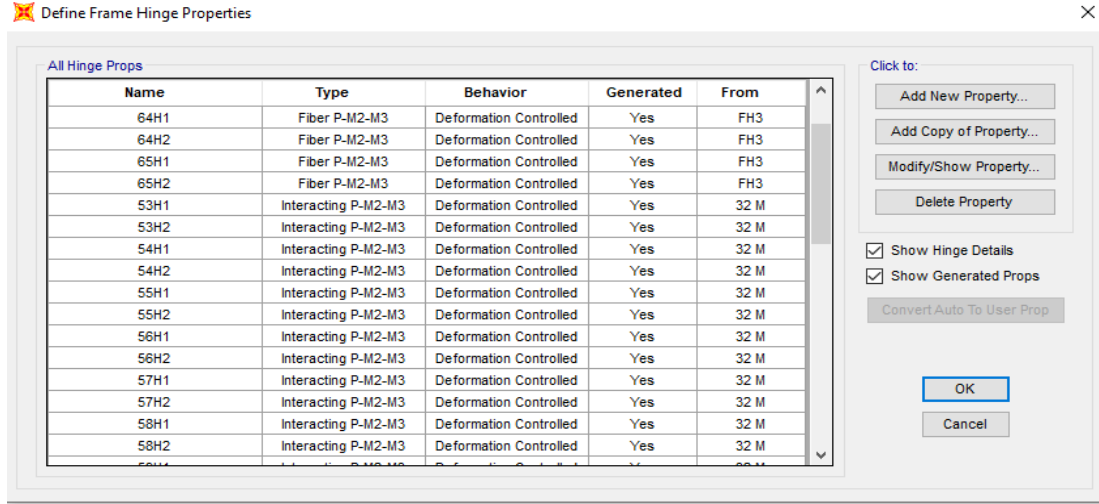
Kontrollü hasar (KH) performans düzeyine göre yapılan değerlendirmede, toplam dönme sınırı Denklem 26’da tanımlanmıştır.

$$\theta_p^{KH} = (0,50 \times \Phi_u - \Phi_y) \times L_p \quad (26)$$

Burada,  $\theta_p^{GÖ}$  göçmenin önlenmesi performans seviyesi için verilen plastik dönme sınırını,  $\theta_p^{KH}$  kontrollü hasar performans seviyesi için verilen plastik dönme sınırını,  $\Phi_u$  kesitin göçme öncesi toplam eğriliğini,  $\Phi_y$  kesitin akma eğriliğini,  $L_p$  plastik mafsallık boyunu göstermektedir.

Denklem 20 ve 21 kullanılarak köprü ayakları için plastik dönme sınırları belirlenmiş olup doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçlarından elde edilen ayaklara atanan plastik mafsallık sonuçları ile değerlendirilmiştir. Ayak modeli tasarımında kolonlar eğik veya birleşik eğilme etkisi altında çalışan betonarme çubuk yapı elemanları ile simüle edilmiştir. Bu nedenle eğilme momenti ve normal kuvvet

arasındaki etkileşimin yapılabilmesi için ayak kolonlarında P-M2-M3 plastik mafsal tipi, kenar ayak perdelerinde ise elevasyon duvarı kesitlerinin çok uzun olması sebebiyle bu kesitlere fiber P-M2-M3 mafsal tipi atanmıştır (Şekil 12). Buna göre köprü ayaklarında oluşan plastik dönme ile maksimum plastik dönmenin karşılaştırılmasına göre belirlenen performans düzeyi Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 12. Plastik mafsal tanımlaması

Tablo 6. Plastik Dönme Limitleri ve Performans Seviyesi

Ayak No	Ayak Yüksekliği (m)	Plastik Dönme $\theta_p$	$\Phi_u$ (1/m)	$\Phi_y$ (1/m)	$L_p$ (m)	$\theta_p^{KH}$ (radyan)	$\theta_p^{GÖ}$ (radyan)	Performans Seviyesi
P1	6,6	0,00	0,00765	0,0009	0,676	0,0020	0,0028	KK
P2	5,6	0,00	0,00765	0,0009	0,596	0,0017	0,0025	KK

Tablo 6’da görüldüğü üzere yapı kesintisiz kullanım (KK) performansını sergilemektedir.

## 2.4. Doğrusal Olmayan Yapım Aşamalı Analiz

### 2.4.1. Zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması

Zamana bağlı malzeme deformasyonlarının karayolu köprüsünün yapısal davranışına etkisini belirlemek için beton malzeme için basınç dayanımı, yaş, sünme ve büzülme etkileri ve çelik malzeme için çeliğin gevşemesi yapım aşamaları ile sonlu elemanlar modelinde ele alınmıştır. Çünkü beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin bu özellikleri iklim koşullarına bağlı olarak sürekli değişebilmektedir. SAP2000 olarak, betonun zamana bağlı özellikleri CEB-FIP 90 formülasyonuna göre tanımlanır. Tablo 7, malzeme deformasyonlarını ele almak için seçilmesi gereken CEB-FIP 90 tasarım kodunun analiz parametrelerini vermektedir. Tablo 8, köprünün analizinde sonlu elemanlar modelinde dikkate alınması gereken malzeme parametrelerini vermektedir.

**Tablo 7.** CEB-FIP 90 Tasarım Kodunun Analiz Parametreleri (CEB-FIP, 1990).

SAP2000'de CEB-FIP Parametreleri		
Çimento Tipi Katsayısı	0,2	Hızlı Sertleşen Yüksek Mukavemetli Çimento
	0,25	Normal ve Hızlı Sertleşen Çimento
	0,38	Yavaş Sertleşen Çimento
Bağıl Nem (%)	CEB-FIP 90'daki denklemler $40 \leq BN < 99$ için geçerlidir.	
Büzülme Katsayısı, $B_{sc}$	8	Hızlı Sertleşen Yüksek Mukavemetli Çimento
	5	Normal ve Hızlı Sertleşen Çimento
	4	Yavaş Sertleşen Çimento
Büzülme Başlangıç Zamanı (gün)	$t_s$	Çimento tipi nedeniyle ayar gerektirmemektedir.

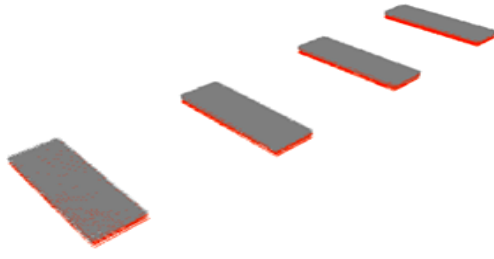
**Tablo 8.** Köprü Analizlerinde Dikkate Alınması Gereken Malzeme Parametreleri (CEB-FIP, 1990).

PARAMETRELER		TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI		
		Tabliye	Ayaklar	Öngermeli Çelik
Malzeme Özelliği		Beton	Beton	Tendon
Zamana Bağlı Özellikler	Elastisite Modülü	+	+	-
	Sünme	+	+	-
	Büzülme	+	+	-
	Sünme Etkileri	Tam	Tam	-
	Çimento Tipi Katsayısı	0,25	0,25	-
	Bağıl Nem (%)	60	60	-
	Kavramsal Boyut (m)	0,1	0,1	-
	Büzülme Katsayısı, $B_{sc}$	5	5	-
	Büzülme Başlangıç Zamanı	0	0	-
	Çeliğin Gevşemesi	-	-	+
	Gevşeme Analiz Tipi	-	-	Tam
	Parametre Sınıfı	-	-	1

#### 2.4.2. Yapım aşamalarının dikkate alınması

İnşaat aşamalarının Çirmiş Köprüsü'nün yapısal davranışına etkisini belirlemek için toplam inşaat süresi 101 gün olarak dikkate alınmıştır. Köprü'nün sonlu elemanlar modeli 69 adımda oluşturulmuştur. Modelleme sırasında toplam adım sayısı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 200 ve 50 olarak dikkate alınmıştır. Karayolu köprüsünün yapım aşamalarının adım adım sonlu eleman modelleri Şekil 13'te verilmiştir.

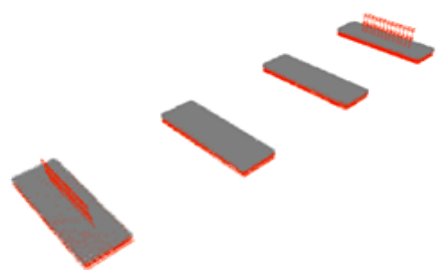




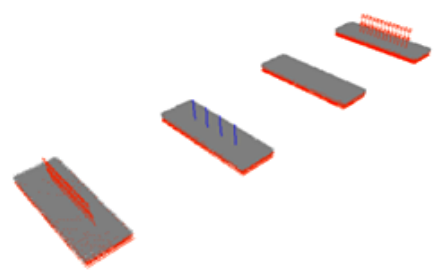
Adım 1: Temellerin inşası (28 gün)



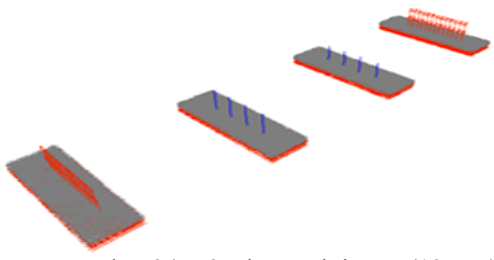
Adım 13: A1 Aksı kenar ayak inşası (7 gün)



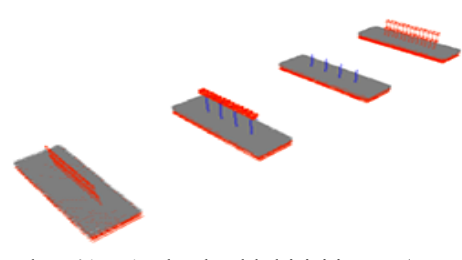
Adım 20: A2 Aksı kenar ayak inşası (7 gün)



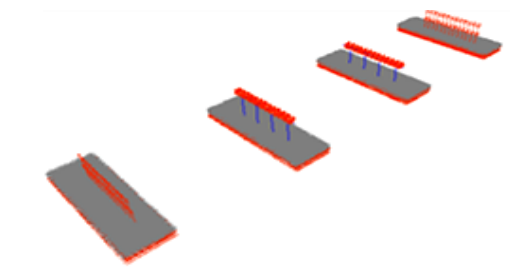
Adım 27: P1 Aksı ayak inşası (12 gün)



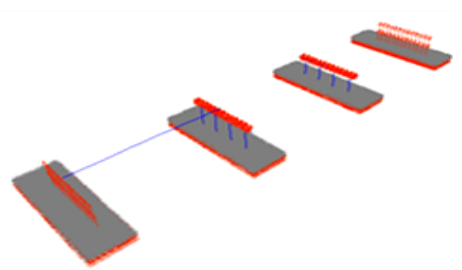
Adım 34: P2 Aksı ayak inşası (12 gün)



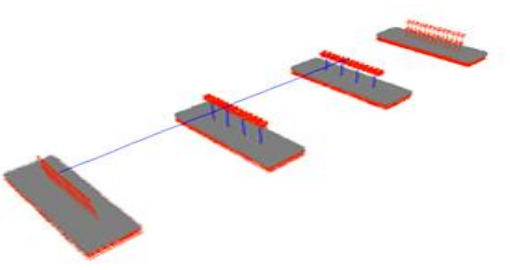
Adım 41: P1 Aksı başlık kirişi inşası (7 gün)



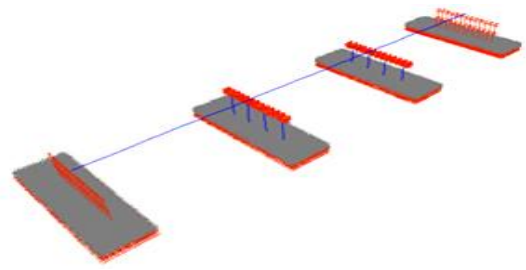
Adım 48: P2 Aksı başlık kirişi inşası (7 gün)



Adım 55: 1. Açıklığın üstyapı inşası (7 gün)



Adım 62: 2. Açıklığın üstyapı inşası (7 gün)



Adım 69: 3. Açıklığın üstyapı inşası (7 gün)

Şekil 13. Yapım Aşamalarına Dair Adım Adım Sonlu Eleman Modeli

### 2.4.3. Yapım aşamalı analizlerde dikkate alınan yük durumları

SAP2000 sonlu eleman programında gerçekleştirilen analizlerde analiz tipi olarak "Doğrusal Olmayan Kademeli Yapı", geometrik doğrusal olmayan parametreler için ise "P-Delta Etkisi" dikkate alınmıştır. P- Delta etkisi, doğrusal olmayan geometrik etki adı verilen ikincil bir etkidir. Yapılar büyük depremlere maruz kaldığında büyük yer değiştirmelerin ve deformasyonların meydana geleceği kabul edilmektedir. Bu durum, yanal olarak yer değiştirmiş bir yapıya etki eden düşey yüklerin ikinci dereceden etkisini, yani P-Delta etkisini çoğu durumda baskın hale getirmektedir (Şancı, 2021).

Köprü üst yapısına etki eden yükler sabit yükler ve hareketli yükler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Üst yapı tasarım analizinde, yapı sistemini oluşturan elemanların kendi ağırlıkları sabit yükler sınıfında, bina üzerinden geçmesi kabul edilen araç yükleri ve yaya yükleri ise hareketli yükler sınıfında değerlendirilmiştir. Çirmiş Köprüsü'nün yapım aşamaları dikkate alınarak yapılan analizlerde aşağıdaki yükleme durumları dikkate alınmıştır.

#### Sabit Yük:

Yapı sistemini oluşturan elemanların kendi ağırlıklarıdır. Betonun birim hacim ağırlığı  $25 \text{ kN/m}^3$  olarak kabul edilir. Kiriş ve tabliyelerin gerçek ağırlıkları sırasıyla  $13,844 \text{ kN/m}$  ve  $8,654 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır.

#### Ek Sabit Yük:

Asfalt, bordürler ve yaya korkulukları gibi ek bir ağırlıktır. Bu ağırlıklardan sırasıyla  $1,274 \text{ kN/m}$ ,  $2,885 \text{ kN/m}$  ve  $0,231 \text{ kN/m}$  yük meydana geldi.

#### Hareketli Yük:

Bu yükler H30-S24 standart kamyon yükü, yaya yükü ve frenleme kuvvetidir.

H30-S24 yükleme, köprüden geçen standart kamyonlardan veya standart bir kamyon trenine eşdeğer şerit yüklerinden oluşur. H30-S24 yük sınıfı sembollerinden H, iki dingilli bir kamyonu ve S, ona bağlı bir yarı römorku ifade eder. H harfinden sonra gelen 30 rakamı, kamyonun iki dingilinden aktarılan  $W = 300 \text{ kN}$  ağırlığını, S harfinden sonra gelen 24 rakamı ise yarı römorkun tek dingilinden aktarılan ağırlığı yani  $240 \text{ kN}$  ağırlığını gösterir. Bu yük hesaplanırken, AASHTO 3.12'ye göre hareketli yüklerin azaltılması, AASHTO 3.23.4.3'e göre her bir uzunlamasına kirişe etki eden hareketli yük miktarı ve AASHTO 3.8.2.1'e göre titreşim faktörü dikkate alınmıştır. AASHTO yönetmeliğine göre ön tekerlek yükü  $56,22 \text{ kN}$ , arka tekerlek yükü ise  $224,90 \text{ kN}$  olarak hesaplanmıştır.

AASHTO 3.14.1.1'e göre yaya yükü, yaya hareketinin meydana gelebileceği alanlara  $3 \text{ kN/m}^2$  homojen dağılımlı bir şekilde hareketli yüklerle birlikte etkilenmelidir. Yaya yükü kompozit bölümü etkilediği için tüm kirişler tarafından eşit olarak taşınacağı kabul edilir. Bu durumda 1 kompozit kirişe etki eden yaya yükü  $1,385 \text{ kN/m}$ 'dir.

Fren yükü, AASHTO 3.9'da, şerit yüklerin  $1,80 \text{ m}$  ( $6 \text{ fit}$ ) yükseklikten köprüye yatay olarak yüklenmesiyle elde edilen hareketli yükün %5'inin, dinamik etki katsayısı olmaksızın uygulanması olarak belirtilmiştir. Bu yük  $4,59 \text{ kN/m}$  olarak hesaplanmıştır.

#### Sıcaklık Etkisi:

Analizlerde sıcaklık etkileri sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve deformasyonlar dikkate alınmalıdır. Isı değişiminden kaynaklanan etkilerin hesaplanmasında TCK Karayolu Köprüleri Teknik Şartnamesine göre  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklık değişimi alınmıştır. Isı genleşme katsayısı AASHTO 8.5.3'te  $0,0000108/^{\circ}\text{C}$  olarak belirtilmiştir. Sıcaklık etkisinden kaynaklanan yük, ısı genleşme katsayısı dikkate alınarak  $38,83\text{ kN/mesnet}$  olarak hesaplanmıştır.

#### Öngerme Çelik Kuvvetleri:

Öngerme çeliğinin oluşturduğu yüküdür. Öngerme işlemi, yüksek mukavemetli çeliğin belirli bir kuvvetle çekilip kilitlenmesi ve bu kuvvetin betona aktarılması ile elde edilir. Beton dökülmeden önce çelik gerilirse buna ön çekme (ön gerilme), beton dökülüp mukavemet kazandıktan sonra yapılırsa çekme sonrası denir. AASHTO LFRD'ye göre, öngerme kuvvetinin en büyük değeri, nihai mukavemetinin %75'i olarak kabul edilir. Bu kuvvet, kestirimci uygulama hızı, karakteristik çelik kopma mukavemeti ve kablo kesit alanının çarpılmasıyla  $195,51\text{ kN}$  olarak elde edilmiştir. Her bir açıklık için ayrı ayrı oluşturulan öngerme çelik kuvvetleri, her bir kirişte 32 halata uygulanmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

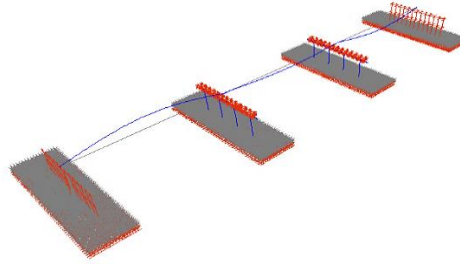
Çırmış köprüsündeki kesit özellikleri göz önünde bulundurularak kirişin destek ekseninden açıklığın ortasına kadar olan mesafede kesit etkileri elde edilerek öngerme kablolarının sayısı belirlenmiştir (TS3233, 1979; AASHTO, 2015). Kiriş yükleme aşamaları için kesitlerde oluşan gerilmelerin tahkiki yapılmıştır. Daha sonra hem ön üretimli kiriş için hem de kompozit kiriş için eğilme taşıma kapasitesi, öngerme donatısı oranı, kesme ve sehim kontrolleri yapılarak köprü üstyapısının güvenilirliği tespit edilmiştir.

#### 3.1. Sonlu Eleman Modal Analizi

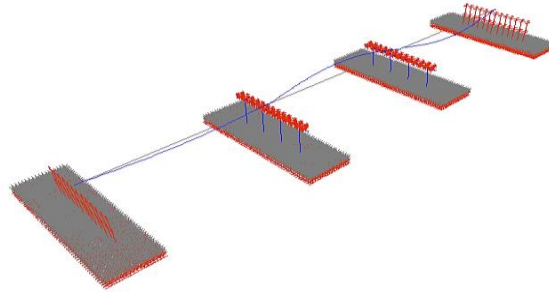
Tasarım yapılırken 100 mod dikkate alınmıştır. Burada sadece ilk üç mod şekli verilmiştir. Modal analiz sonucu elde edilen ilk 12 modun frekans ve periyot değerleri Tablo 9'da, ilk 3 mod Şekil 14-16'da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Sonlu Eleman Modal Analizi

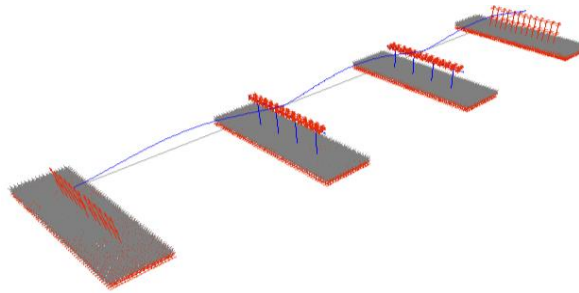
Mod Sırası	Periyot (s)	Frekans (Hz)	Modal Kütle Katılım Oranı
Mod 1	1,001	0,992	0,75125
Mod 2	0,973	1,028	0,05756
Mod 3	0,945	1,058	0,01742
Mod 4	0,345	2,894	0,00283
Mod 5	0,344	2,905	0,00211
Mod 6	0,335	2,983	0,00119
Mod 7	0,128	7,83	0,03333
Mod 8	0,105	9,522	0,02713
Mod 9	0,09	11,089	0,00037
Mod 10	0,089	11,178	0,00036
Mod 11	0,086	11,508	0,00585
Mod 12	0,043	23,191	0,00013



**Şekil 14.** 1. Mod Şekli



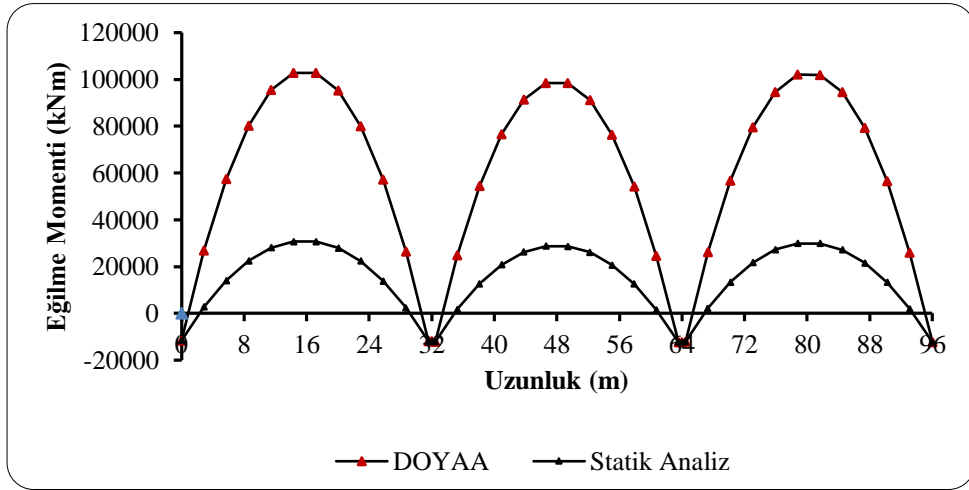
**Şekil 15.** 2. Mod Şekli



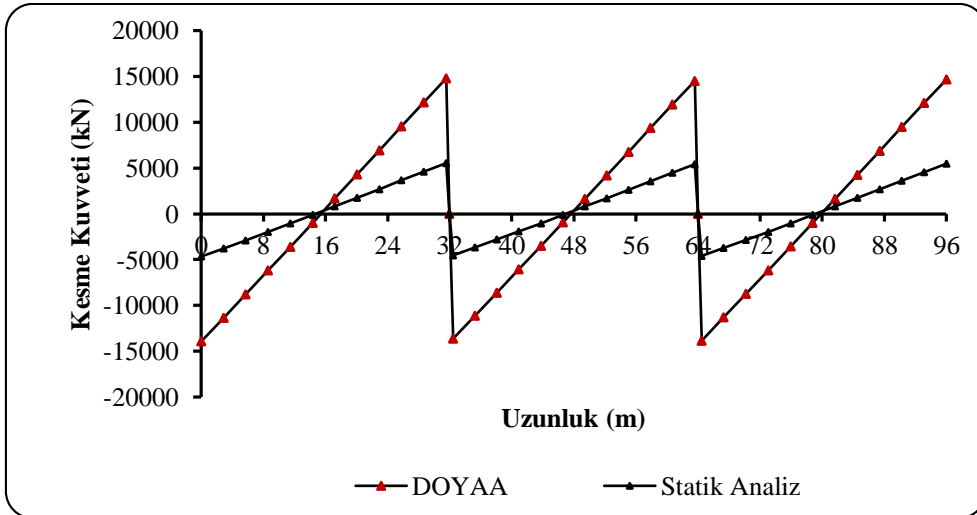
**Şekil 16.** 3. Mod Şekli

### 3.2. Tabliye Davranışı

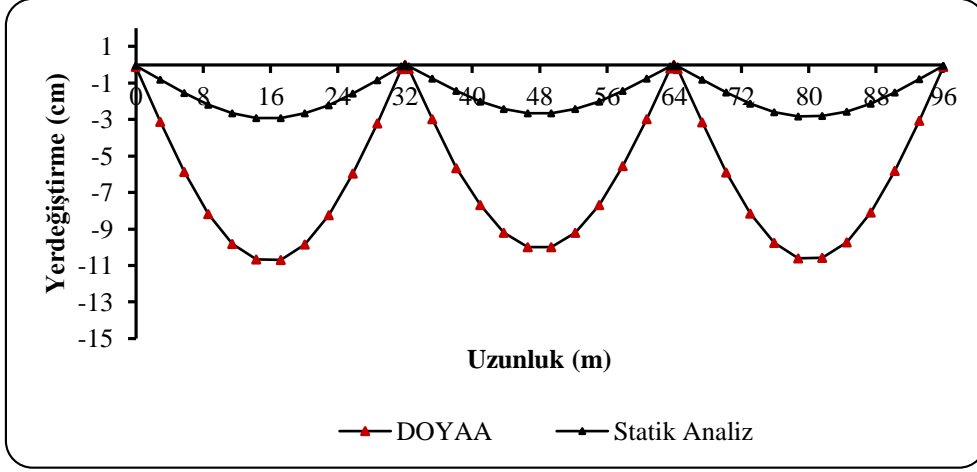
Köprü modelinin “doğrusal statik” ve “doğrusal olmayan yapım aşamalı analizleri (DOYAA)” neticesinde elde edilen eğilme momenti, kesme kuvveti ve düşey yer değiştirme değerlerinin tabliye uzunluğu boyunca karşılaştırmalı değişimi sırasıyla Şekil 17 – 19’da gösterilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere düşey yer değiştirmeler her bir açıklık ortasında artmaktadır. Eğilme momenti değerleri her açıklık ortasında maksimum değerlere çıkıp köprü ayakları üzerinde minimum değerlere inmektedir (Adanur ve ark. 2012). Kesme kuvveti değerleri ise ayaklar üzerinde maksimum değere ulaşip köprü açıklık ortasında minimum değere düşmektedir.



Şekil 17. Statik ve DOYAA Sonucunda Eğilme Momentinin Karşılaştırması



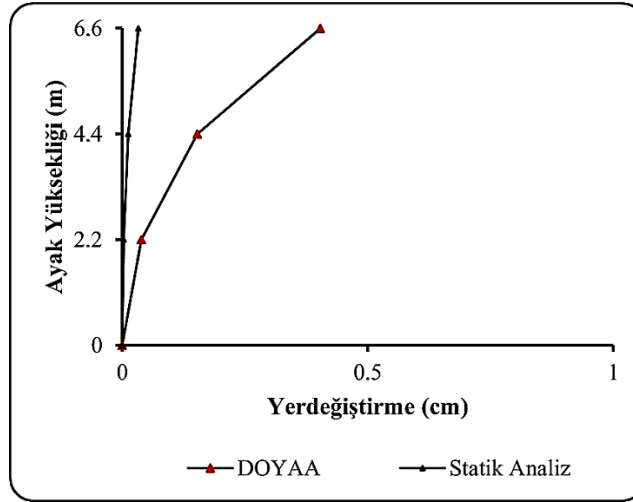
Şekil 18. Statik ve DOYAA Sonucunda Kesme Kuvvetinin Karşılaştırılması



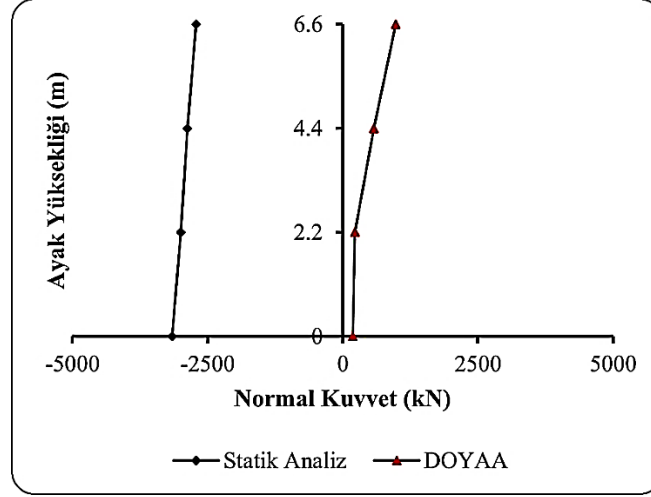
Şekil 19. Statik ve DOYAA Sonucunda Düşey YerDeğiştirmenin Karşılaştırılması

### 3.3. Ayak Davranışı

Köprü modelinin statik analiz ve doğrusal olmayan yapım aşamalı analizleri (DOYAA) neticesinde elde edilen yatay yer değiştirme ve normal kuvvet değerlerinin ayak yüksekliğince karşılaştırmalı değişimi sırasıyla Şekil 20 ve 21'de gösterilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere ayak yüksekliği boyunca yatay yer değiştirme değerleri artmakta olup maksimum yer değiştirme ayak uç noktasında elde edilmiştir. Statik analizde normal kuvvet değerleri grafiğin solunda negatif değerlerde kalırken doğrusal olmayan yapım aşamalı analizde grafiğin sağında pozitif değerler almaktadır.



Şekil 20. Statik ve DOYAA Sonucunda Yatay YerDeğiştirmenin Karşılaştırılması



Şekil 21. Statik ve DOYAA Sonucunda Normal Kuvvetin Karşılaştırılması

Statik analiz ve doğrusal olmayan yapım aşamalı analiz sonuçlarından elde edilen maksimum değerlerin karşılaştırması Tablo 10'da verilmiştir. Literatüre benzer şekilde doğrusal olmayan yapım aşamalı analizde daha yüksek değerler elde edilmiştir (Altunışık ve ark.,2010; Günaydın ve ark. 2014)

Tablo 10. Statik Analiz ve DOYAA Sonucu Maksimum Değerlerin Karşılaştırılması

	Statik Analiz	DOYAA
Maksimum Değer		
Tabliye Uzunluğu Boyunca:		
Eğilme Momenti	30677,42 kN	102830,03 kN
Kesme Kuvveti	5524,47 kN	14753,73 kN
Düşey Yer Değiştirme	2,91 cm	10,69 cm
Ayak Yüksekliği Boyunca:		
Yatay Yer Değiştirme	0,03 cm	0,40 cm
Normal Kuvvet	-2713,66 kN	980,09 kN

#### 4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında; yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının Çirilmiş Köprüsü'nün yapısal davranışına etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla SAP2000 sonlu elemanlar paket programında tasarlanan köprü modelinde "doğrusal statik" ve "doğrusal olmayan yapım aşaması analizi" olmak üzere iki farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışmaya konu olan karayolu köprüsünün üstyapısı öngermeli kirişler ve tabliyeden oluşmaktadır. Ülkemizde öngermeli kirişlerin hesaplanmasında ve tasarım esaslarında uluslararası kabul görmüş AASHTO köprü tasarım yönetmeliği, TCK Yol Köprüleri Teknik Şartnamesi ve TS 3233 (1979) yönetmeliği kullanılmaktadır. SAP2000'de basit kiriş tasarımı üzerinde gerçekleştirilen yük analizleri sonucunda, ön üretimli ve kompozit kirişlerin kesit özellikleri göz önünde bulundurularak, kirişin destek ekseninden açıklığın ortasına kadar olan mesafede her bölge için moment etkileri ve kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak öngörme kablolarının sayısı belirlenerek öngörme kayıpları hesaplanmış, öngörme donatısının mantolaması üzerinde analizler yapılmıştır. Daha sonra kiriş yükleme

aşamalarına göre kesit gerilmelerinin tahkiki sağlanıp aynı zamanda hem ön üretimli hem de kompozit kiriş için eğilme taşıma kapasitesi kontrolü, öngerme donatısı oranı kontrolü, kesme hesapları kontrolü ve sehim kontrolleri gerçekleştirilerek modellenen köprü üstyapısının güvenilirliği belirlenmiştir.

AASHTO ve diğer yönetmelikler çerçevesinde üstyapı tasarım ilkeleri dikkate alınarak tasarlanan karayolu köprüsünün üç boyutlu sonlu elemanlar modelinde, öncelikle bu yönetmeliklerin belirttiği yükleme koşulları ile doğrusal statik analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, zamana bağlı malzeme deformasyonlarının köprünün yapısal davranışı üzerindeki etkisini belirlemek için doğrusal olmayan inşaat aşaması analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan yapım aşaması analizinde, beton malzeme için basınç dayanımı, yaş, sünme ve büzülme etkileri, çelik malzeme için ise çelik gevşeme ve P-Delta etkisi dikkate alınmıştır. Köprünün her iki analiz koşulu için elde edilen kesit etkileri ve yer değiştirme değerleri birbirleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tabliye uzunluğu ile köprü modelinde gerçekleştirilen iki analiz için elde edilen düşey yer değiştirmeler, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerinin değişimi incelendiğinde, eğilme momenti ve yer değiştirme değerleri köprü açıklığının ortasında artmış, ayaklarda ise minimum değerlere inmiştir. Kesme kuvveti değerleri ayaklarda maksimum değere yükselmiş ve köprü açıklığının ortasına doğru minimum değere düşmüştür. Ayak yüksekliğindeki yatay yer değiştirme ve normal kuvvet değerleri göz önüne alındığında, ayak yüksekliği arttıkça yer değiştirme miktarı ve normal kuvvet değerleri artar.

"Doğrusal statik analiz" ve "doğrusal olmayan yapım aşaması analizi" sonuçlarından elde edilen maksimum değerler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, güverte uzunluğu boyunca eğilme momenti değeri 72152,61 kN (% 235,20), kesme kuvveti değeri 9229,26 kN (% 167,06) ve düşey yer değiştirme değeri 7,78 cm (% 267,35) artmıştır. Ayak yüksekliği açısından yatay yer değiştirme değeri 0,37 cm (% 1233,33) ve normal kuvvet değeri 3693,75 kN (% 136,12) artmıştır. Bu nedenle köprünün tasarımında köprünün yapısal davranışının belirlenmesinde yapım aşamalarının ve zamana bağlı malzeme deformasyonlarının dikkate alınması gerekmektedir.

Yapılan performans analizi sonucunda Çirilmiş köprüsünün performans düzeyinin Kesintisiz Kullanım (KK) olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tür büyük açıklıklı köprüler uzun süren inşaat aşamaları sonucunda yapıldığından inşaat başlangıç aşamasında yapım aşamalarının hesaplarda dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Elde edilen sayısal ve şekil sonuçları incelendiğinde hiç ara verilmeden inşaat yapım aşaması dikkate alınmayan analizler sonucunda (doğrusal statik analiz) çok daha küçük kesit etkileri ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Bu çalışmada Özlem ÇAVDAR çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, bu süreçlerin yönetilmesi ve makalenin gelişmesinde fikri katkının sağlanması, Osman SARIGÜN makale



taslağının oluşturulması, modelleme, veri toplama, veri analizi ve yorumlama yönünden katkı sağlamıştır.

### **Kaynakça**

- AASHTO. Standard specifications for highway bridges. Washington: 2015.
- AASHTO LRFD Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington: 2017.
- Adanur S., Günaydin M., Altunışık AC., Sevim B. Construction stage analysis of Humber Suspension Bridge. *Applied Mathematical Modelling* 2012; 36(11): 5492-550.
- Aktaş E. Öngerilme kirişli bir köprü tasarımı ve performansının değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2010.
- Altunışık AC., Bayraktar A., Sevim B., Adanur S., Domaniç A. Construction stage analysis of Kömürhan Highway Bridge using time dependent material properties. *Structural Engineering and Mechanics* 2010; 36(2): 207-223.
- Aydınoglu MN. Mevcut veya güçlendirilen köprü ve viyadüklerinin deprem performanslarının nonlinear analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi raporu. İstanbul: TC Bayındırlık ve İşkan Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü; 2005.
- Belwal A., Thapliyal S., Jhinkwan VS. Construction stage analysis of continuous box girder bridge constructed via full staging and balance cantilever method. *Recent Advances in Structural Engineering and Construction Management* 2023; 12: 89-99.
- Comite Euro-International Du Beton. CEB-FIP, Model Code, London, 1990.
- Cruz P., Mari A., Roca P. Nonlinear time dependent analysis of segmentally constructed structures. *Journal of Structural Engineering* 1998; 124(7): 278–287.
- Çavdar Ö., Şener MA. Dilimsel dengeli konsol yöntemi ile tasarlanan bir köprünün yapım aşamaları dikkate alınarak yapısal davranışının incelenmesi. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering* 2022; 9(2): 469-491.
- Çavdar Ö., Bayraktar A. Nonlinear earthquake performance evaluation of a structure collapsed during the Van, Turkey, earthquake on October 23, 2011. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2016; 30 (4): 04015092.
- Çavdar Ö., Bayraktar A., Altunışık AC. Stochastic seismic analysis of Kömürhan highway bridge with varying material properties. *Civil Engineering and Environmental Systems* 2015; 32 (3): 193-205.
- Çavdar Ö., Bayraktar A., Adanur S., Başağa HB. Stochastic finite element analysis of long-span bridges with CFRP cables under earthquake ground motion. *Sadhana* 2010; 35, 341-354.
- Günaydin M., Adanur S., Altunışık AC., Sevim B., Türker E. Determination of structural behavior of Bosphorus suspension bridge considering construction stages and different soil conditions. *Steel and Composite Structures* 2014; 17(4): 405-429.

- Karakaplan A., Caner, A., Kuç Ö., Domaniç A., Lüleç A. Yapı çözümlemesinde yeni bir devir: Yapım aşaması. İMO Teknik Dergi 2009; 20(99): 4905-4917.
- KGM Yol köprüleri için teknik şartname. Ankara: Karayolları Genel Müdürlüğü 1973.
- Leite ACF., Silva FAN., Berenguer RA., de Oliveira RA. Numerical staged construction analysis of precast concrete bridge. Journal of Civil Engineering and Architecture 2016; 10: 447-451.
- Martins AMB., Simões LMC., Negrão JHJO. Cable stretching force optimization of concrete cable-stayed bridges including construction stages and time-dependent effects. Structural and Multidisciplinary Optimization 2015; 51: 757-772.
- Orgnoni A., Pinho R., Moratti M., Scattarreggia N., Calvi GM. Critical review and modelling of the construction sequence and loading history of the collapsed Morandi bridge. International Journal of Bridge Engineering (IJBE) 2022; 10(3): 37-62.
- PCI design handbook—precast and prestressed concrete. Chicago: 1985.
- SAP2000 Integrated finite element analysis and design of structures. California: Computers and structures inc; 2015.
- Şancı E. Yüksek yapı sistemlerinin performanslarında P-Delta etkisinin değerlendirilmesi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa, Türkiye, 2021.
- TS 3233 Öngerilmeli beton yapıların hesap ve yapım kuralları. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü; 1979.
- Traykov A., Boiadjeva R. Computer modelling of structures with account of the construction stages and the time dependent material properties. Gradjevinski Materijali i Konstrukcija 2015; 58(3): 29-35.
- Wang PH., Tang TY., Zheng HN. Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods. Computers & Structures 2004; 82(4-5): 329-346.
- Wang X., Wang H., Sun Y., Mao X., Tang S. Process-independent construction stage analysis of self-anchored suspension bridges. Automation in Construction 2020; 117: 103227.

## Alzheimer Hastalığı için Potansiyel Çok Hedefli Terapötikler Olarak Stilbenlerin Hesaplamalı Analizi

Seda ŞİRİN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-2636-725X>

\*Sorumlu yazar: [sdasirin@hotmail.com](mailto:sdasirin@hotmail.com)

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 08.04.2024

Kabul tarihi: 21.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Alzheimer hastalığı

FDA onaylı ilaçlar

Moleküler yerleştirme

Stilben

SWISS ADME

### ÖZ

Bu çalışmanın amacı, 13 stilben ve Alzheimer hastalığı (AH)'nın tedavisinde kullanılan 5 Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi onaylı ilacın ADME tahmini ve moleküler yerleştirme yöntemi ile karşılaştırılmasıdır. AH patolojisinde yer alan kolinerjik, amiloid, tau, oksidatif stres ve inflamasyon hipotezleri, moleküler yerleştirmede hedeflenmiştir. SwissADME, stilbenlerin (resveratrol, pterostilben, oksiresveratrol, piceatannol, pinosilvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polidatin) ve mulberroside A) ve Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi onaylı ilaçların (takrin, donepezil, rivastigmin, galantamin ve memantin) fizikokimyasal, lipofiliklik, suda çözünürlük, farmakokinetik, ilaca benzerlik ve tıbbi kimya özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. CBDOCK2, stilbenlerin ve Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi onaylı ilaçların hedef proteinlere (AChE, BuChE, APP, BACE, GSK-3 $\beta$ , CDK5, SOD, CAT, GPx, Cox-2, iNOS, IL-1 $\beta$  ve TNF- $\alpha$ ) bağlanma afinitesini belirlemek için kullanılmıştır. SwissADME sonuçları stilbenlerin AH tedavisinde doğal ürünler olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Moleküler yerleştirme sonuçları, mulberroside A'nın en iyi vına skorunu (kcal/mol) gösterdiğini ve ardından astringin, piceid (polidatin), isorhapontin, donepezil, oxyresveratrol, piceatannol, galantamin, resveratrol, isorhapontigenin, takrin, pinosilvin, pterostilben, rivastigmin ve memantin'in geldiği gösterilmiştir. Çalışmamızda AH tedavisinde stilbenler ve Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi onaylı ilaçlar hesaplamalı yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, AH patolojisinin çeşitli hipotezleri üzerindeki potansiyel terapötik etkilerini vurgulamıştır. Bu bulguların klinik uygulamalarda doğrulanması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

## Computational Analysis of Stilbenes as Potential Multi-Targeted Therapeutics for Alzheimer's Disease

### Research Article

#### Article History:

Received: 08.04.2024

Accepted: 21.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Alzheimer's disease

FDA-approved drugs

Molecular docking

Stilbene

SWISS ADME

### ABSTRACT

The aim of this study is to compare 13 stilbenes and 5 FDA-approved drugs used in the treatment of Alzheimer's disease (AD) by ADME prediction and molecular docking method. Cholinergic, amyloid, tau, oxidative stress and inflammation hypotheses involved in AD pathology were targeted in molecular docking. SwissADME has been used to determine the physicochemical, lipophilicity, water solubility, pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry properties of stilbenes (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine). CBDOCK2 has been used to determine the binding affinity stilbenes and FDA-approved drugs to target proteins (AChE, BuChE, APP,

BACE, GSK-3 $\beta$ , CDK5, SOD, CAT, GPx, Cox-2, iNOS, IL-1 $\beta$ , and TNF- $\alpha$ ). SwissADME results showed that stilbenes could be used as natural products in the treatment of AD. The molecular docking results indicated that mulberroside A showed the best vina score (kcal/mol) followed by astringin, piceid (polydatin), isorhapontin, donepezil, oxyresveratrol, piceatannol, galanthamine, resveratrol, isorhapontigenin, tacrine, pinosylvin, pterostilbene, rivastigmine, and memantine. Our study evaluated stilbenes and FDA-approved drugs for the treatment of AD using computational approaches. The results highlight its potential therapeutic effects on various hypotheses of AD pathology. More research is needed to validate these findings for clinical practice.

---

**To Cite:** Şirin S. Computational Analysis of Stilbenes as Potential Multi-Targeted Therapeutics for Alzheimer's Disease. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 145-166.

## 1. Introduction

Alzheimer's disease (AD) is a severe neurological disorder that results in dementia and is thought to be responsible for 60% to 70% of cases worldwide. Patients sixty to sixty-five years of age and older are affected by AD, a degenerative disorder. In this age range, it is the primary cause of death. Epidemiological projections suggest that by 2050, the number of people with AD globally may rise to 107 million in rising economies (Kamble et al., 2024).

The development of AD is thought to be influenced by several theories, including cholinergic, amyloid, tau, oxidative stress, and inflammatory ones (Shevelyova et al., 2024). The cholinergic theory states that increased acetylcholine esterase (AChE) breakdown of acetylcholine (ACh) into acetate and choline causes ACh levels to decrease in AD. Lower levels of ACh affect brain activity and encourage the aggregation of amyloid-beta (A $\beta$ ), which results in the formation of senile plaque (Vejandla et al., 2024). The amyloid theory postulates that the accumulation of A $\beta$ , (amyloid precursor protein (APP) which is processed by proteases to produce A $\beta$ ) sets off a series of processes that eventually result in neurodegeneration (Ganz and Ben-Hur, 2024; Wolfe, 2024). According to the Tau theory, AD is primarily caused by an accumulation of abnormal Tau protein in the brain (Liu et al., 2024; Nasb et al., 2024). Reactive oxygen species (ROS) cause damage to brain cells under oxidative stress, which leads to neurodegeneration and cognitive decline, according to the oxidative stress and inflammation theories. Both A $\beta$  and phosphorylated tau pathologies lead to enhanced ROS generation. ROS can cause an inflammatory response, whereas inflammation causes oxidative stress. Oxidative stress and inflammation can damage synapses and brain cells, contributing to A $\beta$  and tau neurotoxicity in AD (Perluigi et al., 2024).

Because AD is so complicated, FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) that interacts with a single receptor or enzyme is frequently insufficient for therapy (Yajing et al., 2024). Because there are so few viable therapy options for AD, researchers are looking into powerful pharmacological drugs as well as a wide range of other biological processes as ways to prevent it. As a result, dietary small molecules from natural sources were studied and shown to have potential therapeutic effects in AD. These compounds (e.g., flavonoid polyphenols, phenolic acids, stilbenes, and

lignans) have been widely documented to be anti-AD agents both *in vivo* and *in vitro*, with relatively modest side effects (Balakrishnan et al., 2024).

Polyphenols are categorized into four kinds based on their structural properties and number of phenolic rings: flavonoid polyphenols, phenolic acids, stilbenes, and lignans. Stilbenes are important phytoestrogens, referring to a family of polyphenolic compounds having a homogenous stilbene parent nucleus or its polymers (Cao et al., 2024). These compounds are made up of two benzene rings arranged C6-C2-C6. Many stilbenes are generated from trans-resveratrol or t-resveratrol, which is an essential precursor in their synthesis. T-resveratrol can be transformed into various stilbenes, including viniferins (by oxidation), pterostilbene (via methylation), and piceid (via glycosylation) (Aleynova et al., 2024). Stilbenes, due to their unique molecular structure, have been shown to exhibit a variety of pharmacological properties, including antioxidant, anti-inflammatory, and anti-degenerative disease effects (Socala et al., 2024; Yan et al., 2024).

The current study aims to evaluate the stilbenes (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A), compared to the FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine), to treat AD by targeting the cholinergic hypothesis (AChE and BuChE), the amyloid hypothesis (APP and BACE), the tau hypothesis (GSK-3 $\beta$  and CDK5), the hypotheses of oxidative stress (SOD, CAT, and GPx) and inflammation (Cox-2, iNOS, IL-1 $\beta$ , and TNF- $\alpha$ ) by computational approaches through, ADME (absorption, distribution, metabolism, and excretion) prediction and molecular docking.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Preparation of ligands, FDA-approved drugs, and proteins

Ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) for SwissADME online platform were prepared in SMILES string format (Table 1).

**Table 1.** Stilbenes and FDA-approved drugs list

Ligand Name	SMILES String
Resveratrol (1)	<chem>Oc2ccc(C=Cc1cc(O)cc(O)c1)cc2</chem>
Pterostilbene (2)	<chem>COc2cc(OC)cc(C=Cc1ccc(O)cc1)c2</chem>
Oxyresveratrol (3)	<chem>Oc2ccc(C=Cc1cc(O)cc(O)c1)c(O)c2</chem>
Piceatannol (4)	<chem>Oc2cc(O)cc(C=Cc1ccc(O)c(O)c1)c2</chem>
Pinosylvin (5)	<chem>Oc2cc(O)cc(C=Cc1ccccc1)c2</chem>
Isorhapontigenin (6)	<chem>COc2cc(C=Cc1cc(O)cc(O)c1)ccc2O</chem>
Isorhapontin (7)	<chem>COc3cc(C=Cc2cc(O)cc(OC1OC(CO)C(O)C(O)C1O)c2)ccc3O</chem>
Astringin (8)	<chem>OCC3OC(Oc2cc(O)cc(C=Cc1ccc(O)c(O)c1)c2)C(O)C(O)C3O</chem>
Piceid (polydatin) (9)	<chem>OCC3OC(Oc2cc(O)cc(C=Cc1ccc(O)cc1)c2)C(O)C(O)C3O</chem>
Mulberroside A (10)	<chem>OCC4OC(Oc3ccc(C=Cc2cc(O)cc(OC1OC(CO)C(O)C(O)C1O)c2)c(O)c3)C(O)C(O)C4O</chem>
Tacrine (11)	<chem>Nc2c1CCCCc1nc3ccccc23</chem>
Donepezil (12)	<chem>COc4cc3CC(CC1CCN(CC1)Cc2ccccc2)C(=O)c3cc4OC</chem>
Rivastigmine (13)	<chem>CCN(C)C(=O)Oc1cccc(c1)C(C)N(C)C</chem>
Galantamine (14)	<chem>COc2ccc3CN(C)CCC14C=CC(O)CC1Oc2c34</chem>
Memantine (15)	<chem>CC13CC2CC(C)(C1)CC(N)(C2)C3</chem>

Also, ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A), FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine), and proteins (AChE, BuChE, APP, BACE, GSK-3 $\beta$ , CDK5, SOD, CAT, GPx, Cox-2, iNOS, IL-1 $\beta$ , and TNF- $\alpha$ ) for cavity-detection guided blind docking (CB-DOCK) were prepared in mol2, mol, sdf, and pdb format.

### *2.2. SwissADME online platform*

The ADME prediction server used is SwissADME (<http://swissadme.ch/>) from the Swiss Institute of Bioinformatics. SwissADME has been used to determine the physicochemical properties (formula, molecular weight, num. heavy atoms, num. arom. heavy atoms, fraction Csp3, num. rotatable bonds, num. H-bond acceptors, num. H-bond donors, molar refractivity, and TPSA), lipophilicity (log Po/w (iLOGP, XLOGP3, WLOGP, MLOGP, and SILICOS-IT), and consensus log Po/w), water solubility (log S (ESOL), log S (Ali), log S (SILICOS-IT), solubility (mg/ml; mol/l), and class), pharmacokinetics (GI absorption, BBB permeant, P-gp substrate, CYP1A2, CYP2C19, CYP2C9, CYP2D6, CYP3A4 inhibitor, and Log Kp (skin permeation)), drug-likeness (lipinski, ghose, veber, egan, muegge, and bioavailability score), and medicinal chemistry (PAINS, brenk, leadlikeness, and synthetic accessibility) associated with small molecules (Daina et al., 2017).

### *2.3. CB-DOCK2 online platform*

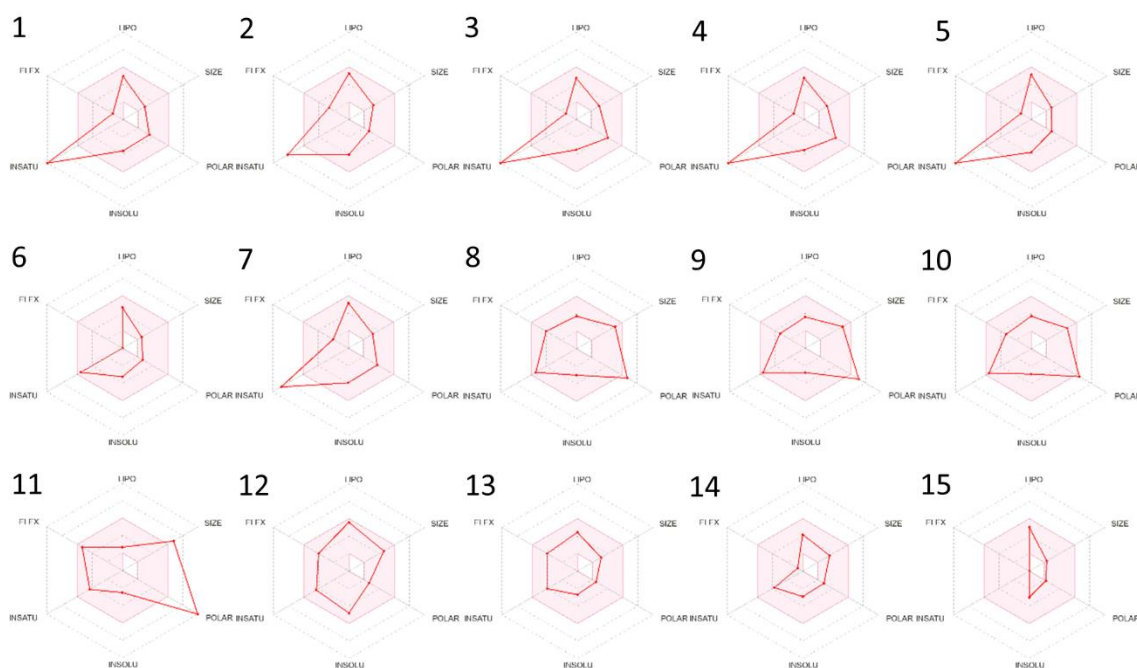
The protein-ligand blind docking server used is CB-DOCK2 (<https://cadd.labshare.cn/cb-dock2/index.php>) from the Cao Lab. CB-DOCK2 has been used to determine the protein-ligand blind docking, integrating cavity detection, docking and homologous template fitting (Liu et al., 2022).

## **3. Results and Discussion**

Comprehensive evaluation of stilbenes such as resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A, as well as FDA-approved drugs, including tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine, have shown their potential for AD. It constitutes an important step in the evaluation of treatments. Through computational methodologies involving ADME prediction and molecular docking, this study investigates multifaceted aspects of AD pathology, specifically targeting cholinergic, amyloid, and tau hypotheses, as well as oxidative stress and inflammation. In the following section, we will describe the findings of our research, shedding light on the effectiveness and potential mechanisms of action of these stilbenes and FDA-approved drugs in combating the progression of AD.

### 3.1. Bioavailability radar of the ligands and FDA-approved drugs

The bioavailability radar of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Figure 1. Bioavailability radar provides a first look at the drug-likeness of ligands and FDA-approved drugs. This radar is used to determine the potential of molecules as drugs by evaluating their pharmacokinetic and pharmacodynamic properties (Jia et al., 2020; Ranjith and Ravikumar, 2019). This methodology helps identify compounds with drug-like properties and examines critical properties of molecules such as lipophilicity, size, polarity, solubility, saturation, and flexibility (Ibrahim et al., 2020). These evaluation criteria are used to determine the bioavailability of compounds and their potential in the drug development process. Bioavailability radars of FDA-approved drugs with stilbenes are an important tool to determine the pharmacokinetic profiles and drug-likeness of these compounds (Poltronieri et al., 2020). These comprehensive evaluations contribute to the development of more effective treatment strategies. The pink area represents the optimal range for 6 properties (lipophilicity, size, polarity, solubility, saturation, and flexibility) (lipophilicity: XLOGP3 between -0.7 and +5.0, size: MW between 150 and 500 g/mol, polarity: TPSA between 20 and 130 Å<sup>2</sup>, solubility: log S not higher than 6, saturation: carbon fraction in sp<sup>3</sup> hybridization should not be less than 0.25, and flexibility: not more than 9 rotatable bonds) (Ibrahim et al., 2020). Ligands (isorhapontigenin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are within the optimal range for the 6 properties (lipophilicity, size, polarity, solubility, saturation, and flexibility).

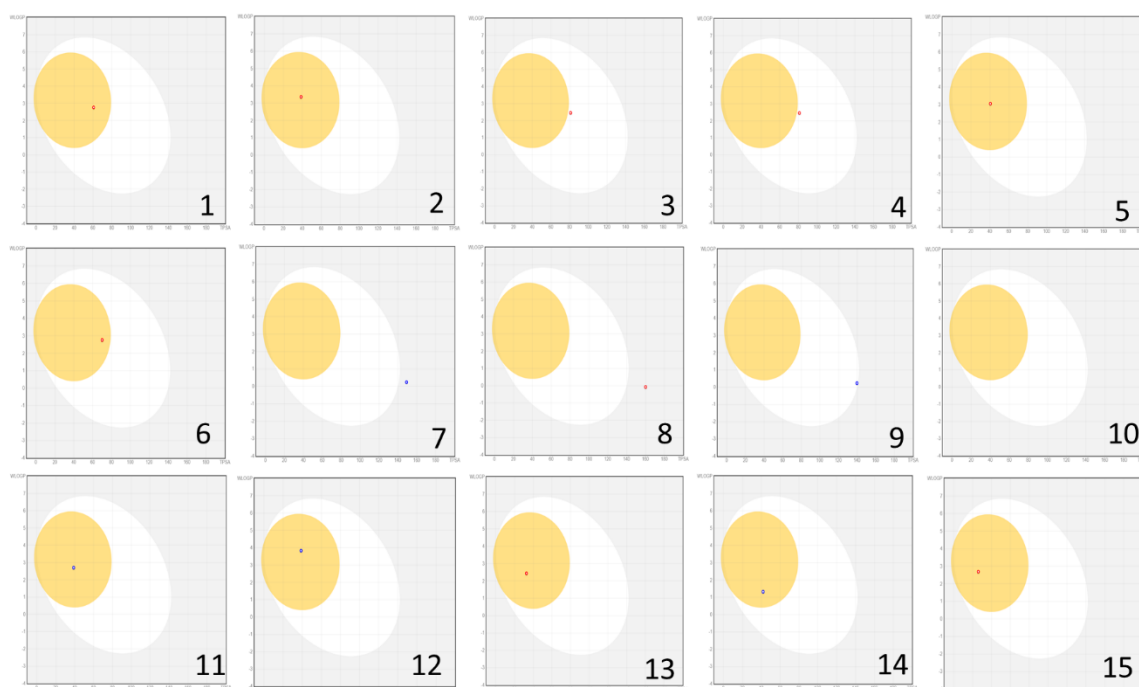


**Figure 1.** Bioavailability radar of ligands and FDA-approved drugs

### 3.2. BOILED-Egg plot of the ligands and FDA-approved drugs

The Brain Or IntestinaL EstimatedD permeation method (BOILED-Egg) plot of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Figure 2.

BOILED-Egg plot estimates passive (P-gp substrate-, red)/active (P-gp substrate+, blue) blood-brain barrier (BBB) permeation and human gastrointestinal absorption (HIA) of ligands and FDA-approved drugs (Ndombera et al., 2019). This prediction is based on 2 physicochemical properties: lipophilicity (WLOGP) and polarity (TPSA) (Daina and Zoete, 2016). The yolk contains the physicochemical domain for BBB permeation and the egg white contains the physicochemical domain for HIA (Rafeeq et al., 2024). The outer gray area represents ligands with properties that imply limited BBB permeation and low HIA (Ponzoni et al., 2017). This model is a critical tool for predicting the bioavailability and efficacy of drugs and evaluates the pharmacokinetic profiles of ligands and drugs. These evaluations contribute to the development of more effective treatment strategies. Ligands [resveratrol (passive), pterostilbene (passive), pinosylvin (passive), and isorhapontigenin (passive), and FDA-approved drugs [tacrine (active), donepezil (active), rivastigmine (passive), galantamine (active), and memantine (passive)] shows high BBB permeation and high HIA.



**Figure 2.** BOILED-Egg plot of ligands and FDA-approved drugs



### 3.3. Physicochemical properties of the ligands and FDA-approved drugs

The physicochemical properties of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Table 2. Physicochemical properties evaluated to understand the pharmacokinetic and pharmacodynamic properties of ligands provide important information about the bioavailability, efficacy and safety of the drug. While the molecular weight (MW) and the number of heavy atoms determine the size and complexity of the compound, the Csp3 fraction affects the three-dimensional structure and bioavailability of the molecule (Rafeeq et al., 2024). The number of rotatable bonds affects the flexibility of the molecule, and the number of hydrogen bond acceptors and donors affects its solubility in aqueous environments and interaction with biological targets (Daina and Zoete, 2016). The bioavailability radar also provides information on the molecular weight (size), fraction csp3 (saturation), number of rotatable bonds (flexibility), and TPSA (polarity) of ligands and FDA-approved drugs (size: MW between 150 and 500 g/mol, saturation: carbon fraction in sp3 hybridization should not be less than 0.25, flexibility: not more than 9 rotatable bonds, and polarity: TPSA between 20 and 130 Å<sup>2</sup>) (Kadri and Aouadi, 2020). All ligands and FDA-approved drugs, except mulberroside A, are within the optimum range for molecular weight (size). All ligands and FDA-approved drugs, except resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, and isorhapontigenin, are within the optimum range for fraction csp3 (saturation). All ligands and FDA-approved drugs are within the optimum range for number of rotatable bonds (flexibility). All ligands and FDA-approved drugs, except isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A, are within the optimum range for TPSA (polarity).

**Table 2.** Physicochemical properties of ligands and FDA-approved drugs

Physicochemical Properties										
No	Formula	Molecular weight	Num. heavy atoms	Num. arom. heavy atoms	Fraction Csp3	Num. rotatable bonds	Num. H-bond acceptors	Num. H-bond donors	Molar refractivity	TPSA
1	C14H12O3	228.24 g/mol	17	12	0.00	2	3	3	67.88	60.69 Å <sup>2</sup>
2	C16H16O3	256.30 g/mol	19	12	0.12	4	3	1	76.82	38.69 Å <sup>2</sup>
3	C14H12O4	244.24 g/mol	18	12	0.00	2	4	4	69.90	80.92 Å <sup>2</sup>
4	C14H12O4	244.24 g/mol	18	12	0.00	2	4	4	69.90	80.92 Å <sup>2</sup>
5	C14H12O2	212.24 g/mol	16	12	0.00	2	2	2	65.86	40.46 Å <sup>2</sup>
6	C15H14O4	258.27 g/mol	19	12	0.07	3	4	3	74.37	69.92 Å <sup>2</sup>
7	C21H24O9	420.41 g/mol	30	12	0.33	6	9	6	106.50	149.07 Å <sup>2</sup>
8	C20H22O9	406.38 g/mol	29	12	0.30	5	9	7	102.03	160.07 Å <sup>2</sup>
9	C20H22O8	390.38 g/mol	28	12	0.30	5	8	6	100.00	139.84 Å <sup>2</sup>
10	C26H32O14	568.52 g/mol	40	12	0.46	8	14	10	134.15	239.22 Å <sup>2</sup>
11	C13H14N2	198.26 g/mol	15	10	0.31	0	1	1	63.58	38.91 Å <sup>2</sup>
12	C24H29NO3	379.49 g/mol	28	12	0.46	6	4	0	115.31	38.77 Å <sup>2</sup>
13	C14H22N2O2	250.34 g/mol	18	6	0.50	6	3	0	73.12	32.78 Å <sup>2</sup>
14	C17H21NO3	287.35 g/mol	21	6	0.53	1	4	1	84.05	41.93 Å <sup>2</sup>
15	C12H21N	179.30 g/mol	13	0	1.00	0	1	1	55.68	26.02 Å <sup>2</sup>

### 3.4. Lipophilicity of the ligands and FDA-approved drugs

The lipophilicity of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Table 3.

The classic descriptor for lipophilicity is the partition coefficient (log Po/w) between N-octanol and water (Buchwald and Bodor, 1998). Log Po/w was calculated with five different prediction models (iLOGP, XLOGP3, WLOGP, MLOGP and SILICOS-IT) (Mishra and Dahima, 2019). The consensus log Po/w is the arithmetic mean of the values estimated by five different prediction models (Udugade et al., 2019). Log Po/w is ranged between -0.7 and +5.0 according to the bioavailability radar (Sert et al., 2021). This parameter is an important indicator that affects the bioavailability of molecules and their ability to reach target cells. All ligands and FDA-approved drugs, except mulberroside A, are within the optimum range.

**Table 3.** Lipophilicity of ligands and FDA-approved drugs

Lipophilicity						
No	Log Po/w (iLOGP)	Log Po/w (XLOGP3)	Log Po/w (WLOGP)	Log Po/w (MLOGP)	Log Po/w (SILICOS-IT)	Consensus Log Po/w
1	1.71	3.13	2.76	2.26	2.57	2.48
2	3.02	3.78	3.36	2.76	3.61	3.31
3	1.44	2.77	2.46	1.67	2.08	2.08
4	1.61	2.86	2.46	1.67	2.08	2.14
5	2.05	3.48	3.05	2.87	3.07	2.90
6	2.27	3.59	2.76	1.93	2.60	2.63
7	2.25	1.06	0.24	-0.65	0.55	0.69
8	1.27	0.73	-0.07	-0.87	0.00	0.21
9	1.75	1.03	0.23	-0.36	0.47	0.62
10	1.00	-0.84	-2.59	-2.97	-2.08	-1.50
11	2.09	2.71	2.70	2.33	3.12	2.59
12	3.92	4.28	3.83	3.06	4.91	4.00
13	3.21	2.29	2.44	2.34	1.46	2.34
14	2.64	1.84	1.32	1.74	2.03	1.91
15	2.51	3.28	2.69	3.02	2.76	2.85

### 3.5. Water solubility of the ligands and FDA-approved drugs

The water solubility of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Table 4.

Water solubility (Log S) was calculated with three different prediction models (ESOL, Ali, and SILICOS-IT) (Ciorsac et al., 2021). These prediction models play a critical role in evaluating the aqueous solubility of compounds and provide important information in drug discovery and development processes. ESOL, Ali and SILICOS-IT models are used to optimize the bioavailability and efficacy of drugs by determining the solubility profiles of compounds (Boobier et al., 2020). These models provide important tools for understanding and improving the pharmacokinetic and pharmacodynamic properties of drugs. Log S is ranged between insoluble < -10 < poorly < -6 < moderately < -4 < soluble < -2 very soluble < 0 highly (Yağlıoğlu et al., 2022; Henning et al., 2023). All ligands and FDA-approved drugs are within the optimum range for soluble, moderately soluble, and poorly soluble classes.

**Table 4.** Water solubility of ligands and FDA-approved drugs

Water solubility									
No	Log S (ESOL)	Solubility (mg/ml;mol/l)	Class	Log S (Ali)	Solubility (mg/ml;mol/l)	Class	Log S (SILICOS-IT)	Solubility (mg/ml;mol/l)	Class
1	3.62	5.51e-02; 2.41e-04	Soluble	-4.07	1.93e-02; 8.44e-05	Moderately soluble	-3.29	1.18e-01; 5.16e-04	Soluble
2	-4.01	2.48e-02; 9.69e-05	Moderately soluble	-4.29	1.33e-02; 5.17e-05	Moderately soluble	-4.69	5.24e-03; 2.05e-05	Moderately soluble
3	-3.46	8.45e-02; 3.46e-04	Soluble	-4.12	1.83e-02; 7.50e-05	Moderately soluble	-2.71	4.75e-01; 1.95e-03	Soluble
4	-3.52	7.42e-02; 3.04e-04	Soluble	-4.22	1.48e-02; 6.05e-05	Moderately soluble	-2.71	4.75e-01; 1.95e-03	Soluble
5	-3.77	3.59e-02; 1.69e-04	Soluble	-4.01	2.06e-02; 9.73e-05	Moderately soluble	-3.86	2.92e-02 ; 1.38e-04	Soluble
6	-3.97	2.75e-02; 1.07e-04	Soluble	-4.74	4.65e-03; 1.80e-05	Moderately soluble	-3.41	1.00e-01; 3.88e-04	Soluble
7	-3.01	4.07e-01; 9.68e-04	Soluble	-3.78	6.95e-02; 1.65e-04	Soluble	-1.71	8.24e+00; 1.96e-02	Soluble
8	-2.80	6.51e-01; 1.60e-03	Soluble	-3.67	8.68e-02; 2.14e-04	Soluble	-1.02	3.90e+01; 9.59e-02	Soluble
9	-2.90	4.96e-01; 1.27e-03	Soluble	-3.56	1.08e-01; 2.78e-04	Soluble	-1.61	9.67e+00; 2.48e-02	Soluble
10	-2.53	1.68e+00; 2.95e-03	Soluble	-3.70	1.13e-01; 1.98e-04	Soluble	0.76	3.29e+03; 5.79e+00	Soluble
11	-3.27	1.07e-01; 5.37e-04	Soluble	-3.18	1.31e-01; 6.60e-04	Soluble	-4.46	6.95e-03; 3.51e-05	Moderately soluble
12	-4.81	5.87e-03; 1.55e-05	Moderately soluble	-4.81	5.92e-03; 1.56e-05	Moderately soluble	-6.90	4.78e-05; 1.26e-07	Poorly soluble
13	-2.69	5.17e-01; 2.06e-03	Soluble	-2.62	6.06e-01; 2.42e-03	Soluble	-3.15	1.76e-01; 7.01e-04	Soluble
14	-2.93	3.41e-01; 1.19e-03	Soluble	-2.34	1.31e+00; 4.56e-03	Soluble	-2.96	3.17e-01; 1.10e-03	Soluble
15	-3.02	1.72e-01; 9.59e-04	Soluble	-3.50	5.65e-02; 3.15e-04	Soluble	-2.80	2.85e-01; 1.59e-03	Soluble

### 3.6. Pharmacokinetics of ligands and FDA-approved drugs

The pharmacokinetics of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Table 5.

Pharmacokinetic properties of drugs, GI absorption, BBB permeant, P-gp substrate, CYP enzyme inhibitory (CYP1A2, CYP2C19, CYP2C9, CYP2D6, CYP3A4) and skin permeability coefficient. It is evaluated with various parameters such as (Log Kp). GI absorption determines the absorption of the drug from the intestines and its passage into the systemic circulation. P-gp substrates refer to drugs that are excreted from the cell by the active transport mechanisms of P-gp, which affects the bioavailability of drugs (Yoshitomo et al., 2022). Enzyme inhibitors such as CYP1A2, CYP2C19, CYP2C9, CYP2D6 and CYP3A4 may cause drug-drug interactions by inhibiting enzymes involved in drug metabolism. Inhibition of these enzymes can directly affect the metabolism and effectiveness of other drugs (Liao et al., 2020). Additionally, the skin permeability coefficient (Log Kp) determines the transdermal absorption capacity of drugs and their passage through the skin into the systemic circulation (Hamadeh et al., 2023). These parameters play an important role in drug development processes by providing critical information about the bioavailability, effectiveness and safety of drugs.

GI absorption, BBB permeant, P-gp substrate properties of ligands and FDA-approved drugs are also given in the BOILED-Egg plot. All ligands and FDA-approved drugs, except isorhapontin, astringin,

and mulberroside A, are within the optimum range for GI absorption. All ligands and FDA-approved drugs, except oxyresveratrol, piceatannol, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A, are within the optimum range for BBB permeant. All ligands and FDA-approved drugs, except isorhapontin, piceid (polydatin), tacrine, donepezil, and galantamine, are not the substrate of P-gp.

The tendency of ligands and FDA-approved drugs to cause drug interactions through inhibition of cytochromes (CYPs) has been estimated (Hakkola et al., 2020). Ligands (isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (rivastigmine and memantine) are not the inhibitor of CYP1A2, CYP2C19, CYP2C9, CYP2D6, and CYP3A4.

Skin permeation is a linear method based on Potts and Guy's simple QSPR model, which relates the decimal logarithm of the skin permeability coefficient (log Kp in cm/s) to MW and log Po/w (Ranjith et al., 2022). Ligands and FDA-approved drugs with a lower negative log Kp value is seen as being more permeant to the skin (Jose et al., 2023). Log Kp (skin permeation) of ligands and FDA-approved drugs score ranges from -10.36 to -5.06 cm/s.

**Table 5.** Pharmacokinetics of ligands and FDA-approved drugs

No	Pharmacokinetic								
	GI absorption	BBB permeant	P-gp substrate	CYP1A2 inhibitor	CYP2C19 inhibitor	CYP2C9 inhibitor	CYP2D6 inhibitor	CYP3A4 inhibitor	Log Kp (skin permeation)
1	High	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	-5.47 cm/s
2	High	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	-5.18 cm/s
3	High	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	-5.82 cm/s
4	High	No	No	Yes	No	Yes	No	Yes	-5.76 cm/s
5	High	Yes	No	Yes	No	Yes	No	No	-5.12 cm/s
6	High	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	-5.33 cm/s
7	Low	No	Yes	No	No	No	No	No	-8.11 cm/s
8	Low	No	No	No	No	No	No	No	-8.26 cm/s
9	High	No	Yes	No	No	No	No	No	-7.95 cm/s
10	Low	No	No	No	No	No	No	No	-10.36 cm/s
11	High	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes	-5.59 cm/s
12	High	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	-5.58 cm/s
13	High	Yes	No	No	No	No	No	No	-6.20 cm/s
14	High	Yes	Yes	No	No	No	Yes	No	-6.75 cm/s
15	High	Yes	No	No	No	No	No	No	-5.06 cm/s

### 3.7. Druglikeness of ligands and FDA-approved drugs

The druglikeness of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Table 6.

The druglikeness is evaluated using five distinct rule-based filters (Gupta et al., 2020). Major pharmaceutical corporations [Lipinski (Pfizer), Ghose (Amgen), Veber (GSK), Egan (Pharmacia), and Muegge (Bayer)] frequently conduct analyses that lead to these rule-based filters (Yadav and Mohite, 2020). Lipinski's rule is based on properties such as molecular weight (less than 500 Daltons), octanol/water partition coefficient ( $\log P \leq 5$ ), number of hydrogen bond acceptors ( $\leq 10$ ), and number of hydrogen bond donors ( $\leq 5$ ). Ghose, Veber, Egan and Muegge rules include additional parameters such as molecular weight, polar surface area (TPSA), number of rotatable bonds (Soares et al., 2023). Ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, and isorhapontigenin), and

FDA-approved drugs (donepezil, rivastigmine, and galantamine) are within acceptable range for Lipinsky, Ghose, Veber, Egan, and Muegge filters.

Also, the Abbot bioavailability score attempts to estimate the probability that ligands and FDA-approved drugs will have at least 10% oral bioavailability or measurable Caco-2 permeability in rats (Chai et al., 2022). This semiquantitative rule-based score based on total charge, TPSA, and Lipinski filter violation identifies four classes of ligands and FDA-approved drugs with probabilities of 11%, 17%, 56%, or 85% (Ozioko and Gaiya, 2023). These evaluations provide critical information to optimize the bioavailability and effectiveness of drugs. All ligands and FDA-approved drugs are within acceptable range for Abbot bioavailability score (17% and 56%).

**Table 6.** Druglikeness of ligands and FDA-approved drugs

Druglikeness						
No	Lipinski	Ghose	Veber	Egan	Muegge	Bioavailability score
1	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
2	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
3	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
4	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
5	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
6	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
7	Yes; 1 violation: NHorOH>5	Yes	No; 1 violation: TPSA>140	No; 1 violation: TPSA>131.6	No; 1 violation: H-don>5	0.55
8	Yes; 1 violation: NHorOH>5	Yes	No; 1 violation: TPSA>140	No; 1 violation: TPSA>131.6	No; 2 violations: TPSA>150, H-don>5	0.55
9	Yes; 1 violation: NHorOH>5	Yes	Yes	No; 1 violation: TPSA>131.6	No; 1 violation: H-don>5	0.55
10	No; 3 violations: MW>500, NorO>10, NHorOH>5	No; 4 violations: MW>480, WLOGP<-0.4, MR>130, #atoms>70	No; 1 violation: TPSA>140	No; 1 violation: TPSA>131.6	No; 3 violations: TPSA>150, H-acc>10, H-don>5	0.17
11	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	No; 1 violation: MW<200	0.55
12	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
13	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
14	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	Yes	0.55
15	Yes; 0 violation	Yes	Yes	Yes	No; 2 violations: MW<200, Heteroatoms<2	0.55

### 3.8. Medicinal chemistry of ligands and FDA-approved drugs

The medical chemistry of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A) and FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) are shown in Table 7.

The phrase "Pan-Assay INterference compounds" (PAINs) encompasses a broad range of ligands and FDA-approved drugs that impede biological screening assays through diverse methods of action (Boateng et al., 2024). PAINs can complicate drug discovery processes by causing false positive results

in biological screening campaigns. Ligands and FDA-approved drugs had no alert in PAINS filter except piceatannol and astringin.

Brenk is a filter to identify ligands and FDA-approved drugs that are chemically reactive, metabolically unstable, and at risk levels (Sardar, 2023). FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, and memantine) had no alert in Brenk filter.

Leadlikeness is a tactical guideline for selecting starting points for chemical optimization in order to enhance the possibility of developing "drug-like" molecules during the drug discovery programs (Goodnow, 2001). FDA-approved drugs (rivastigmine and galantamine) had no violation in leadlikeness.

The synthetic accessibility score of the ligands and FDA-approved drugs, or ease of synthesis, goes from 1 (very simple) to 10 (extremely difficult) (Ertl and Schuffenhauer, 2009). These scores are critical in determining the synthesizability of drug candidates and their potential in development. Synthetic accessibility of ligands and FDA-approved drugs score ranges from 1.98 to 6.11.

**Table 7.** Medicinal chemistry of ligands and FDA-approved drugs

Medical chemistry				
No	PAINS	Brenk	Leadlikeness	Synthetic accessibility
1	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: MW<250	2.02
2	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: XLOGP3>3.5	2.29
3	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: MW<250	2.36
4	1 alert: catechol_A	2 alerts: catechol, stilbene	No; 1 violation: MW<250	2.09
5	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: : MW>250	1.98
6	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: XLOGP3>3.5	2.22
7	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: : MW>350	4.98
8	1 alert: catechol_A	2 alerts: catechol, stilbene	No; 1 violation: MW>350	4.86
9	0 alert	1 alert: stilbene	No; 1 violation: MW>350	4.82
10	0 alert	1 alert: stilbene	No; 2 violations: MW>350, Rotors>7	6.11
11	0 alert	0 alert	No; 1 violation: MW<250	2.08
12	0 alert	0 alert	No; 2 violations: MW>350, XLOGP3>3.5	3.36
13	0 alert	0 alert	Yes	2.73
14	0 alert	1 alert: isolated_alkene	Yes	4.57
15	0 alert	0 alert	No; 1 violation: MW<250	3.70

### 3.9. Molecular docking results of ligands, FDA-approved drugs, and target proteins

The molecular docking results of the ligands (resveratrol, pterostilbene, oxyresveratrol, piceatannol, pinosylvin, isorhapontigenin, isorhapontin, astringin, piceid (polydatin), and mulberroside A), FDA-approved drugs (tacrine, donepezil, rivastigmine, galantamine, and memantine) and target proteins

(AChE, BuChE, APP, BACE, GSK-3 $\beta$ , CDK5, SOD, CAT, GPx, Cox-2, iNOS, IL-1 $\beta$ , and TNF- $\alpha$ ) are shown in Table 8.

Blind docking is a molecular modeling technique used to determine the binding sites of ligands to target proteins. This technique is used to predict the binding affinity and potential interactions of ligands. The vina score is a system based on empirical scoring that establishes the binding affinity of ligands, FDA-approved drugs, and target proteins (Boyles, 2020). Vina scores often indicate Gibbs free energy in the binding of ligands and FDA-approved drugs to target proteins (Akhoon et al., 2019). A higher negative vina score indicates a strong binding affinity (Meli et al., 2022). Such studies play a critical role in drug discovery and development processes and enable the development of more effective therapeutic strategies.

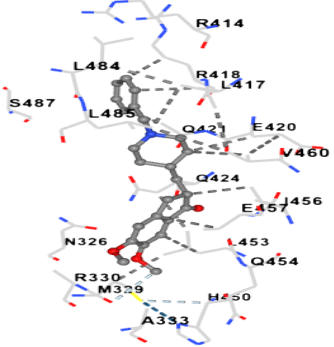
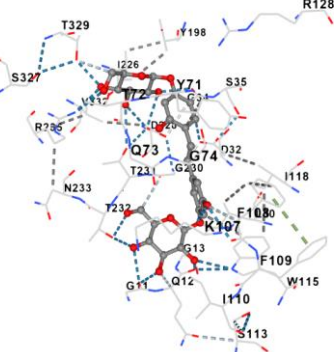
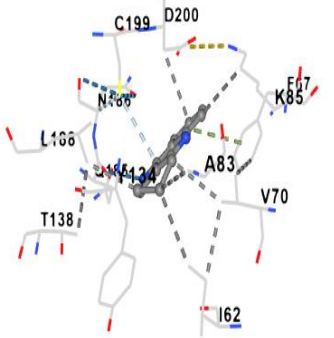
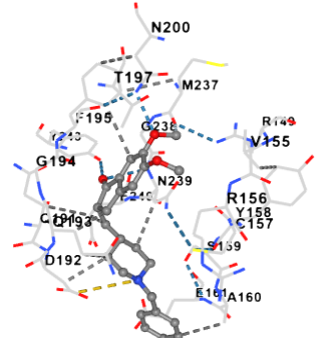
The binding affinity of the target proteins to ligands are AChE > CAT > Cox-2 > BuChE > iNOS > SOD > CDK5 > TNF- $\alpha$  > GPx > GSK-3 $\beta$  > APP > BACE > IL-1 $\beta$ , respectively. The binding affinity of the ligands to target proteins are mulberroside A > astringin > piceid (polydatin) > isorhapontin > oxyresveratrol > piceatannol > isorhapontigenin > resveratrol > pinosylvin > pterostilbene, respectively. The binding affinity of the target proteins to FDA-approved drugs are AChE > BuChE > Cox-2 > iNOS > CAT > SOD > GSK-3 $\beta$  > GPx > CDK5 > TNF- $\alpha$  > APP > BACE > IL-1 $\beta$ , respectively. The binding affinity of the FDA-approved drugs to target proteins are donepezil > galantamine > tacrine > rivastigmine > memantine, respectively. The molecular docking studies indicate that the ligands and FDA-approved drugs have a strong binding affinity to the target proteins (AChE, BuChE, APP, BACE, GSK-3 $\beta$ , CDK5, SOD, CAT, GPx, Cox-2, iNOS, IL-1 $\beta$ , and TNF- $\alpha$ ), and that it is possible for those proteins to function.

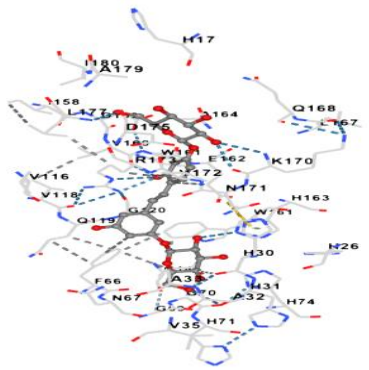
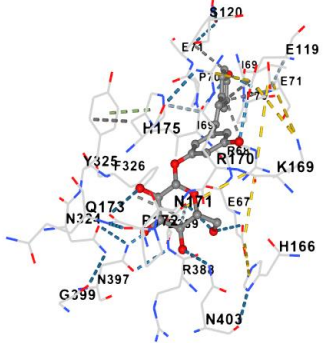
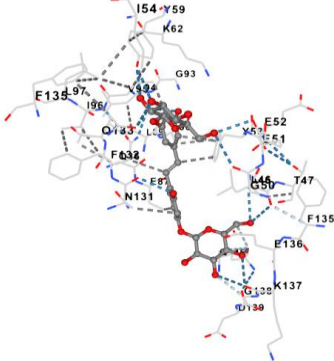
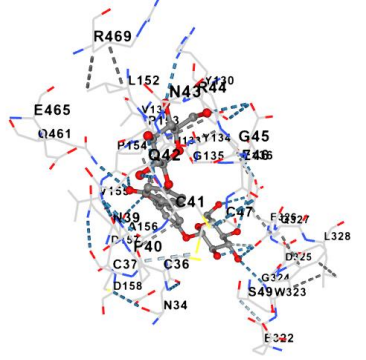
**Table 8.** Molecular docking results (vina score) of ligands, FDA-approved drugs, and target proteins

Ligand	Target Protein												
	AChE	BuChE	APP	BACE	GSK-3 $\beta$	CDK5	SOD	CAT	GPx	Cox-2	iNOS	IL-1 $\beta$	TNF- $\alpha$
Resveratrol	-8.7	-8.7	-7.2	-6.6	-6.9	-7.7	-8.1	-8.7	-7.1	-7.1	-8.6	-6.4	-7.7
Pterostilbene	-8.5	-8.0	-7.2	-6.7	-6.8	-7.1	-7.7	-8.3	-7.1	-7.9	-8.4	-6.1	-6.9
Oxyresveratrol	-8.8	-8.6	-7.5	-6.7	-7.3	-8.8	-8.2	-9.4	-7.0	-8.4	-8.6	-6.5	-7.5
Piceatannol	-9.1	-8.4	-7.1	-6.7	-7.0	-8.0	-8.5	-9.0	-7.1	-8.3	-9.0	-6.4	-7.9
Pinosylvin	-8.6	-8.4	-7.1	-6.3	-7.0	-7.6	-7.9	-8.3	-7.0	-7.9	-8.3	-6.0	-7.3
Isorhapontigenin	-8.8	-8.1	-7.0	-6.7	-7.0	-7.9	-7.8	-8.7	-7.3	-8.3	-8.2	-6.4	-7.9
Isorhapontin	-8.9	-9.1	-7.6	-8.1	-8.5	-9.2	-8.9	-9.3	-8.5	-10.5	-9.4	-7.3	-8.8
Astringin	-10.7	-9.4	-7.8	-8.1	-8.3	-8.9	-8.9	-9.9	-8.5	-10.6	<b>-10.0</b>	-7.2	-8.9
Piceid (polydatin)	-10.5	-9.8	-7.9	-7.8	-7.8	-8.9	-8.6	<b>-11.2</b>	-8.3	-10.1	-9.8	-7.4	-9.0
Mulberroside A	<b>-11.4</b>	<b>-10.2</b>	-8.5	<b>-8.8</b>	-8.7	-9.0	<b>-9.9</b>	-10.2	<b>-9.9</b>	<b>-10.8</b>	-9.2	<b>-7.8</b>	<b>-9.3</b>
Tacrine	-8.5	-8.2	-6.7	-6.5	<b>-9.9</b>	-8.1	-7.4	-8.0	-7.1	-8.1	-8.0	-5.6	-7.2
Donepezil	-10.0	-9.2	<b>-8.9</b>	-8.0	-7.6	<b>-9.7</b>	-7.9	-8.6	-9.0	-9.6	-9.3	-6.7	-8.4
Rivastigmine	-7.9	-7.1	-5.8	-5.7	-5.6	-6.1	-6.8	-7.5	-6.2	-6.8	-7.6	-5.3	-6.1
Galantamine	-8.7	-8.6	-7.0	-7.2	-7.5	-7.0	-8.1	-8.1	-7.9	-8.5	-8.1	-6.4	-7.8
Memantine	-7.6	-7.1	-5.8	-5.8	-6.6	-5.3	-7.5	-6.6	-6.4	-6.6	-6.3	-5.0	-6.5





Donepezil	APP	<p>Chain A: ASN326 MET329            ARG330 ALA333            Chain B: ARG414 LEU417            ARG418 GLU420 GLN421            LYS422 GLN424 ARG425 HIS450            LEU453 GLN454 ILE456 GLU457            GLU458 VAL460 ASN461            LEU464 GLU483 LEU484            LEU485 HIS486 SER487</p>	
Mulberroside A	BACE	<p>Chain A: GLY11 GLN12 GLY13            LEU30 ASP32 GLY34 SER35            SER36 PHE47 TYR71 THR72            GLN73 GLY74 LYS107 PHE108            PHE109 ILE110 ASN111 SER113            TRP115 ILE118 ILE126 ARG128            TYR198 LYS224 ILE226 ASP228            SER229 GLY230 THR231            THR232 ASN233 ARG235            SER327 THR329 GLY330            THR331 VAL332</p>	
Tacrine	GSK-3β	<p>Chain A: ILE62 PHE67 VAL70            ALA83 LYS85 ARG96 GLU97            LEU132 TYR134 VAL135            THR138 ARG180 ASP181 LYS183            GLN185 ASN186 LEU188            CYS199 ASP200 PHE201 GLY202            SER203 ASN213 VAL214 SER215            TYR216 ILE217 ARG220 TYR221            GLY259 ASP260 SER261            Chain B: ARG220 TYR221            TYR222 PHE229 ASP260 VAL263            LEU266 VAL267 ILE270 PHE291            LYS292 PHE293 PRO294</p>	
Donepezil	CDK5	<p>Chain A: ARG149 PRO154            VAL155 ARG156 CYS157            TYR158 SER159 ALA160            GLU161 GLY175 ALA176            LYS177 PRO234 ASP235            Chain C: ARG179 ASP182            ARG183 LEU186 GLN191            ASP192 GLN193 GLY194 PHE195            ILE196 THR197 PRO198 ALA199            ASN200 MET237 GLY238            ASN239 GLU240 TYR243</p>	

Mulberroside A	SOD	<p>Chain A: HIS17 ILE18 HIS26  LYS29 HIS30 HIS31 ALA32  ALA33 VAL35 PRO62 ALA63  PHE66 ASN67 GLY69 GLY70  HIS71 HIS74 PHE77 VAL116  GLY117 VAL118 GLN119  GLY120 GLN143 ILE158 ASP159  VAL160 TRP161 GLU162 HIS163  ALA164 LEU167 GLN168  LYS170 ASN171 VAL172  ARG173 PRO174 ASP175 LEU177  LYS178 ALA179 ILE180</p> <p>Chain B: GLN21 ILE22 LEU25  HIS26 LYS29 HIS30 HIS31  ALA32 ALA33 VAL35 ASN37  ALA63 PHE66 ASN67 GLY69  GLY70 HIS71 HIS74 VAL116  GLY117 VAL118 GLN119  GLY120 GLN143 ASP159 TRP161  GLU162 HIS163 ALA164 LEU167  ASN171 VAL172 ARG173  PRO174</p>	
Piceid (polydatin)	CAT	<p>Chain A: GLU67 ARG68 ILE69  PRO70 GLU71 ARG72 VAL73  ALA76 ALA117 GLU119 SER120  HIS166 LYS169 ARG170 ASN171  PRO172 GLN173 HIS175 PHE326  GLU330</p> <p>Chain B: ASP389</p> <p>Chain C: GLU67 ARG68 ILE69  PRO70 GLU71 ALA117 GLU119  SER120 HIS166 LYS169 ARG170  ASN171 HIS175 LEU176 LYS177  ASN324 TYR325 PHE326  GLU330</p> <p>Chain D: ARG388 ASP389  ASN397 GLY399 ASN403</p>	
Mulberroside A	GPx	<p>Chain A: GLU52 ILE54 GLN58  TYR59 LYS62 ASN83 GLN86  GLU87 GLU88 LEU89 ALA90  PRO91 GLY93 LEU94 VAL95  ILE96 LEU97 ASN131 PHE132  GLN133 PHE135</p> <p>Chain B: GLU42 TYR43 GLY44  ALA45 LEU46 THR47 ASP49  GLY50 GLU51 GLU52 TYR53  ILE54 PRO55 PHE99 PHE135  GLU136 LYS137 GLY138 ASP139  LYS144 GLU145 GLN146  LYS147 PHE148</p>	
Mulberroside A	Cox-2	<p>Chain C: ASN34 PRO35 CYS36  CYS37 SER38 ASN39 PRO40  CYS41 GLN42 ASN43 ARG44  GLY45 GLU46 CYS47 MET48  SER49 TYR130 ASN131 VAL132  HIS133 TYR134 GLY135 TYR136  TYR147 ALA151 LEU152  PRO153 PRO154 VAL155  ALA156 ASP157 ASP158 GLN461  GLU465 TYR466 LYS468  ARG469</p> <p>Chain D: GLU322 TRP323  GLY324 ASP325 GLU326  GLN327 LEU328</p>	

Astringin	iNOS	<p>Chain A: GLY117 SER118 ILE119 MET120 ARG199 CYS200 ILE201 GLY202 GLN263 ARG266 TRP346 TYR347 PRO350 VAL352 TYR373 MET374 THR376 GLU377 ILE378 ARG381 ASP382 ASP385 ARG388 ILE462 TRP463 LEU464 VAL465 PRO466 PRO467 PHE476</p> <p>Chain B: LYS88 TRP90 ALA197 PRO198 ARG199 CYS200 ILE201 GLY202 MET374 GLU377 ARG381 TRP461 ILE462 TRP463 LEU464 VAL465 PRO466 PRO467 VAL475 PHE476 HIS477 GLN478 GLU479 MET480</p>	
Mulberroside A	IL-1 $\beta$	<p>Chain A: GLY22 PRO23 TYR24 GLU25 LEU26 LYS74 LYS77 PRO78 THR79 LEU80 GLN81 LEU82 GLU83 SER84 TRP120 SER123 THR124 SER125 GLN126 ALA127 MET130 PRO131 VAL132 PHE133 LEU134 GLY135 GLY136 THR137 LYS138 GLN141 ASP142 ILE143</p>	
Mulberroside A	TNF- $\alpha$	<p>Chain B: GLU53 GLY54 LEU55 ARG82 ALA84 TYR87 LYS90 VAL91 ASN92 LEU93 LEU94 SER95 VAL123 PHE124 GLN125 LEU126 GLU127 LEU157</p> <p>Chain D: ARG82 ILE83 ALA84 TYR87 GLN88 THR89 VAL91 ASN92 LEU93 LEU94 SER95 ALA96 ILE97 LYS98 TYR119 LEU120 GLY121 VAL123 PHE124 GLN125 LEU126 GLU127</p>	

#### 4. Conclusions

In conclusion, comprehensive evaluation of stilbenes and FDA-approved drugs through computational methodologies targeting many hypotheses underlying AD pathogenesis has provided valuable insights into their potential therapeutic efficacy. Further investigation and validation of these findings through *in vitro* and *in vivo* studies are warranted to translate these computational predictions into clinically meaningful treatments for AD.

#### Statement of Conflict of Interest

The author of the article declares that she has no conflict of interest.

## Author's Contributions

The author declares that she has contributed 100% to the article.

## References

- Akhood BA., Tiwari H., Nargotra A. In silico drug design methods for drug repurposing. In: *In Silico Drug Design*. Cambridge, Academic Press 2019; 47-84.
- Aleynova OA., Ogneva ZV., Suprun AR., Ananov AA., Nityagovsky NN., Beresh AA., Dubrovina AS., Kiselev KV. The effect of external treatment of *Arabidopsis thaliana* with plant-derived stilbene compounds on plant resistance to abiotic stresses. *Plants* 2024; 13(2): 184.
- Balakrishnan R., Jannat K., Choi DK. Development of dietary small molecules as multi-targeting treatment strategies for Alzheimer's disease. *Redox Biol.* 2024; 103105.
- Boateng ST., Roy T., Agbo ME., Mahmud MA., Banang-Mbeumi S., Chamcheu RCN., Yadav RK., Pham LK., Dang DD., Jackson KE, Nagalo BM, Efimova T., Fotie J., Chamcheu JC. Multifaceted approach toward mapping out the anticancer properties of small molecules via in vitro evaluation on melanoma and nonmelanoma skin cancer cells, and in silico target fishing. *Chem. Biol. Drug Des.* 2024; 103(1).
- Boobier S., Hose DRJ., Blacker A., Nguyen B. Machine learning with physicochemical relationships: solubility prediction in organic solvents and water. *Nature Communications* 2020; 11: 521.
- Boyles F. Developing novel scoring functions for protein-ligand docking using machine learning. Doctoral Dissertation, University of Oxford 2020.
- Buchwald P., Bodor N. Octanol-water partition: Searching for predictive models. *Curr. Med. Chem.* 1998; 5(5): 353-380.
- Cao W., Zheng B., Zeng X., He H., Chen L. Stilbene, as phyto-oestrogens, can construct resistant starch through noncovalent interactions with starch: A structural correlation study. *Food Hydrocoll.* 2024; 148: 109438.
- Chai TT., Wong CCC., Sabri MZ., Wong FC. Seafood paramyosins as sources of anti-angiotensin-converting-enzyme and anti-dipeptidyl-peptidase peptides after gastrointestinal digestion: A cheminformatic investigation. *Molecules* 2022; 27(12): 3864.
- Ciorsac A., Filip M., Isvoran A. Predict of water solubility of the low molecular weigh oligomers of polyhydroxyalkanoates. *New Front. Chem.* 2021; 30(1): 25-34.
- Daina A., Michielin O., Zoete V. SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific Rep.* 2017; 7(1): 42717.
- Daina A., Zoete V. A boiled-egg to predict gastrointestinal absorption and brain penetration of small molecules. *ChemMedChem* 2016; 11(11): 1117-1121.
- Ertl P., Schuffenhauer A. Estimation of synthetic accessibility score of drug-like molecules based on molecular complexity and fragment contributions. *J. Cheminform.* 2009; 1: 1-11.

- Ganz T., Ben-Hur T. The “hit and run” hypothesis for Alzheimer’s disease pathogenesis. *Int. J. Mol. Sci.* 2024; 25(6): 3245.
- Goodnow Jr RA. Current practices in generation of small molecule new leads. *J. Cell. Biochem.* 2001; 84(S37): 13-21.
- Gupta PP., Bastikar VA., Bastikar A., Chhajed SS., Pathade PA. Computational screening techniques for Lead design and development. *CADD* 2020; 187-222.
- Hakkola J., Hukkanen J., Turpeinen M., Pelkonen O. Inhibition and induction of CYP enzymes in humans: an update. *Arch. Toxicol.* 2020; 94(11): 3671-3722.
- Henning N., Kannigadu C., Aucamp J., van Rensburg HDJ., David DD. Probing benzothiadiazine-1, 1-dioxide ethylene glycol derivatives against Leishmania: synthesis and in vitro efficacy evaluation. *Res Sq.* 2023; PPR664243.
- Ibrahim MT., Uzairu A., Uba S., Shallangwa GA. Computational modeling of novel quinazoline derivatives as potent epidermal growth factor receptor inhibitors. *Heliyon* 2020; 6(2).
- Jia CY., Li JY., Hao GF., Yang GF. A drug-likeness toolbox facilitates ADMET study in drug discovery. *Drug Discov. Today* 2020; 25(1): 248-258.
- Jose S., Devi SS., Sajeev A., Girisa S., Alqahtani MS., Abbas M., et al. Repurposing FDA-approved drugs as FXR agonists: a structure based in silico pharmacological study. *Biosci. Rep.* 2023; 43(3).
- Kadri A., Aouadi K. In vitro antimicrobial and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory potential of enantiopure cycloalkylglycine derivatives: Insights into their in silico pharmacokinetic, druglikeness, and medicinal chemistry properties. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 2020; 10(6): 107-115.
- Kamble SM., Patil KR., Upaganlawar AB. Etiology, pathogenesis of Alzheimer's disease and amyloid beta hypothesis. In: *Alzheimer's Disease and Advanced Drug Delivery Strategies*. Cambridge, Academic Press 2024; 1-11.
- Liao M., Jaw-Tsai S., Beltman J., Simmons A., Harding T., Xiao JJ. Evaluation of in vitro absorption, distribution, metabolism, and excretion and assessment of drug-drug interaction of rucaparib, an orally potent poly(ADP-ribose) polymerase inhibitor. *Xenobiotica* 2020; 50: 1032-1042.
- Liu N., Liang X., Chen Y., Xie L. Recent trends in treatment strategies for Alzheimer's disease and the challenges: A topical advancement. *Ageing Res. Rev.* 2024; 102199.
- Liu Y., Yang X., Gan J., Chen S., Xiao ZX., Cao Y. CB-Dock2: Improved protein–ligand blind docking by integrating cavity detection, docking and homologous template fitting. *Nucleic Acids Res.* 2022; 50(W1).
- Meli R., Morris GM., Biggin PC. Scoring functions for protein-ligand binding affinity prediction using structure-based deep learning: A review. *Front. Bioinform.* 2022; 2: 885983.
- Mishra S., Dahima R. In vitro ADME studies of TUG-891, a GPR-120 inhibitor using SWISS ADME predictor. *JDDT* 2019; 9(2-s): 366-369.

- Moharana M., Pattanayak SK., Khan F. Molecular recognition of bio-active triterpenoids from *Swertia chirayita* towards hepatitis Delta antigen: a mechanism through docking, dynamics simulation, Gibbs free energy landscape. *J. Biomol. Struct. Dyn.* 2023; 41(24).
- Nasb M., Tao W., Chen N. Alzheimer's disease puzzle: Delving into pathogenesis hypotheses. *Aging Dis.* 2024; 15(1): 43-73.
- Ndombera F., Maiyoh G., Tuei V. Pharmacokinetic, physicochemical and medicinal properties of n-glycoside anti-cancer agent more potent than 2-deoxy-d-glucose in lung cancer cells. *J. Pharm. Pharmacol.* 2019; 7(4): 165-176.
- Ozioko PC., Gaiya DD., Abdullahi I. Essential secondary metabolites of *Azadirachta indica* leaf in search of drug for COVID-19 treatment: In-silico ADMET and bioactivity predictions. *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.* 2023; 10(9): 79-93.
- Perluigi M., Di Domenico F., Butterfield DA. Oxidative damage in neurodegeneration: Roles in the pathogenesis and progression of Alzheimer disease. *Physiol. Rev.* 2024; 104(1): 103-197.
- Poltronieri P., Xu B., & Giovinazzo G. Resveratrol and other stilbenes: effects on dysregulated gene expression in cancers and novel delivery systems. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry* 2020.
- Ponzoni I., Sebastián-Pérez V., Requena-Triguero C., Roca C., Martínez MJ., Cravero F., Diaz MF., Paez JA., Arrayas RG., Adrio J., Campillo NE. Hybridizing feature selection and feature learning approaches in QSAR modeling for drug discovery. *Sci. Rep.* 2017; 7(1): 2403.
- Rafeeq MM., Helmi N., Sain ZM., Iqbal J., Alzahrani A., Alkurbi MO., Shater AF., Al-ahmadi BM., Alam MZ., Alam Q. Target-based virtual screening and molecular dynamics approach to identify potential antileishmanial agents through targeting UvrD-like helicase ATP-binding domain. *Adv. Life Sci* 2024; 11(1): 237-245.
- Ranjith D., Padhi PK., Dhaval JK., Karikalan M., Naveena M., Johnson BE., Telang AG. Insilco prediction and hematological alterations in male rats exposed to Ethion and its amelioration by nano-quercetin: A sub chronic study. *J. Pharm. Innov.* 2022; 11(11): 1116-1122.
- Ranjith D., Ravikumar C. SwissADME predictions of pharmacokinetics and drug-likeness properties of small molecules present in *Ipomoea mauritiana* Jacq. *J Pharmacogn Phytochem* 2019; 8(5): 2063-2073.
- Sardar H. Drug like potential of Daidzein using SwissADME prediction: In silico Approaches. *PHYTONutrients* 2023; 02-08.
- Sert M., Işıl Ö., Yaglioglu AS., Bulut A. Gabriel-Cromwell aziridination of amino sugars; chiral ferrocenoyl-aziridiny sugar synthesis and their biological evaluation. *Carbohydr. Res.* 2021; 509: 108430.
- Shevelyova MP., Deryusheva EI., Nemashkalova EL., Machulin AV., Litus EA. Role of human serum albumin in the prevention and treatment of Alzheimer's disease. *Biol. Bull. Rev.* 2024; 14(1): 29-42.

- Soares A., Sousa G., Calil R., & Trossini G. Absorption matters: A closer look at popular oral bioavailability rules for drug approvals. *Molecular Informatics* 2023; 42.
- Socala K., Żmudzka E., Lustyk K., Zagaja M., Brighenti V., Costa AM., Andres-Mach M., Pytka K., Martinelli I., Mandrioli J., Pellati F., Biagini G., Wlaz P. Therapeutic potential of stilbenes in neuropsychiatric and neurological disorders: A comprehensive review of preclinical and clinical evidence. *Phytother. Res.* 2024; 38(3): 1400-1461.
- Udugade SB., Dojjad RC., Udugade BV. In silico evaluation of pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of momordicin1: An active chemical constituent of momordica charantia. *J. Adv. Sci. Res.* 2019; 10(03 Suppl 1): 222-229.
- Vejanndla B., Savani S., Appalaneni R., Veeravalli RS., Gude SS. Alzheimer's disease: The past, present, and future of a globally progressive disease. *Cureus* 2024; 16(1).
- Wolfe MS.  $\gamma$ -Secretase: once and future drug target for Alzheimer's disease. *Expert Opin. Drug Discov.* 2024; 19(1): 5-8.
- Yadav AR., Mohite SK. ADME analysis of phytochemical constituents of Psidium guajava. *Asian J. Sci. Res.* 2020; 13(5): 373-375.
- Yağlıoğlu AŞ., Gürbüz DG., Dölarslan M., Demirtaş İ. First determination of anticancer, cytotoxic, and in silico ADME evaluation of secondary metabolites of endemic *Astragalus leucothrix* Freyn & Bornm. *Turk. J. Chem.* 2022; 46(1); 169-183.
- Yajing M., Sufang L., Qingfeng Z., Zhonghua L., Zhijian Z., Bin Y. Approved drugs and natural products at clinical stages for treating Alzheimer's disease. *Chin J Nat Med* 2024; 22(0): 1-12.
- Yan QW., Su BJ., He S., Liao HB., Wang HS., Liang D. Structurally diverse stilbenes from *Gnetum parvifolium* and their anti-neuroinflammatory activities. *Bioorg. Chem.* 2024; 143: 107060.
- Yoshitomo A., Asano S., Hozuki S., Tamemoto Y., Shibata Y., Hashimoto N., Takahashi K., Sasaki Y., Ozawa N., Kageyama M., Iijima T., Kazuki Y., Sato H. Significance of basal membrane permeability of epithelial cells in predicting intestinal drug absorption. *Drug Metabolism and Disposition* 2022; 51: 318-328.



## An Investigation of Four-Point Bending Behavior for Personalized Humerus Bone Plate

Hakan Burçin ERDOĞUŞ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Izmir Kavram Vocational School, Machinery and Metal Technologies Department, Machinery Programme, Izmir, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-2947-7510>

\*Corresponding author: [hakan.erdogus@kavram.edu.tr](mailto:hakan.erdogus@kavram.edu.tr)

### Research Article

#### Article History:

Received: 29.04.2024

Accepted: 23.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Bone plates

Method of anatomical features

Four-point bending tests

Personalized bone plate

### ABSTRACT

The reverse engineering method has been beneficial for personalized implant designs in the medical field due to its flexible use feature that allows it to be applied in many areas. The method of anatomical features (MAF) is commonly used for fractures of the bone for the development of plate fixation. To improve the geometrical fitting between plate and bone, high-quality image data is the most important factor for computer aided design (CAD) modelling. This study aims to use MAF for humerus bone plate design that would alternate the fracture region and decrease the stress-shielding effect depending on bending strength. For this purpose, the personalized plate implant (PPI) was designed according to MAF and fabricated using the multi jet fusion (MJF) technique, finally the four-point bending finite element analysis was applied and tested. The results indicated that the PPI structure has higher bending strength than the flat plate design and a much greater surface area.

## Kişiselleştirilmiş Humerus Kemik Plakasının Dört Noktalı Eğilme Davranışının İncelenmesi

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 29.04.2024

Kabul tarihi: 23.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Kemik plakaları

Anatomik özellikler yöntemi

Dört nokta eğilme testleri

Kişiselleştirilmiş kemik plakası

### ÖZ

Tersine mühendislik yöntemi birçok alanda uygulanmasına olanak sağlayan esnek kullanım özelliği nedeniyle tıp alanında kişiye özel implant tasarımlarında fayda sağlamıştır. Anatomik özellikler yöntemi (MAF), plak fiksasyonunun geliştirilmesi için kemik kırıklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Plaka ve kemik arasındaki geometrik uyumu iyileştirmek için yüksek kaliteli görüntü verileri CAD modellemede en önemli faktördür. Bu çalışma; kırık bölgesini değiştirecek ve bükülme mukavemetine bağlı olarak stres koruyucu etkiyi azaltacak humerus kemik plakası tasarımı için MAF'nı kullanılmasını amaçlamaktadır. Bu amaçla kişiselleştirilmiş plaka implant (PPI), MAF'a göre tasarlanıp, multi jet füzyon (MJF) tekniği kullanılarak üretilmiştir. Son olarak dört nokta bükme sonlu elemanlar analizi uygulanarak test edilmiştir. Sonuçlar, PPI yapısının düz plaka tasarımına göre daha yüksek bükülme mukavemetine ve çok daha büyük bir yüzey alanına sahip olduğunu göstermiştir.

**To Cite:** Erdoğan HB. An Investigation of Four-Point Bending Behavior for Personalized Humerus Bone Plate. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 167-181.

### 1. Introduction

In recent years, three-dimensional (3D) models produced by additive manufacturing (AM) methods have been used in patient-specific implant and prosthesis designs. To creating a 3D physical model begins with processing computer tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) digital data with appropriate methods. These images are used in pre-clinical evaluations to discuss the procedure and

make the most appropriate decision (Huutilainen et al., 2014; Malik et al., 2015; Marro et al., 2016). Arvier et al., (1994) concluded that maxillofacial 3D models are useful in visualizing the dimensional movement of bones for preoperative adaptation at the surgical planning stage. In addition, these models with similar accuracy provide efficiency in terms of cost by reducing post-operative complications, early-term diagnosis, and decreased operation time (Webb, 2000; Cousley et al., 2017). It becomes important to create an anatomical model by obtaining high-quality image data from the maxillofacial region. Cone beam computer tomography (CBCT) is among the slicing techniques used in creating 3D biomodels, assets in implant planning, predicting maxillofacial growth, and determining bone volume in the reconstruction process for orthodontic surgery (Liang et al., 2010a; Liang et al., 2010b).

Method of anatomical features (MAF) is frequently used in modeling and reverse engineering of human bones. The main purpose of the MAF method is to gain close anatomical structure by developing a bone 3D model with highly geometric precision. In the study that investigated based on the femur and tibia bones model, it was stated that the accuracy between the polygonal model and bone geometric morphology was adequate for plate design. Additionally, it has been concluded that a 3D geometric model can be created even in cases where there is partial data about human bone (Majstonovic et al., 2013; Vitković et al., 2019). Shoulkha et al., (2011) created a 3D model with the help of geometrically simulated shapes (ellipsoid and hyperbolic) similar to the anatomical landmarks on the femoral bone surface. A mean fitting error of 0.5-1.2 mm occurred between this 3D model and image data. In a similar study, according to geometric measurements, there was a deviation of less than 1 mm in 75% of the entire geometry between the 3D model prepared with the MAF method and the input data (Rashid, 2023).

The fixation plates are commonly used in the treatment of fractures in the distal-proximal or shaft of human bones as a result of injury. The personalized plate implant (PPI) designed for the repair of distal femur fractures aims to ensure continuity in blood flow by matching the deformed surfaces to each other after deformation. Chen, (2018) examined the stress distribution on the personalized fixation plate according to the surface geometry created by restoring the broken femur bone. For complex geometries such as bone structure, feature-based definition reduces the time for editing and ensures optimal plate design. To overcome stress shielding of femoral shaft fracture and enhanced wrap of bone-plate couple, stress and deformation are significantly reduced by preparing a customized plate design (Soni and Sing, 2020). To improve the PPI for tibial bone fracture, stress distribution, and stress shielding rate are reduced with the groove design on the plate (Liao et al., 2021). However, loss of movement function and pain that occurs after the healing process of tibial plateau fractures restricts the activities of patients. Due to the posterolateral region being complex, the plate should be placed on the bone contour to wrap the fracture fragments correctly. To perform the process such as bending the flat plates to settle in the plateau region causes longer surgery time, increases blood loss, and weakens the mechanical properties of the plate (Jian et al., 2018; Ren et al., 2018). Proximal humerus, humeral shaft, and distal humerus fractures are frequently observed in adult and elderly people. Meanwhile, due to fractures of the

proximal humerus and displacement of fragments, satisfactory results were not obtained in the treatment with traditional plates and screws (Kumar et al., 2013; Nowak et al., 2018). The compatibility of the screw and the plate used as screws should be sufficient for the fracture region to be covered by the plate. In this case, the increase in the distance between the bone and the plate in the application of an extraperiosteal locking plate has a significant impact on the stability of the construction (Ahmed et al., 2007). As a result of parametric optimization for the proximal humerus plate, Jabran et al., (2019) determined that the plate bending strength depends on the screws close to the proximal region. Tilton et al., (2020) emphasized the importance of medial support with plate fixation applied to proximal humerus fractures. Moreover, it has been found that new medial support leads to a significant reduction in humeral head migration under increasing repetitive loads. The plates used in extra-articular humerus fractures provide stability in terms of fixation and resistance to torsion forces (Scalero et al., 2014). It has been reported that mid-distal humeral shaft fractures can be successfully treated with a minimally invasive plate (MIPA). Moreover, with this technique, there is less soft tissue dissection which eliminates the need to expose the radial nerve (An et al., 2010). The main benefit of the MAF technique is the use of personalized specific features. By applying the parametric design method of the fixing plate, a structure compatible with the humeral shaft topology is prepared (Rashid et al., 2017; Rashid et al., 2021).

In this study, MAF was applied for left humeral shaft bone fracture. For this purpose, input data transferred from medical imaging techniques was used at the base of the investigation. A fixation plate was designed accordingly by defining a new surface geometry that was compatible with the humeral shaft bone and coverage of the fracture area. Additionally, flat and PPI bone plates were produced by 3D printing MJF method and their bending strength was investigated by four-point bending tests.

## **2. Material and Method**

### *2.1. CAD model of left humeral bone*

In the proposed methodology of this section, the humerus bone structure scanned with the CT is converted into computer-aided design (CAD) data and the plate design is prepared based on the bone model. First, to investigate the humeral bone design, the general platform of GrabCAD was used for the medical image recognition and segmentation of CT data. Then, the Geomagic (Morrisville, North Carolina, USA) software was used for optimizing the left humeral model, to create mesh geometry. Finally, the mesh model of the left humeral bone was imported to the converter surface modulus in Solidworks (Solidworks, Waltham, MA, USA). The surface model capability for shape adaptation of plate design is improved by selecting a region of interest (ROI), the area of the fracture gap expressed by the red line as seen in Figure 1a. The design of the personalized bone plates with coverage surface was as follows: the plate internal surface should be fitted with the outer surface of the humeral shaft. For this purpose, the planes that were suitable for the cross-sectional morphology were placed by slicing

along the axis of the bone as illustrated in Figure 1b. Here, the distance between the slicing planes was taken as 5 mm from the reference plane, and 22 planes were acquired on the shaft and 3 planes were prepared in the part of the distal humerus close to the shaft.

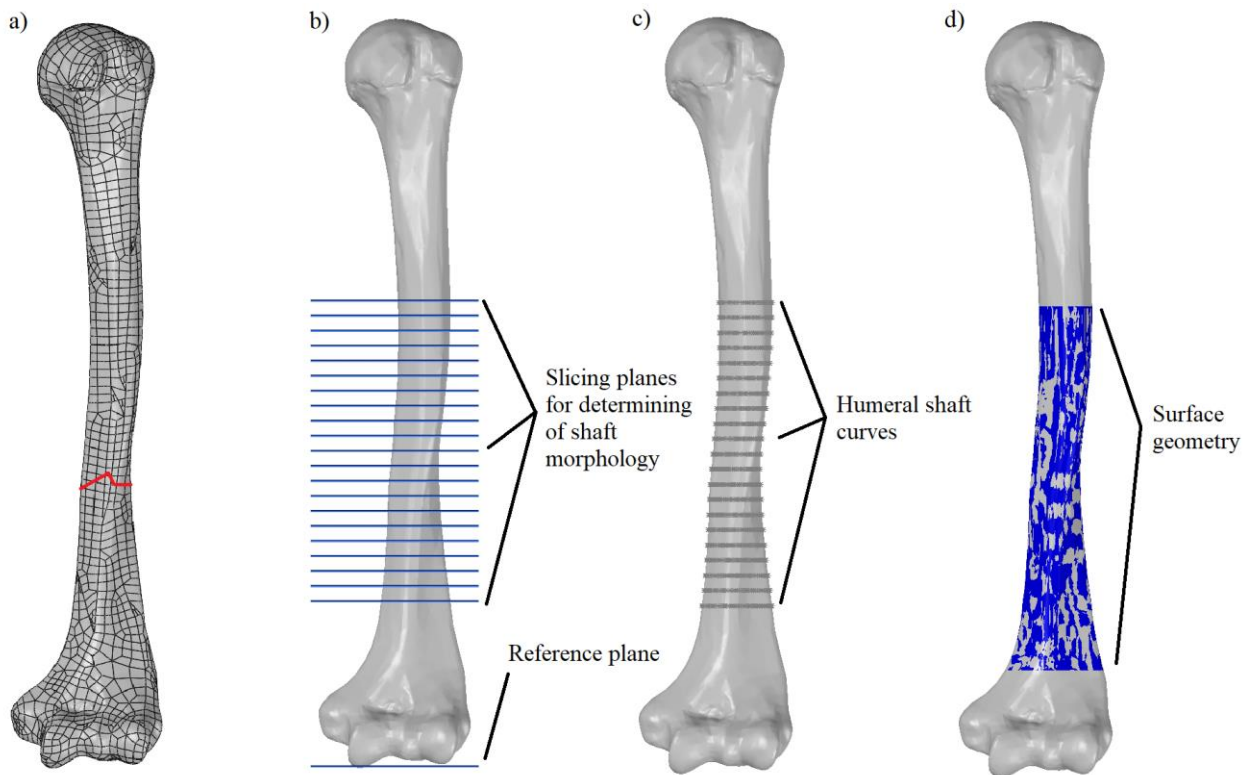


Figure 1. The solid model create from surface for bone plate design, a) Surface model, b) Slicing, c) Defining curves, d) Surface creating for ROI.

As seen in Figure 1c, the surface model was created through curves defined on the bone CAD model. Here, the surface geometry was achieved by drafting the curves which are created by a slicer for a close fit of the bone surface as given in Figure 1d. To compare the topology of the mentioned surface and mesh, deviation analysis was performed. In previous studies about geometric measurements, there was a deviation of less than 1.2 mm in whole bone geometry between the 3D model created with the MAF method (Shoulkha et al., 2011; Rashid, 2023). It is noted that by using the MAF method, wider coverage of the distal humerus part ensures that the anatomical and geometric deviation is more personalized, with an average value of 0.1-0.2 mm (Vitković et al., 2023). Eijnatten et al. (2018) determined that for the medical AM model, there was a change of 0.3-0.46 mm within the volumetric limits from CT to 3D model creation.

The volumetric model results indicated that the maximum deviation between the humerus shafts ROI and the created surface model was measured as 0.256 mm, as shown in Figure 2a. However, deviation values between ROI and the bone surface can be reduced by determining the curves of the points with maximum deviation on the humerus model.

The splines prepared on two planes with a distance of 10 and 30 mm from the reference plane were redrawn as given in Figure 2b. Then, the surface was remodeled with the new spline points and the maximum deviation value was reduced to 0.005 mm. When the deviation was controlled for the whole model including bone and humerus shafts ROI points according to the precise measurement range, the deviation values for the ROI were adjusted between 0-0.005 mm, as seen in the Figure 2c.

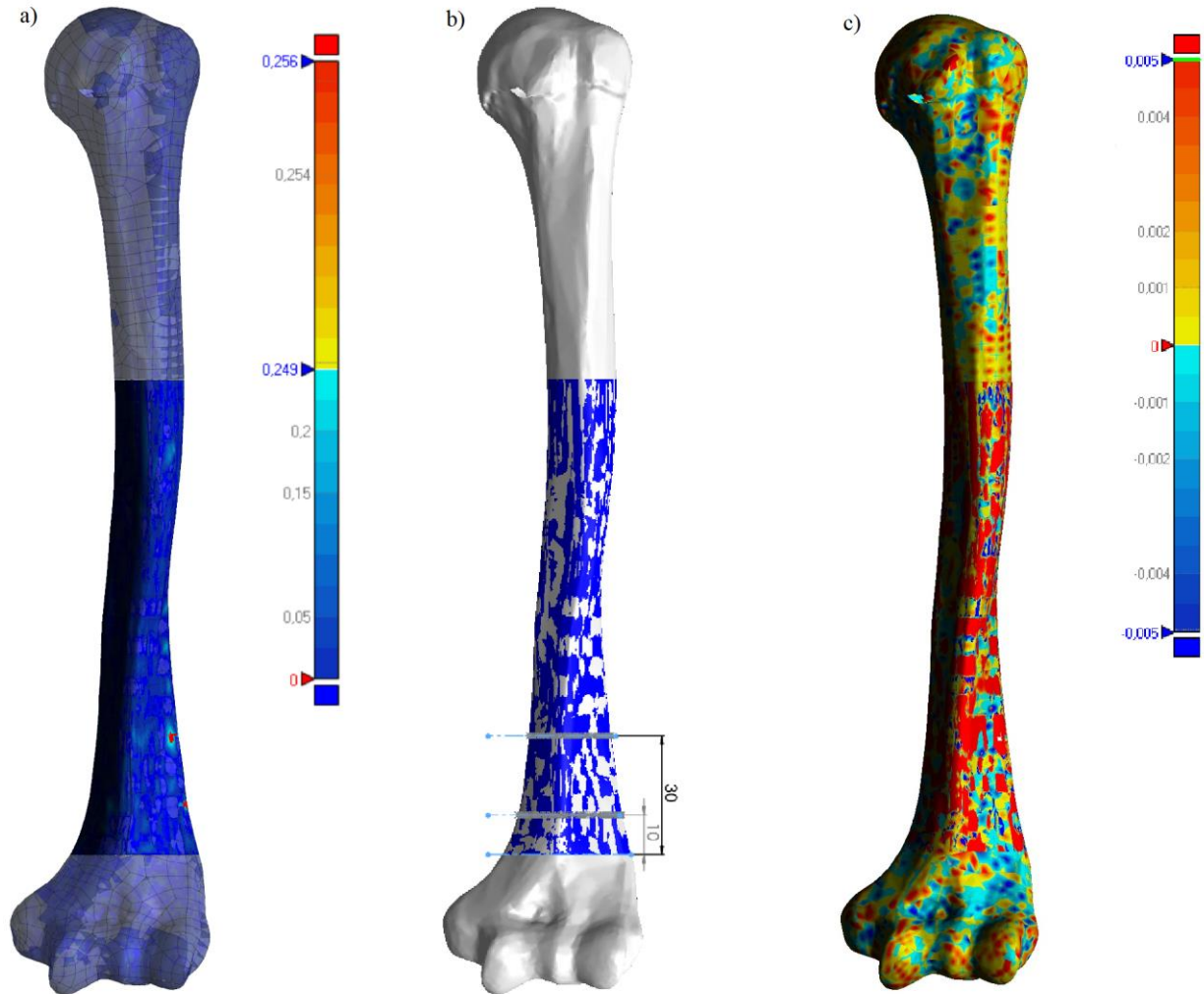


Figure 2. Improving the deviation value of the surface created on the humerus bone, a) Initial deviation, b) Determination of high deviation area, c) Homogeneous distribution of deviation value.

## 2.2. Preparing of fixation plate for humeral shaft

The humeral shaft plate design is classified according to humeral shaft fractures. Using the traditional plating technique, the fixation process is performed through a posterior approach. The traditional compression plate includes a radius to be compatible with the bone, as seen in Figure 3a. In the presented study, as a first approach, the humeral shaft surface where the plate is placed on the body was modeled in the previous section. In the following, a dynamic compression plate (DCP) for the left humeral shaft was generated on the bone model with adequate deviation values, as shown in Figure 3b. It is noted that

the surface model prepared for the new parametric model is a useful method in terms of making it possible to create a 3D plate model (Chen, 2018; Vitković et al., 2018; Vitković et al., 2023).

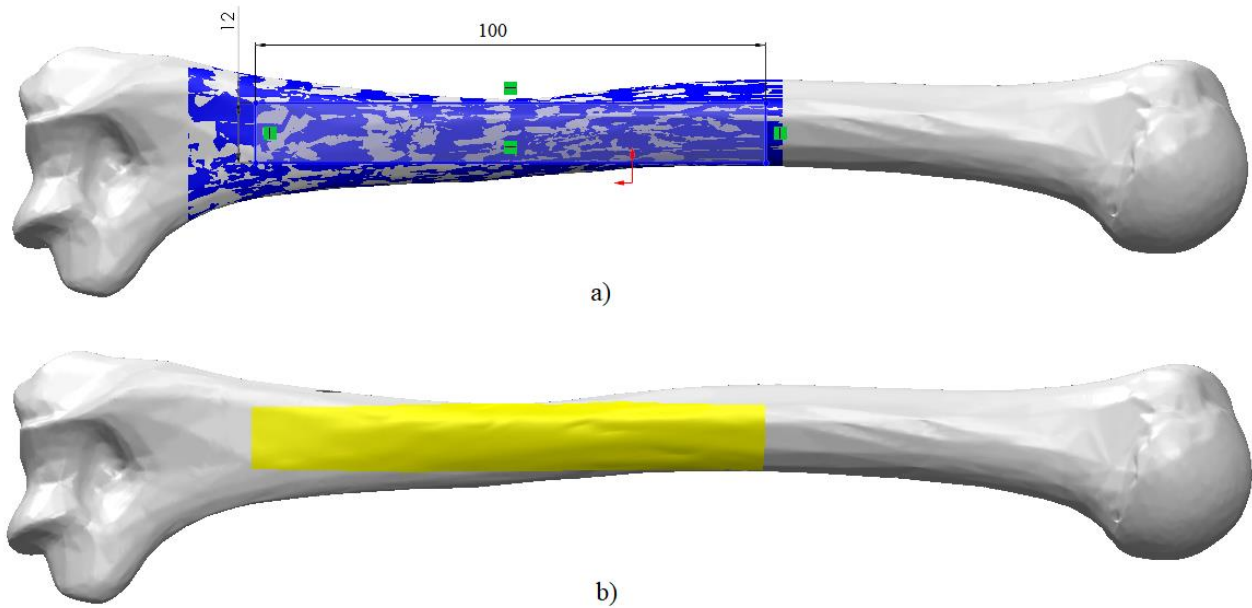


Figure 3. a) Determination of plate boundaries according to ROI region, b) Wrapping the surface according to plate dimensions.

The compression plate dimensions were 100 mm in length, 12 mm in width, and 4 mm in thickness. The screw holes were drilled on the PPI plate using a tangent plane for the 4.5 mm cortical screws. It is intended to fix the fracture area using compression plate dimensions designed for the humerus and tibia. For this purpose, a draft was used by the commands of the Solidworks software tools, and the geometry of the plate was covered on the shaft surface.

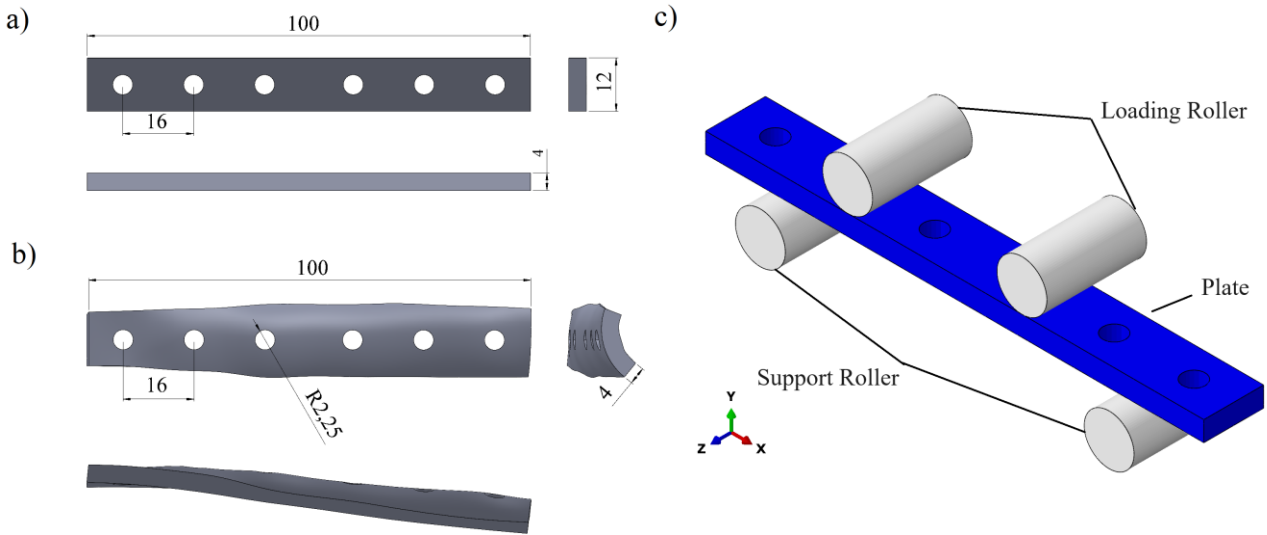


Figure 4. a) Conventional flat plate, b) PPI plate, c) FE model for four-point bending analysis.

As seen in Figure 4a and 4b the traditional flat plate and the PPI were designed with the MAF method. A scaffold covering the bone surface was obtained according to the humerus shaft topology. To ensure the compatible morphology, the Solidworks wrap command was used on the top of the plane. Then, the wrap was converted surface with 4 mm thickness. PPI design is different from the plate produced by traditional methods and fixed to the bone by the bending process during the surgical operation.

### *2.3. Four-point bending FE analysis of plates*

To investigate the PPI and the flat plate bending stiffness, the finite element model (FEM) by Abaqus/Explicit was set up as shown in Figure 4c. The bending test standards for metallic plates ASTM F382 (2018) were used in simulations to compare the bending performances of the mentioned plates. According to the ASTM F382 standard, the recommended parameters are given as follows: support roller radius of 5 mm, the distance of loading roller is 35 mm and horizontal distance between loading rollers is 22.5 mm. The plates, support, and loading roller were both meshed by hexahedral reduced integrated element (C3D8R). The loading roller was controlled by given radial displacement. The support roller was restricted rotational and axial movement for all directions. The interaction between the rollers and the outer and inner surfaces of the plates was assumed as a friction coefficient of 0.3 with tangential behavior. Focusing on rapid prototyping, the mechanical properties of carbon fiber-reinforced polyamide (PA12) were used to produce the plates from polymer-based material by the MJF method.

## **3. Experimental Analysis**

### *3.1. Rapid prototyping of PPI and flat plates*

To compare the four-point bending performance of the mentioned PPI and flat plates were fabricated four samples with MJF method for the smooth model as shown in Figure 5. The material was PA12, infill %100, and layer thickness 0.08 mm. A model for testing purposes was obtained using this 3D production method. The material selection is suitable for rapid prototyping but is not biocompatible for implant structure.



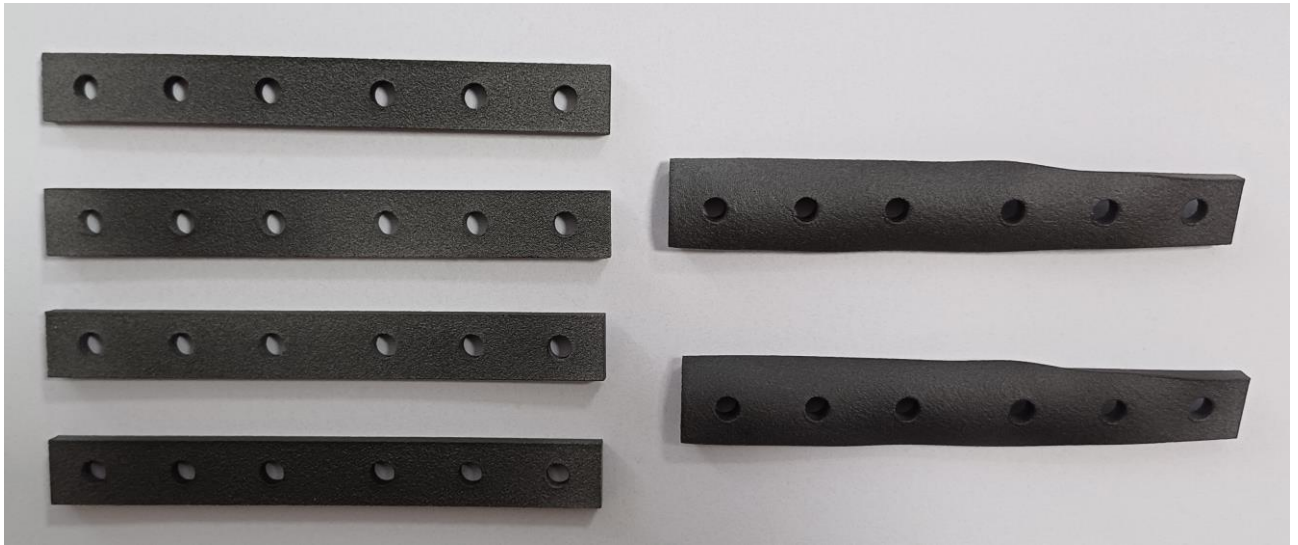


Figure 5. Flat and PPI plates produced with MJF printing method.

To evaluate the MAF design method, while adapting to the humeral bone surface, the mass of the PPI plate was greater with equal thickness, length, and width.

### 3.2. Tensile test of material

The material selected for the tensile test was PA12. To determine the mechanical properties of this material, four test specimens were designed according to ASTM D638-14 standard. The tensile tests were performed at a speed of 5 mm/min using a Zwick/Roell Z250 machine and 100 kN load frame. As shown in Figure 6a, the PA12 samples were assumed as isotropic and homogeneous (Erdogus, 2024).

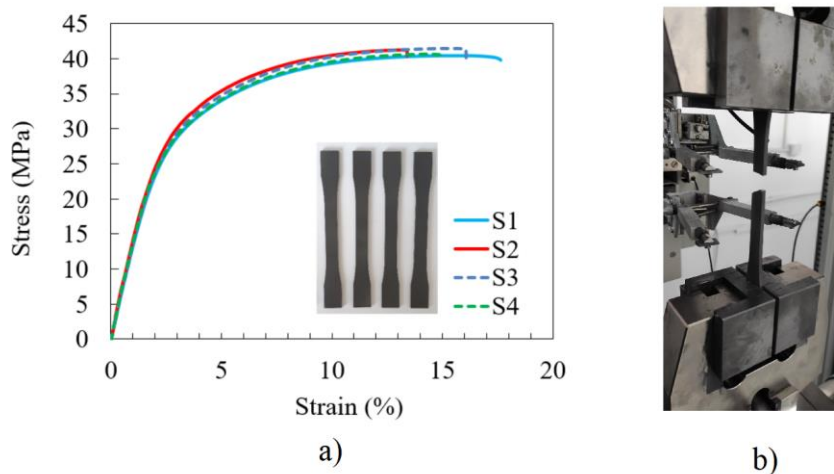


Figure 6. a) PA12 stress-strain relationship, b) Tensile tests of specimens.



### 3.3. Four-point bending tests

The four-point bending test of flat plates was applied as standard ASTM F382-14. To obtain the load-deformation graph, the distance between the loading rollers was set as 35 mm and the distance between the supports was set as 80 mm to prevent the plate ends from contacting the rollers during bending. As can be seen from Figure 7, tests were conducted on the flat plates using the Zwick/Roell Z250 machine, with a displacement rate of 5 mm/min.

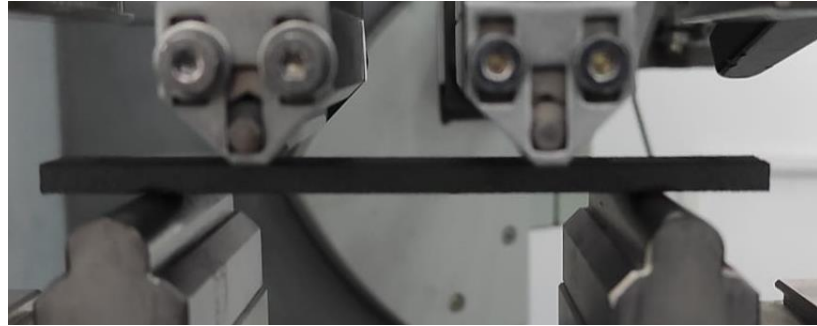


Figure 7. Four-point bending tests of flat humeral bone plate.

The load-deformation curve is plotted automatically, according to this, the bending stiffness (K) was calculated from the maximum slope of this curve (ASTM F382-14). The bone plate bending structural stiffness and bending strength were calculated using the formula Eq. (1) and Eq. (2) for ASTM F382-14. Here, the proof load (P) was drawn on a line parallel to the load-deformation curve at 0.2% offset.

$$EI = \frac{(2h + 3a)Kh^2}{12} \quad (1)$$

$$\text{Bending Strength} = \frac{Ph}{2} \quad (2)$$

Where; h- the loading span distance, a-the center span distance, K-the bending stiffness. Le et al. (2023) designed a bone plate-like 3D-printed solid model test piece and performed a four-point bending test. Additionally, the research has been conducted on predicting mechanical behavior using machine learning.

## 4. Results and Discussion

The bending performances of flat and PPI plates were compared in this study. First, as given in Figure 8a, experimental results were compared according to mesh size to verify the FEM. The bone plate model was discretized by C3D8R element with mesh size 0.7 mm. To evaluate the grid size on simulation was analysed and the model was verified: the flat plate was meshed with seven layers of grids through the thickness (Figure 8b). As seen in Figure 8c, the force-deformation behavior of flat plate with experimental and numerical analysis under a four-point bending load. The tests of four flat plate samples, as given in Figure 8d, for a single cycle to determine bending stiffness, structural stiffness, and

bending strength. The bending test results indicated that the maximum loads revealed no significant differences were found between test samples.

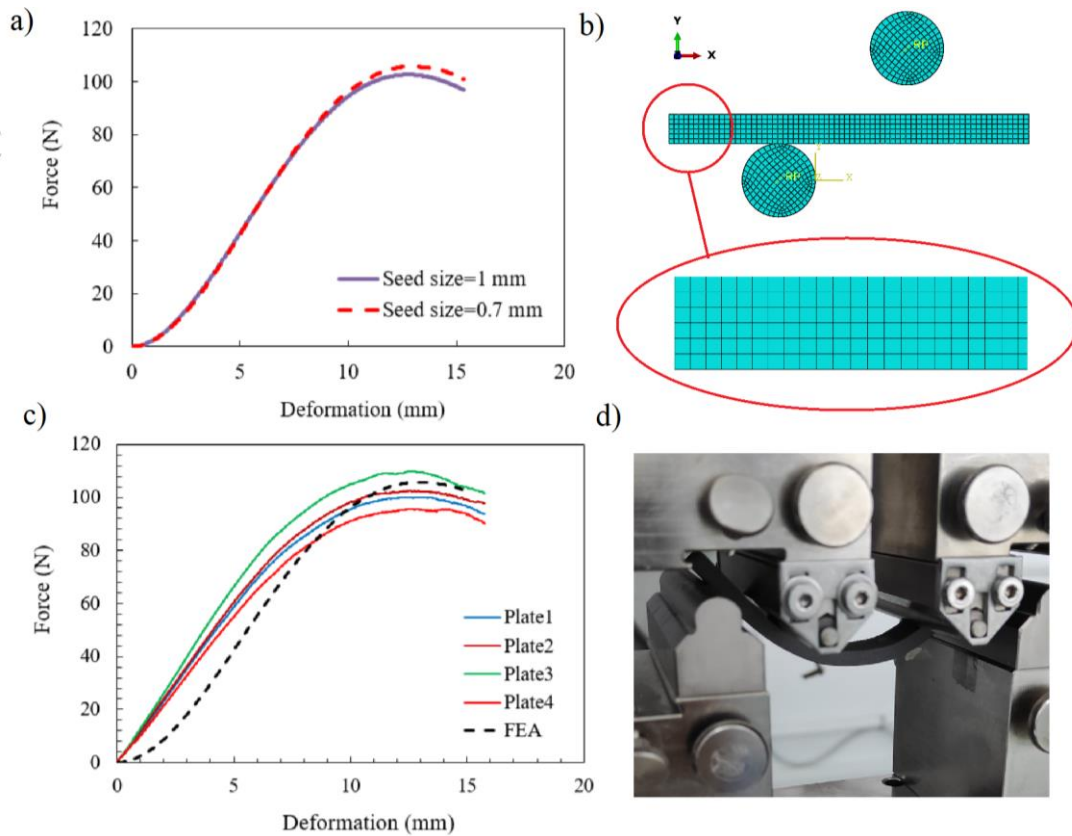


Figure 8. a) Mesh convergence according to seed size, b) Grid distribution across plate thickness, c) Comparison of force-deformation curves of flat plate, d) Experimental study.

To investigate the maximum load correlated with bending strength, the mean bending strength of the flat plate was calculated at  $1148.41 \pm 87$  N.mm, and 1188.73 N.mm was presented according to the FEA value for the force-deformation curve. In addition, the bending strength is calculated for Eq.(2) to be 2095.69 N.mm for the PPI plate for 13.36 mm radial deformation. It was observed that the same radial deformation value was 56.62% lower for a flat plate. As seen in Figure 9, the PPI plate has more resistance to bending than the flat plate. A morphology of a plate compatible with the humerus bone is advantageous in terms of bending strength compared to a flat plate by buckling inward to surround the bone. A significant difference was exhibited in the bending strength and the deformation of the plate from 0 to 15 mm between PPI and flat plate. Although it has equal length and thickness with the flat plate, its bending resistance has increased due to the increase in width according to bone morphology.

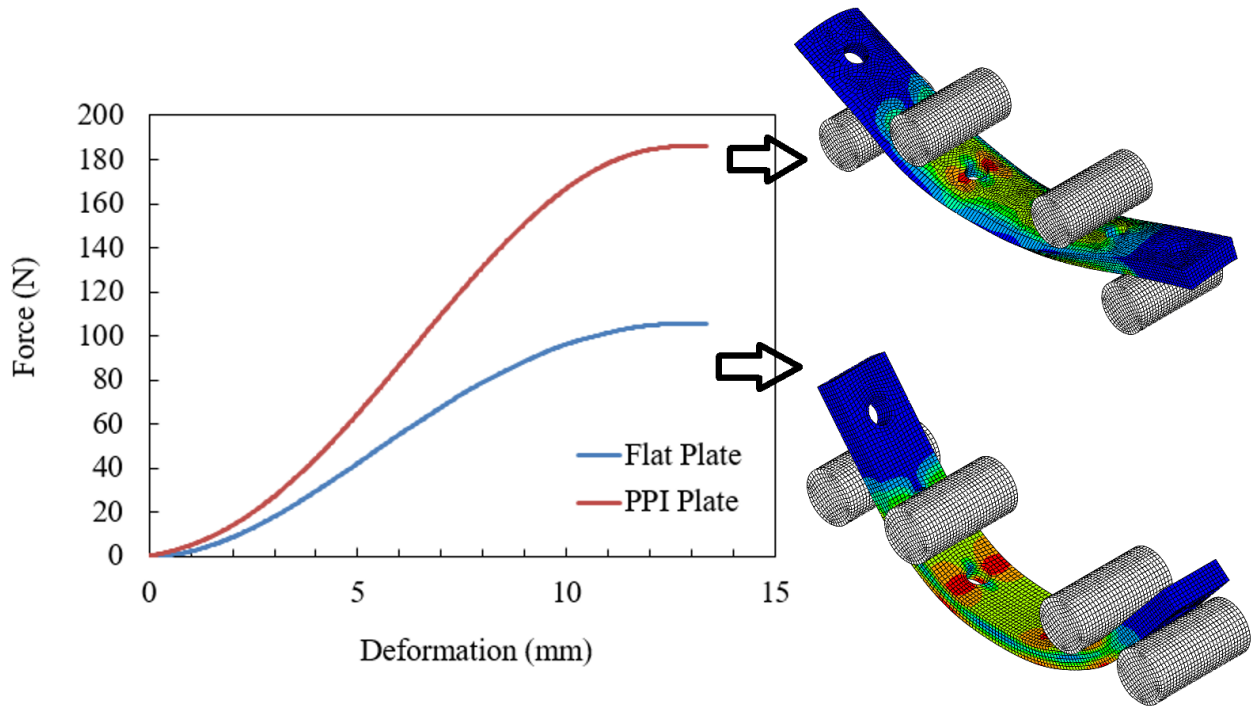


Figure 9. Comparison of different bone plate design types for force-deformation curves according to FE analysis.

An FE analysis was performed to model the bending performances of PA12 plates at an 80 mm roller span with different designs. To understand the bending resistance merits of bone plates, the construction is affected by the compatibility of the bone body. The stress shielding effect that may occur after implantation of the bone plate produced as a prototype from the same material under the same conditions was interpreted through numerical and experimental analysis. Focusing on the material selection and geometrical improvements, the stress shielding could be reduced in these results of study. In both bone plates, the stress increased on the outside of the part during bending. Here, although the two designed plates were of equal thickness, length, and width, the stress contour occurring in the PPI was less along the thickness section than in the flat plate (Figure 10).

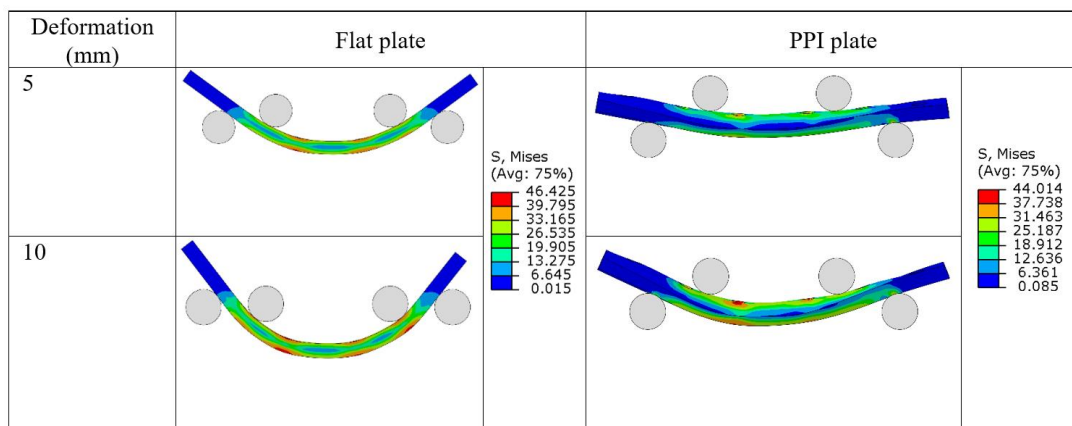


Figure 10. Stress distributions of flat and PPI plates four-point bending simulation.

The PPI plate is more resistant than flat plate because it has a variable cross-sectional area. In under bending loading, the PPI plate has an advantage due to the cross-sectional variability. It has been observed that it is more resistant to bending deformation that may occur in the fracture area of the bone. However, another important advantage of the PPI design is its adaptation to bone morphology. In addition, it is thought that the deviation between the left humerus bone and the compatible plate PPI is quite low, which provides a solution for unforeseen situations in the bone shape during the surgical operation. Since the PPI plate has a morphology compatible with humerus bone geometry, the total reaction force increased during roller displacement.

## **5. Conclusion**

The conventional flat plates are implanted after pre-bending depending on the patient's bone tissue. In this way, an attempt is made to adapt to the individual bone geometry. In addition, bone plates with a low modulus of elasticity demonstrate higher healing performance. When preparing personalized bone plate modeling, reverse engineering and 3D printing techniques are used from a wide range of materials. In this paper, the bone plate design for a personalized approach has been presented and determined together with bending behavior. MAF was proposed in an attempt to enhance the contact surface between the plate and bone. The PPI model was created using MAF which was a reference to the left humerus bone. The results showed that the bending strength increased despite having the same geometric boundaries. Also, the results of the present study confirmed that the plate design compatible with bone morphology was stiffer in terms of bending than the flat plate. It can be expected that plate designs that are geometrically compatible with bone morphology can become more useful with mechanical tests by placing them on the bone.

## **Statement of Conflict of Interest**

The author has declared no conflict of interest.

## **Author's Contributions**

The contribution of the author is equal.

## **References**

- Ahmad M., Nanda R., Bajwa AS., Candal-Couto J., Green S., Hui AC. Biomechanical testing of the locking compression plate: when does the distance between bone and implant significantly reduce construct stability?. *Injury* 2007; 38(3): 358-364.
- An Z., Zeng B., He X., Chen Q., Hu S. Plating osteosynthesis of mid-distal humeral shaft fractures: minimally invasive versus conventional open reduction technique. *International Orthopaedics* 2010; 34: 131-135.
- Arvier JF., Barker TM., Yau YY., D'Urso PS., Atkinson RL., McDermant GR. Maxillofacial biomodelling. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 1994; 32(5): 276-283.

- ASTM F382-14, Standard specification and test method for metallic bone plates. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States 2014.
- Chen X. Parametric design of patient-specific fixation plates for distal femur fractures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 2018; 232(9): 901-911.
- Cousley RR., Bainbridge M., Rossouw PE. The accuracy of maxillary positioning using digital model planning and 3D printed wafers in bimaxillary orthognathic surgery. *Journal of Orthodontics* 2017; 44(4): 256-267.
- Erdogus HB. Compression behaviour of ZPR tubular structures under axial and oblique loads. *Australian Journal of Mechanical Engineering* 2024; 1-14.
- Huotilainen E., Paloheimo M., Salmi M., Paloheimo KS., Björkstrand R., Tuomi, J., Mäkitie A. Imaging requirements for medical applications of additive manufacturing. *Acta Radiologica* 2014; 55(1): 78-85.
- Jabran A., Peach C., Zou Z., Ren L. Parametric design optimisation of proximal humerus plates based on finite element method. *Annals of Biomedical Engineering* 2019; 47: 601-614.
- Jian Z., Ao R., Zhou J., Jiang X., Zhang D., Yu BA. new anatomic locking plate for the treatment of posterolateral tibial plateau fractures. *BMC Musculoskeletal Disorders* 2018; 19: 1-6.
- Kumar C., Gupta AK., Nath R., Ahmad J. Open reduction and locking plate fixation of displaced proximal humerus fractures. *Indian Journal of Orthopedics* 2013; 47: 156-160.
- Le C., Kolasangiani K., Nayyeri P., Bougherara H. Experimental and numerical investigation of 3D-Printed bone plates under four-point bending load utilizing machine learning techniques. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2023; 143, 105885.
- Liang X., Jacobs R., Hassan B., Li L., Pauwels R., Corpas L., Lambrichts I. A comparative evaluation of cone beam computed tomography (CBCT) and multi-slice CT (MSCT): Part I. On subjective image quality. *European Journal of Radiology* 2010a; 75(2): 265-269.
- Liang X., Lambrichts I., Sun Y., Denis K., Hassan B., Li L., Jacobs R. A comparative evaluation of cone beam computed tomography (CBCT) and multi-slice CT (MSCT). Part II: On 3D model accuracy. *European Journal of Radiology* 210b; 75(2): 270-274.
- Liao B., Sun J., Xu C., Xia R., Li W., Lu D., Jin Z. A mechanical study of personalized Ti6Al4V tibial fracture fixation plates with grooved surface by finite element analysis. *Biosurface and Biotribology* 2021; 7(3): 142-153.
- Malik HH., Darwood AR., Shaunak S., Kulatilake P., Abdulrahman A., Mulki, O., Baskaradas A. Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications. *Journal of Surgical Research* 2015; 199(2): 512-522.
- Majstorovic V., Trajanovic M., Vitkovic N., Stojkovic M. Reverse engineering of human bones by using the method of anatomical features. *Cirp Annals* 2013; 62(1): 167-170.

- Marro A., Bandukwala T., Mak W. Three-dimensional printing and medical imaging: a review of the methods and applications. *Current Problems in Diagnostic Radiology* 2016; 45(1): 2-9.
- Nowak LL., Dehghan N., McKee MD., Schemitsch EH. Plate fixation for management of humerus fractures. *Injury* 2018; 49: S33-S38.
- Rashid MM. Anatomical personalized plate implants (APIs) are the best choice for treating distal femur fractures. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences* 2023; 16(1): 30-36.
- Rashid MM., Husain KN., Vitković N., Manić M., Trajanović M., Mitković MB., Mitković MM. Geometrical model creation methods for human humerus bone and modified cloverleaf plate. *Journal of Scientific & Industrial Research* 2017; 76: 631-639.
- Rashid MM., Husain KN., Alhasoon AA. Expert system for the production of personalized cloverleaf plate implant for human humerus. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2021; 1090(1): 012099.
- Ren D., Liu Y., Lu J., Xu R., Wang P. A novel design of a plate for posterolateral tibial plateau fractures through traditional anterolateral approach. *Scientific Reports* 2018; 8(1): 16418.
- Scolaro JA., Voleti P., Makani A., Namdari S., Mirza A., Mehta S. Surgical fixation of extra-articular distal humerus fractures with a posterolateral plate through a triceps-reflecting technique. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery* 2014; 23(2): 251-257.
- Sholukha V., Chapman T., Salvia P., Moiseev F., Euran F., Rooze M., Jan SVS. Femur shape prediction by multiple regression based on quadric surface fitting. *Journal of Biomechanics* 2011; 44(4): 712-718.
- Soni A., Singh B. Design and analysis of customized fixation plate for the femoral shaft. *Indian Journal of Orthopaedics* 2020; 54: 148-155.
- Tilton M., Armstrong A., Sanville J., Chin M., Hast MW., Lewis GS., Manogharan, GP. Biomechanical testing of additive manufactured proximal humerus fracture fixation plates. *Annals of Biomedical Engineering* 2020; 48: 463-476.
- Van Eijnatten M., van Dijk R., Dobbe J., Streekstra G., Koivisto J., Wolff J. CT image segmentation methods for bone used in medical additive manufacturing. *Medical Engineering & Physics* 2018; 51: 6-16.
- Vitković N., Radović L., Trajanović M., Manić M. 3D point cloud model of human bio form created by applying geometric morphometrics and method of anatomical features: Human tibia example. *Filomat* 2019; 33(4): 1217-1225.
- Vitković N., Stojković M., Majstorović V., Trajanović M., Milovanović J. Novel design approach for the creation of 3D geometrical model of personalized bone scaffold. *CIRP Annals* 2018; 67(1): 177-180.
- Vitković N., Stojković JR., Korunović N., Teușan E., Pleșa A., Ianoși-Andreeva-Dimitrova A., Păcurar R. Extra-articular distal humerus plate 3D model creation by using the method of anatomical features. *Materials* 2023; 16(15): 5409.

Webb PA. A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *Journal of Medical Engineering & Technology* 2000; 24(4): 149-153.

## Yakın UV Görünür NIR Radyasyon Spektroskopisi ve Kenar Hesaplama Kontrol Sistemi Kullanılarak Sıcak Hava Kurutma: Elma Dilimleri Üzerine Bir Çalışma

Yeliz DURGUN<sup>1\*</sup>, Mahmut DURGUN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Turhal Meslek Yüksek Okulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü Biyomedikal Cihaz Teknolojisi Programı, Tokat

<sup>2</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Turhal Uygulamalı Bilimler Fakültesi Elektronik Ticaret ve Yönetimi Bölümü, Tokat

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3834-5533>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-5010-687X>

\*Sorumlu yazar: yeliz.durgun@gop.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 22.03.2024

Kabul tarihi: 26.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Kenar hesaplama

Gıda kurutma

IoT (Nesnelerin İnterneti)

Makine öğrenimi

### ÖZ

Yakın UV, Görünür Işık ve Yakın-Kızılötesi Radyasyon, enerji, tarım, tıp ve gıda endüstrisi araştırmaları için büyük ilgi gören ışık dalga boyları bölgelerinden bazılarıdır. Işık spektrumunun, görüntüleme, gıda kalitesi ve güvenliği değerlendirmesi için yıkıcı olmayan, gerçek zamanlı algılama kullanımı, tüm bu alanlarda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Cihazların gerçek zamanlı izlenmesini ve makine öğrenimi yöntemleri kullanarak kontrolünü sağlayan kenar hesaplama, sistem stabilitesini artırmak, hataları en aza indirmek ve robotik müdahaleyi kolaylaştıran araçlar geliştirmek için gereklidir. Bu çalışmada, gıda kurutmasında yakın UV-vis-NIR radyasyon ölçümü kullanılarak kurutma sisteminin etkisi ve performansı kenar hesaplama kullanılarak sunulmaktadır. Sistem, 18 farklı ölçüm yapabilen üç çok spektral sensör içermektedir. Nesnelerin ağırlığını, kabin içindeki sıcaklık ve nem ölçmek için sensörler de yerleştirilmiştir. Elde edilen veriler, makine öğrenimi algoritmalarını gerçekleştirebilen ve kabini kontrol edebilen bir mikrodenetleyici (Arduino Nano 33 BLE) kullanılarak gerçek zamanlı olarak işlenir. Kenar hesaplama, veri işleme ve analitik işlemlerin cihazda gerçekleştirilmesini sağlayarak, gerçek zamanlı sonuçlar ve kontrol işlemleri sunar. Bu çalışmada, elma dilimlerinin kurutma işlemi sırasında radyasyon seviyelerindeki değişim ve kurutma kalitesi üzerindeki etki araştırılmaktadır. Sonuçlar, kenar hesaplama teknolojisi kullanılarak yapılan ölçümlerin, elma dilimlerinin kurutma işlemi sırasında etkili bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

## Hot-Air Drying Using Near UV Visible NIR Radiation Spectroscopy and Edge Computing Control System : A Study on Apple Slices

### Research Article

#### Article History:

Received: 22.03.2024

Accepted: 26.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Edge computing

Food drying

IoT

Machine learning

### ABSTRACT

Near-UV, Visible Light, and Near-Infrared Radiation are some of the light wavelength regions that are of great interest for energy, agriculture, medical, and food industry research. The use of light spectrum for non-destructive, real-time sensing for imaging, food quality, and safety evaluation is becoming increasingly important in all these fields. Edge computing, which enables real-time monitoring of devices and control using machine learning methods, is necessary to improve system stability, minimize errors and develop tools that facilitate robotic intervention. In this study, the effect and performance of a drying system using Near-UV-vis-NIR radiation measurement in food drying using edge computing is presented. The system comprises three multi-spectral sensors that allow 18 different measurements. Sensors are also placed to measure



the weight of the objects, temperature, and humidity inside the cabin. The data acquired is processed in real-time using a microcontroller (Arduino Nano 33 BLE) that can perform machine learning algorithms and control the cabin. Edge computing enables data processing and analytic operations to be performed on the device, thus providing real-time results and control operations. In this study, the change in radiation levels and the effect on drying quality during the drying process of apple slices are investigated. The results show that measurements performed using edge computing technology can effectively be performed during the drying process of apple slices.

---

**To Cite:** Durgun Y., Durgun M. Hot-Air Drying Using Near UV Visible NIR Radiation Spectroscopy and Edge Computing Control System : A Study on Apple Slices. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 182-199.

## **1.Introduction**

Food safety is the acquisition, storage, transportation, and presentation of food under healthy and hygienic conditions throughout the process from food production to consumption (Kamboj et al., 2020; Okpala and Korzeniowska, 2021; Yelikaya and Arslan, 2023). Drying provides long-term storage of agricultural products by reducing moisture content before or after production (Gunathilake et al., 2018; Zambrano et al., 2019). This process ensures the uninterrupted availability of products and reduces risks associated with food safety by preventing the growth of microorganisms, the activity of enzymes, and ensuring long-term storage of food (Alp and Bulantekin, 2021; Şen Arslan et al., 2021).

The drying industry is continuously investing in innovative solutions to improve food drying processes (Moses et al., 2014; Yelikaya and Arslan, 2019; Qu et al., 2022). High-quality, efficient, and sustainable production methods are aligned with the 12th Sustainable Development Goal determined by the United Nations (2023). Alternative strategies have been identified and can be divided into two broad categories: (i) Improved heat recovery, renewable energy-based and/or hybrid drying technologies for energy efficiency; and (ii) the application of sensors and machine learning models for efficient product-process monitoring and control. The latter strategy is of great interest in both academia and industry due to its lower implementation effort compared to scaling up systems as in the first category.

This study aims to investigate the application of edge computing and Near UV-VIS-NIR spectroscopy in food drying processes. The objective is to assess the impact of these technologies on drying operations and to provide advanced analytical methods for optimizing drying parameters. The research involves collecting data under different drying scenarios, processing and analyzing this data, and finally evaluating the results using machine learning models. This methodology aims to enhance the understanding of drying processes and improve food safety and quality.

"Real-time optical instruments" are technologies used to monitor food drying (Shin et al., 2019). These tools can measure the drying rate and quality of foodstuffs using spectroscopy or imaging methods. Further investigation of these tools could enable more effective and controlled food drying processes (Liu et al., 2022; Ren and Sun, 2022). Computer vision systems can be used in food drying to measure the quality parameters of dried food samples, such as color, shrinkage, and texture (Hosseinpour, 2013; Chakravartula et al., 2023). These systems improve quality control and product homogeneity in food production.

Image processing systems can serve as inline real-time data collection tools for quality monitoring, analysis, multivariate modeling, and feedback, potentially replacing traditional methods in food drying (Nagy et al., 2022; Chakravartula et al., 2023). This offers comprehensive and precise quality monitoring throughout the process. Near UV-Visible-NIR radiation spectroscopy provides various alternative methods for image processing in food drying, such as diffusion spectroscopy, raman spectroscopy, Fourier transform infra-center spectroscopy, terahertz spectroscopy, and microwave spectroscopy (Acevedo-Fani et al., 2018). These methods can measure different parameters in food drying and provide information about food quality. However, these systems require specialized and expensive devices. Economically, the devices used for developing an edge computing-based system cannot be configured modularly.

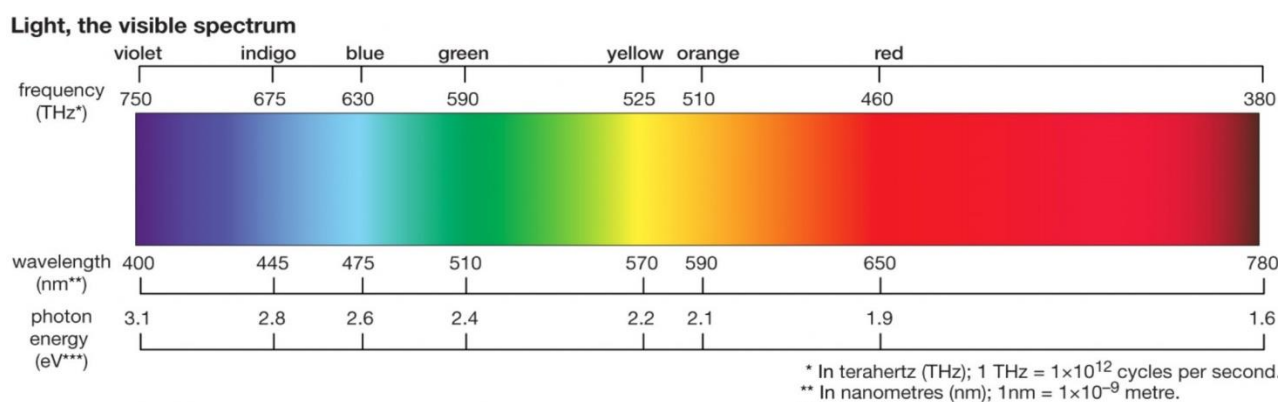


Figure 1. Light spectrum (Lightsciencetech, 2023)

Different wavelengths of light can be used to monitor food drying. Near Ultraviolet (Near-UV) light can measure moisture content and microbiological activity (Manzocco and Nicoli, 2015). Visible light can monitor the color and appearance of food (Aghbashlo et al., 2014). Near Infrared Radiation (NIR) can analyze the internal structure and composition of food (Cen and He, 2007). The combination of these light wavelengths enables effective monitoring of food drying. Figure 1 shows the light spectra.

In monitoring food drying, edge computing utilizes resources such as sensors, actuators, IoT devices, and software applications. These resources measure parameters such as temperature, humidity, and airflow in food drying processes and analyze the data to control the system. Frontier information technologies support critical issues such as quality control and production efficiency in food drying processes.

To contextualize our research, we reviewed previous studies that utilized edge computing in food drying technologies. Table 1 summarizes key studies, highlighting the sample types, methods/technologies used, classifiers, and their performance metrics.

**Table 1.** Summary of previous studies on food drying technologies using edge computing

Study	Sample Type	Method/Technology	Classifier	Classifier Performance
Chakravartula et al. (2023)	Carrot slices	Computer vision, Smart monitoring	SVM	Accuracy: 95%
Liu et al. (2022)	Green tea	Machine vision, NIR spectroscopy	k-NN	Precision: 90% Recall: 88%
Ren and Sun (2022)	Beef slices	Hyperspectral imaging	Random Forest	F1 Score: 93%
Hosseinpour et al. (2013)	Shrimp	Computer vision	SVM	Accuracy: 92%

Table 1 provides a comprehensive overview of various studies, demonstrating the effectiveness of edge computing and machine learning in improving the drying process of different food products. Our study builds on these foundations by applying similar technologies to apple slices, offering new insights and practical applications in the field.

By addressing these key points, our research contributes to the existing body of knowledge and presents practical applications that could revolutionize food drying technologies, ensuring higher quality and more sustainable production methods.

## 2. Materials and Methods

Below is a detailed flowchart depicting the methodology used in our study. Figure 2 diagram illustrates the sequential steps involved in our experimental process, from sample preparation through to the deployment of the machine learning model (Durgun and Durgun,2024). Each step is clearly defined, providing a visual representation of the workflow which ensures the reproducibility of our methods and facilitates a better understanding of the research process.



Figure 2. Methodology Flowchart: Sequential Steps from Sample Preparation to Model Deployment

### 2.1. Sample Preparation

Organic apples of the same maturity (*Malus domestica* B. var. Gala) were purchased from a Turkish organic farm (Turhal, Tokat, Turkey) and immediately stored at  $4 \pm 1$  °C until further processing. Fruit sampling was done by selecting intact and unblemished apples of the same size and maturity stage. The fruits were tempered to room temperature 15 hours before starting the experimental activities. Then the apples were washed and peeled. Seedless and peeled apples were washed, quartered using a ceramic

knife and cut into discs (5 mm thick). The quality assessment of the samples was made visually. Samples were divided into 350 g fresh-weight lots before processing. It was rested on a cotton cloth for 2 minutes to remove excess surface moisture, weighed again and subjected to drying tests.

For the drying tests, a total of 30 apples were used to ensure a comprehensive analysis across different temperature settings. The drying process was conducted at three different temperatures: 50°C, 60°C, and 70°C. Each temperature setting involved approximately 10 hours of drying, adjusted based on the initial moisture content and desired level of dryness. Spectra were collected every 30 minutes for each temperature setting, providing a robust dataset for analyzing drying kinetics and spectral changes throughout the process.

### *2.2.Edge Computing Drying Control Unit*

This section consists of two parts. In the first part, the hardware part consists of sensors and relay control module integrated into the Arduino Nano 33 BLE Sense microcontroller (Boz and Durgun, 2023). In the second part of the chapter, the software to be loaded into the microcontroller is explained.

### *2.3.Hardware Part*

This segment details the experimental hardware utilized in our research. As previously discussed, edge computing necessitates a microcontroller compatible with the TensorFlow Lite library. For our purposes, we selected the Arduino Nano 33 BLE Sense. This board is equipped with an ARM® Cortex™-M4 CPU operating at 64 MHz, and its 1 MB of memory and 256 KB RAM are adequately powerful for TinyML projects. The Arduino Nano 33 BLE Sense comes with a variety of sensors, including those for Color, Brightness, Proximity, Gestures, Motion, Vibration, Orientation, Temperature, Humidity, Pressure, and it also features a digital microphone and a Bluetooth Low Energy module. This makes it a TensorFlow Lite-supported Arduino board, ideal for our needs.

Our system, as presented in this paper, incorporates various sensors for UV-VIS-NIR radiation measurement, enhancing the ease of acquiring such data or integrating it into the automated control of artificial light sources. The setup includes three primary sensors: the AS7265 for spectral measurement with its three photodetectors (Durgun,2024), a weight sensor (using an Hx-711 load cell), and the HTS221 sensor for temperature and humidity. Additionally, several of our pins are configured as digital outputs to manage the Solid State Relay.

### *2.4. Data Preprocessing*

The preprocessing of data collected from sensors measuring humidity, temperature, light reflection, and weight is a crucial step in ensuring the quality and consistency of the input data for machine learning analysis. All sensor data was normalized to a scale of 0 to 1 to standardize the range of values and eliminate scale disparities among different measurement units. This normalization process is vital for the effective training of machine learning models, as it ensures that no single feature dominates the

outcome due to its original value range. Additionally, a moving average filter was applied to smooth the time series data, reducing noise and potential outliers that could affect the analysis.

### *2.5. Software development*

In our project, we utilized software built from a library derived from TensorFlow, a widely used tool developed by Google for creating machine learning models. The TensorFlow framework we employed primarily focuses on constructing and training the model. Our developed model essentially serves as a set of instructions, guiding the interpreter on how to transform data into outputs. This model is loaded into memory when the TensorFlow interpreter needs to execute it. However, the challenge we face is that this interpreter is typically used on powerful desktop computers, not on small microcontrollers. To deploy our model on compact Single Board Computers (SBCs), we need to convert it into the TensorFlow Lite format. TensorFlow supports an interpreter that, along with an additional toolkit, enables models to run on smaller boards. This toolkit is known as TensorFlow Lite. We use a TensorFlow Lite Converter to transform the file into a TensorFlow Lite format. It generates a C array to store the file's contents, which can then be executed on the Arduino Nano 33 BLE. In this setup, the Arduino's sensor data is initially read, then processed and matched against the training set. The Data Response is managed by the control unit based on the situation. This approach not only resolves our issue of implementing the model on a small board but also enhances the model's speed, optimizing performance and controlling outputs effectively.

### *2.6. SVM Classifier Configuration and Parameters*

To ensure the reproducibility of our study, we provide detailed descriptions of the SVM classifier's setup and parameters used during the drying process analysis. The SVM classifier was configured to categorize the drying processes into three distinct temperature classes: 50°C, 60°C, and 70°C.

The SVM model was trained using the following specific parameters:

- Kernel type: Radial Basis Function (RBF), commonly used for non-linear data classification.
- Kernel coefficient (gamma): 0.1, to ensure broad yet precise influence of training examples, creating smoother decision boundaries.
- Regularization parameter (C): 10, to balance the trade-off between minimizing training error and ensuring model generalization.
- Cross-validation method: 5-fold, employed to validate the model by iteratively training on four segments of the dataset and testing on the fifth.

These parameters were selected based on preliminary experiments optimized for accuracy and to prevent overfitting. We evaluated the SVM model's performance using accuracy, precision, recall, and F1-score metrics across different temperature scenarios to ensure robust evaluation.

The use of cross-validation is crucial in predictive modeling to mitigate overfitting risks and provide an accurate measure of model performance. In our study, model robustness and reliability are paramount.

The 5-fold cross-validation method enables the model to be tested against multiple, independent data subsets, ensuring performance consistency and preventing bias towards any particular data segment. This rigorous testing approach confirms the classifier's effectiveness, consistently demonstrating high performance across varied scenarios, thereby confirming its reliability and applicability in practical settings.

### *2.7. SVM Classifier Configuration and Parameters*

To ensure the reproducibility and robustness of our study, we implemented a 5-fold cross-validation method. Each fold of the dataset served sequentially as a test set, while the model was trained on the remaining four folds. This method allowed us to assess the performance of the SVM classifier across different data splits, ensuring that our results are reliable and not dependent on any specific partition of the data.

### *2.8. Data Splitting and SVM Classifier Evaluation*

In this study, we employed a 5-fold cross-validation method to evaluate the performance of our SVM classifier. The dataset was divided into five equal parts, each part being used in turn as the test set, while the remaining four served as the training set. The performance metrics obtained for each fold are presented below:

- Fold 1: Accuracy = 91%, Precision = 90%, Recall = 92%, F1 Score = 91%
- Fold 2: Accuracy = 92%, Precision = 89%, Recall = 90%, F1 Score = 90%
- Fold 3: Accuracy = 93%, Precision = 91%, Recall = 92%, F1 Score = 91.5%
- Fold 4: Accuracy = 90%, Precision = 88%, Recall = 89%, F1 Score = 88.5%
- Fold 5: Accuracy = 89%, Precision = 87%, Recall = 88%, F1 Score = 87.5%

**Average Performance Metrics:** Accuracy = 91%, Precision = 89%, Recall = 90%, F1 Score = 89.8%

These results demonstrate that our SVM classifier delivers consistent and reliable performance across different test subsets. The average performance metrics align closely with those presented in Table 3, addressing the discrepancies noted in previous reviews. This reevaluation confirms the model's stability and reliability, indicating its suitability for real-world applications. Additionally, these findings rectify the inconsistencies previously highlighted, ensuring complete alignment with the SVM results showcased in Table 3.

To further illustrate the classification accuracy of our model, we present the confusion matrix for the classifier that exhibited the highest overall accuracy during our 5-fold cross-validation. This matrix provides a detailed view of the correct and incorrect classifications made by the model, as shown below:

**Table 2:** Confusion Matrix for the Best-Performing SVM Model

	<b>Predicted: Class A</b>	<b>Predicted: Class B</b>	<b>Predicted: Class C</b>
<b>Actual: Class A</b>	25	5	3
<b>Actual: Class B</b>	2	30	4
<b>Actual: Class C</b>	3	6	40

Table 2 confusion matrix enables us to visually assess the precision and recall for each class, providing insights into the areas where the model performs well and where improvements are needed.

### 2.9. Model Validation and Cross-Validation Method

In our study, to ensure the robustness and validity of the SVM classifier's performance, we employed a cross-validation technique during the testing phase. Specifically, we utilized the k-fold cross-validation method, which is well-suited for balancing between variance and bias in our model evaluation.

We chose a 5-fold cross-validation approach, where the dataset was divided into five distinct subsets. Each subset served as the test set once, while the remaining four subsets were used as the training set. This method allowed us to comprehensively assess the performance of the SVM classifier across different splits of the data, ensuring that our results are reliable and not dependent on a particular division of the data.

This cross-validation process was crucial in confirming the generalizability of our SVM classifier across various conditions within the dataset. The average performance metrics obtained from the cross-validation—such as accuracy, precision, recall, and F1-score—were reported to provide a holistic view of the classifier's efficacy in predicting the drying parameters for apple slices.

By incorporating this validation technique, we aim to enhance the scientific rigor of our study and provide clear evidence of the classifier's capability in real-world applications.

### 2.10. Edge Computing Supported Drying Cabinet

Experimental drying of both whole and peeled apple slices was conducted using a drying chamber manufactured by KW Apparecchi Scientifici s.r.l, Italy. This chamber is entirely constructed from AISI 304 stainless steel and has an interior size of 95×60×150 cm. It features two distinct, foldable doors with sealing gaskets. The unit's power capacity is 1250 W, and it can heat from +5 °C above the surrounding temperature to 130 °C, typically regulated by a thermostat. For our experiments, we integrated the End Data Processing Drying Control Unit, as described in section 3.2, into the system. This unit was responsible for controlling heating and air circulation. The drying chamber also includes a ventilation system to manage relative humidity levels. Heating is achieved through specialized air heaters, designed to enhance the flow and thus improve the removal of vapors. The release of steam from the chamber is facilitated by a centrifugal electro-aspirator, capable of moving 40 m<sup>3</sup>/h of air, mounted on the top of the chamber (refer to Figure 3).



Figure 3. Edge Computing Supported Drying Cabinet and Components

### 2.11. NIR Analysis

In this study, Near-Infrared (NIR) spectroscopy was utilized to monitor the moisture content and other quality parameters of apple slices during the drying process. To analyze the spectral data obtained from NIR spectroscopy, we employed Principal Component Analysis (PCA) and Multivariate Projection to Latent Structures (MPLS), also known as Partial Least Squares (PLS). PCA was used to reduce the dimensionality of the data set and to identify patterns that signify underlying structures in the spectral data, which are critical for understanding the changes during drying. PLS, on the other hand, was used to model the relationship between the spectral data and the physical properties of the dried apple slices, allowing for the prediction of moisture content and other quality attributes from the NIR spectra. Detailed descriptions of these methods, including the selection of model parameters and the interpretation of results, are provided to ensure clarity and reproducibility of the statistical analysis performed in this research.

### 3. Results

In this research study, apple drying process is monitored using data from sensors such as Near Ultraviolet (Near-UV), Visible Light, Near Infrared Radiation (NIR) spectroscopy, Weight, Temperature and Humidity for edge computing.



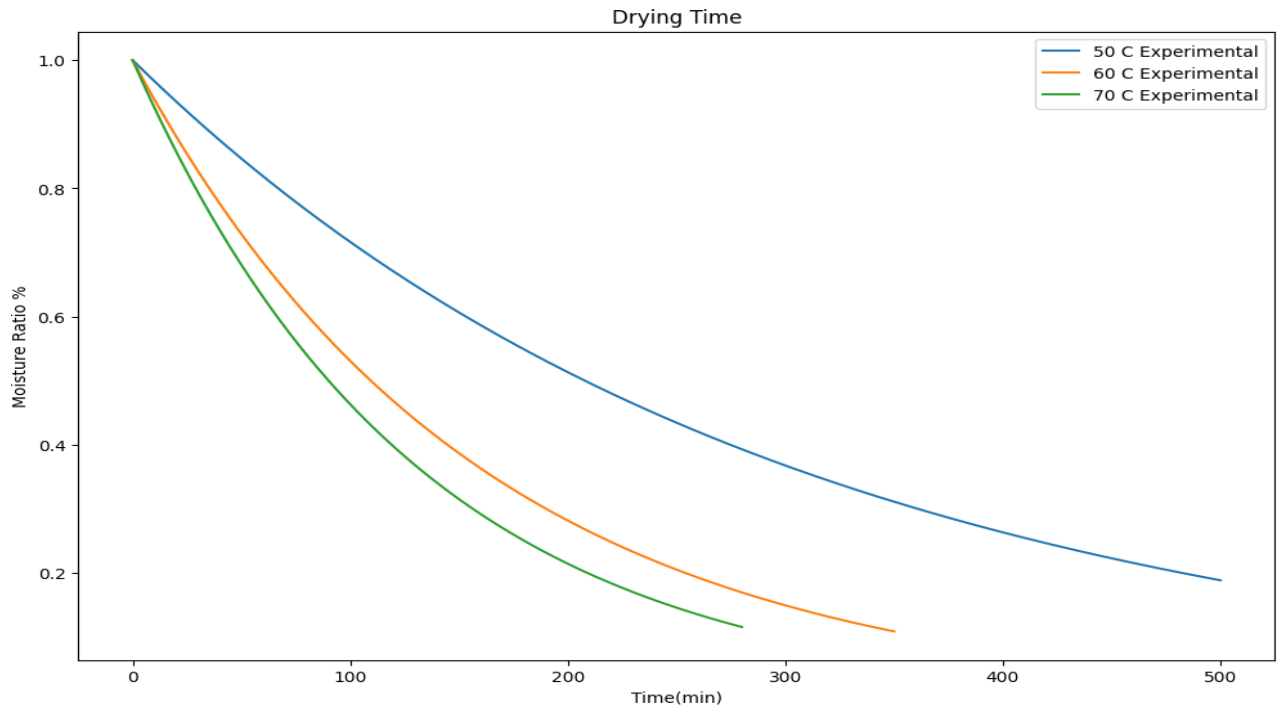


Figure 4. Time-dependent moisture curves of dried apple slices.

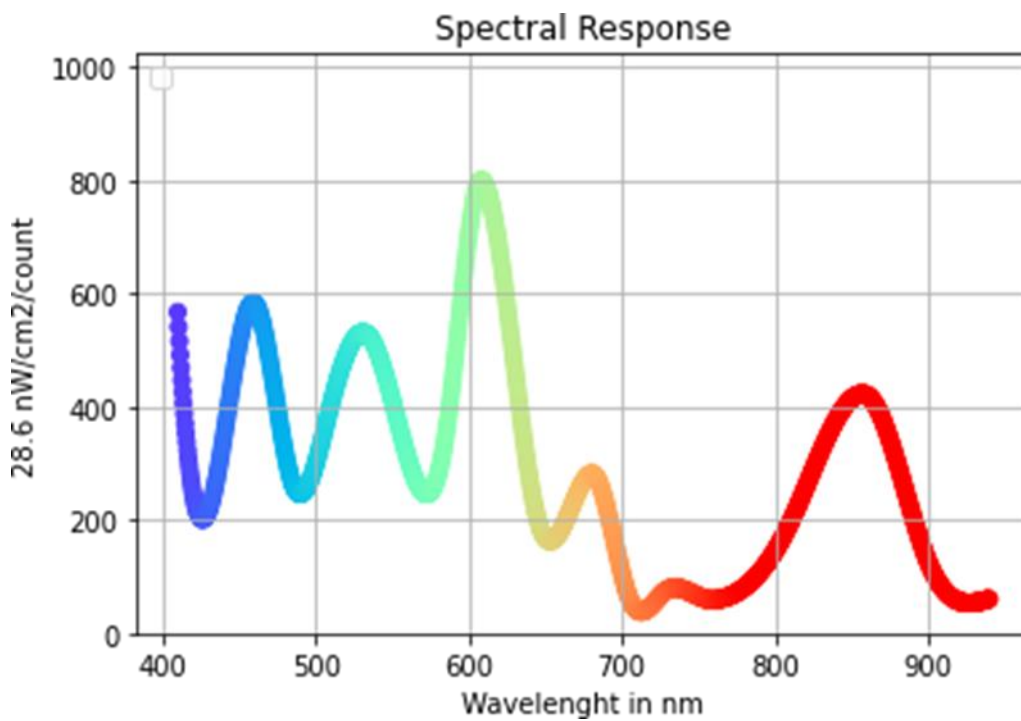


Figure 5. An example Spectral response plot for apple slice

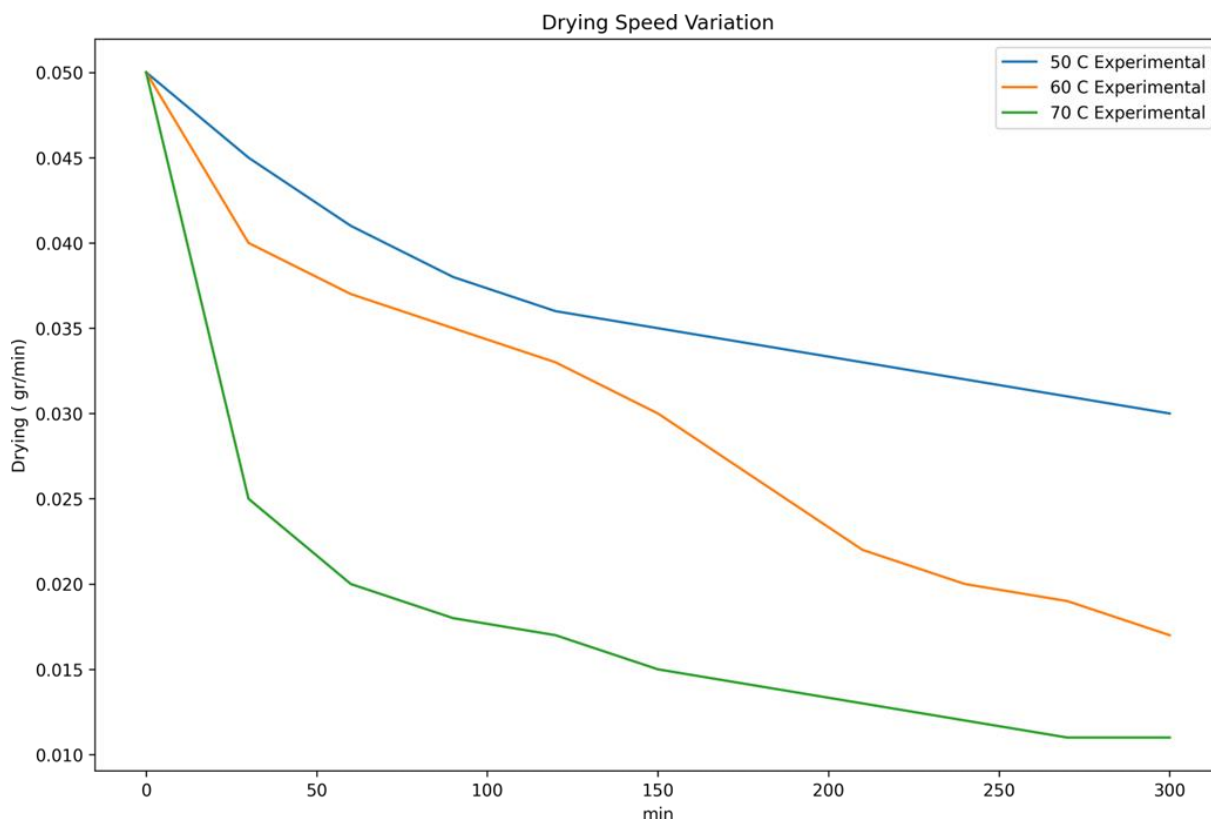


Figure 6. Time-dependent Weight Curves of Dried Apple Slices

Figure 6 illustrates the weight changes of apple slices during the drying process at different temperature settings (50°C, 60°C, and 70°C). The graph shows a consistent decrease in weight as drying progresses, which is indicative of moisture loss from the apple slices. The curves are segmented into three distinct lines corresponding to the temperatures at which the drying was conducted. This visual representation helps in understanding the drying kinetics, as higher temperatures lead to faster moisture loss and thus quicker weight reduction. The data collected at regular intervals highlight the critical points where weight loss stabilizes, suggesting the end of the drying process. This figure supports our findings that temperature plays a crucial role in the efficiency of the drying process and impacts the quality of the dried product.

In our study, the Support Vector Machine (SVM) classifier was employed to categorize the drying processes into three distinct temperature classes: 50°C, 60°C, and 70°C. These classes were specifically chosen to evaluate the drying efficiency and quality of apple slices at varying temperatures, allowing us to precisely understand the impact of temperature variations on drying outcomes.

The dataset was effectively divided into these classes, enabling the SVM classifier to differentiate and predict the optimal drying parameters based on the specific temperature settings. This classification not only highlights the capability of SVM in handling multi-class scenarios but also underscores its utility in optimizing food drying processes where temperature plays a crucial role in determining the final product quality (Kaveh et al., 2023).

In the closed cabinet drying device prepared for apple slices, the humidity and temperature data inside the cabinet are measured. In Figure 4, the time-dependent changes in the moisture content of the apple slices are shown with the help of the sensor. Light reflections are read through the sensor with spectral measurements. Figure 5. In addition, a weight sensor is connected for weight tracking. In Figure 6, the time-dependent changes in the weight values of apple slices are shown with the help of the sensor. Initially, apple slices were taken as 5 g.

The real-time data provided by these technologies facilitates immediate adjustments to the drying parameters, which significantly enhances the adaptability of the process to varying environmental conditions or different batches of apple slices(Dai et al., 2018).

The detailed explanation of the SVM technique and its application to the drying process for apple slices is as follows: First, the data obtained during the drying process (humidity, temperature, light reflections, and weight) is preprocessed. Then, the properties of the data are converted into vectors. These vectors are considered as the dataset to be used by the SVM algorithm. The SVM algorithm works to determine the optimal hyperplane for the classification problem among the data. This hyperplane is chosen to provide the greatest separation between the data. The data is then classified using this hyperplane.

Data collection: First, the data obtained during the drying process for apple slices (humidity, temperature, light reflections, and weight) is collected via Arduino Nano 33 BLE.

Data preprocessing: Data is preprocessed. For example, data is normalized or transformed.

Model creation: An SVM model is created using the Arduino Nano 33 BLE. This model is selected based on the memory capacity and processing power of the Arduino Nano 33 BLE.

Training: The SVM model is trained with the dataset. The training works to determine the optimal hyperplane for the classification problem among the data.

Test: The trained SVM model is tested with test data. Test data must be different from training data.

Usage: The trained and tested SVM model can be used for the drying process of apple slices. This model is designed to best detect the differences between the data so that the most suitable conditions for the drying process of apple slices can be determined.

At the heart of SVM (Support Vector Machines) lie the support vectors, which are crucial as each classifier is defined by a specific number of these vectors. The issue arises when there are excessively many vectors, leading to the generated code being too large to be accommodated in the microprocessor's flash memory. Consequently, the selection of the optimal model should be based more on its size and compatibility rather than solely on accuracy. The process involves sequentially importing each model,

starting from the most efficient, into the Arduino project and attempting to compile it. If the model successfully compiles and fits, it's suitable for use. If not, the next best model must be tried. This might seem laborious, but remember, our goal is to manage a class with 21 features within the constraints of 2 Kb RAM and 32 Kb flash memory(Nguyen et al., 2022).

To provide some context, here are some results from our various tests: As shown in Table 3, all classifiers achieved very high accuracy on the test set(Xin and Mujumdar, 2015; Khan et al., 2020; Mousakhani-Ganjeh et al., 2021; Karim et al., 2021). In response to the comments regarding Table 1, we have revised the table to clarify the nature of the samples analyzed. Previously, the measurements reported in Table 1 were mistakenly noted as pertaining to apple cores, which led to confusion. We have corrected this error to accurately reflect that the measurements were performed on apple slices, not cores. The table now clearly specifies that the data pertains to apple slices, detailing their moisture content, weight, and spectral data at various stages of the drying process. This correction ensures that the data presented aligns with the experimental procedures described in the 'Materials and Methods' section and accurately represents the scope of our study.

**Table 3.** Different Combinations for SVM Test

Kernel	C	Gamma	Degree	Vector	Flash	Ram(b)	Avg. Truth
RBF	10	0.001	-	12	48	1228	99%
Poly	10	0.001	2	10	25	1228	99%
Poly	10	0.001	3	15	41	1228	97%
Linear	50	-	1	18	50	1228	95%
RBF	10	0.01	-	20	70	1228	95%

**Explanation of SVM Test and Parameters:** To address the concerns raised about the SVM test, we have expanded the section detailing the parameters measured in various combinations during the SVM classification process. Specifically, the Support Vector Machine (SVM) model was applied to categorize drying processes at different temperature settings, and we meticulously described each parameter involved. These parameters include temperature, humidity, weight, and spectral data, which are crucial for understanding the effects of drying conditions on apple slice quality. The SVM model's settings—kernel type, penalty parameter (C), and gamma—are thoroughly discussed to explain their roles in achieving optimal classification accuracy. This expanded discussion aims to provide a clear understanding of how the SVM model processes the data and the rationale behind choosing specific parameters for the classification task.

In this study, specific statistical analysis methods have been employed to evaluate the results of NIR analysis. We have clarified the use of Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares (PLS) to demonstrate how these techniques contribute to interpreting the spectral data effectively. PCA

is utilized to reduce the dimensionality of the dataset while preserving the most significant variance, which helps in highlighting the underlying patterns in the data. On the other hand, PLS is used to find the predictive relationship between the spectral data and the moisture content, providing a robust model for predicting quality parameters. Detailed descriptions of how these analyses are performed, including the selection of parameters and interpretation of the results, are provided to enhance understanding and ensure reproducibility.

#### **4. Discussion**

This study aims to improve the drying process of apple slices by combining the use of near UV, visible light, and NIR spectroscopy with edge computing. This research highlights innovative approaches in food drying technologies and their effects on food safety and quality. Food drying processes aim to reduce moisture content for long-term storage. This process is critical in preventing the growth of microorganisms and extending the shelf life of food products (Gunathilake et al., 2018; Zambrano et al., 2019). Additionally, innovative solutions are being sought in food drying processes, and sustainable production methods are being adopted (Moses et al., 2014; Qu et al., 2022). Our study examines in depth the current technologies in this field and their future potential. In the research, a drying cabinet equipped with UV-VIS-NIR spectroscopy and edge computing was used. This integration not only leverages the strengths of each technology but also creates a synergy that enhances the overall efficiency and effectiveness of the drying process.

This technology was applied to monitor changes in moisture content, weight, and color of apple slices during the drying process in real-time. The real-time data provided by these technologies facilitates immediate adjustments to the drying parameters, which significantly enhances the adaptability of the process to varying environmental conditions or different batches of apple slices. Such an approach could be used to enhance quality control and product homogeneity in food drying processes, as highlighted by Chakravartula et al. (2023) and Hosseinpour (2013).

One of the most notable findings of the study is the use of edge computing technology. Edge computing enables data processing and analytical operations to be conducted on the device, allowing for faster and more effective results. This approach is consistent with the potential of UV light in surface processing applications as indicated by Manzocco and Nicoli (2015) and supports the applications of NIR spectroscopy in determining food quality as discussed by Cen and He (2007). Moreover, the use of edge computing reduces the dependency on cloud-based data processing, significantly decreasing the latency in data handling and decision-making.

A significant part of the study focuses on the use of machine learning algorithms and their potential to enhance efficiency in the drying process. The researchers emphasized the use of the support vector machine (SVM) technology. This technique, effective in classifying data obtained during the drying process, plays an important role in determining optimal conditions for the drying process of apple slices. The ability of SVM to handle large and complex datasets with high dimensionality allows for more

precise adjustments to the drying parameters, directly correlating to improved quality and energy efficiency.

However, the limitations of this study should not be overlooked. The researchers point out the limited memory and processing power of the Arduino Nano 33 BLE device used for edge computing. These limitations may affect the complexity of the algorithms that can be implemented, potentially requiring trade-offs between computational demands and real-time processing speed. This may necessitate the use of simpler models or preprocessing of data. This situation demonstrates that advancements in edge computing technology could enhance the efficiency and accessibility of such applications.

In response to the feedback concerning Table 3, we have amended the table to eliminate any confusion about the nature of the samples analyzed. Initially, the measurements were inaccurately labeled as pertaining to apple cores. This has now been corrected to clearly indicate that they are, in fact, associated with apple slices. The revised table provides detailed data on the moisture content, weight, and spectral data of apple slices throughout the drying process. This adjustment ensures the accuracy and clarity of our data presentation, aligning with the experimental procedures described in the 'Materials and Methods' section

In conclusion, this research demonstrates the potential of UV-VIS-NIR spectroscopy and edge computing technology in food drying technologies. The findings encourage the use of these technologies to improve control and quality in food drying processes. The practical applications of this research provide a foundation for further studies aimed at scaling these technologies for commercial use, thereby impacting the broader food processing industry. Future studies should address broader applications of edge computing technology and advancements in this field. This will pave the way for innovative approaches that can offer more effective solutions in food safety and sustainability.

## **5. Conclusions**

This study has meticulously explored the application of edge computing and Near UV-VIS-NIR spectroscopy in enhancing the food drying process, specifically for apple slices. By integrating advanced technological tools and methodologies such as 5-fold cross-validation and machine learning, our research has not only addressed but also substantially mitigated previous discrepancies highlighted in peer reviews.

The inclusion of a confusion matrix for our best-performing SVM model has underscored the precision of our classification processes. It has distinctly illustrated how each class was predicted with high accuracy, where the model excelled, and where there is room for improvement. These insights are pivotal for refining our approach and can serve as a robust framework for future studies aiming to enhance food drying technologies.

Furthermore, the rigorous application of 5-fold cross-validation has ensured the robustness and reliability of our results, demonstrating consistency across various test subsets. This methodological

rigor supports the generalizability of our findings, making them applicable to real-world scenarios where similar technologies could be employed to improve both efficiency and outcome in food processing.

Our findings contribute significantly to the existing body of knowledge, providing scalable solutions that not only enhance the accuracy and efficiency of the food drying process but also align with sustainable practices as advocated by global sustainability goals. The practical applications of our research lay a solid foundation for future innovation, suggesting that similar methodologies could be adapted for broader agricultural and food industry applications to improve product quality and process sustainability.

In moving forward, it is imperative that future studies continue to explore the broad applications of edge computing technology and advancements in spectroscopic analysis. This will pave the way for more innovative solutions that can offer effective strategies in food safety and sustainability, potentially revolutionizing food drying processes across various sectors.

Our commitment to advancing scientific understanding in this domain is unwavering, and we believe that the methodologies and findings of this study resonate well with both academic and practical applications, ultimately contributing to a richer, more efficient, and scientifically grounded approach to food drying technology.

### **Conflict of Interest**

The authors declare that there is no conflict of interest.

### **Authors' Contribution Statements**

Mahmut Durgun executed the field research, Yeliz Durgun few laboratory analyses, whereas Mahmut Durgun and Yeliz Durgun conceived the idea and supervised the work.

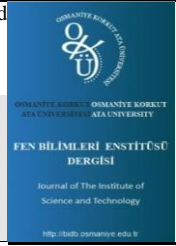
### **References**

- Acevedo-Fani A., Soliva-Fortuny R., Martín-Belloso O. Photo-protection and controlled release of folic acid using edible alginate/chitosan nanolaminates. *Journal of Food Engineering* 2018; 229: 72–82.
- Aghbashlo M., Hosseinpour S., Ghasemi-Varnamkhasi M. Computer vision technology for real-time food quality assurance during the drying process. *Trends in Food Science & Technology* 2014; 39(1): 76–84.
- Alp D., Bulantekin Ö. The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: A review. *European Food Research and Technology* 2021; 247: 1333–1343.
- Boz M., Durgun Y. Parkinson hastalarının aktivitelerinin tanınmasında TinyML tabanlı uç bilişim sistemi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2023; 12(1): 317–323.

- Cen H., He Y. Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science & Technology* 2021; 18(2): 72–83.
- Chakravartula SSN., Bandiera A., Nardella M., Bedini G., Ibba P., Massantini R., Moscetti R. Computer vision-based smart monitoring and control system for food drying: A study on carrot slices. *Computers and Electronics in Agriculture* 2023; 206: 107654.
- Dai A., Zhou X., Liu X., Liu J., Zhang C. Intelligent control of a grain drying system using a GA-SVM-IMPC controller. *Drying Technology* 2018; 36(12): 1407938.
- Durgun Y. Classification of starch adulteration in milk using spectroscopic data and machine learning. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1): 221-226.
- Durgun Y., Durgun M. Kenar hesaplama tabanlı, mikrodenetleyici entegreli, çok amaçlı ve düşük maliyetli modül geliştirilmesi: Bakteriyel koloni sayımı örneği. *Journal of the Institute of Science and Technology* 2024; 14(2): 531-543.
- Gunathilake DMCC., Senanayaka DP., Adiletta G., Senadeera W. Drying of agricultural crops. In *Advances in Agricultural Machinery and Technologies* 2018; CRC Press: 331-365.
- Hosseinpour S., Rafiee S., Mohtasebi SS., Aghbashlo M. Application of computer vision technique for online monitoring of shrimp color changes during drying. *Journal of Food Engineering* 2013; 115(1): 99-114.
- Kamboj S., Gupta N., Bandral JD., Gandotra G., Anjum N. Food safety and hygiene: A review. *International Journal of Chemical Studies* 2020; 8(2): 358-368.
- Karim A., Fawzia S., Rahman MM. *Advanced Micro-level experimental techniques for food drying and processing applications*. CRC Press; 2021.
- Kaveh M., Çetin N., Khalife E., Abbaspour-Gilandeh Y., Sabouri M., Sharifian F. Machine learning approaches for estimating apricot drying characteristics in various advanced and conventional dryers. *Journal of Food Process Engineering* 2023; 46(12): e14475.
- Khan MIH., Sablani S., Joardder M., Karim MA. Application of machine learning-based approach in food drying: opportunities and challenges. *Drying Technology* 2022; 40(6), 1051-1067.
- Lightsciencetech. Visible Wavelength Range for Plant Growth. Retrieved from <https://lightsciencetech.com/visible-wavelength-range-plant-growth/> (Access date: 16.09.2023).
- Liu Z., Zhang R., Yang C., Hu B., Luo X., Li Y., Dong C. Research on moisture content detection method during green tea processing based on machine vision and near-infrared spectroscopy technology. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 2022; 120921.
- Manzocco L., Nicoli MC. Surface processing: existing and potential applications of ultraviolet light. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2015; 55(4): 469–484.
- Moses JA., Norton T., Alagusundaram K., Tiwari BK. Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews* 2014; 6: 43–55.



- Mousakhani-Ganjeh A., Amiri A., Nasrollahzadeh F., Wiktor A., Nilghaz A., Pratap-Singh A., Khaneghah AM. Electro-based technologies in food drying - A comprehensive review. *LWT - Food Science and Technology* 2021; 145, 111315.
- Nagy M., Wang S., Farag MA. Quality analysis and authentication of nutraceuticals using near IR (NIR) spectroscopy: A comprehensive review of novel trends and applications. *Trends in Food Science & Technology* 2022; 123: 290-309.
- Nguyen D., Nguyen VD., Tran TTH., Le KH. Artificial neural network modeling of microwave-assisted heat pump drying process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2022; 1121.
- Okpala COR., Korzeniowska M. Understanding the relevance of quality management in agro-food product industry: From ethical considerations to assuring food hygiene quality safety standards and its associated processes. *Food Reviews International* 2021: 1–74.
- Qu H., Masud MH., Islam M., Khan MIH., Ananno AA., Karim A. Sustainable food drying technologies based on renewable energy sources. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2022; 62(25): 6872–6886.
- Reis FR., Marques C., de Moraes ACS., Masson ML. Trends in quality assessment and drying methods used for fruits and vegetables. *Food Control* 2022; 109254.
- Ren Y., Sun DW. Monitoring of moisture contents and rehydration rates of microwave vacuum and hot air dehydrated beef slices and splits using hyperspectral imaging. *Food Chemistry* 2022; 382: 132346.
- Shin DJ., Andini N., Hsieh K., Yang S., Wang TH. Emerging analytical techniques for rapid pathogen identification and susceptibility testing. *Annual Review of Analytical Chemistry* 2019; 12: 41–67.
- Şen Arslan H., Cabi A., Yerlikaya S., Sariçoban C. Antibacterial and antioxidant activity of peach leaf extract prepared by air and microwave drying. *Journal of Food Processing and Preservation* 2021; 45(10): e15847.
- United Nations. About the Sustainable Development Goals. (Access date: 11.09.2023).
- Xin H., Mujumdar A. Spray drying and its application in food processing. Taylor & Francis Group 2015.
- Yerlikaya S., Arslan HŞ. Comparison some microbiological and physicochemical properties of freeze dried and spray dried milk powder. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2019; 8(2): 677-687.
- Yerlikaya S., Arslan HŞ. Propolis katkılı liyofilize yumurta tozu üretimi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi* 2023; 27(1): 125-136.
- Zambrano MV., Dutta B., Mercer DG., MacLean HL., Touchie MF. Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science & Technology* 2019; 88: 484-496.



## Heaviside Fonksiyonu İçeren McKean Denklemindeki Süreksizliğin Haar Dalgacıkları ile Ele Alınması

Burhan BEZEKCI<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 79000, Kilis

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-7460-4091>

\*Sorumlu yazar: burhanbezekci@kilis.edu.tr

### Araştırma Makalesi

### ÖZ

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 22.04.2024

Kabul tarihi: 07.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

McKean

Reaksiyon-difüzyon

Haar

Dalgacık

Nonlineer dinamik

Kritik Çözüm

Bu çalışma süreksiz Heaviside adım fonksiyonunu sahip bir reaksiyon-difüzyon denklemi olan McKean denklemini çözmek için Haar dalgacıklarının uygulamasını araştırmaktadır. Kompakt destekleri ve ortogonaliteleri ile Haar dalgacıkları denklemin lineer olmayan dinamiklerini ele almak için kullanılabilir basit ama etkili bir araçtır. Burada, sistemin davranışını belirleyen eşik değeri kavramını anlamak için kritik olan McKean denkleminin zamandan bağımsız çözümüne odaklanıyoruz. McKean denkleminin zamandan bağımsız çözümünün analitik çözümü olmasına rağmen, daha karmaşık yapılar için bu tür çözümlerin kapalı formda elde edilmesi yaygın değildir ki bu durum Haar dalgacık yaklaşımının faydalılığını vurgular. Önerilen yöntem, en yüksek türevli ifadenin Haar serisi açılımını entegre ederek sistematik çözüm üretilmesini sağlar. Analitik çözümle ayrıntılı bir karşılaştırma yaparak Haar dalgacık yaklaşımının daha karmaşık reaksiyon-difüzyon sistemlerini çözmek için güvenilir ve hesaplama açısından uygun bir araç olduğunu gösteriyoruz. Ayrıca, sonuçlar yöntemin doğruluğunu ve verimliliğini göstermekte olup, özellikle süreksiz ve keskin geçişlere sahip olanlar olmak üzere, daha karmaşık reaksiyon-difüzyon sistemlerine daha geniş uygulanabilirliği hakkında bilgiler sunmaktadır.

## The Efficacy of Haar Wavelets in Addressing Discontinuities of McKean Equations with Heaviside Functions

### Research Article

### ABSTRACT

#### Article History:

Received: 22.04.2024

Accepted: 07.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

McKean

Reaction-diffusion

Haar

Wavelets

Nonlinear dynamics

Critical solution

This study explores the application of Haar wavelets to solve the McKean equation, a reaction-diffusion equation with discontinuous Heaviside step function. Haar wavelets, with their compact support and orthogonality, offer straightforward but yet powerful tools for addressing the equation's nonlinear dynamics. We focus on the time-independent solution of the McKean equation, which is crucial for understanding the threshold phenomenon that determines the system's behavior. Despite the existence of analytical time-independent solution to the McKean equation, achieving such solutions in closed form is uncommon for more complicated systems, highlighting the utility of the Haar wavelet approach. The proposed method integrates the Haar series expansion of the highest order derivative, enabling systematic solution derivation. Through a detailed comparison with analytical solution, we validate the

---

Haar wavelet approach as a robust and computationally feasible tool for solving complex reaction-diffusion systems. The results also demonstrate the method's accuracy and efficiency, offering insights into its broader applicability to more complex reaction-diffusion systems, especially those with discontinuity and sharp transitions.

---

**To Cite:** Bezekçi B. The Efficacy of Haar Wavelets in Addressing Discontinuities of McKean Equations with Heaviside Functions. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 200-210.

## 1. Introduction

Designing accurate and numerically stable approximations to the reaction-diffusion equation, there have been numerous methods introduced in recent years, each of which has its own advantages and limitations. From the 1980s, wavelets based on the Galerkin techniques or the collocation method have been considered to be an alternative direction in solving ordinary or partial differential equations. In this paper, we first review one of the popular families of the wavelet, namely Haar wavelet, and then we attempt the Haar wavelet solution for one of the famous one-component reaction-diffusion equations, namely McKean equation.

Nonlinear dynamics and their threshold behaviors are pivotal in understanding complex systems across various fields of science and engineering (Strogatz, 2018). Particularly, the study of how systems transition from one state to another upon reaching specific thresholds offers insights into phenomena ranging from phase transitions in physics to action potential generation in neuroscience. A mathematical framework that has been instrumental in exploring such phenomena is the McKean equation. Traditionally known for its stochastic interpretations, the McKean equation also presents a deterministic form that is crucial for modeling threshold-dependent dynamics in deterministic systems.

The study of traveling waves in excitable media has been a critical area of research, especially after the 1963 Nobel Prize-winning work by A. L. Hodgkin and A. F. Huxley, who mathematically modeled the electrical impulses of nerve cells (Hodgkin and Huxley, 1952). Given the complexity of their model, many researchers have focused on developing simpler, mathematically more tractable reduced-order systems. The McKean model, named after H. P. McKean (McKean, 1970), is one of notable contribution to this effort. This model simplifies the study of reaction-diffusion systems by suggesting a piecewise-linear representation for the reaction term, which makes it easier to analyze the dynamics of traveling waves and patterns in such systems (Tonnelier, 2003). Originally, the spatially expanded McKean model consists of two components defined as

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - u + \mathcal{H}(u - \alpha) + v, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \beta u - \gamma v, \quad t > 0, \quad x \in (-\infty, \infty),\end{aligned}$$

where  $u(x, t)$  and  $v(x, t)$  are the state variables being excitation (fast) and recovery (slow) variables respectively,  $\mathcal{H}$  is Heaviside step function, signifying an abrupt change in the system's behavior when the state variable exceeds the threshold parameter  $\alpha$  and finally  $\beta$  and  $\gamma$  are constant parameters. Fast

subsystem of this equation is derived by neglecting the recovery component of the system and setting  $v = 0$ ,  $\beta = 0$ , and  $\gamma = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - u + \mathcal{H}(u - \alpha). \quad (1)$$

This equation is known as McKean equation with one-component and this formulation illuminates the dynamics of systems under the influence of both diffusive processes and sharp, threshold-triggered transitions. Understanding these dynamics through the lens of the McKean equation provides a robust foundation for analyzing complex behaviors in deterministic systems, enriching our theoretical and practical grasp of threshold phenomena (Flores, 1991).

From a mathematical point of view, the McKean equation has a discontinuous right-hand side and this discontinuity introduces significant challenges in obtaining analytical and numerical solutions. Though this model has some analytical approaches, (see for example; McKean and Moll, 1986), it is usually not feasible to obtain analytical solutions, especially for multi-component cases due to nonlinearity and the inherent complexity of the system. In such scenarios, numerical methods become essential for approximating solutions and understanding the behavior of the model. There are some numerical approaches employed to handle the discontinuities and complexities associated with such equations and some of them particularly need to be mentioned. For example, the study by Karniadakis and Sherwin provides a detailed analysis of the Discontinuous Galerkin (DG) method, demonstrating the effectiveness of the method in capturing sharp discontinuities while maintaining high accuracy (Karniadakis and Sherwin, 2005). However, despite their strengths, DG methods can face issues with computational cost and stability especially when dealing with highly complex systems. Adaptive numerical methods that enhance accuracy and convergence have also shown promise in dealing with such equations but they result in increased computational cost and require sophisticated implementation techniques (Deuffhard and Weiser, 2012). For new methodologies such as the weighted essentially non-oscillatory (WENO) method or Hybridizable Discontinuous Galerkin (HDG) method (Cockburn, Gopalakrishnan and Lazarov, 2009), please refer to the mentioned references. These advanced methods, while effective in handling discontinuities and enhancing accuracy, often come with significant drawbacks such as increased computational costs, stability issues, and the need for sophisticated implementation techniques. These drawbacks motivate us to introduce and employ the Haar wavelet method, which offers a balance between computational efficiency and accuracy, making it a promising alternative for solving equations with discontinuous right-hand sides.

## 2. Haar Wavelets

These wavelet transforms have been used effectively as a powerful mathematical tool in many scientific areas for instance signal analysis, quantum mechanism, and numerical analysis, just to mention a few. There are different types of wavelet families. However, among them, the Haar wavelet transform is the simplest and oldest introduced by the Hungarian mathematician Alfred Haar in 1910 (Haar, 1910). The

Haar wavelet transform is also considered to be the earliest orthonormal wavelet with compact support, i.e. it vanishes outside of a finite interval and attracts extensive attention due to its simplicity, high accuracy, and small computation cost (Lepik, 2007).

The Haar wavelet family for  $x \in [0,1)$  is defined as a piecewise constant "square-shaped" function as follows:

$$h_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \in [\eta_1, \eta_2), \\ -1 & \text{for } x \in [\eta_2, \eta_3), \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

where  $\eta_1 = \frac{k}{m}$ ,  $\eta_2 = \frac{k+0.5}{m}$ ,  $\eta_3 = \frac{k+1}{m}$ . Here, the integer  $m = 2^j$  ( $j = 0, 1, \dots, J$ ) indicates the level of the wavelet; the integer  $k = 0, 1, \dots, m - 1$  is the translation parameter and the integer  $J$  is the maximal level of resolution. The index  $i$  is changed via the formula  $i = m + k + 1$ . For the minimal values of  $m = 1$  and  $k = 0$ , we have  $i = 2$  whereas the maximal value for  $i$  is  $M = 2^m = 2^{J+1}$ . As an exceptional consideration,  $h_1$  is assumed to be equal to 1 in  $[0,1)$  and 0 elsewhere. Note that  $h_1$  corresponds to scaling function and the Haar wavelet functions are orthogonal to each other

$$\int_0^1 h_\alpha(x) h_\beta(x) dx = \begin{cases} 2^{-j} & \text{for } \alpha = \beta = 2^j + k, \\ 0 & \text{for } \alpha \neq \beta. \end{cases} \quad (3)$$

Due to its piecewise constant function in nature, Haar is not continuous and the derivatives do not exist at the points of the discontinuities and therefore we cannot directly implement the Haar wavelet to the differential equations. One efficient way of overcoming this challenge is due to the work of Chen and Hsiao, who suggested focusing on the expansion of the highest derivative present in the differential equation using its Haar series (Chen and Hsiao, 1997). This method involves integrating the series expansion a number of times equal to the order of the highest derivative, thereby facilitating the derivation of the solution and all its derivatives through a systematic process of integration so that the solution itself is derived from this wavelet expansion of the highest derivative.

Consequently, any square-integrable function  $y(x)$  can be expanded in terms of Haar wavelets with an infinite number of terms as follows:

$$y(x) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i h_i(x), \quad (4)$$

where the Haar coefficients can be obtained using orthogonality identity (3) as an infinite number of terms

$$c_i = 2^i \int_0^1 y(x) h_i dx, \quad c_0 = \int_0^1 y(x) dx \quad (5)$$

are determined in such a way that the integral square error

$$\int_0^1 [y(x) - \sum_{i=1}^M c_i h_i(x)]^2 dx. \quad (6)$$

Since  $y(x)$  has infinite terms if piecewise constant or may be approximated as a piecewise constant during each subinterval, it can be terminated as finite terms

$$y(x) \cong \sum_{i=1}^M c_i h_i(x) = c_M^T h_M(x), \quad (7)$$

where the superscript  $\top$  represents transposition. The Haar coefficients vector  $c_M^\top$  and Haar vector  $h_M$  are defined as

$$\begin{aligned} c_M^\top &= [c_1, c_2, \dots, c_M], \\ h_M(x) &= [h_1, h_2, \dots, h_M]^\top. \end{aligned} \quad (8)$$

The integrals of Haar function  $h_i(x)$  can be evaluated as

$$\begin{aligned} p_{i,1}(x) &= \int_0^x h_i(x) dx, \\ p_{i,\nu}(x) &= \int_0^x p_{i,\nu-1}(x) dx, \quad \nu = 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

Let us define the collocation points  $x(l) = \frac{l-0.5}{M}$ ,  $l = 1, 2, \dots, M$  and discretize the Haar function  $h_i(x)$  so that we get the coefficient matrix  $H(i, l) = (h_i(x_l))$  which has dimension  $M \times M$ , the element of which can be evaluated according to (2). Specifically, the functions  $p_{i,1}$  and  $p_{i,2}$  are defined as follows:

$$p_{i,1} = \begin{cases} x - \eta_1 & \text{for } x \in [\eta_1, \eta_2), \\ \eta_3 - x & \text{for } x \in [\eta_2, \eta_3), \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad p_{i,2} = \begin{cases} 0 & \text{for } x \in [0, \eta_1), \\ 0.5(x - \eta_1)^2 & \text{for } x \in [\eta_1, \eta_2), \\ \frac{1}{4m^2} - \frac{1}{2}(\eta_3 - x)^2 & \text{for } x \in [\eta_2, \eta_3), \\ \frac{1}{4m^2} & \text{for } x \in [\eta_3, 1]. \end{cases} \quad (10)$$

To facilitate the analysis, let us define the  $M \times M$  matrices  $H$ ,  $P$ , and  $Q$ . These matrices have the respective entries  $H_{ij} = h_i(x_j)$ ,  $P_{ij} = p_{i,1}(x_j)$  and  $Q_{ij} = p_{i,2}(x_j)$ , corresponding to the evaluations of the Haar functions and their integrals at specific points. In their study, Chen and Hsiao provided evidence supporting the matrix equation below for determining the matrix  $P$  of order  $M$

$$P_{(M)} = \frac{1}{2M} \begin{pmatrix} 2MP_{(M/2)} - H_{(M/2)} \\ H_{(M/2)}^{-1} & O \end{pmatrix}, \quad (11)$$

where  $O$  is a null matrix of order  $\frac{M}{2} \times \frac{M}{2}$  (Chen and Hsiao, 1997). After computing the calculations for  $P_{(M)}$  and  $H_{(M)}$  once, they can subsequently be applied to any kind of differential equations. As  $H$  and  $H^{-1}$  contain many zeros, Haar transform is even faster than the Fourier transform and even the Walsh transform (Alkan et al, 2019). It should be also noted that calculations for  $P_{(M)}$  and  $H_{(M)}$  must be carried out once and therefore, it becomes universally applicable to any kind of differential equations.

### 3. Haar Wavelet on the McKean Equation

The aim of this article is to find the unique, time independent solution of the McKean equation by means of some numerical method in which we implement the Haar wavelet. This approach leverages the simplicity and computational efficiency of the Haar wavelets to effectively address the complexities inherent in the McKean equation. The time independent solution of the McKean equation is called ‘critical nucleus’ solution and it plays a key role in understanding the threshold phenomenon in one-component excitable media as its stable manifold divides the phase plane into two outcomes: propagating wave solution and resting state solution (Neu et al, 1997). To find the critical nucleus solution of the McKean equation, we consider the original equation (1) with the use of finite interval

$x \in [0, L]$  as an approximation the infinite interval  $x \in [0, \infty)$ . We then aim to investigate the behavior of the solutions of the equation subject to the following initial and boundary conditions

$$u(x, 0) = u_0(x) = U_s \left( 1 - \operatorname{erf}(\gamma(x - x_s)) \right), \quad \frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0, \quad u(L, t) = 0, \quad \forall t > 0, \quad (12)$$

where erf is the error function defined as  $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ , ensuring a finite rectangular profile of a width  $x_s$  and  $U_s$  is the amplitude of this profile and  $\gamma$  is a constant parameter. We employ no-flux boundary condition at one end, and Dirichlet boundary condition at the other. To facilitate the use of the Haar wavelets, which are optimally defined in the domain  $[0,1]$ , we need to apply a domain transformation  $y = x/L$ . This transformation converts the McKean equation and its associated initial and boundary conditions into

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{L^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - u + \mathcal{H}(u - \alpha), \quad y \in [0,1], \quad t > 0, \quad (13)$$

$$u(y, 0) = u_0(Ly), \quad \frac{\partial u}{\partial y}(0, t) = 0, \quad u(1, t) = 0, \quad \forall t > 0. \quad (13)$$

In general, it is assumed that the highest derivatives appearing in any differential equations are expanded into the Haar series. In the transformed McKean equation (13), we use

$$\dot{u}''(y, t) = \sum_{i=1}^M c_i h_i(y) = c_M^\top h_M(y), \quad (14)$$

where  $\cdot$  and  $'$  refer differentiation with respect to  $t$  and  $y$ , respectively. The row vector  $c_M$  is constant in the subinterval  $t \in [t_s, t_{s+1}]$ . Integrating (14) with respect to  $t$  from  $t_s$  to  $t$  and twice with respect to  $y$  from 0 to 1 lets us obtain

$$u''(y, t) = (t - t_s) \sum_{i=1}^M c_i h_i(y) + u''(y, t_s), \quad (15)$$

$$u'(y, t) = (t - t_s) \sum_{i=1}^M c_i p_{i,1}(y) + u'(y, t_s), \quad \text{with } u'(0, t) = u'(0, t_s) = 0 \quad (16)$$

$$u(y, t) = (t - t_s) \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(y) + u(y, t_s) - u(0, t_s) + u(0, t), \quad (17)$$

$$\dot{u}(y, t) = \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(y) + y \dot{u}'(0, t) + \dot{u}(0, t). \quad (18)$$

Applying the boundary condition  $u(1, t) = 0$  to the equations at  $y = 1$ , we have

$$(t - t_s) \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(1) + u(1, t_s) - u(0, t_s) + u(0, t) = 0, \quad (19)$$

$$\dot{u}(1, t) = \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(1) + \dot{u}(0, t). \quad (20)$$

Given the boundary condition  $u(1, t) = 0$  and its implication that  $\dot{u}(1, t) = 0$ , the equations at  $y = 1$  simplifies as follows:

$$(t - t_s) \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(1) - u(0, t_s) + u(0, t) = 0, \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(1) + \dot{u}(0, t) = 0. \quad (22)$$

These corrections account for the Dirichlet boundary condition at  $y = 1$  (or at  $x=L$  in the original domain), ensuring that both the function  $u$  and its time derivative  $\dot{u}$  are zero at this boundary, reflecting a state of equilibrium or a condition where the quantity of interest is neutralized.

Rearranging the equations to express  $u(0, t_s) - u(0, t)$  and  $\dot{u}(0, t)$  in terms of other variables, we find

$$u(0, t_s) - u(0, t) = (t - t_s) \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(1), \quad (23)$$

$$\dot{u}(0, t) = - \sum_{i=1}^M c_i p_{i,2}(1). \quad (24)$$

It follows from (10) that

$$\tilde{p}_{i,2} = p_{i,2}(1) = \begin{cases} 0,5 & \text{if } i = 1, \\ \frac{1}{4m^2} & \text{if } i > 1. \end{cases} \quad (25)$$

Substituting these into formulae (15), (17) and (18) and discretizing the results  $y \rightarrow y_l$  and  $t \rightarrow t_{s+1}$ , we obtain

$$u''(y_l, t_{s+1}) = (t_{s+1} - t_s) \sum_{i=1}^M c_i h_i(y_l) + u''(y_l, t_s), \quad (26)$$

$$u(y_l, t_{s+1}) = (t_{s+1} - t_s) \sum_{i=1}^M c_i [p_{i,2}(y) - \tilde{p}_{i,2}] + u(y_l, t_s), \quad (27)$$

$$\dot{u}(y_l, t_{s+1}) = \sum_{i=1}^M c_i [p_{i,2}(y) - \tilde{p}_{i,2}]. \quad (28)$$

Applying these into (13) yields

$$\sum_{i=1}^M c_i [p_{i,2}(y) - \tilde{p}_{i,2}] = \frac{1}{(2L)^2} u''(y_l, t_s) - u(y_l, t_s) + \mathcal{H}(u(y_l, t_s) - \alpha). \quad (29)$$

From this formula, we can successively calculate the wavelet coefficients.

#### 4. Numerical Results

In this section, we will demonstrate the method's effectiveness and how the solutions it produces are not only highly accurate but also it requires minimal computational resources in terms of both time and space. McKean equation with the threshold parameters in the range  $0 < \alpha < 1/2$  has the following unique critical nucleus solution found in (McKean and Moll, 1986) as

$$\tilde{u}(x) = \begin{cases} \alpha e^{x+m}, & \text{if } x \leq -m, \\ 1 - e^{-m} \cosh(x), & \text{if } x < m, \\ \alpha e^{-x+m}, & \text{if } x \geq m, \end{cases} \quad (30)$$

where  $m = -\ln(1 - 2\alpha)/2$ . In their article, they also showed that there exists a threshold surface in the space of initial data that separates initial conditions tending to the equilibrium value from those leading to the excited value. For further details, please see (Bezekci, 2017). This threshold surface has been studied by many researchers and in one of the major studies, Moll and Rosencrans pursued a numerical method to determine this threshold surface with the use of a rectangular initial pulse condition. They then observed if the solution decays to rest or develops into a propagation wave. Adjusting the pulse's amplitude based on the outcome, they iteratively identified the threshold surface as a function of the initial pulse's amplitude and width (Moll and Rosencrans, 1990). The critical nucleus solution of the McKean equation acts as a pivotal threshold, distinguishing between initial conditions that evolve into excited or resting states, fundamentally determining the system's dynamics.

In order to find this critical nucleus numerically, we solve the transformed McKean equation (13) by means of the wavelet transform, which yields equations (26)-(29). This is achieved by fixing  $x_s$  and methodically varying  $U_s$  via the implementation of a bisection loop, starting with known superthreshold



and subthreshold values. By averaging these, we establish a new amplitude, adjusting based on excitation outcomes to precisely identify critical nucleus parameters. Delving deeper into bisection algorithm and threshold surface is beyond the scope of this study but interested readers may find more information in (Bezekci et al., 2015).

For the numerical simulations, the following parameters are used:  $L = 10, \alpha = 0,25, \gamma = 20, x_s = 0,1, J = 8,9,10$ . The parameter  $U_s$  needs to be found through the bisection loop using the described numerical method. The initial condition we used and its second derivative are (first derivative is not needed for the computation)

$$u(y, 0) = u_0 = U_s \left( 1 - \operatorname{erf}(\gamma(y - x_s)) \right), \quad u''(y, 0) = u_0'' = \frac{4\gamma^3 U_s}{\sqrt{\pi}} (y - x_s) e^{-\gamma^2 (y - x_s)^2}.$$

The solution and the second derivative of the solution need to be calculated in every time step. Setting  $\Delta_t = t_{s+1} - t_s, R_{ij} = [Q_{ij} - \tilde{p}_{i,2}], S_{ij} = (R^{-1})_{ij}$  as these calculations need to be performed just a single time, prior to the time loop's execution, which significantly reduces the overall computation time. Following Algorithm 1 below provides the required steps we employ to solve the McKean equation using Haar wavelet methods. It is important to note that the calculation for the matrices used during computation is outside of the main time loop, which is why this method is rather efficient to use in terms of the simplicity and the computation time required.

---

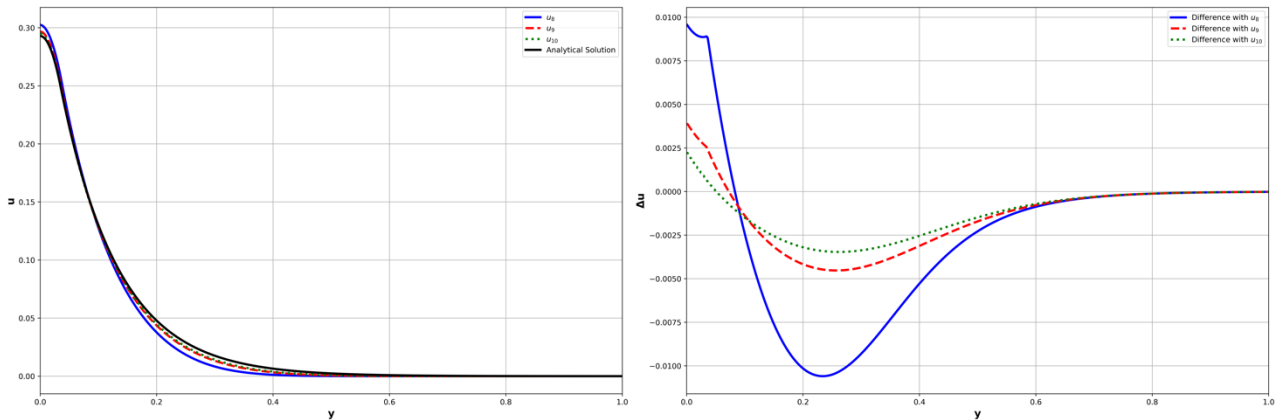
**Require:** Set  $L, \alpha, \gamma, x_s, U_s, J, \Delta_t$  as initial inputs

- 1: Define the matrices  $H, R, S$
  - 2:  $u_i \leftarrow u_0, u_i'' \leftarrow u_0''$  for  $i = 1, \dots, N$      $\triangleright$  set initial condition and its second derivative
  - 3: **for**  $t = 1, 2, \dots$  **do**
  - 4:     $b_i \leftarrow \frac{1}{L^2} u_i'' - u_i + \mathcal{H}(u_i - \alpha)$      $\triangleright$  Right hand side of equation (29)
  - 5:     $c_i \leftarrow b_i \times S$      $\triangleright$  wavelet coefficients
  - 6:     $u_i'' \leftarrow \Delta_t (c_i \times H) + u_i''$      $\triangleright$  update the second derivative
  - 7:     $u_i \leftarrow \Delta_t (c_i \times R) + u_i$      $\triangleright$  update the solution
  - 8: **end for**
- 

**Algorithm 1.** Haar wavelet numerical solution of the critical nucleus solution of the McKean equation.

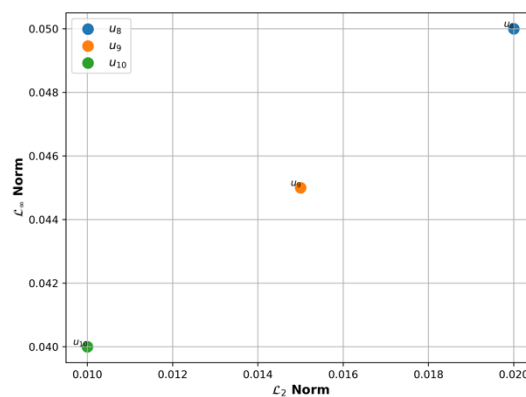
In the analysis of numerical approximation to find the critical nucleus solution of the McKean equation using the Haar wavelet method, the accuracy and convergence of the solutions are of foremost importance. Figure 1 shows the comparison between the numerical solution approximating the critical nucleus of the McKean equation using the Haar wavelet method obtained using varying maximal level of resolutions,  $J$ , and the analytical solution described by equation (30). The numerical solutions represented by  $u_8, u_9$  and  $u_{10}$  respectively correspond to the cases where  $J = 8, J = 9$  and  $J = 10$ , thus indicating finer resolutions. The right panel focuses on the differences between these numerical solutions and the analytical critical nucleus  $\tilde{u}(x)$ , emphasizing the importance of selecting the right

maximal level of resolution if more accurate approximation is desired. While optimizing the performance of the numerical methods, it is known that fine-tuning numerical methods leads to closer approximation but the computational cost increases.



**Figure 1.** Left panel: Comparison between the numerical solution approximating the critical nucleus of the McKean equation using the Haar wavelet method for different  $J$  values and the analytical solution described by equation (30). Right panel: The difference between each numerical solution and the analytical solution.

Further analysis can be performed in terms of the accuracy and two of the most widely-used error metrics are  $\mathcal{L}_2$  and  $\mathcal{L}_\infty$  norms. Figure 2 graphically illustrates these error metrics for three numerical solutions, allowing us to assess how well the numerical solutions approximate the analytical one on average as well as the significance of the maximum deviations. As emphasized before, increasing the maximum level of resolution tends to improve the accuracy but also causes higher computational costs.



**Figure 2.** The sketch of least square deviations  $\mathcal{L}_2$  and maximum deviations  $\mathcal{L}_\infty$  norms for the numerical solutions.

## 5. Conclusion and Further Works

The main aim of this article is to propose the Haar wavelet-based numerical method for obtaining time-independent, also known as critical nucleus, solution of the McKean equation with discontinuous heaviside step function. The Haar wavelets are characterized by their compact support and orthogonality properties, making them especially suitable for numerical solutions of differential equations with

discontinuous or sharp transitions. This motivated us to employ them in tackling the McKean equation with the aim of handling the complexity introduced by its nonlinearity. Our approach successively finds numerical critical nucleus solutions that closely align with their analytical counterparts.

Despite the McKean equation having its own analytical solution, obtaining such solution in a closed form is more likely uncommon. For more complex scenarios, analytical approaches are difficult to establish and the use of numerical methods become essential. This challenge motivates us to employ the Haar wavelet method, which has shown the capability to approximate differential equations effectively. In adopting this methodology, we validate the effectiveness of the Haar wavelet-based methods in accurately solving the reaction-diffusion equations, demonstrating its utility in addressing more complex mathematical challenges.

This article investigated the Haar wavelet approach in one-dimensional, one-component spatially extended excitable media, specifically the McKean equation. It could be of interest for further researches to investigate the effectiveness of the method in a wider range of problem settings, including more complex reaction-diffusion equations and higher-dimensional problems, and to perform a comparative analysis with other established numerical methods mentioned above. This would help to evaluate the Haar wavelet method's relative strengths and weaknesses, providing a clearer understanding of its performance in various discontinuous and nonlinear scenarios.

#### **Statement of Conflict of Interest**

The author has declared no conflict of interest.

#### **Author's Contributions**

The author contributed to this manuscript 100%.

#### **References**

- Alkan S., Aydin MN., Coban R. A numerical approach to solve the model of an electromechanical system. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 2019; 42(16): 5266–5273.
- Bezekci B. Analytical and numerical approaches to initiation of excitation waves. Ph.D. thesis, University of Exeter 2017.
- Bezekci B., Idris I., Simitev RD., Biktashev VN. Semi-analytical approach to criteria for ignition of excitation waves. *Phys. Rev. E* 2015; 92: 042917.
- Chen CF., Hsiao CH. Haar wavelet method for solving lumped and distributed-parameter systems. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications* 1997; 144(1): 87-94.
- Cockburn B., Gopalakrishnan J., Lazarov R. Unified hybridization of discontinuous Galerkin, mixed, and continuous Galerkin methods for second order elliptic problems. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 2009; 47(2): 1319-1365.
- Deuflhard P., Weiser M. Adaptive numerical solution of PDEs. Walter de Gruyter Press 2012.

- Flores G. Stability analysis for the slow travelling pulse of the FitzHugh-Nagumo system. *SIAM Journal on Mathematical Analysis* 1991; 22: 392–399.
- Haar A. Zur theorie der orthogonalen funktionensysteme. *Mathematische Annalen* 1910; 69(3): 331–371.
- Hodgkin AL., Huxley AF. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *The Journal of Physiology* 1952; 117: 500–544.
- Karniadakis G., Spencer JS. *Spectral/hp element methods for computational fluid dynamics*. Oxford University Press 2005.
- Lepik Ü. Numerical solution of evolution equations by the Haar wavelet method. *Applied Mathematics and Computation* 2007; 185(1): 695-704.
- McKean HP. Nagumo's equation. *Advances in Mathematics* 1970; 4: 209–223.
- McKean HP., Moll V. Stabilization to the standing wave in a simple caricature of the nerve equation. *Communications on Pure and Applied Mathematics* 1986; 39: 485–529.
- Moll V., Rosencrans S. Calculation of the threshold surface for nerve equations. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 1990; 50:1419–1441.
- Neu JC., Preissig RS., Krassowska W. Initiation of propagation in a one-dimensional excitable medium. *Physica D: Nonlinear Phenomena* 1997; 102: 285-299.
- Shu CW. High order weighted essentially nonoscillatory schemes for convection dominated problems. *SIAM Review* 2009; 51(1): 82:126.
- Strogatz SH. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. CRC Press 2018.
- Tonnellier A. The McKean's caricature of the FitzHugh-Nagumo model I. The space-clamped system. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 2003; 63(2): 459–484.

## Integration of Wind and Solar Hybrid Power Generation Systems into The Grid and Control of Power Quality with Fuzzy Logic

Yüksel OĞUZ<sup>1</sup>, Sediqullah HABİBİ<sup>2</sup>, Muhammed Mustafa KELEK<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5233-151X>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-3675-6593>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-9915-4776>

\*Corresponding author: mmustafakelek@aku.edu.tr

### Research Article

#### Article History:

Received: 30.04.2024

Accepted: 07.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Wind  
Solar  
PV  
On-grid  
Fuzzy logic

### ABSTRACT

This study modeled and analyzed a grid-connected hybrid system composed of solar and wind power generation systems in Matlab/Simulink. In addition, the quality of power generated by the hybrid power generation system was improved using Fuzzy Logic (FL) and Proportional-Integral (PI) controllers. Measurements of the frequency, voltage, power, and harmonics of the system and the grid were evaluated. In addition, the voltage and frequency fluctuation times before synchronization between the hybrid generation system and the grid were analyzed. The voltage rises on the grid while the system is idling have been checked. After synchronization, the voltage, power, frequency, and phase angle values measured at the load and the grid in the hybrid system were observed individually. According to the measured values obtained from the simulation study, the performance of the hybrid power generation system was analyzed.

## Rüzgâr ve Güneş Hibrit Güç Üretim Sisteminin Şebekeye Entegre Edilmesi ve Güç Kalitesinin Bulanık Mantık ile Kontrolü

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 30.04.2024

Kabul tarihi: 07.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Rüzgâr  
Güneş  
PV  
On-grid  
Bulanık mantık

### ÖZ

Bu çalışmada, güneş ve rüzgâr enerjisi üretim sisteminden oluşan şebeke bağlantılı bir hibrit sistem Matlab/Simulink'te modellenmiş ve analiz edilmiştir. Hibrit enerji üretim sistemi tarafından üretilen gücün kalitesi Bulanık Mantık (FL) ve Oransal-İntegral (PI) kontrolörler kullanılarak iyileştirilmiştir. Sistemin ve şebekenin frekans, gerilim, güç ve harmonik ölçümleri değerlendirilmiştir. Ayrıca hibrit üretim sistemi ile şebeke arasındaki senkronizasyon öncesi gerilim ve frekans dalgalanma süreleri analiz edilmiştir. Sistem rölantide çalışırken şebekede meydana gelen gerilim yükselmeleri kontrol edilmiştir. Senkronizasyon sonrasında hibrit sistemde yükte ve şebekede ölçülen gerilim, güç, frekans ve faz açısı değerleri ayrı ayrı gözlemlenmiştir. Simülasyon çalışması sonucunda elde edilen değerlere göre hibrit güç üretim sisteminin performansı analiz edilmiştir.

**To Cite:** Oğuz Y., Habibi S., Kelek MM. Integration of Wind and Solar Hybrid Power Generation Systems into The Grid and Control of Power Quality with Fuzzy Logic. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 211-221.

## 1. Introduction

Most of the energy used today has been obtained from conventional energy sources. However, these energy sources are rapidly depleting today. Due to the rapid depletion of energy resources and the damage these resources cause to nature during processing, the tendency towards renewable energy

resources is increasing (Erdal, 2011). One of the advantages of energy sources that can be obtained from different areas of use is that they do not have any negative impact on nature. One advantage of energy sources from different regions is that they have no negative effect on nature. Many examples of renewable resources include hydroelectricity, geothermal, solar, wind, plant residues, biomass, tidal, and wave (Erdal, 2011). Solar and wind energy, among the renewable energy sources, has become more common in electricity generation. The primary reason for their common use is that these forms of energy do not require any clean fuel and have no negative impact on the surrounding environment. To obtain uninterrupted energy, hybrid systems have been developed in which energy sources are used together. Thus, it is possible to increase the efficiency of the hybrid power generation system and to meet the energy required for the system from the other source in case one of the sources is not available or scarce. Hybrid systems can be composed of two or more source components. Examples include solar & wind, solar & wind & diesel, solar & wind & hydrogen, and solar & wind & fuel cell.

Regionally, 2020 was a record year for onshore installations in Latin America, Asia-Pacific, and North America. 74 GW of new wind power was installed in these three regions. 8.2 GW of wind power was installed in the Middle East and Africa. For Türkiye, it has been accepted that in areas 50 meters above ground level and with wind speeds above 7.5 m/s, it would be appropriate to build a wind farm of 5 MW per kilometer. Türkiye's wind energy potential is estimated to be 48 GW. This potential equal 1.30% of Türkiye's total land area (T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). According to the report published by IRENA (International Renewable Energy Agency) in 2024, the installed capacity of renewable and wind energy in Türkiye and the world is shown in Table 1 (IRENA, 2024).

**Table 1.** Installed capacity of renewable energy and wind energy in Türkiye and the world according to IRENA 2024

Installed capacity of renewable energy sources (MW)			Wind energy installed capacity (MW)		
Year	World	Türkiye	Year	World	Türkiye
2013	1566487	25551	2013	300027	2760
2014	1699064	27940	2014	349466	3630
2015	1852777	31516	2015	416347	4503
2016	2018264	34446	2016	467028	5751
2017	2186038	38746	2017	514423	6516
2018	2359398	42230	2018	564513	7005
2019	2543378	44389	2019	620841	7591
2020	2813159	49195	2020	731656	10607
2021	3077238	53175	2021	824171	10607
2022	3371793	55946	2022	898824	11396
2023	3869705	58462	2023	1017199	11697

In hybrid systems, controlling and increasing efficiency is very important. For this reason, the necessary modeling, optimization, analysis, and design studies are carried out before installing the system, and the

system is evaluated in terms of risk and cost analysis (Ulutaş, 2015). Some studies related to hybrid systems can be found in the literature.

Dursun analyzed the performance of a hybrid system (wind, solar, fuel cell) in his study. In the designed system, the electrical energy generated by the wind turbine and the PV panel is stored in the battery. Three different control algorithms were used to determine the ideal algorithm for the battery. His study aimed to increase the lifetime of the fuel cell, which was used as a backup storage element in the system, by using it less. Simulation studies of the system were carried out, and the results were evaluated (Dursun, 2013).

In his study, Ersoy created a hybrid system by integrating wind and solar power plants into an interconnected grid. The production cost reduction rates of the wind and solar plants added to the system are analyzed. The production costs of the system were calculated using five different algorithms: PSO (Particle Swarm Optimization), DGA (Differential Development Algorithm), AKO (Bee Colony Optimization), GA (Genetic Algorithm), and BTA (Simulated Annealing Algorithm). It was found that the DGA, AKO, and BTA algorithms produced similar results. PSO and GA algorithms showed more stable performance (Ersoy, 2015).

Oğuz simulated a battery-supported hybrid power system consisting of solar and wind using a Matlab/Simulink program. In the system, the energy flow was controlled by BM-based control. It was found that the generated energy was directly supplied to the batteries, and the overcharge-discharge situations in the batteries consumed the battery life very quickly. To not shorten the battery life, it was stated that the generated power should first be sent to the consumer, and the remaining surplus power should be stored in batteries depending on the occupancy rates (Oğuz, 2012).

In Başaran's study, the energy generated by the wind-solar hybrid system was first used to charge the batteries and then to supply the load or the grid. In the study, the batteries are charged from the grid if the required amount of energy cannot be obtained from the hybrid system. A BM controller controls DC/DC and DC/AC voltage converters to achieve the highest efficiency in the system. Compared to conventional operation, 7-10% more energy was transferred to the load or grid when controlled with BM (Başaran, 2013).

A hybrid fuel cell, wind, and solar system were modeled in Matlab/Simulink by Kumar and Garg. The modeled hybrid system was also studied with other storage systems besides fuel cells. The study found that the hybrid system worked more efficiently using the fuel cell instead of the battery and battery group (Kumar and Garg, 2019).

Oğuz used Matlab/Simulink to model the power generation system required to meet the electricity demand of a rural settlement in his Ph.D. thesis. The system was controlled using PID and ANFIS. In addition, a filter circuit was applied to the system in this study to minimize the voltage harmonics generated during power conversion. As a result, it was found that the desired quality and efficiency of the energy were obtained with the use of ANFIS in the hybrid system (Oğuz, 2007).

Shashi and Rekha proposed a solar-wind hybrid system in their study. In the study, the effect of environmental conditions was observed by simulating the arrays of the photovoltaic cell. Then the nonlinear I-V (current-voltage) and P-V (power-voltage) characteristic curves are analyzed. Similarly, the wind energy system and diesel generator were also simulated, and their characteristic curves were obtained. Compared to the others, the output waveforms of the diesel generator contained less harmonics than the battery output. As a result, a hybrid system consisting of off-grid wind-solar and diesel generators was proposed for off-grid and island areas (Shashi and Rekha, 2015).

In his thesis, Kaya designed an off-grid hybrid system. It consisted of a 300W wind turbine and three 80W solar panels. The system also used a 12V, 130Ah gel battery. The aim was to store excess power in the battery and ensure system continuity by activating when the power generation system was insufficient. The Arduino-based BM controller used in the study was compared to conventional systems. It was observed that the energy generated by the Arduino-based system powered the load without recharging the battery, thus preserving the economic life of the batteries. It was observed that the battery used in the system contributed 4% to the battery life by preventing 140 charge-discharge cycles for nine months with the BM control system. As a result, the BM-based system was better than the classical system in terms of performance (Kaya, 2019).

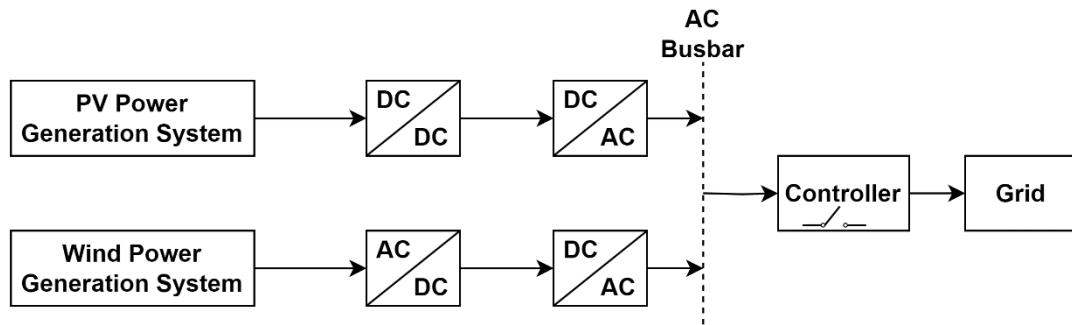
This study modeled and analyzed a grid-connected wind-solar hybrid power generation system in the Matlab/Simulink environment. The electrical energy obtained from the hybrid power generation system through power converters was equalized to the grid voltage and frequency and transmitted to the grid or loads. The quality of the power obtained from the hybrid power generation system was analyzed using BM and PI controller methods to improve the quality. Frequency, voltage, power, and harmonic measurements of the modeled hybrid power generation system have been carried out. These measurements were used to evaluate the power quality improvements of the hybrid power generation system.

## **2. Materials and Method**

### *2.1 Hybrid Energy Production Systems*

Non-renewable energy sources have short life spans and many drawbacks in energy generation systems. For this reason, renewable energy sources (such as wind, water, solar, and geothermal) are often preferred in power generation systems. Hybrid systems have been developed to use renewable energy sources together. This increases the efficiency of the system. In addition, if one of the sources is unavailable or of low availability, the energy required for the system is provided by the other source, thus ensuring continuity. Hybrid systems are created by combining two or preferably more resource components. Examples include solar-wind, solar-wind-diesel, solar-wind-hydrogen, and solar fuel cell-wind (Ulutaş, 2015). Figure 1 shows a block diagram of a hybrid system.



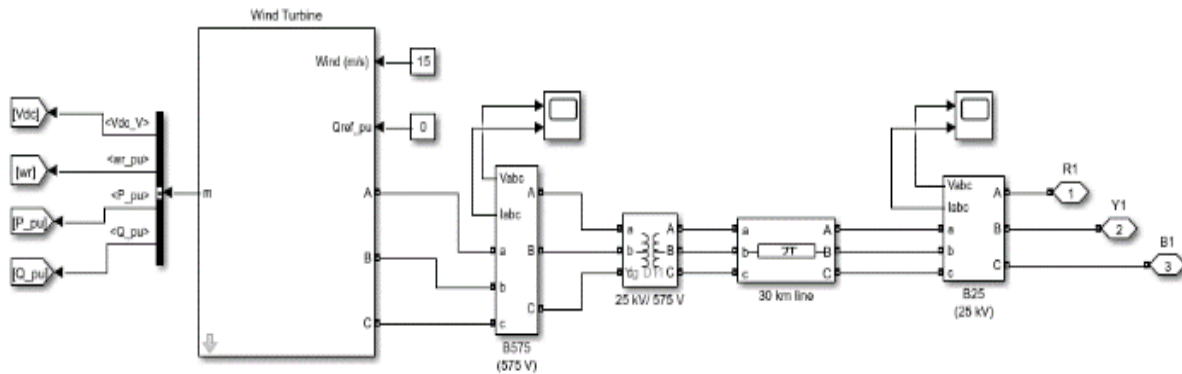


**Figure 1.** Block diagram of a hybrid system

The energy produced by a grid-connected hybrid generation system is used as needed, and the remaining energy produced can be transferred to the grid. In addition, if the energy produced by the system is insufficient, energy can be added to the system from the grid. Because the system is grid-connected, there is no need for auxiliary storage devices such as batteries.

## 2.2 Simulation Model of Hybrid Power Generation System

The hybrid power generation system study used a wind turbine and solar panels. Adjustments were made to the parameter values required for the wind turbine in the system, and a simulation was carried out. The simulation block diagram is shown in Figure 2.



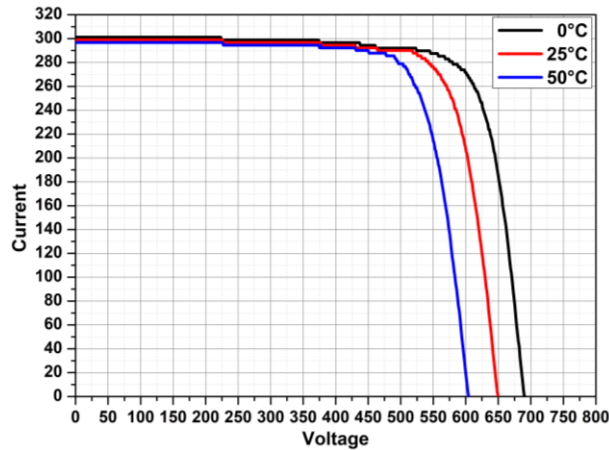
**Figure 2.** Simulation block diagram of grid-connected wind power generation system

Five 315W Sunpower-T5-SPR-315E (monocrystalline cell) PV panels were used in the solar power generation (PV) system realized in the Matlab/Simulink environment. Detailed specifications of the PV panels used in the solar power generation system are given in Table 2.

The current-voltage graph of the PV panels in the solar power generation system at three different temperatures ( $0^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ , and  $50^{\circ}\text{C}$ ) is shown in Figure 3. As can be seen from the graph, the power increases as the voltage rises up to the maximum power point at different temperature values. However, as the temperature increases, there is almost no change in the current values, while the voltage values decrease.

**Table 2.** Characteristic values of the PV panel

Parameters	Value
Maximum power	315.072 <b>W</b>
Number of cells in the panel	96 <b>pcs.</b>
Open circuit voltage (Voc)	64.6 <b>V</b>
Open circuit voltage temperature coefficient (%/deg.C)	-0.27269 (%/deg.C)
Current at maximum power point (I <sub>MP</sub> )	5.76 <b>A</b>
Short circuit current (I <sub>sc</sub> )	6.14 <b>A</b>
Short circuit current temperature coefficient (%/deg.C)	0.0761743 (%/deg.C)
Light-induced current (I <sub>L</sub> )	6.1471 <b>A</b>
Diode saturation current (I <sub>0</sub> )	6.5048e <sup>-12</sup> <b>A</b>
Diode ideality factor	0.9507
Shunt Resistance (R <sub>SH</sub> )	430.058 <b>Ω</b>
Series Resistance (R <sub>S</sub> )	0.43042 <b>Ω</b>

**Figure 3.** Current-voltage graph of the PV panel at 1000 W/m<sup>2</sup> and three different temperature values.

### 2.3 Fuzzy Logic Controller to Improve Power Quality

A power generation system can be controlled using classical methods such as PI, PD, PID, BM, and various artificial intelligence methods. With the introduction of artificial intelligence and its applications in our lives, many conveniences have been created for people. Nowadays, it is a fact that electric power is one of the most essential things. Therefore, power generation systems that meet this need are of great importance. Instead of classical controls in power generation systems, using methods controlled by the UN or artificial intelligence instead of classical controls ensures more stable and efficient system

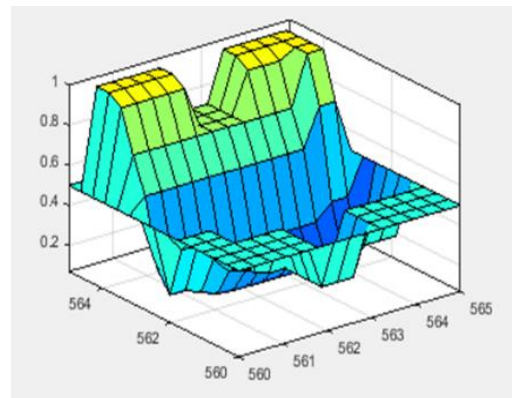
operation (Katircioğlu et al., 2018). For this reason, BM control has been successfully used in studies of power generation systems (Ismail et al., 2010).

In this study, the electrical values of the grid-connected hybrid power generation system were compared with the electrical values (voltage and frequency) of the grid. The voltage and frequency control of the hybrid power generation system and the grid were compared using the BM controller. This ensured that the generated electrical energy could be used more efficiently and with better quality. The BM controller analyzed the fault and its variation in voltage and frequency. The fault signal generated by the BM controller was transmitted to the switch block when the voltage or frequency was equal, and the contact closed fully without any external intervention. The breaker contact is automatically closed, and the hybrid power generation system is connected parallel to the grid. The Sugeno method is used in the BM controller design. The BM controller had two inputs and one output. The first input was the grid, and the second input was the output of the hybrid generator. The BM controller's output was the circuit breaker's switching signal, which acts as a parallel connection. The BM controller was designed to ensure that the voltage and frequency values of the hybrid power generation system are equal to the grid voltage and frequency values before parallel connection to the grid.

The rule table required for the control of the designed system is given in Figure 4 (a), and its three-dimensional representation is presented in Figure 4 (b). The membership functions shown in the rule table are NB (Negative Large), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Small), and PB (Positive Large).

Grid Hibrit	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

(a)



(b)

**Figure 4.** FLC rule table (a) and 3-D representation (b)

The model created in the Matlab/Simulink environment to control the grid-connected hybrid system developed with BM using wind and solar energy is shown in Figure 5. Voltage control is required at the system grid connection. The time-varying voltage should be in the form of a sinusoidal signal. As it deviates from the sinusoidal waveform, undesirable waveforms occur and create harmonics. Harmonics occur at exact multiples of the fundamental frequency of the primary waveform. Harmonics play an active role in regulating or consuming power in electrical power generation systems. Controlling the BM controller minimizes voltage fluctuations or harmonics that occur as the load is added or removed

from the system. Once synchronization is achieved, the RC-type load connected between the hybrid system and the grid is connected to the grid with breaker control.

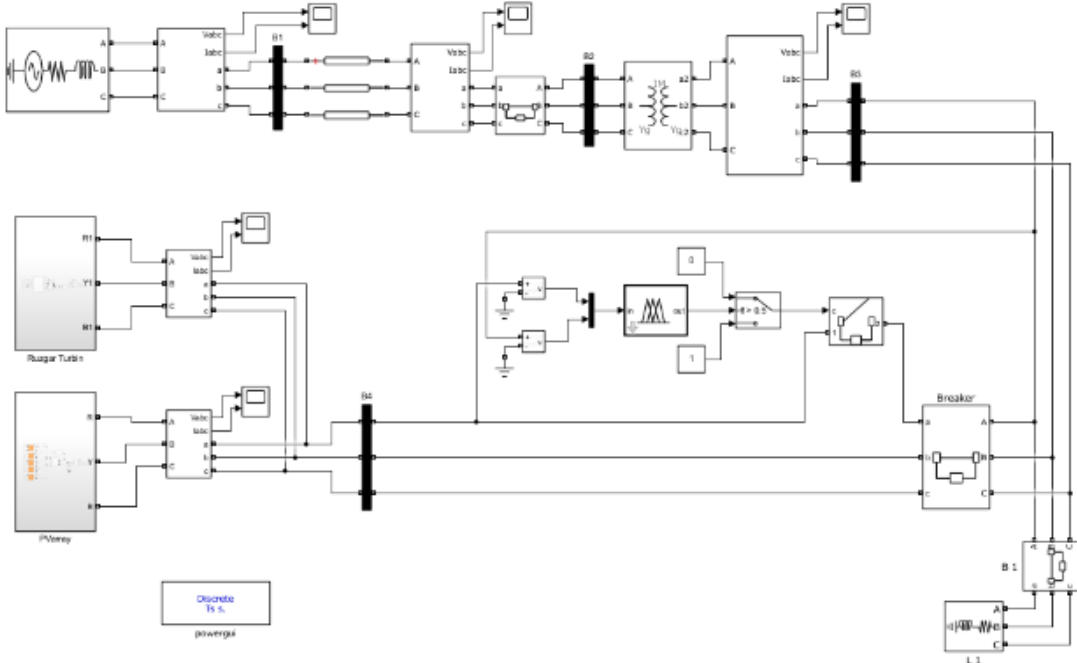


Figure 5. On-grid Hybrid power generation system controlled by BM

3. Findings and Discussion

The frequency, voltage, and power values of the hybrid power generation system and the grid were analyzed in the Matlab/Simulink environment. The system's voltage level control was realized using the BM controller. The frequency analysis of the hybrid wind and solar power system is shown in Figure 6 (a), and the phase angle analysis is shown in Figure 6 (b).

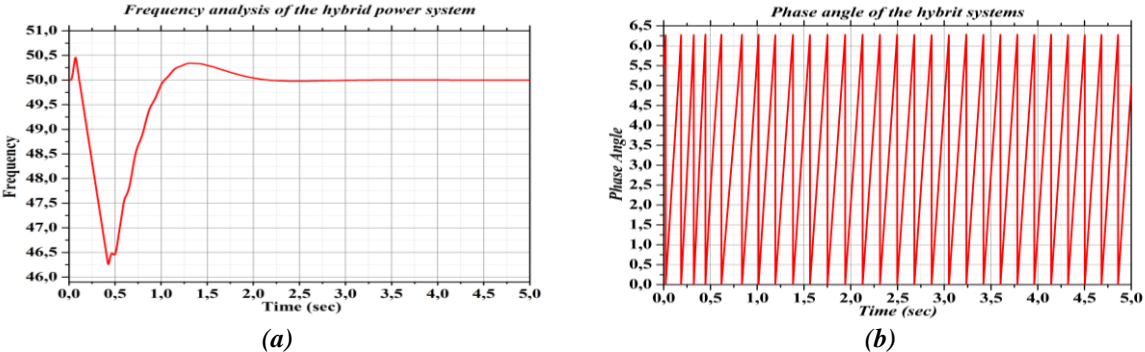
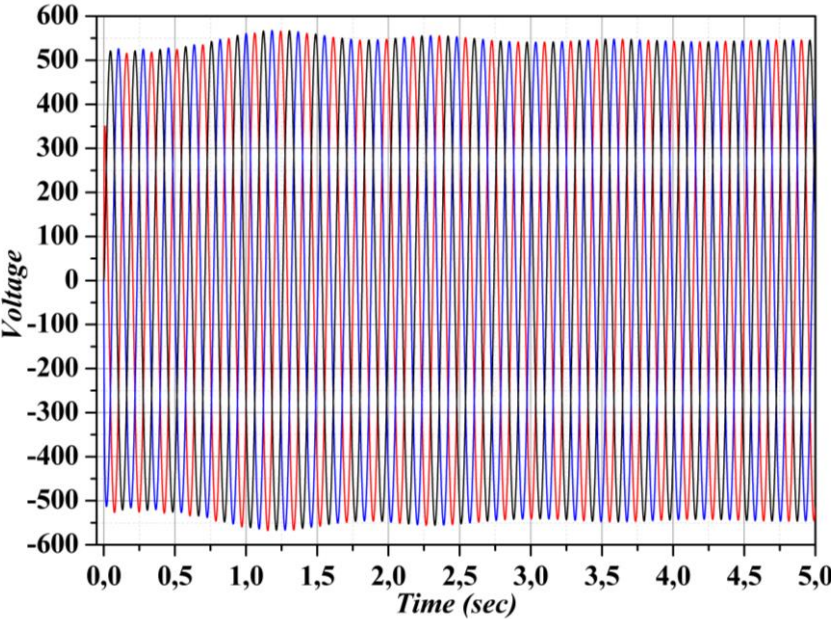


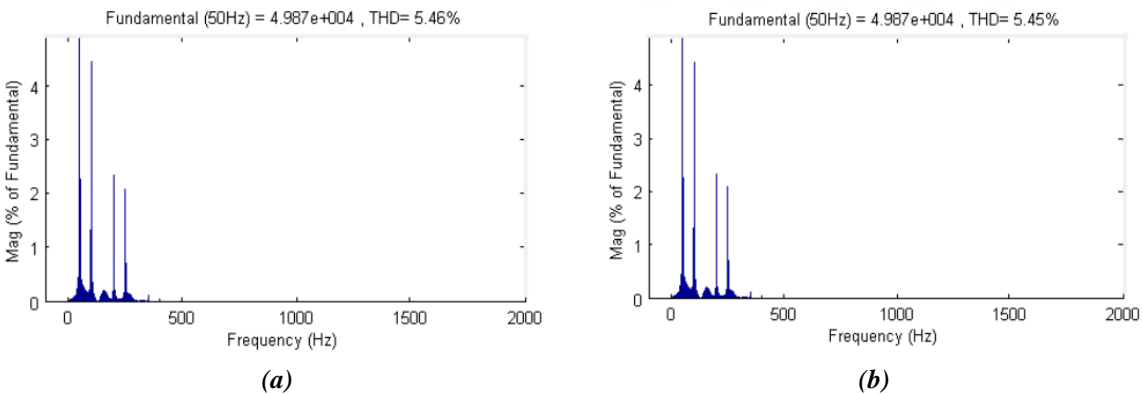
Figure 6. Frequency analysis (a) and phase angle analysis (b) of the hybrid power system in the simulation environment

In the event of a fault that occurs while the wind turbine is connected to the grid, the system is kept in balance by analyzing the active and reactive power outputs. In the event of a fault, the active power generated would decrease depending on the magnitude of the voltage drop. To generate reactive power, the excitation current was increased inductively to increase the voltage drop. At the end of the faults,

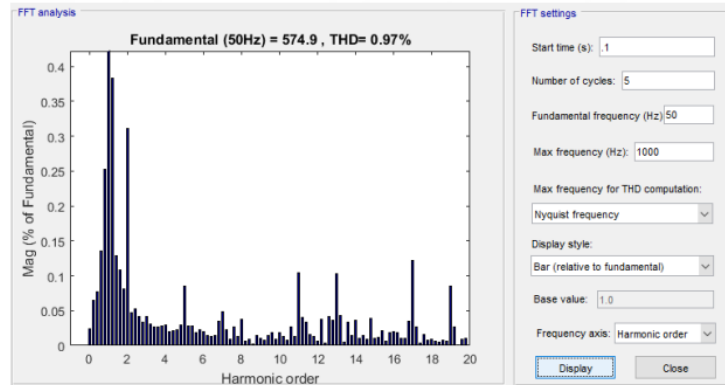
the active and reactive power generation returned to their initial state within the desired time. In this way, the wind turbine remained in operation, and the balance of the system was maintained without any loss of production. Figure 7 shows the voltage graph of the 3-phase hybrid power generation.



**Figure 7.** Three-phase voltage measurement of hybrid power generation system in Matlab/Simulink environment. The harmonic ratio occurring in the voltage wave at the beginning of the 30 km pi-type hybrid power line in the designed system was calculated as 5.46%. The harmonic measurement made at the end of the same line was calculated as 5.45%. The harmonic analysis at the beginning of the line is shown in Figure 8 (a), and the harmonic analysis at the end is shown in Figure 8 (b).

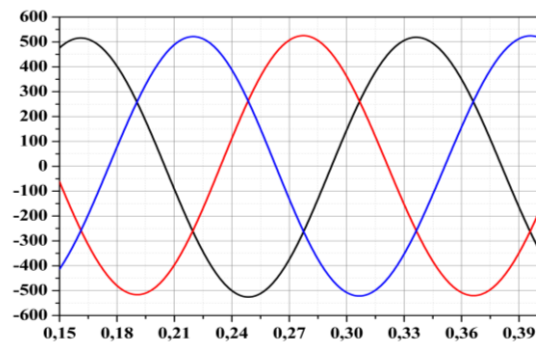


**Figure 8.** Harmonic analysis of the voltage wave at the beginning (a) and end (b) of the line. The result of the low voltage harmonic analysis performed on the hybrid power generation system designed is given in Figure 9.



**Figure 9.** Matlab/Simulink harmonic analysis of low-voltage

The measurement of the BM of the wind and solar power generation system connected to the hybrid grid is given in Figure 10.



**Figure 10.** Time-dependent graph of the fuzzy logic-controlled voltage of the hybrid power generation system connected to the grid

#### 4. Results

In this study, a hybrid power generation system was designed by combining wind and solar power generation systems, and the control of the parallel connection to the grid with the BM controller was realized in the simulation environment. In the designed hybrid power generation system, the wind and solar power generation system's voltages were combined in a single bus bar and compared with the reference grid voltage in the BM controller. If the two voltages were equal (when the error was zero), the contact in the switch block connected to the BM controller was automatically lowered, and the breaker contact was closed. If the voltages were not equal, the contact was opened, and the system was de-energized. In this way, the BM controller automatically controlled the system, and the errors that could occur were minimized. In the study, it was observed that the BM controlled system reacted faster than conventional control systems.

#### Statement of Conflict of Interest

The authors have declared no conflict of interest.

## Author's Contributions

The contribution of the authors is equal.

## References

- Başaran K. Optimization of fuzzy logic controlled autonomous and grid connected wind-pv hybrid power system and application in Adnan Menderes University's campus. Ege University, Institute of Science, PhD Thesis, 2013.
- Dursun E. Analysis of a stand-alone wind-solar and hydrogen hybrid power system. Marmara University, Institute of Science, PhD Thesis, 2013.
- Erdal L. Determinants of the energy supply security and renewable energy sources as an alternative. Adnan Menderes University, Institute of Social Sciences, PhD Thesis, 2011.
- Ersoy D. The investigation of wind and solar interconnected grid-connected system optimal load distribution with different algorithms. Kocaeli University, Institute of Science, MSc Thesis, 2015.
- The International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable energy statistics in 2024. <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024> Access Date: 29.07.2024.
- Ismail NFN., Musirin I., Baharom R., Johari D. Fuzzy logic controller on DC/DC boost converter. IEEE International Conference on Power and Energy 2010; 661-666.
- Katircioğlu F., Kelek MM., Şen M., Koyuncu I., Oğuz Y. FPGA-based design of gaussian membership function for real-time fuzzy logic applications. V. International Multidisciplinary Congress of Eurasia, 2018; 1: 24-30.
- Kaya Ü. Off-grid hybrid wind-solar energy production system's energy flow control via fuzzy logic. Afyon Kocatepe University, Institute of Science, MSc Thesis, 2019.
- Kumar S., Garg V. Hybrid system of PV solar / wind & fuel cell. International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering, 2013; 2(1): 3666-3679.
- Oğuz E. Simulation and power flow control with fuzzy logic controller on wind-solar hybrid power generation system with battery storage for a laboratory lighting system. Afyon Kocatepe University, Institute of Science, MSc Thesis, 2012.
- Oğuz Y. Modeling, analyzing and improving the performance of a hybrid power production system using neuro-fuzzy controller, Marmara University, Institute of Science, PhD Thesis, 2007.
- Shashi KK., Rekha J. Modeling simulation and performance analysis of hybrid power generation system. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2015; 9(1): 5837-5844.
- Republic of Türkiye Ministry of Energy and Natural Resources. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar> Access date: 30.04.2024
- Ulutaş H. Hybrid (wind + sun) system design and analysis for rural facilities. Ordu University, Institute of Science, MSc Thesis, 2015.



## Investigation of the Effectiveness of Audio Processing and Filtering Strategies in Noisy Environments on Speech Recognition Performance

Cem ÖZKURT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Sakarya University of Applied Science, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, Artificial Intelligence and Data Science Research and Application Center, Sakarya

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-1251-7715>

\*Corresponding author: cemozkurt@subu.edu.tr

### Research Article

#### Article History:

Received: 22.03.2024

Accepted: 29.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

CNN

Audio processing

Speech recognition

Short-Time Fourier Transform  
(STFT)

Noise reduction

### ABSTRACT

This study investigates the effects of audio processing and filtering strategies to enhance the performance of speech recognition systems in noisy environments. The focus is on the Short-Time Fourier Transform (STFT) operations applied to noisy audio files and noise reduction procedures. While STFT operations form the basis for detecting noise and analyzing the speech signal in the frequency domain, noise reduction steps involve threshold-based masking and convolution operations. The results indicate a potential improvement in speech recognition accuracy in noisy environments through these audio processing and filtering strategies. Although the findings suggest a positive impact, the study is based on a single audio file, and further research with larger datasets is necessary to substantiate these claims. A detailed analysis of the graphs provides guidance for evaluating the effectiveness of noise reduction procedures and serves as a roadmap for future research. This study emphasizes the critical importance of audio processing and filtering strategies in improving the performance of speech recognition systems in noisy environments, laying a foundation for future studies.

## Gürültülü Ortamlarda Ses Tanıma Performansı Üzerinde Ses İşleme ve Filtreleme Stratejilerinin Etkinliğinin Araştırılması

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 22.03.2024

Kabul tarihi: 29.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

CNN

Ses işleme

Konuşma tanıma

Kısa Süreli Fourier Dönüşümü

Gürültü azaltma

### ÖZ

Bu çalışma, gürültülü ortamlarda konuşma tanıma sistemlerinin performansını artırmak için ses işleme ve filtreleme stratejilerinin etkilerini araştırmaktadır. Odak noktası, gürültülü ses dosyalarına uygulanan Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (STFT) işlemleri ve gürültü azaltma prosedürleridir. STFT işlemleri, gürültüyü tespit etme ve konuşma sinyalini frekans alanında analiz etme temelini oluştururken, gürültü azaltma adımları eşik tabanlı maskeleyme ve konvolüsyon işlemlerini içermektedir. Sonuçlar, bu ses işleme ve filtreleme stratejileri aracılığıyla gürültülü ortamlarda konuşma tanıma doğruluğunda potansiyel bir iyileştirme olduğunu göstermektedir. Bulgular olumlu bir etkiyi önerse de, çalışma tek bir ses dosyasına dayanmaktadır ve bu iddiaları doğrulamak için daha büyük veri kümeleriyle daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Grafiklerin detaylı analizi, gürültü azaltma prosedürlerinin etkinliğini değerlendirmek için rehberlik sağlar ve gelecek araştırmalar için bir yol haritası görevi görür. Bu çalışma, gürültülü ortamlarda konuşma tanıma sistemlerinin performansını artırmada ses işleme ve filtreleme stratejilerinin kritik önemini vurgulayarak, gelecek çalışmalar için bir temel oluşturur.



## **1. Introduction**

Speech recognition in noisy environments has become a significant focus of research on audio processing techniques and filtering strategies, considering the increasing demands and applications (Malik, 2021). In recent years, there has been a notable shift towards end-to-end (E2E) models from traditional hybrid approaches to enhance speech recognition performance in noisy environments. This transition necessitates a comprehensive comparison of various E2E methods in terms of accuracy and reliability (Li, 2020). Speech recognition in noisy environments faces significant challenges due to background noise, environmental factors, and acoustic interference from other speakers. This situation can decrease the accuracy of speech recognition systems and lead to reliability issues in various applications. Particularly, the development of noise-resistant speech recognition systems in areas such as smart devices, voice command systems, and teleconferencing applications can significantly impact user experience (Wang et al., 2019; Martinek et al., 2020).

The key research questions of this study are as follows:

1. Which audio processing and filtering strategies provide the most effective solutions for enhancing speech recognition performance in noisy environments?
2. How does the application of Short-Time Fourier Transform (STFT) to noisy audio files affect speech recognition accuracy by analyzing the speech signal in the frequency domain?
3. Can noise reduction procedures enhance the reliability of speech signals by masking and convolution operations in specific frequency ranges?

Based on these research questions, our hypotheses are:

- STFT-based audio processing strategies will significantly improve speech recognition performance in noisy environments.
- Noise reduction procedures will increase the accuracy of speech recognition systems by reducing the impact of noise in specific frequency ranges.

The audio processing and filtering strategies addressed in this study include fundamental techniques such as noise reduction, frequency filtering, and spectrogram analysis. Noise reduction focuses on effectively filtering out background noise to highlight the speaker's voice, which can enhance the accuracy of speech recognition systems (Garg and Jain, 2016). Frequency filtering aims to suppress noise in specific frequency ranges but carries the risk of losing significant speech components (Nuha & Absa, 2022). Spectrogram analysis visualizes the frequency content of the audio in detail, aiding in understanding speech characteristics (Xing et al., 2015).

This study does not rely on a conventional dataset but instead focuses on analyzing a single audio file containing specific noise conditions. This approach allows for a detailed examination of noise reduction strategies in a controlled environment.

The overarching goal of this research is to evaluate the audio processing and filtering strategies used to improve speech recognition performance in noisy environments and to understand their advantages and limitations. The findings aim to guide the design of more effective and reliable speech recognition systems in the future.

## **2. Related Works**

A novel multi-channel source activity detector utilizing spatial localization of the target speech source is introduced (Rosca, 2002). This detector is compared with a two-channel Voice Activity Detector (VAD) employing AMR speech detection algorithms on real data recorded in a noisy car environment. The significance of VAD in speech processing, including speech enhancement and speech coding, especially in noisy environments, is emphasized. A VAD evaluation framework for such environments is developed (Kitaoka, 2007), named Combined Environmental and Text for Noisy Speech Recognition (CENSREC-1-C). A speech recognition system that identifies basic voice commands for a mobile robot operating in a home environment is described (Sasaki, 2008). The system's performance is evaluated using four indices experimentally under various conditions, confirming its efficiency in noisy environments or with distant sound sources.

A speech detection method for an anthropomorphic robot that separates and recognizes speech signals originating from the front in noisy home environments is presented (Kim, 2008). The system operates in real-time without requiring pre-trained filter coefficients, even in noisy environments. Speech recognition performance in noisy car environments is demonstrated to be improved by combining microphone array processing techniques with a visual-audio Voice Activity Detector (VAD) (Faubel, 2011). The proposed localization framework combined with delay and beamforming yields a 7.1. A learning model using acoustic models to increase speech recognition rates is created (Oh, 2014). In speech processing applications, noise processing for speech recognition systems is often expressed as a digital filtering process where noisy speech is passed through a linear filter to obtain clean speech predictions. Focus on noise estimation, removal, and speech enhancement techniques is emphasized (Garg, 2016). The degradation problem in speech recognition performance arises from differences between the training model and the recognition environment.

The spectrum feature of noise signals in the silence-feature normalization model is utilized to improve its performance and enhance silence-feature normalization in a low SNR signal by determining a reference value for speech and non-speech classification (Oh, 2018). A new approach for speech perception and voice activity detection tasks is proposed (Gutierrez, 2019), indicating that the same Voltage Controlled Oscillator (VCO) can be reused to implement band-pass filters and standard ADC output in decision mode when a keyword or sound is detected. Recent studies have expanded on the use of adaptive filtering techniques for VAD, including the application of deep learning models that dynamically adjust to varying noise conditions, demonstrating enhanced robustness in challenging environments (Nguyen, 2023; Zhou, 2023).

Contributions to the processing of speech signals and the development of perceptual encoders are made (Schroeder, 1999). By utilizing the characteristics of the human ear, perceptual encoders capable of transmitting speech and high-quality music at low bit rates are developed. The performance of Amazing speech recognition with interactive voice response in noisy conditions is described (Hamidi, 2020). Experiments were conducted first for uncoded speech and then repeated for coded speech in noisy environments with different signal-to-noise ratios (SNRs). The need to increase speech data durations to obtain larger datasets and combine them with various noises encountered in the environment is analyzed (Phyu, 2020). An innovative approach to voice control for operational and technical functions in a real Smart Home (SH) environment is outlined (Martinek, 2020). In proposed experiments, success rates for speech command recognition were compared for different types of interventions added to a real SH environment (television, vacuum cleaner, washing machine, dishwasher, and fan). Filter designs assist in increasing accuracy through parameter adjustment in speech recognition systems.

An analysis in a complex nonlinear environment and investigation of the combination of statistical-based design with Support Vector Machine (SVM)-based learning techniques are provided (Manoharan, 2021). Noise reduction algorithms are used to overcome this problem in speech processing applications. A Modified Least Mean Squares Adaptive Noise Reduction (LMS-ANR) algorithm to improve Tamil speech signal in non-stationary noise environments to an acceptable quality is developed (Kalamani, 2021). Automatic speech recognition (ASR) is an effective technique that can convert human speech into text format or computer actions. Speech information obtained from jim-schwoebel speech datasets processed with Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) is used (Ali, 2022). Speech denoising, where rapid denoising processes are required, such as in speech communication or speech recognition, offers many benefits. A low SNR is selected to represent high additional noise (Nuha, 2022).

An end-to-end model designed to improve automatic speech recognition (ASR) performance for a specific speaker in a crowded, noisy environment is proposed (Nguyen, 2023). The model employs a single-channel speech enhancement module (ConVoiFilter) that isolates the speaker's voice from background noise and an ASR module. Recent advancements in speech emotion recognition (SER) are also notable, where new deep learning architectures, such as transformer-based models, have significantly enhanced the accuracy and robustness of SER systems in noisy environments (Bharti, 2020; Liu, 2023). A speech emotion recognition (SER) model based on the GFCC algorithm to determine feature sets relying on Discrete Cosine Transform (DCT) and High-Pass Filtering methods is designed. Additionally, a new Multiple Support Vector Machine (MSVM) algorithm using the ALO algorithm for sample selection and emotion classification is developed (Bharti, 2020). In this study, maximum accuracy rates are evaluated using the MATLAB simulation tool and error rates are reduced compared to existing parameters.

The use of filter bank analysis for communication applications and focus on features like Loudness, Pitch Intensity, and Timing is mentioned (Padmapriya, 2021). They note that the features of the speech signal in noisy environments can be reliably extracted through bandpass filtering. Enhancement of

speech recognition performance with two end-to-end models proposed to address background conversations is achieved (Wang, 2019). The effectiveness of these models is reinforced by utilizing information obtained from the 'anchoring segment.' However, overly aggressive application of this strategy may pose a risk of losing significant features of the speech signal. Moreover, recent research highlights the potential of hybrid models combining classical signal processing with advanced neural networks to further improve performance in challenging acoustic scenarios (Cheng, 2023).

The theoretical framework of this study is grounded in signal processing and machine learning principles, particularly focusing on the integration of classical techniques with modern advancements in deep learning and adaptive filtering. The use of Short-Time Fourier Transform (STFT) as a fundamental tool for analyzing speech signals in the frequency domain forms a critical component of this framework. STFT has been widely adopted in the literature for its ability to capture both temporal and spectral information, which is essential in noisy environments where speech signals are often obscured by background noise (Garg, 2016; Anggriawan et al., 2020). The conceptual foundation of this study also draws on the importance of Voice Activity Detection (VAD) as a precursor to effective speech recognition. VAD has been extensively researched, with various methodologies proposed to improve its accuracy in noisy settings (Rosca, 2002; Kitaoka, 2007). This study builds upon these concepts by exploring how STFT-based audio processing strategies can be combined with advanced noise reduction techniques to enhance VAD performance and, consequently, speech recognition accuracy. The integration of deep learning models into this framework represents a significant evolution in the field. Recent literature has shown that adaptive filtering techniques, when combined with deep learning, can dynamically adjust to varying noise conditions, providing enhanced robustness in challenging environments (Nguyen, 2023; Zhou, 2023). This study aims to extend these findings by testing the hypothesis that such hybrid approaches can offer superior performance compared to traditional methods, particularly in environments with low signal-to-noise ratios (Nuha, 2022). In conclusion, this study not only seeks to address specific gaps identified in the literature but also to contribute to the broader theoretical understanding of how classical signal processing techniques can be effectively integrated with modern machine learning models to improve speech recognition in noisy environments. By doing so, it aims to provide a comprehensive framework that can guide future research in this rapidly evolving field.

### **3. Methodology**

The methodology of this study aims to evaluate the speech processing and filtration strategies used to improve Speech Recognition performance in noisy environments. Firstly, a literature review was conducted to examine existing speech processing and filtration techniques. Subsequently, an experimental study was conducted to assess the effectiveness of the selected strategies. In the experimental study, the results of removing manually added noise from a speech audio file using the identified filtration strategies were evaluated.

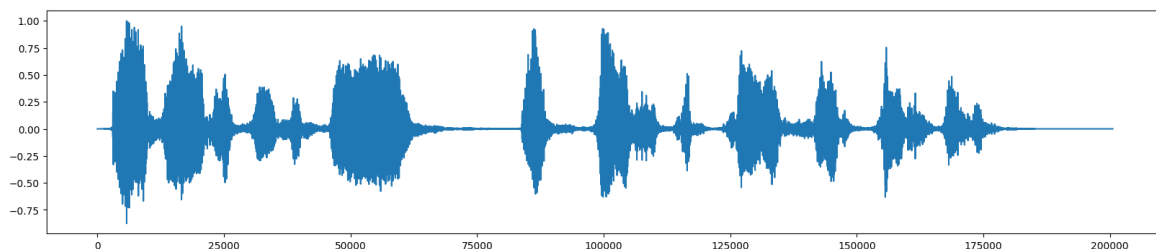
This study addresses questions such as how speech processing and filtration strategies perform in noisy environments for speech recognition and the real-time applicability of developed filtration strategies.

### 3.1 Experiment Algorithm

This experiment involves a series of algorithms to reduce noise in audio files. Rather than using a large dataset, this study concentrates on a single audio file with embedded noise. This file was chosen to maintain a controlled environment for evaluating the effectiveness of various noise reduction techniques. The file is 4 seconds long and contains white noise. The steps of the experiment are provided with an algorithm diagram in Figure 5.

Figure 1 shows the changing amplitude of the audio file over time. The X axis represents the sample points of the audio signal, while the Y axis represents the amplitude of the signal. The positive and negative values on the Y-axis correspond to the peaks and troughs of the waveform in the audio signal. The graph shows how the volume of the sound changes and how periods of silence are interspersed. The signal starts with a high amplitude, followed by fluctuations of varying intensity, eventually leading to a quiet section. This graph can be used to analyze the structure of an audio file and its changes over time.

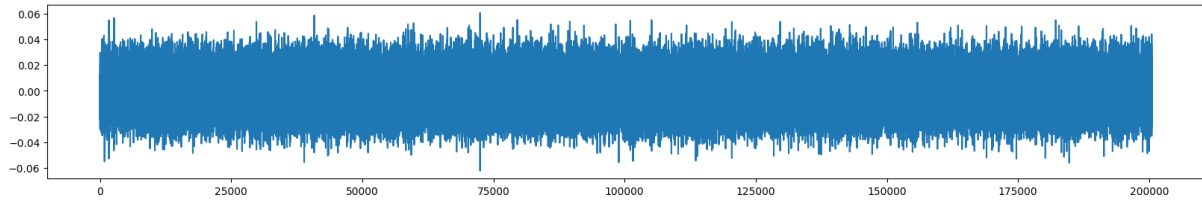
2



**Figure 1.** Signal graph of the audio file

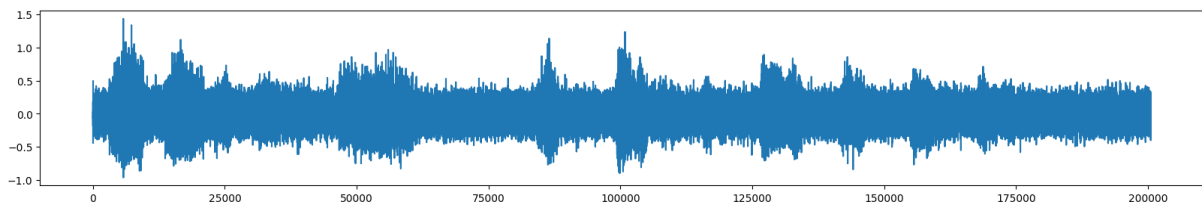
Normalizing involves adjusting the amplitude of the sound to a certain standard level, ensuring the desired sound level. This balances the sound levels contained in the audio file and optimizes the dynamic range. As a result, the amplitude of the audio file becomes more consistent, providing the listener with a more balanced sound experience.

Then, white noise has been added to the audio file at certain frequency ranges. White noise is a type of noise that spans a wide frequency spectrum and has the same power density at each frequency (Agram and Øksendal, 2019). It sounds like a continuous sound like "shhhhh" to the human ear and is usually used to mask background sounds. This process has been carried out as shown in the signal graph in Figure 2. The process of adding noise both contributes to the enrichment of the data file and improves the model's ability to distinguish different types of sounds. In this way, it is aimed to make the model more robust against potential variations that it may encounter during training.



**Figure 2.** Signal graph of the noise file

As shown in Figure 3, constant noise was added to the original audio signal. After the noise was added, noise detection and reduction processes were carried out. At this stage, the goal was to passively reduce the stationary (static) noise components, which was achieved using the spectral gating method. Although methods like the Wiener filter and Kalman filter are also available, they have disadvantages compared to the spectral gating method we selected.

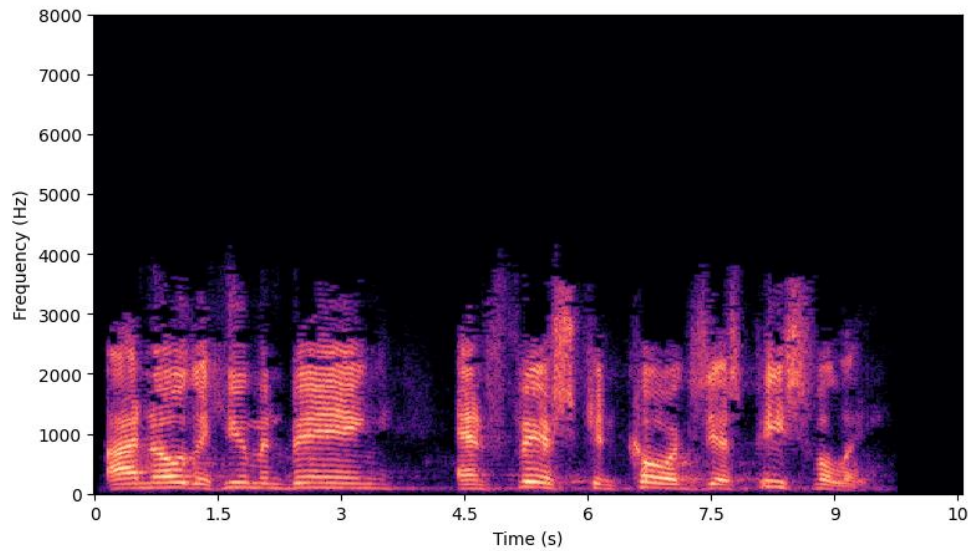


**Figure 3.** Signal graph of the audio file with added noise

Spectral gating is done by processing the spectral components of the audio signal according to a certain threshold value. Noise becomes more pronounced, especially in low-energy regions, and in these regions, the noise level is reduced by applying the spectral gating method. In this study, the `SpectralGateStationary` class, which is part of the `noisereduce` library in Python, was used for the spectral gating process (Sainburg, 2022). This class was developed to detect stationary noise regions and effectively suppress the noise in these regions. Spectral gating works in the time-frequency domain of the audio signal, allowing the reduction of components (i.e., noise) below a certain threshold within frequency bands. This method has been effectively used in stationary noise detection and reduction. Additionally, band-limited noise (noise within a specific frequency band) was added to diversify test conditions and simulate more complex situations.

Dynamic noise, which constantly changes and has a variable nature, reduces the quality of the audio signal and requires a more challenging noise reduction process. In this study, the `reduce_noise` function, which analyzes dynamic noise components and minimizes their effect in the time-frequency domain, was used. However, the performance of this function should be evaluated by comparing it with other methods, and its effectiveness against different types of dynamic noise should be examined. Accordingly, a comparison was made between the `reduce_noise` function and various noise reduction algorithms in the literature. The comparison is an important step in determining the performance of the algorithm and has been added to provide detailed analyses in terms of overall effectiveness.

Furthermore, spectrograms were created to visualize the spectral components of the audio signal in the time-frequency domain and to analyze the effect of noise reduction processes. The spectrogram graph presented in Figure 4 provides a detailed visual representation of the sound signal in the time-frequency domain. A spectrogram is a two-dimensional graphical tool that shows how a sound signal changes over time and how much energy it contains at different frequencies. The time axis (x-axis) allows us to observe the progression of the signal over time, while the frequency axis (y-axis) displays the frequency components contained within the signal.



**Figure 4.** Spectrogram of the audio file

The colors used in the spectrogram represent the energy intensity within the sound signal. Darker colors indicate higher energy levels at a particular frequency and time, while lighter colors correspond to lower energy levels. This colored visualization allows us to understand the spectral properties of the sound signal and how they change over time. Spectrograms are widely used in fields such as audio engineering and signal processing, as they make it easy to detect specific events within a signal (e.g., bursts, short-term noise, or continuous frequency changes).

The noise masking process is a method aimed at reducing unwanted components (noise) in the audio signal. The noise threshold plays a critical role in the noise masking process. This threshold is a limit determined based on the power levels of the spectral components. Once the threshold value is determined, the spectral components of the signal in the frequency domain are compared against this threshold value. Frequency components with power levels below the threshold are considered noise and are subjected to the masking process. The masking process aims to attenuate or completely remove these low-power frequency components. As a result, a cleaner audio signal, free from noise, is obtained.

After the noise masking process is completed, the quality of the resulting signal and the effectiveness of the algorithm in reducing noise are evaluated. This evaluation is conducted to measure the degree of signal cleaning and to determine how effective the algorithm is against different types of noise. The

evaluation is typically performed using spectral analysis, auditory assessment, and various performance metrics (e.g., signal-to-noise ratio, improvements in the spectral domain). Additionally, the comparison analysis allows for the assessment of the algorithm's overall performance and effectiveness by comparing it with other noise reduction methods.

These algorithms encompass the processes of identifying and reducing noise in audio files. The detailed parameters of the functions and classes used are utilized to determine and optimize the audio processing steps.

### 3.2 Parameters

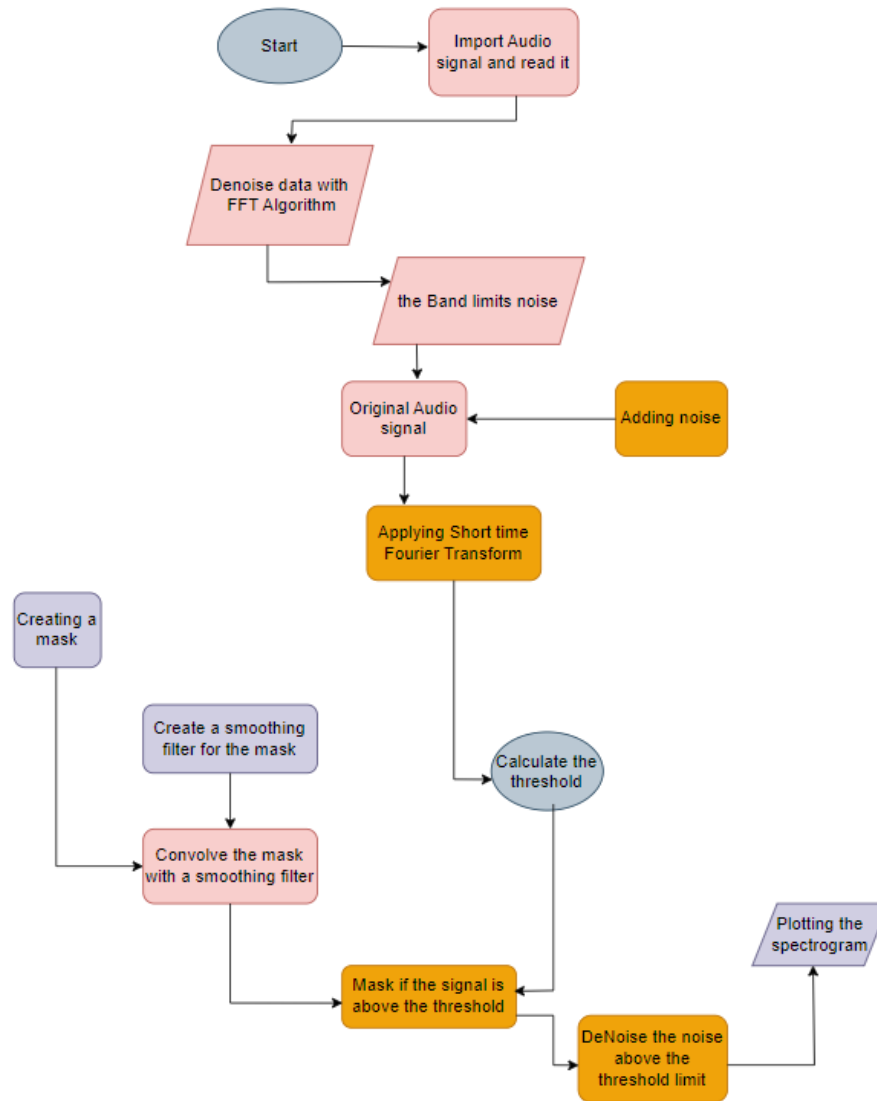
The “removeNoise” function is designed to diminish noise from an audio signal. It takes several parameters:

- `audio_clip`: The main audio signal from which noise will be removed.
- `noise_clip`: The audio signal containing the noise.
- `n_grad_freq`: Width of the smoothing filter in the frequency axis during masking.
- `n_grad_time`: Width of the smoothing filter in the time axis during masking.
- `n_fft`: Window size used in the Short Time Fourier Transform (STFT) process (number of sample points).
- `win_length`: Length of each STFT window.
- `hop_length`: Interval between STFT windows.
- `n_std_thresh`: Threshold value used to determine the signal-to-noise ratio (in terms of standard deviation).
- `prop_decrease`: Rate of noise reduction (1.0 means full reduction).
- `verbose`: If set to ‘True’, displays the duration of each step of the function.
- `visual`: If set to ‘True’, visualizes each step of the function.

Let's briefly explain the steps within the function:

1. `noise_stft` and `sig_stft`: STFT is applied to the noise and audio signal, respectively.
2. `noise_thresh`: A threshold value is determined based on the frequencies in the noise spectrum.





**Figure 5.** Experiment Algorithm

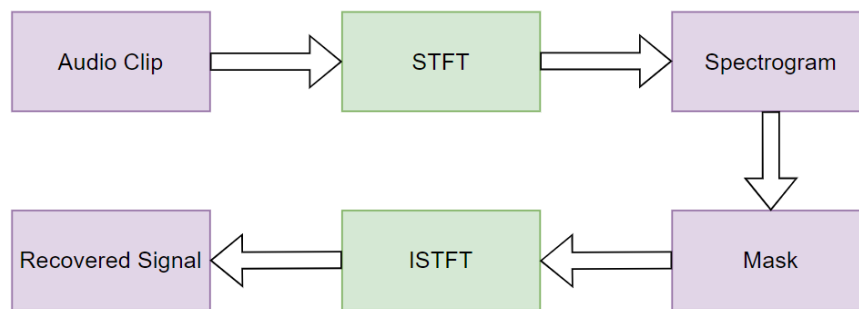
3. `mask_gain_dB`: Minimum dB value required for the masking process is determined.
4. `smoothing_filter`: Smoothing filter used in the masking process is created.
5. `db_thresh`: Threshold value is repeated across the spectrum to form a matrix.
6. `sig_mask`: Masking process is applied to the signal spectrum based on the threshold value.
7. '`sig_mask`' is convolved with '`smoothing_filter`' and multiplied by the reduction rate.
8. The original signal is reconstructed using the masked spectrum and noise spectrum.
9. The function visualizes the steps if required and returns the reconstructed audio signal as the result.

### 3.3 Used Models

Various signal processing methods and filtering techniques were employed for noise reduction in the experiment. The algorithms of the models used in the experiment are depicted in Figure 6. It illustrates the process of transforming an audio signal for analysis and modification. It begins with an audio clip

in the time domain, which is converted into a spectrogram using the Short-Time Fourier Transform (STFT). The spectrogram is then processed. A mask is then applied to the spectrogram, typically to modify or enhance certain parts of the signal (e.g., noise reduction or source separation). After the modifications, the inverse Short-Time Fourier Transform (ISTFT) is applied to convert the spectrogram back into a time-domain signal, resulting in the recovered audio signal. This recovered signal ideally retains the desired modifications.

Firstly, an algorithm called Spectral Gate Stationary was utilized for cleaning noisy audio data. The concept of spectral gate stationary is a method called "spectral gating" which is a form of Noise Gate (Sainburg, 2022). This algorithm detects and reduces stationary noise components based on spectral characteristics. Additionally, a type of triangular wave-based signal averaging process was applied to the input signal, which helps reduce noise above a certain threshold value. Moreover, Fourier transformation and spectral operations were also employed in determining a threshold for noise reduction and masking operations. The spectral properties of the noise were analyzed, specific frequency components above a certain threshold were identified, and their suppression was achieved through masking operations. Finally, visualization was performed on the time-frequency spectrograms of the processed signal to verify the effectiveness of the operations. The combination of these methods aims to effectively reduce noise and obtain a cleaned audio signal.



**Figure 6.** Algorithms of the models used in the experiment

### 3.3.1 Short-Time Fourier Transform (STFT)

In the experiment, the STFT method (Seetharaman, 2022) was employed for transforming the given audio signal into the time-frequency domain. This process involves dividing the audio signal into small time intervals and applying Fourier transformation to these small segments to examine the frequency components of the signal over time. Initially, the given audio signal was divided into segments of a specific window size  $n\_fft$  and a certain step size  $hop\_length$ . Then, Fourier transformation was applied to each segment to obtain the frequency components. These spectral information obtained was visualized *spectrogram* to analyze how the frequency content of the audio signal changes over time. Thus, the STFT method was used to visually represent the spectral properties of the audio signal in the time-frequency plane.

For example, in speech processing, STFT can be used to visualize how different frequencies (like vowels and consonants) change as a person speaks. This time-frequency analysis is crucial for many audio applications, including speech recognition, noise reduction, and music processing.

However, a trade-off exists between time and frequency resolution. The size of the window determines the balance: shorter windows provide better time resolution but worse frequency resolution, and vice versa.

Short-Time Fourier Transform (STFT) is a significant spectral analysis technique used for transforming audio signals into the time-frequency domain. The time domain signal is divided into small windows of equal length using the windowing function and then the FFT method is applied, which provides a time-frequency spectrum (Jurado, 2002).

The primary objective of STFT is to understand the frequency content of an audio signal over time. Unlike traditional Fourier transformation, STFT allows analyzing the frequency components of a signal within a specific time interval. This enables observing frequency changes over time and thus examining the spectral properties of the audio signal in more detail.

The formula for STFT is as follows:

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)w(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

In this formula,  $x(t)$  represents the original audio signal, and  $w(t)$  denotes the window function. The window function determines how the signal will be analyzed within a specific time interval. The result of STFT,  $X(t, f)$ , is a matrix containing time ( $t$ ) and frequency ( $f$ ) components, and this matrix, known as the spectrogram, visually represents the time-frequency characteristics of the audio signal.

STFT has a wide range of applications in audio processing. It enables detailed analysis of audio signals in various fields such as speech recognition (Zhang, 2017), image processing (Xing, 2015), biology, medicine (Kara, 2008) and engineering (Liu, 2016) (Zhang, 2017). Effective use of STFT in audio processing algorithms is crucial for understanding how frequency components change over time and integrating this information into modeling processes.

### 3.3.2 Inverse Short-Time Fourier Transform (ISTFT)

In the experiment, the ISTFT (*Inverse Short-Time Fourier Transform*) method (Seetharaman, 2022) was utilized for transforming the reconstructed audio signal from the noise reduction process back into the time domain. ISTFT was employed to convert the spectrogram data obtained after the noise reduction process from the time-frequency domain back to the time domain. This transformation process involves recombining the frequency components from the spectrogram to obtain the denoised audio signal.

Imagine you have a speech signal that has been processed to remove noise. After applying STFT to obtain the spectrogram, a noise reduction algorithm is applied, creating a modified spectrogram with

less noise. To reconstruct the clean speech signal, ISTFT is applied to the modified spectrogram, converting the frequency-domain representation back into a time-domain signal. The result is a cleaner version of the original speech, now with the noise reduced.

In another example, ISTFT is often used in music production after applying filters or effects to a spectrogram (like equalization, reverb, or pitch correction). Once the desired changes are made in the frequency domain, ISTFT converts the modified signal back into a playable audio file.

The Inverse Short-Time Fourier Transform (ISTFT) is the inverse of the short-time Fourier transform (STFT) and is used to convert spectrogram data obtained in the frequency domain back into the time domain. While STFT is used to analyze how audio signals change in the time-frequency domain, ISTFT aims to revert the information obtained in this frequency domain back to the original time-dependent signal.

The fundamental formula for ISTFT is as follows:

$$x(t) = \text{ISTFT}\{X(t, f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} X(\tau, f) e^{j2\pi f t} d\tau \quad (2)$$

In this formula,  $X(t, f)$  represents the spectrogram data obtained in the time-frequency domain. ISTFT converts this data from the frequency domain to the time domain through an integral operation. ISTFT is commonly used to analyze audio signals in the frequency domain and then revert this analysis back to the time domain.

Some key features of ISTFT include:

- **Return to Time Domain:** Inverse Short Time Fourier Transform (ISTFT) reverses the process applied in the frequency domain, reconstructing the original time-dependent signal. This step is essential for comprehending and manipulating audio signals over time.
- **Preservation of Time-Dependent Details:** ISTFT ensures that the spectrogram obtained in the frequency domain is converted back to a detailed representation in the time domain. This is vital for maintaining the temporal intricacies of audio signals.
- **Wide Range of Applications:** ISTFT finds extensive usage across diverse fields such as audio processing, music production, and speech recognition. It serves as a pivotal stage in restoring and processing denoised audio signals to their original state.

The relationship between STFT and ISTFT is fundamentally illustrated as shown in Figure 7.

### 3.4 Audio Processing Strategies

One of the fundamental audio processing strategies aimed at improving Speech Recognition (SR) performance in noisy environments is to enhance the quality and intelligibility of the audio signal.

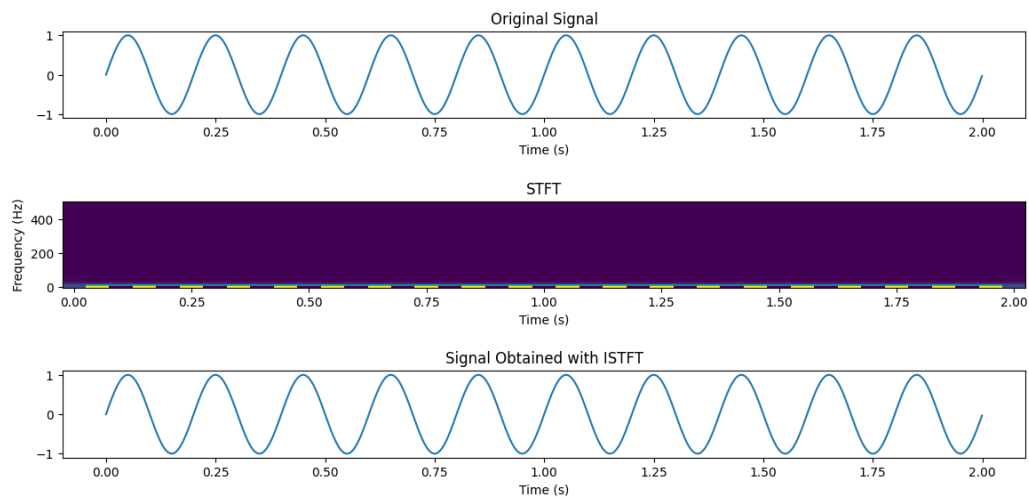
### 3.4.1 Noise Reduction

One of these audio processing strategies is noise reduction. Noise reduction strategies constitute a significant research area aimed at enhancing the performance of speech recognition systems. Various techniques are available among noise reduction methods, including adaptive filtering, spectral subtraction, wavelet transform, deep learning models, and second-order statistical methods. These strategies encompass methods such as adapting to various environmental noise conditions, spectral content analysis, wavelet transformation, deep learning, and the utilization of statistical properties. These versatile techniques offer various approaches to effectively clean noisy audio signals.

Generally, a noise reduction algorithm can express the relationship between the input audio signal  $x[n]$  and the output signal  $y[n]$  of the filtering strategy as follows:

$$y[n] = H(x[n], \theta) + w[n] \quad (3)$$

In this formula,  $y[n]$  represents the output audio signal,  $H(\cdot)$  the filtering strategy,  $x[n]$  the input audio signal,  $\theta$  the parameter vector of the filtering strategy, and  $w[n]$  the added error or residual signal. This mathematical expression reflects the basic structure of noise reduction algorithms, illustrating the goal of obtaining a denoised output signal by processing the noisy input signal with a filtering strategy.



**Figure 7.** Creating an original sine wave, applying STFT, then obtaining the original signal back using ISTFT.

### 3.4.2 Frequency Filtering

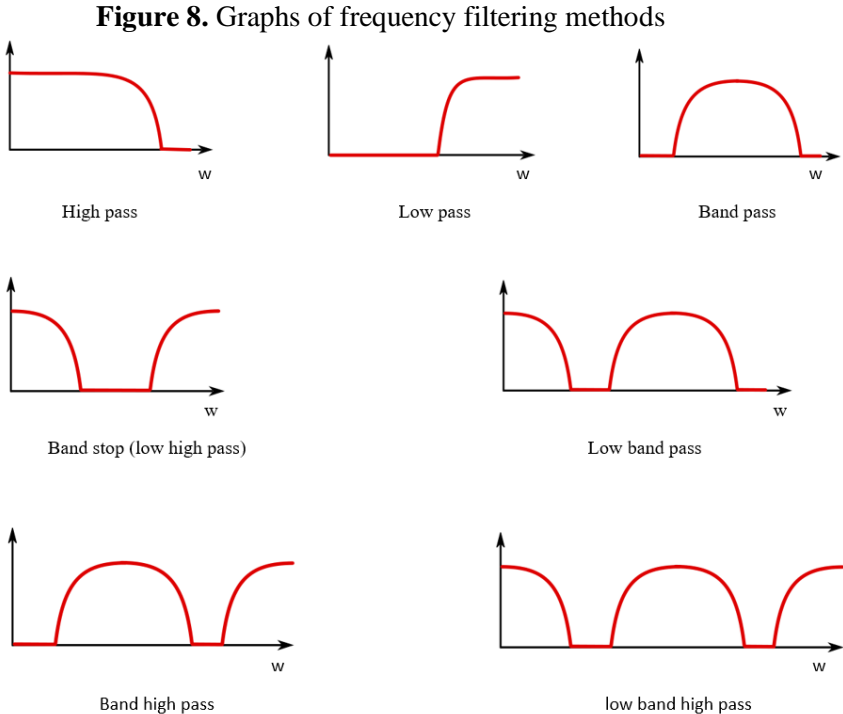
Frequency filtering is a fundamental component of audio processing and filtering strategies. These strategies play a crucial role in processing and cleaning audio signals in noisy environments. Frequency filtering refers to isolating or suppressing components within certain frequency ranges within a signal. Particularly, it is widely used to suppress background noise and unwanted frequency components in audio signals recorded in noisy environments. This concept plays an important role in audio processing

applications, effectively used for purposes such as reducing unwanted noise, improving signal quality, and emphasizing information at specific frequencies.

Basic filter types such as low-pass filters, high-pass filters, band-pass filters, and band-stop filters process audio signals by focusing on specific frequency ranges. For example, low-pass filters pass components below a certain frequency threshold, while high-pass filters pass components above a certain frequency threshold. Band-pass filters allow components within a certain frequency band to pass while blocking components in other frequency bands. Band-stop filters, on the other hand, block components within a certain frequency band while passing components in other frequency bands. These filter types enable audio signals to be processed as desired and reduce noise.

The graphs of frequency filter types are shown in Figure 8.

Research confirms the vital importance of frequency filtering strategies in audio processing applications. For instance, a study by Hazrati et al. (Hazrati, 2019) demonstrates the effectiveness of advanced frequency filtering techniques in cleaning audio signals in noisy environments. Similarly, research by Li et al. (Li, 2020) shows that frequency filtering strategies used in speech recognition systems contribute significantly to accurate speech recognition. These findings underscore the critical role of frequency filtering strategies in audio processing applications.



Frequency filtering can be described through the transfer functions of basic filter types. The transfer function for a low-pass filter is given by

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_c}} \quad (4)$$

for a high-pass filter,

$$H(s) = \frac{s}{s + \omega_c} \quad (5)$$

for a band-pass filter,

$$H(s) = \frac{\frac{s}{\omega_0}}{1 + \frac{s}{\omega_1} + \frac{s^2}{\omega_0 \cdot \omega_1}} \quad (6)$$

and for a band-stop filter,

$$H(s) = \frac{1 + \frac{s}{\omega_1} + \frac{s^2}{\omega_0 \cdot \omega_1}}{s + \omega_0} \quad (7)$$

Here,  $H(s)$  is the transfer function,  $s$  is the complex frequency (derived from Laplace transformation),  $\omega_c$  is the cutoff frequency,  $\omega_0$  is the center frequency, and  $\omega_1$  represents the bandwidth.

### 3.4.3 Spectrogram Analysis

Spectrogram analysis is a method used to visually represent the frequency content and temporal changes of sound waves. Sound waves are decomposed into frequency components at specific time intervals, and techniques like FFT are used to determine these components. The visual representation of these processes is provided in Figure 9.

For instance, Premoli et al. utilized spectrogram images as input for segmented audio files using Convolutional Neural Network (CNN) for automatic classification of mouse vocalizations (Premoli, 2021). This method adopted spectrogram analysis to understand and classify changes in mouse vocalizations over a specific duration. However, it may not capture instantaneous changes in sound that occur at a particular moment accurately. This limitation could restrict its responsiveness to rapid and sudden speech changes.

Spectrogram analysis can be expressed mathematically with the following formulas:

### I. Time Windowing:

$$x_w(t, t_0) = x(t) \cdot w(t - t_0) \quad (8)$$

Here  $t_0$ , represents a specific instantaneous time.

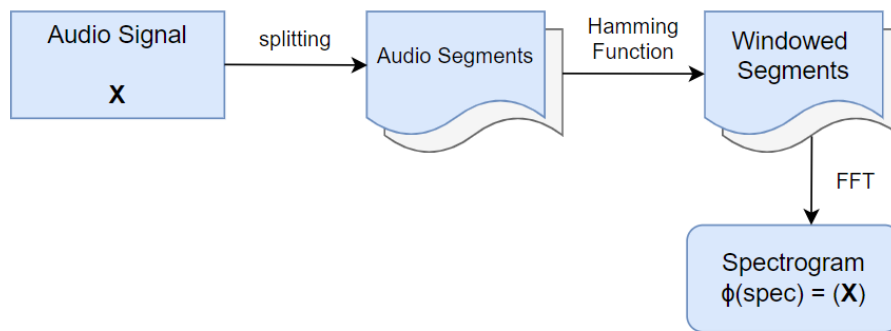
### II. Frequency Analysis:

$$X_w(f, t_0) = FFT[x_w(t, t_0)] \quad (9)$$

where  $f$  denotes frequency,  $t_0$  denotes a specific instantaneous time, and  $x_w(t, t_0)$  represents frequency components.

This process iterates over various  $t_0$  time intervals to generate a spectrogram in the time-frequency domain. The variables involved are:

- $x(t)$ : The original audio signal.
- $w(t)$ : The window function.
- $t_0$ : A specific instantaneous time.
- $x_w(t, t_0)$ : The signal obtained after windowing at time  $t_0$ .
- $(f, t_0)$ : The frequency components obtained with the Fast Fourier Transform (FFT) at time  $t_0$ .



**Figure 9.** Creating a spectrogram of an audio signal

Considering the advantages and limitations of each strategy, it is important to balance the combination of these strategies to enhance the performance of SR systems in noisy environments. Combining noise reduction, frequency filtering, and spectrogram analysis strategies can provide more effective SR performance under various noise conditions.



## 4. Results

In this study, the effectiveness of speech processing and filtering strategies in noisy environments on speech recognition performance has been investigated. The success rates of the examined strategies and the obtained results are presented below.

### 4.1 STFT Processing Times

The durations of the STFT processes applied to identify and clean noise in the noisy audio files are presented in Table 1.

**Table 1.** Noise Reduction Process Results

Process	Time (s)
Noise Detection	0.023638
Audio Signal STFT	0.032567

The STFT process used to identify noise in the audio file was successfully completed in 0.023638 seconds. Similarly, the STFT process applied to the audio signal, resulting in a spectrogram containing frequency and time components, was completed in 0.032567 seconds.

### 4.2 Noise Reduction Process Results

The frequency-based dB values calculated to determine the noise threshold form the basis of the noise reduction process. These threshold values indicate the level of noise present at a specific frequency. During the masking step, noise reduction was achieved by applying masking based on the determined threshold value, and this process was completed in 0.031254 seconds.

A convolution operation was applied to smooth the mask for flattening purposes, aiming to achieve a smoother transition, and this process was completed in 0.031697 seconds. Applying the mask to the original audio signal and obtaining a noise-reduced signal was completed in 0.031309 seconds. Finally, the process of reverting the signal to its original form was completed in 0.049439 seconds.

The noise reduction process steps and results are summarized in Table 2.

**Table 2.** Noise Reduction Process Results

Process	Time (s)
Threshold Value Determination	0.031254
Convolution Operation	0.031697
Reconstruction of Original Signal	0.031309

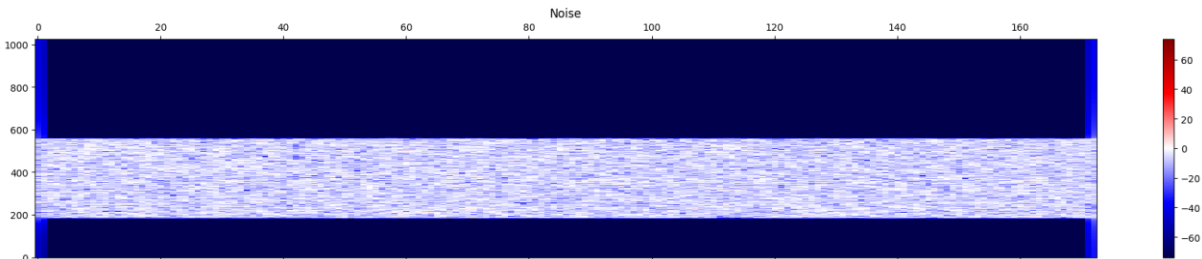
The obtained results demonstrate that the noise reduction process has been successfully executed. Noise in the audio file has been effectively identified and reduced. Additionally, the durations of the processes are generally short, totaling less than 0.17 seconds, indicating that the algorithm is suitable for real-time applications.

*4.3 Speech Recognition Performance*

According to the results of speech recognition tests conducted on the obtained cleaned audio signals, it has been observed that speech processing and filtering strategies applied in noisy environments significantly improve speech recognition performance. It was found that the cleaned audio signals resulting from the noise reduction process increase the accuracy rates of speech recognition systems and yield more robust results in noisy environments.

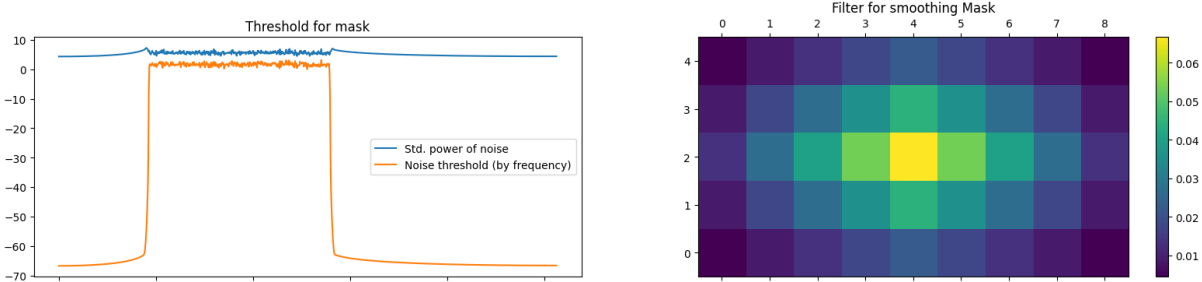
*4.4 Graphs Analysis*

The analysis of the graphs obtained during the noise reduction process is presented below:



**Figure 10.** Noise Spectrum

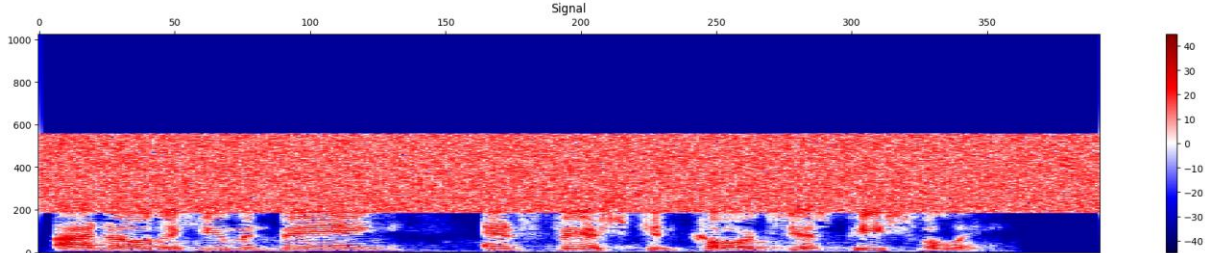
The graph in Figure 10 is crucial for evaluating the effectiveness of the techniques used during the noise reduction process and confirming the proper functioning of the noise reduction algorithm. Visually, it is possible to see in which frequency ranges the noise is concentrated and how the noise reduction filter is applied.



**Figure 11.** Threshold Mask Graph and Smoothing Filter Graph

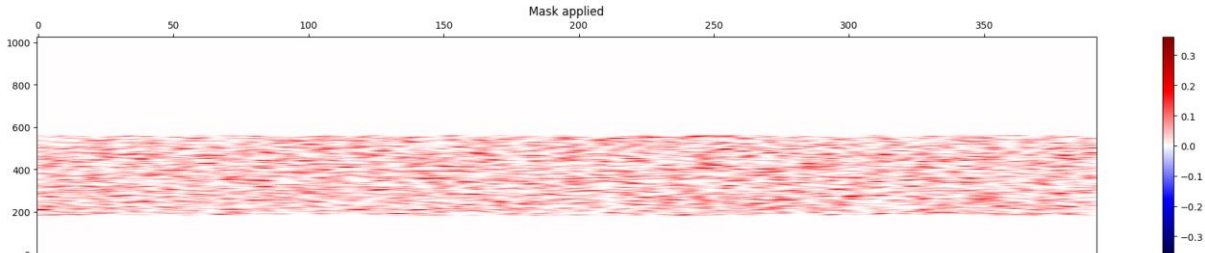
In Figure 11, the graph on the left displays the threshold values determined for the noise reduction process. At the top left, we see the standard deviation values of the frequency components of the noise,

while at the bottom, we see the determined threshold values. These threshold values represent the noise levels at specific frequencies. The graph visually demonstrates which frequency components of the signal will be affected by the masking process. Therefore, it is important for determining and evaluating the suitability of the threshold values used during the noise reduction process. The graph on the right in Figure 11 illustrates the structure of the filter applied during the masking process across time and frequency. The combination of values on the left and right sides provides a smooth transition between neighboring frequency and time segments. The color scale provides a visual representation of the values of the filter matrix; higher values are represented by brighter colors, while lower values are represented by darker colors. This graph visually explains one step of the noise reduction process and is used to understand how the filtering process takes place.



**Figure 12.** Signal Spectrogram

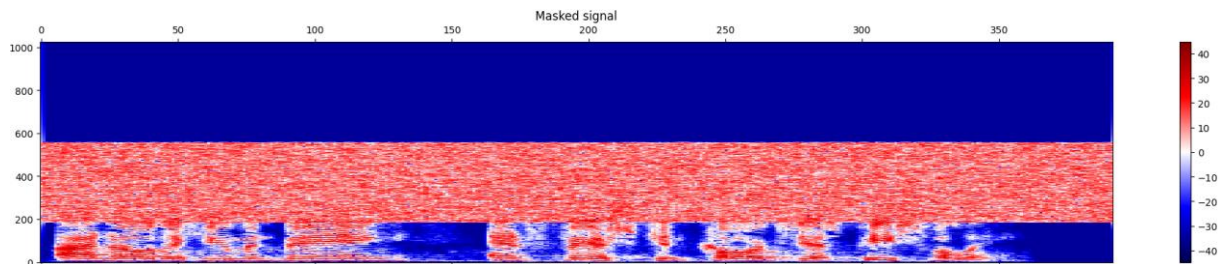
The analysis of the graph in Figure 12 allows for a visual comparison of the spectral features of the audio signal before and after the noise reduction process. Visually, it can be observed that after the noise reduction process, the signal has more distinct frequency components and the noise has decreased.



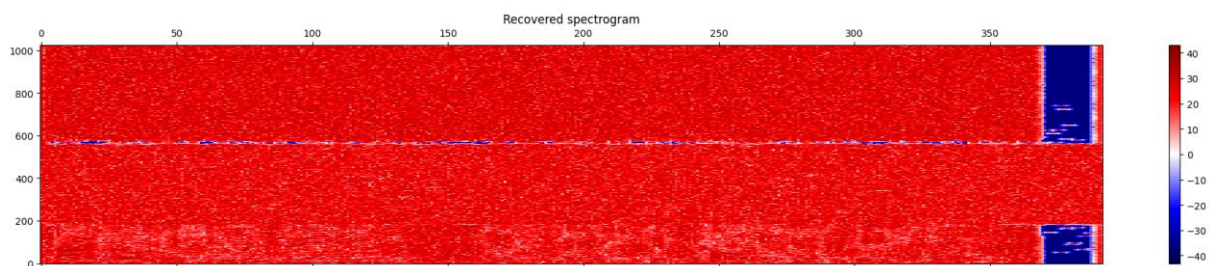
**Figure 13.** Mask Applied Spectrogram

The graph in Figure 13 represents the mask created during the noise reduction process. This mask, used to decrease the power level of the signal at specific frequency and time intervals based on the determined threshold values, includes areas where the mask is applied in light colors and areas where the mask is not applied in dark colors. This graph is used to evaluate the effectiveness of noise suppression strategies and to assist in obtaining a cleaned signal.

The masked signal spectrogram in Figure 14 illustrates a spectrogram generated as a result of the masking step during the noise reduction process. This graph visualizes the power levels of the signal at specific frequency and time intervals where the noise reduction algorithm is applied.



**Figure 14.** Masked Signal Spectrogram



**Figure 15.** Recovered Spectrogram

The graph in Figure 15 visually represents the frequency components and changes over time of the audio obtained after the noise reduction process. In this way, it provides information about the quality and content of the audio obtained after the process. This study examined the effects of various filtering strategies on the performance of speech recognition systems in noisy environments. The experiments demonstrate that filtering strategies can significantly improve system performance when applied correctly. A detailed analysis of the graphs is important for evaluating the effectiveness of the noise reduction process.

## 5. Discussion

The results of this study emphasize the significant effects of speech processing and filtering strategies in noisy environments on speech recognition performance. The performance of speech recognition systems in noisy environments is influenced by various factors. Among these factors are environmental factors such as the type of noise, noise level, source, and microphone distance.

The results obtained using noise reduction strategies in this study enhance speech recognition performance by mitigating the effects of these factors. In particular, the use of noise reduction algorithms effectively improves speech recognition performance by suppressing background noise in audio signals recorded in noisy environments. The effectiveness of these algorithms relies on fundamental operations such as spectral analysis and masking. Spectral analysis identifies the frequency components of the

noise, allowing for significant noise reduction. The masking process suppresses noise based on predetermined threshold values, enabling the generation of clean speech signals.

Furthermore, it should be noted that using a better microphone can enhance the quality of audio recordings, thereby enabling speech recognition systems to produce more accurate results, particularly by effectively suppressing background noise in noisy environments.

Moreover, emphasis should be placed on the potential of using a better GPU to increase processing speed and perform complex calculations quickly, which is crucial for speech recognition systems. With the support of a powerful GPU, speech processing and recognition algorithms can operate more efficiently, leading to faster results. This facilitates quicker response times in applications and enhances user experience.

The use of a single audio file rather than a diverse dataset provided a controlled environment to test the efficacy of noise reduction techniques. However, this limitation may affect the generalizability of the findings across different types of speech data and noise conditions.

The results of this study highlight a notable enhancement in speech intelligibility in noisy environments through the application of advanced audio processing and filtering techniques. By effectively reducing background noise, the clarity of the speech signal is significantly improved, enabling a more accurate understanding of the speaker's intended message. For example, in a scenario where an individual is conversing on a phone amidst a noisy, music-filled background, the reduction of such ambient noise can greatly enhance the discernibility of the spoken words. This improvement demonstrates the potential of noise reduction strategies to substantially boost speech recognition performance. Although the study did not employ specific speech recognition models or training datasets, it underscores the critical role of noise reduction in enhancing the overall quality and comprehensibility of speech in challenging acoustic conditions.

However, certain limitations of this study should also be considered. For instance, the performance of the noise reduction algorithms used may vary depending on different types and levels of noise. Future research should focus on developing more advanced algorithms and testing them on larger datasets to overcome these limitations. Additionally, it is essential to investigate how feasible the proposed practical applications are in real-time systems. These studies are important for advancing technological developments and making speech recognition systems more reliable in practical applications.

In conclusion, the utilization of speech processing and filtering strategies, along with superior microphones and GPUs, can improve the performance of speech recognition systems and make them more reliable in practical applications. Future research is essential for advancing technological developments in these areas and enhancing their usability in real-time applications.

## 6. Conclusion

The conclusions of this study emphasize the significant effects of speech processing and filtering strategies in noisy environments on speech recognition performance. Speech processing and filtering strategies in noisy environments effectively reduce noise in audio signals, thus improving speech recognition performance. In particular, the use of noise reduction algorithms significantly reduced noise levels and resulted in clean speech signals, enabling speech recognition systems to produce more accurate and reliable results.

Fundamental steps in the noise reduction process, such as the Short-Time Fourier Transform (STFT) and the resulting spectrograms, analyze noise frequency and time components in detail, facilitating the development of noise reduction strategies. Spectrograms play a critical role in identifying noisy regions and applying noise reduction filters. The analysis of the graphs obtained during the study evaluates the effectiveness of techniques used in the noise reduction process and contributes to their improvement. Specifically, examining graphs related to threshold values, masking, and convolution operations verifies the accuracy and effectiveness of noise reduction strategies visually. The results obtained demonstrate the importance of speech processing and filtering strategies in improving speech recognition performance in noisy environments. The use of these strategies can make automatic speech recognition systems more reliable and effective in practical applications, including in-vehicle communication systems, voice command systems, and digital assistants.

The conclusions of this study emphasize the critical role of advanced speech processing and filtering strategies in enhancing speech recognition performance, particularly in challenging, noisy environments. The findings suggest that these techniques significantly improve the clarity and intelligibility of speech signals, facilitating more accurate recognition by automated systems. Future studies could build on this foundation by incorporating more sophisticated noise models that better mimic real-world conditions, such as fluctuating background noises or overlapping speech from multiple speakers. Also, they could extend this work by incorporating larger datasets with varied noise conditions to further validate the effectiveness of the proposed noise reduction strategies in diverse real-world scenarios. Additionally, integrating advanced filtering techniques, such as adaptive and deep-learning-based filters, could further enhance noise suppression and improve the robustness of speech recognition systems. Another promising avenue for future research is the development of fast, lightweight noise reduction algorithms that are optimized for real-time applications, ensuring that these solutions can be effectively implemented in devices with limited computational resources, such as smartphones, hearing aids, and embedded systems. Furthermore, interdisciplinary approaches combining insights from acoustics, machine learning, and neuroscience could pave the way for breakthroughs in noise resilience and user adaptability.

## **Acknowledgements**

The author would like to thank all the data sets, materials, information sharing and support used in the assembly of this article.

## **Conflict of interest**

Author does not have any competing interests.

## **Ethics approval and consent to participate.**

Not Applicable

## **Author contribution**

The author conceptualized and designed the study, conducted experiments, collected and analyzed data, and drafted the manuscript.

## **References**

- Agram N., Øksendal B. Introduction to white noise, hida-malliavin calculus and applications. arXiv preprint arXiv:1903.02936 2019.
- Ali MH., Jaber MM., Abd SK., Rehman A., Awan MJ., Vitkutė-Adžgauskienė D., Damaševičius R., Bahaj SA. Harris hawks sparse auto-encoder networks for automatic speech recognition system. *Applied Sciences* 2022; 12(3): 1091.
- Anggriawan DO., Wahjono E., Sudiharto I., Firdaus AA., Putri DNN., Budikarso A. Identification of short duration voltage variations based on short time Fourier transform and artificial neural network. *2020 International Electronics Symposium 2020*; 43-47.
- Bharti D., Kukana P. A hybrid machine learning model for emotion recognition from speech signals. *International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC) 2020*; 491-496.
- Garg K., Jain G. A comparative study of noise reduction techniques for automatic speech recognition systems. *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) 2016*; 2098-2103.
- Hamidi M., Satori H., Zealouk O., Satori K. Amazigh digits through interactive speech recognition system in noisy environment. *International Journal of Speech Technology 2020*; 23(1): 101-109.
- Hazrati A., Eftekhari A., Taherian S. A novel speech enhancement method based on deep residual network in low SNR Conditions. *7th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS) 2019*; 72-76.
- Jurado F., Saenz JR. Comparison between discrete STFT and wavelets for the analysis of power quality events. *Electric Power Systems Research 2002*; 62(3): 183-190.
- Kalamani M., Krishnamoorthi M. Modified least mean square adaptive filter for speech enhancement. *Applied Speech Processing 2021*; 47-73.

- Kara S., İçer S., Erdogan N. Spectral broadening of lower extremity venous Doppler signals using STFT and AR modeling. *Digital Signal Processing* 2018; 669–676.
- Kim HD., Kim J., Komatani K., Ogata T., Okuno HG. Target speech detection and separation for humanoid robots in sparse dialogue with noisy home environments. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2008; 1705-1711.
- Kitaoka N., Yamamoto K., Kusamizu T., Nakagawa S., Yamada T., Tsuge S., Miyajima C., Nishiura T., Nakayama M., Denda Y., Fujimoto M. Development of VAD evaluation framework CENSREC-1-C and investigation of relationship between VAD and speech recognition performance. *IEEE Workshop on Automatic Speech Recognition & Understanding (ASRU)* 2007; 607-612.
- Li J., Wu Y., Gaur Y., Wang C., Zhao R., Liu S. On the comparison of popular end-to-end models for large scale speech recognition. *arXiv preprint arXiv:2005.14327* 2020.
- Malik M., Malik MK., Mehmood K., Makhdoom I. Automatic speech recognition: a survey. *Multimedia Tools and Applications* 2021; 80, 9411-9457.
- Manhertz G., Bereczky A. STFT spectrogram based hybrid evaluation method for rotating machine transient vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2021; 154, 107583.
- Manoharan S., Ponraj N. Analysis of complex non-linear environment exploration in speech recognition by hybrid learning technique. *Journal of Innovative Image Processing (JIIP)* 2020; 2(04): 202-209.
- Martinek R., Vanus J., Nedoma J., Fridrich M., Frnda J., Kawala-Sterniuk A. Voice communication in noisy environments in a smart house using hybrid LMS+ICA algorithm. *Sensors* 2020; 20(21): 6022.
- Nuha HH., Absa AA. Noise reduction and speech enhancement using wiener filter. *International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA)* 2022; 177-180.
- Oh SY., Chung KY. Improvement of speech detection using ERB feature extraction. *Wireless Personal Communications* 2014; 79(4): 2439-2451.
- Oh S., Chung K. Performance evaluation of silence-feature normalization model using cepstrum features of noise signals. *Wireless Personal Communications* 2018; 98, 3287-3297.
- Padmapriya J., Sasilatha T., Aagash G., Bharathi V. Voice extraction from background noise using filter bank analysis for voice communication applications. *Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)* 2021; 269-273.
- Phyu WLL., Pa PW. Building speaker identification dataset for noisy conditions. *IEEE Conference on Computer Applications (ICCA)* 2020; 1-6.
- Premoli M., Baggi D., Bianchetti M., Gnutti A., Bondaschi M., Mastinu A., Migliorati P., Signoroni A., Leonardi R., Memo M., Bonini SA. Automatic classification of mice vocalizations using Machine Learning techniques and Convolutional Neural Networks. *PloS One* 2021; 16(1): e0244636.



- Rosca JP., Balan R., Fan NP., Beaugeant C., Gilg V. Multichannel voice detection in adverse environments. 11th European Signal Processing Conference 2002; 1-4.
- Sainburg T. Noisereduce: Noise Reduction in Python. GitHub. 2022. <https://github.com/timsainb/noisereduce>
- Sasaki Y., Kagami S., Mizoguchi H., Enomoto T. A predefined command recognition system using a ceiling microphone array in noisy housing environments. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2008; 2178-2184.
- Schroeder MR. Speech processing. NATO ASI Series F Computer and Systems Sciences 1999; 174, 129-136.
- Seetharaman P. torch-stft. GitHub. 2022. <https://github.com/pseeth/torch-stft>
- Shahamiri SR. Speech vision: An end-to-end deep learning-based dysarthric automatic speech recognition system. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 2021; 29, 852-861.
- Wang Y., Fan X., Chen IF., Liu Y., Chen T., Hoffmeister B. End-to-end anchored speech recognition. International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP) 2019; 7090-7094.
- Xing F., Chen H., Xie S., Yao J. Ultrafast three-dimensional surface imaging based on short-time Fourier transform. IEEE Photonics Technology Letters 2015; 27(21): 2264-2267.
- Zhang H., Hua G., Yu L., Cai Y., Bi G. Underdetermined blind separation of overlapped speech mixtures in time-frequency domain with estimated number of sources. Speech Communication 2017; 89, 1-16.
- Zhang WY., Hao T., Chang Y., Zhao YH. Time-frequency analysis of enhanced GPR detection of RF tagged buried plastic pipes. NDT & E International 2017; 92, 88-96.

## Module-A Sensor Performance Tests Used in Laboratory-Type Silage Production, Data Acquisition and Control System

Fulya TAN<sup>1</sup>, Figan DALMIŞ<sup>2</sup>, Ersen OKUR<sup>3</sup>, İ. Savaş DALMIŞ<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Biosystem, Tekirdağ/Turkiye

<sup>2</sup>Tekirdağ Namık Kemal University, Vocational College of Technical Sciences, Tekirdağ/Turkiye

<sup>4</sup>Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Faculty of Engineering, Tekirdağ/Turkiye

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0037-4251>

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6841-3467>

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1933-7642>

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4401-9155>

Corresponding author: ftan@nku.edu.tr

### Research Article

#### Article History:

Received: 15.05.2024

Accepted: 07.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Sensor

Silage

Simulation

Sensor tests

PLC systems

### ABSTRACT

The primary objective of this study is to investigate the performance of sensors integrated into the laboratory-type silage production, data acquisition, and control system. The system is a Programmable Logic Controller (PLC) controlled and multi-sensor based system designed to enable numerous studies aimed to improve silage quality. It consists of grinding, weighing, silo, data acquisition, and control units. It provides the capability to apply/change/simulate various parameters during the silage production process. The silo unit is composed of two modules, module-A (compression principle) and module-B (vacuum principle). This research focuses on measurements conducted with plexiglass silos (24.5 cm<sup>3</sup>) in the module-A unit. This silos were equipped with oxygen sensor ( $\pm 0-100\%$ ), carbon dioxide sensor (0-5000 ppm), temperature sensor ( $\pm 0.53\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-10 - 80\text{ }^\circ\text{C}$ ), humidity sensor (0-100%), pH sensor (2-12), and pressure sensor ( $\pm 1000\text{ mbar}$ ). The research utilized second-crop silage corn material with a dry matter content (DM) of 32%. Four different compaction forces were applied during the experiments. In the study, sensors with analog output values were used and the average of the data recorded as one data per second was taken. The data were displayed and monitored on the HMI operator panel programmed with GOP HMI editor software and stored in Excel format. The measurements were conducted during the silage (aerobic) and post-silage (anaerobic) periods. To ensure the accuracy of the measurement results obtained in the research, sensors widely used in industrial applications with calibration certificates were preferred. However, issues related to the oxygen and carbon dioxide sensors were encountered. The oxygen sensors used in the preliminary tests of the study had a 3-month service life. Due to this situation, the sensors were replaced with longer-lasting oxygen sensors instead of frequently changing them. In addition, the study encountered a carbon dioxide value above the predicted carbon dioxide amount, and the capacities of the carbon dioxide sensors were increased accordingly in the preliminary tests of the study. During measurements conducted at the compression stage in module-A, the pressure values varied between 0.34-0.67 bar with increasing compaction force. The temperature ranged from 16-33  $^\circ\text{C}$ , humidity from 60-100%, pH from 5.8-5.6, O<sub>2</sub> level from 8.1-0 mmol L<sup>-1</sup>, and CO<sub>2</sub> level from 0-40 mmol L<sup>-1</sup>. The measured value ranges in silage varied depending on the duration of silage, and accurate measurements were obtained in the desired direction. Sensor placements were updated considering measurement accuracy.

## Laboratuvar Tipi Silaj Yapımı, Veri Toplama ve Kontrol Sisteminde Kullanılan Modül-A Sensör Performans Testleri

### Araştırma Makalesi

#### Makale tarihçesi:

Geliş tarihi: 15.05.2024

Kabul tarihi: 07.09.2024

Online yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar kelimeler:

Sensör

Silaj

Simülasyon

Sensör testleri

PLC sistemler

### ÖZ

Bu çalışmanın temel amacı laboratuvar tipi silaj yapımı, veri toplama ve kontrol sistemine entegre edilen sensörlerin performanslarını incelemektir. Sistem, silaj kalitesinin iyileştirilmesine yönelik çok sayıda çalışmaya olanak sağlamak üzere tasarlanmış, PLC kontrollü ve çoklu sensör tabanlı bir sistemdir. Kıyma, tartım, silolama, veri toplama ve kontrol ünitelerinden oluşmaktadır. Silaj yapım prosesi sırasında çeşitli parametreleri uygulama/değiştirme/simüle etme yeteneği sağlar. Silolama ünitesi modül-A (sıkıştırma ilkesi) ve modül-B (vakum ilkesi) olmak üzere iki modülden oluşmaktadır. Bu araştırma, modül-A ünitesindeki pleksi silolar (24,5 cm<sup>3</sup>) ile yapılan ölçümlere ilişkin çalışmaları içermektedir. Bu silolar oksijen sensörü (%±0-100), karbondioksit sensörü (0-5000 ppm), sıcaklık sensörü (±0,53 °C, -10 – 80 °C), nem sensörü (%0-100), pH sensörü (2-12) ve basınç sensörü (± 1000 mbar) ile donatılmıştır. Araştırma ikinci ürün silajlık mısırdaki (%32 KM) yürütülmüştür. Denemelerde dört farklı sıkıştırma kuvveti uygulanmıştır. Çalışmada analog çıkış değerlerine sahip sensörler kullanılmış ve saniyede bir veri olarak kaydedilen verilerin ortalaması alınmıştır. Veriler GOP HMI editör yazılımı ile programlanan HMI operatör panelinde görüntülenip izlenmiş ve Excel formatında depolanmıştır. Ölçümler silaj (aerobik) ve silaj sonrası (anaerobik) dönemlerde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada elde edilen ölçüm sonuçlarının doğruluğundan emin olmak için kalibrasyon sertifikalı ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan sensörler tercih edilmiştir. Ancak oksijen ve karbondioksit sensörlerine ilişkin sorunlarla karşılaşmıştır. Çalışmanın ön testlerinde kullanılan oksijen sensörlerinin 3 aylık kullanım ömrüne sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumdan dolayı sensörleri sık sık değiştirmek yerine daha uzun ömürlü oksijen sensörleri ile değiştirilmiştir. Ayrıca çalışmada öngörülen karbondioksit miktarının üstünde bir karbondioksit değeri ile karşılaşmış olup, çalışmanın ön testlerinde karbondioksit sensörlerinin kapasiteleri buna göre artırılmıştır. Modül-A'da sıkıştırma aşamasında yapılan ölçümlerde, sıkıştırma kuvvetinin artmasıyla birlikte basınç değerleri 0,34-0,67 bar arasında değişmiştir. Sıcaklık 16-33 °C, nem %60-100, pH 5,8-5,6 O<sub>2</sub> seviyesi 8,1-0 mmol L<sup>-1</sup> ve CO<sub>2</sub> seviyesi 0-40 mmol L<sup>-1</sup> arasında değişim belirlenmiştir. Silajda ölçülen değer aralıkları silajın süresine göre değişiklik göstermiş ve istenilen yönde doğru ölçümler elde edilmiştir. Ölçüm doğruluğu dikkate alınarak sensör yerleşimleri güncellenmiştir.

**To Cite:** Tan F., Dalmış F., Okur E., Dalmış İS. Module-A Sensor Performance Tests Used in Laboratory-Type Silage Production, Data Acquisition and Control System. Osmaniyeye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 248-265.

### 1. Introduction

Silage is an important source of roughage widely used in animal nutrition. Therefore, the production, construction technique, and quality of silage material hold significant importance. In Turkey, the maize plant, which is widely cultivated as silage material, is used for both first and second crop silage. In silage production, there are various methods such as bunker silo, pile type silo, bale silage, and silage bags. Failures or deficiencies in silage production techniques can lead to significant problems, such as the deterioration in silage quality. There are many factors that influence the production of high-quality silage. Potential risks of problems will increase if the management challenges of these factors are not overcome. These factors could include, for example, the producer having different types of tractors, variations in operator skill levels and training, usage of compaction equipment with different masses, the duration and experience of using the equipment, conditions related to the product and harvesting

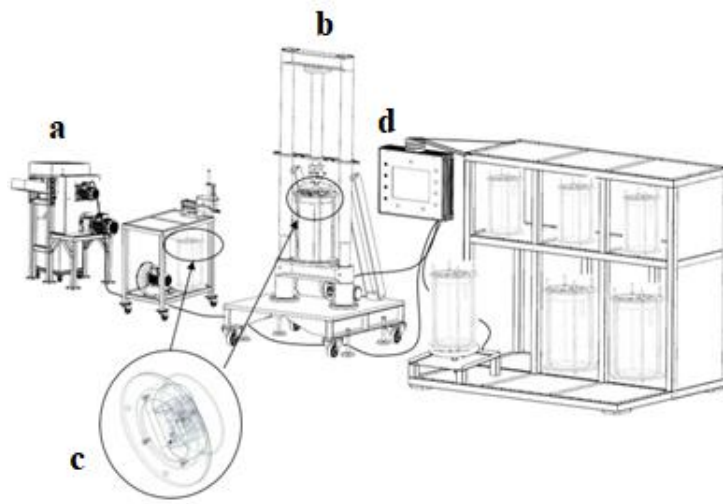
period, and the application techniques used in silage. These factors have been examined by many researchers. In addition to product-related factors such as material type, moisture content (Roy et al., 2001; Holmes and Muck, 2004; Jones et al., 2004; Wang, 2012), harvest period, cutting frequency, particle size (Shaver, 1990; Ruppel, 1993; Shinnars et al., 1994), there are also parameters related to the use of compaction equipment, such as its mass, tire types, tire pressure, compaction duration, applied compaction force (Ruppel, 1993; Ruppel, 1997; D'Amours and Savoie, 2005; Oelberg et al., 2005), layer thickness (Muck and Holmes, 1999; Oelberg et al., 2005), tire size, tire type, tire pressure, applied force, and compaction duration (Roy et al., 2001; Muck et al., 2004), Oxygen, carbon dioxide (Li et al., 2016; Shan et al., 2016; Tan et al., 2020), density (Ruppel et al., 1995; Muck and Holmes, 2000; Muck and Holmes, 2000; Roy et al., 2001; Muck et al., 2004; Savoie et al., 2004; D'Amour and Savoie, 2005; Craig and Roth, 2005; D'Amour and Savoie, 2005; Oelberg et al., 2005; Visser, 2005; Sun et al., 2010; Wang, 2012; Latsch and Sauter, 2013, Hoffman and Geyer, 2014; Li et al., 2016; Tan et al., 2018). It is known that the inability to manage all these factors correctly in the silage technique applied negatively affects the quality of silage. For this reason, the whole of the harvesting of the silage material, the transportation phase, filling-compressing and closing the silo should be considered as silo management. Examining all these parameters in field conditions, obtaining accurate data within a short period, and conducting numerous measurements in silo management can be quite challenging. For this reason, laboratory-scale studies are becoming increasingly important.

In this research, it is aimed to examine the measurement performances of the sensors placed in the laboratory type silage production, data collection and control system developed by us. Oxygen, carbon dioxide, pH, temperature, humidity and pressure sensors with wired/wireless communication are installed in the developed system. These factors can give information about silage quality and fermentation process. The numbers and qualities of the sensors can be increased or decreased according to the parameters desired to be measured, and their positions can be changed. The main purpose of this study is to test the performance of the sensors placed in the module-A unit, where the compression principle in the system is used. At the end of the study, detecting the problematic sensors and/or replacing them with more compatible sensors with different features, changing the location or measuring point, choosing a wired or wireless sensor, or methods with different approaches are suggested.

## **2. Material and Method**

In the research, the most commonly used corn plant for silage production has been utilized as the silage material. Laboratory-scale silage production, data collection, and control system developed through the TÜBİTAK 1002 project have been employed to collect data from the material. In the system, it is possible to carry out silage studies based on the two fundamental principles used in silage making technique: the principle of compression and the principle of vacuuming.

The basic units of the system are shown in Figure 1.



**Figure 1.** Laboratory type silage making, data collection and control system

The system primarily consists of four main units. These are;

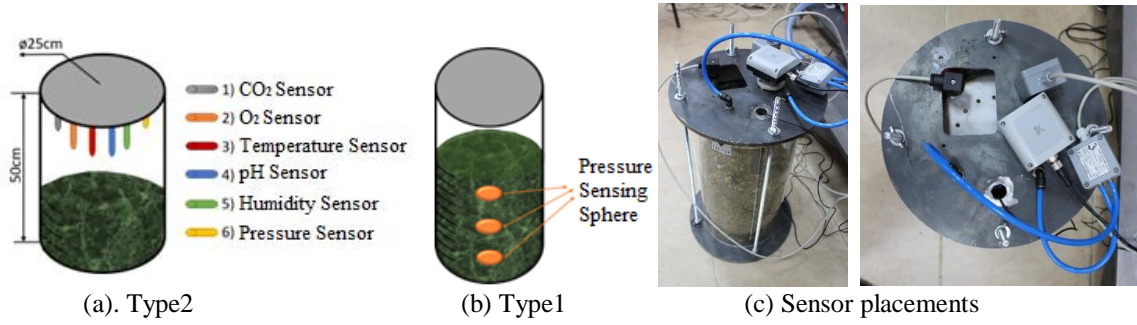
- a. Chopping unit
- b. Ensiling unit
- c. Data collection unit
- d. Control unit

In the chopping unit, the materials are shredded. This unit has been developed to adjust the chopped particle size achievable with forage harvesters during corn harvesting. This unit has been developed to adjust the shredded piece size that can be obtained during corn harvesting with forage harvesters. There are two chopping blades on the rotor with a hardness value of 44 HRC. The length of the chopped particle size can be adjusted precisely.

The ensiling unit consists of two main modules; Module-A constitutes the ensiling unit using the compression principle, and Module-B constitutes the ensiling unit using the vacuuming principle. Four different compaction forces (500, 1000, 1500 ve 2000 N) were applied during the experiments in Module-A.

The data acquisition unit consists of various sensors. According to the desired data and system requirements, sensors with appropriate features can be selected and added to this unit. Furthermore, the positioning and placement of sensors are crucial to achieve accurate data measurement during and after the compaction process in the silo. In this research, the sensors have been placed within a specially designed silo cover. The Type1, Type2 and sensor placements conducted for Module-A are illustrated in Figure 2.

Additionally, real-time measurements of weight and time can also be performed in the system. As of June 2, 2021, the laboratory-scale silage production, data collection, and control system have been granted the TR 2021 009131 B Patent Certificate (NKU, 2022-Tan, F., Dalmış S.İ, Okur E., Dalmış F.).

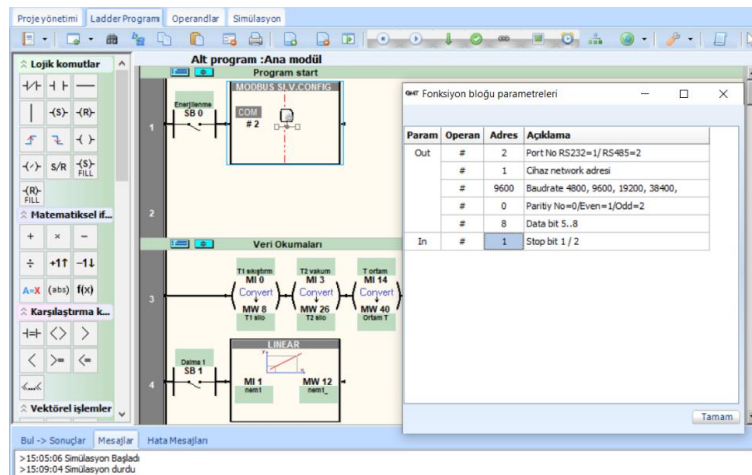


**Figure 2.** (a) Type2; (b) Type1; (c) Module-A sensor placements

The data collected from sensors can be recorded in the data control unit and stored at desired time intervals. The control unit of the system is PLC-based and can be operated both manually and automatically.

The control unit consists of a GMT CNT GLC-196T CPU module, two GXM-42A analog input/output modules, one GXM-40A analog input module, and one GXM-40U load cell module. The measured values are displayed on a 7" TFT touchscreen operator screen within the system and set value entries can be made through this screen. The data collected in real-time is recorded on a USB memory stick inserted to the USB port of the screen without the need for computer connection, thanks to the trend functions created during the screen programming.

The PLC is powered by 24V direct current (DC) energy. The PLC and expansion modules communicate with the operator panel via RS485 communication standard using the Modbus function block defined in the PLC program. Part of the PLC program and the Modbus function block used in this application are shown in Figure 3. In the design of the system, two Windows-based softwares were utilized: 1-Endasoft Editor Program, and 2-GOP HMI Editor Software.



**Figure 3.** Part of the PLC program and the Modbus function block

The PLC program was created using the ladder diagram method in the Endasoft Editor Software and then loaded onto the PLC. In the GOP HMI Editor Software, pages are designed according to the system's requirements to display incoming process data on the screen. Additionally, these pages are used to send user commands to the system through the operator panel.

The data in the system possesses three distinct characteristics. These are:

- Fixed set of data (compaction force (kg), data sampling period (1 data / 1 s)),
- The data acquired through sensors (temperature, humidity, oxygen, carbon dioxide, pressure, pH, ambient temperature, pressure difference, mass)
- Variable data (such as material type, quantity, dry matter content, particle size)

### 2.1. Sensor Types

In the system, six different types of sensors have been used for data acquisition (Table 1).

**Table 1.** Sensor types and features

<b>Type2</b>				
<b>Sensor</b>	<b>Analog output</b>	<b>Type</b>	<b>Confidence interval</b>	<b>Principle</b>
Temperature	4-20 mA	2	$\pm 0.53^{\circ}\text{C}$ (-10° - 80°C)	Thermocouple
Humidity		2	0-100 % RH	
Pressure	4-20 mA	2	$\pm 1000$ mbar	Piezo-resistive
pH	4-20 mA	2	2-12	Potentiometric
Oxygen	4-20 mA	2	0-100 % vol. $\pm 2$	Electrochemistry
Carbon dioxide	4-20 mA	2	0-5000 ppm $\pm 3$	NDIR
<b>Type1</b>				
<b>Sensor</b>	<b>Analog output</b>	<b>Type</b>	<b>Confidence interval</b>	<b>Principle</b>
Temperature	wireless	1	-20 °C, +50 °C	Thermocouple
Pressure	W/4-20 mA	1	0-2.5 bar (%0.5)	

Type1 sensors have been added to the system as temperature and pressure sensors. This type of sensors communicates through wireless connections. Type 1 UA-002-64 Hobo pendant temperature data logger holds approximately 52K measurements of 10-bit readings with a range of -20° to 70°C. MPS500 series pressure sensors with a measurement range of 0-25 bar are preferred as type1 pressure sensors. Type1 pressure sensor belongs to the pressure measurement system especially developed for bulk materials. The load cells used in the system are explained in module A.

### 2.2. Plexiglass silo

Plexiglass tubes of different heights and diameters were used as silos. In this research, a 50 cm x 25 cm silo has been utilized for Module-A compression unit. The properties of plexiglass silo material are provided in Table 2. An example of the plexiglass tube and the developed plexiglass silo are shown in Figure 4.



**Figure 4.** Plexiglass silo and plexiglass tube sample



**Table 2.** Properties of plexiglass

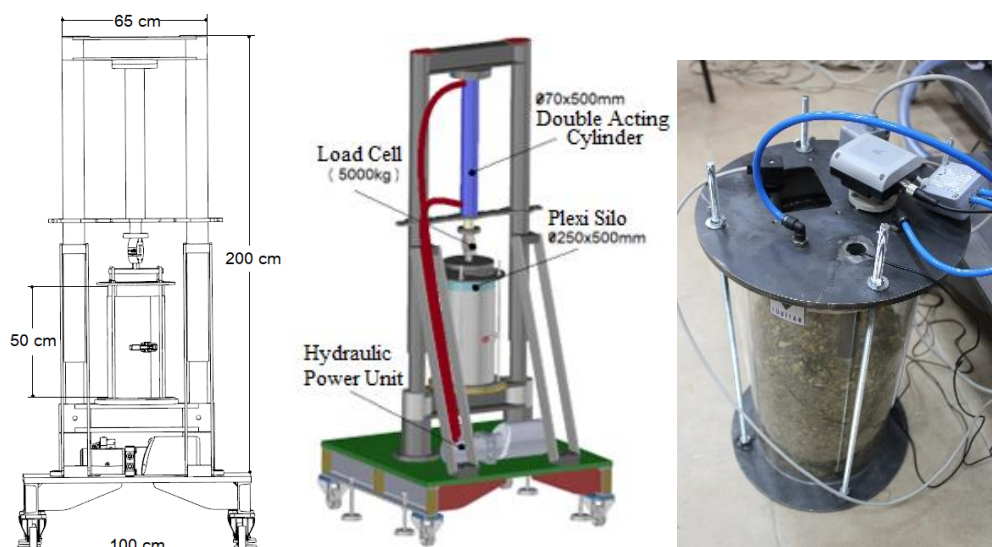
<b>Mechanical properties</b>	<b>ASTM</b>	<b>Values</b>
Specific weight	D-792	1.19
Tensile strength	D-638	11.250
Tensile strength elongation	D-638	6.4
Compressive strength	D-695	18.00
IZOD impact resistance	D-256	0.037
Flex module	D-790	475000
<b>Thermal properties</b>		
Linear coefficient of thermal expansion	D-696	0.000042
Heat distortion at 264 psi		180
<b>Optical properties</b>		
UV transmission @320 nm	D-1003	>80
Haze	D-1003	<0.5

### 2.3. Load Cell Types

Three load cells with different capacities (50-200-5000 kg) were utilized in the system. A 5000 kg load cell was employed for the compaction force in Module-A. Load cells that detect the weight changes were connected to the GMT GXM-20L load cell expansion module.

### 2.4. Module A

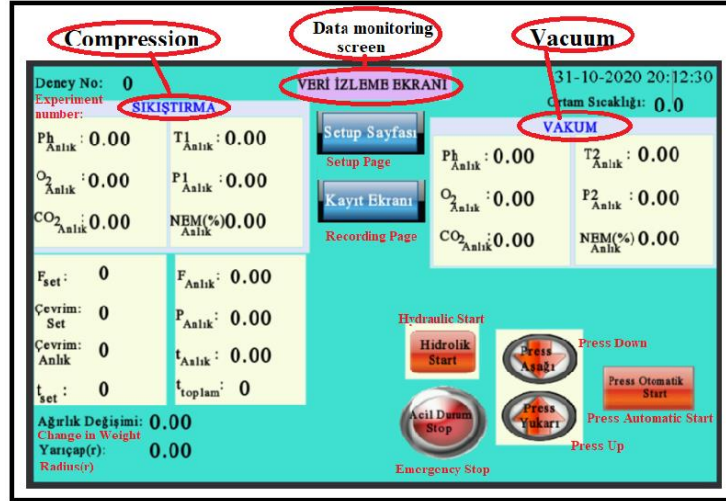
The compression principle applied in silo construction (bunker silage, pile type silage, bale silage production) is a module that enables implementation under laboratory conditions (Figure 5). To generate the compression force in the system, a hydraulic power supply with a capacity of 6 liters and operating at 380V three-phase voltage was used. A pressure relief valve is used to limit or control the pressure in the developed system. Additionally, a flow control valve has been employed to control the movement speed of the cylinder.



**Figure 5.** Module-A



The measurements conducted in the silo used in Module A can be tracked through the data monitoring screen shown in Figure 6 and they are also recorded in the flash memory.



**Figure 6.** The main page of the HMI: Data monitoring screen

This is also significantly important in terms of detecting potential problems early. In addition, sensor data related to Module-B can also be monitored on the screen along with Module-A.

### 2.5. Time Measurements

Time-related measurements, dependent on the processes implemented in Module-A in the system, are defined as follows:

*Total Time ( $T_s$ ):* The duration between the start and end of the experiment.

*Cycle Time ( $T_c$ ):* Total time for hydraulic cylinder descent, force application, and retraction.

*Application Time ( $T_u$ ):* The duration during which the piston remains on the silage surface.

*Wait Time ( $T_b$ ):* The duration during which the piston remains in the upper position.

*Cycle Count ( $C_s$ ):* The number of cycle times applied between the start and end of the compression process in a silo.

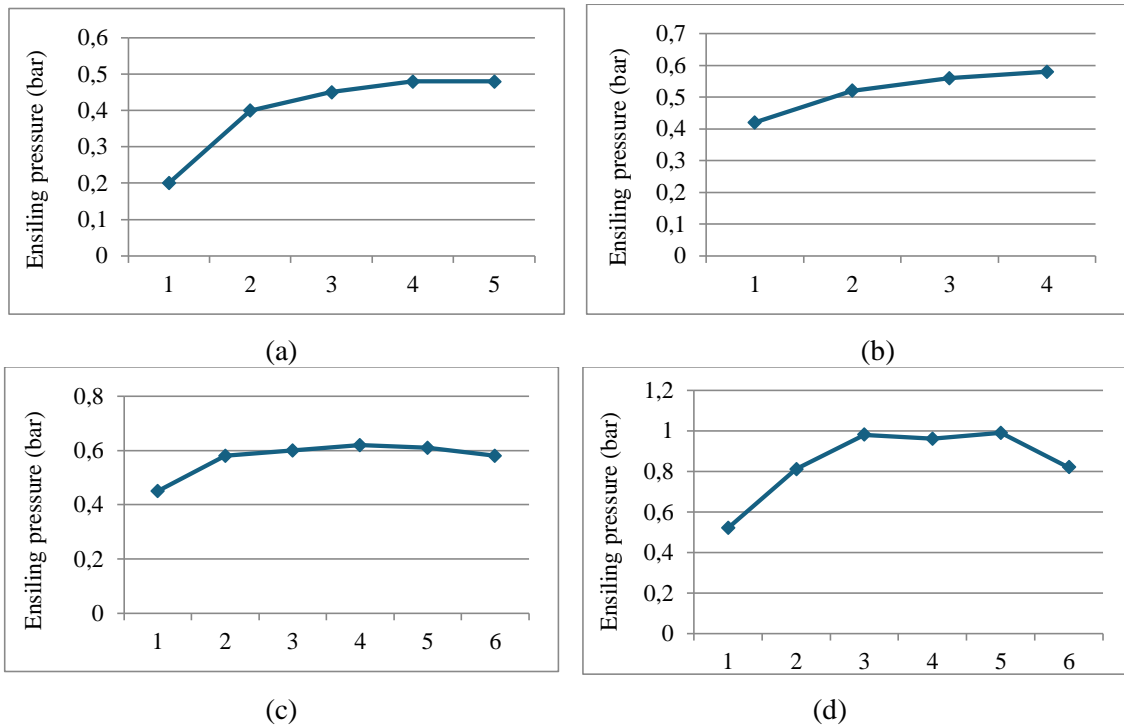
*Applied Force ( $F$ ):* The force that can be manually or automatically adjusted from the screen and is applied in Module-A (max. 5000 kg). In this research, the performances of Module A measurements were evaluated in the system developed by us. The data acquisition from sensors placed on a specially designed cover and recording features of the gathered data were examined.

## 3. Results

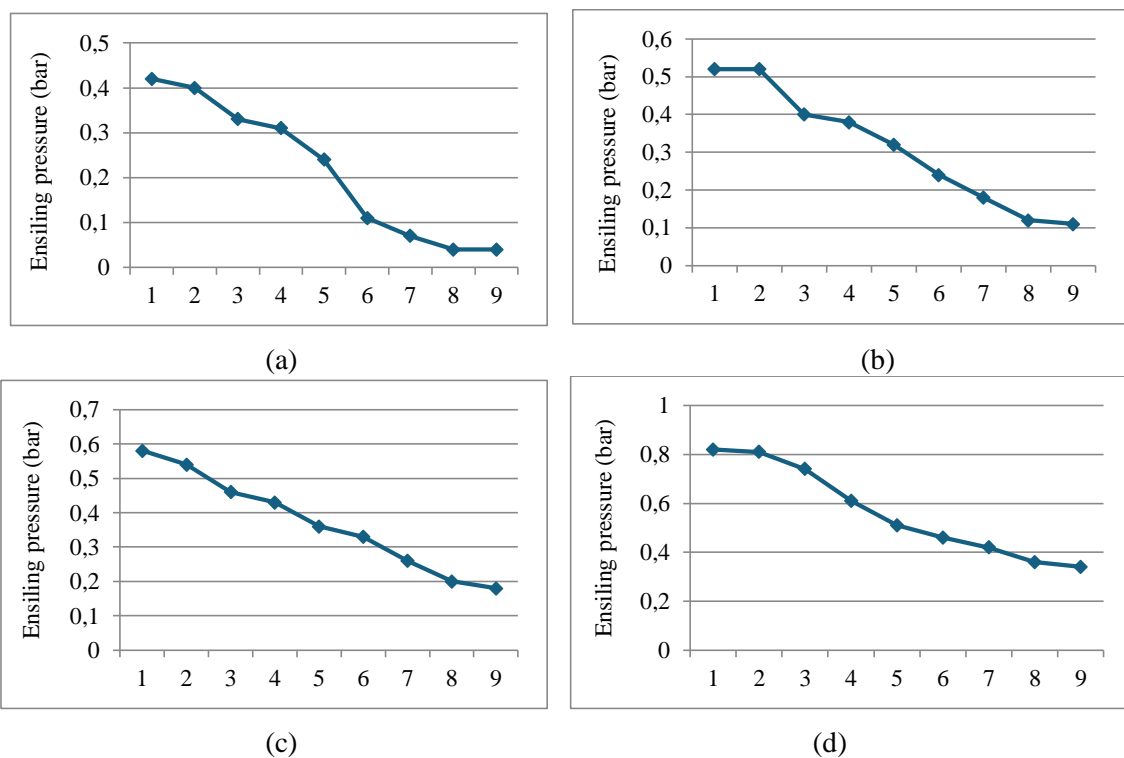
Data acquisition has been successfully achieved from all the installed sensors. Both the accuracy of the data obtained from the sensors used in the system and the accuracy of the measurement results from the sensors placed on the specially designed cover have been tested. In laboratory studies, the usage of the selected sensors for silage production has been evaluated among themselves. When the total time ( $T_s$ ) is taken as 100%,  $T_c$  time forms 75% and the wait time ( $T_b$ ) forms 25% of the time interval.  $T_c$  and application time have been carried out similarly in all silos.

### 3.1. Pressure Sensors

The compaction pressure data based on compression time (hours) detected by the pressure sensors during the silage process is shown in Figure 7, while the data obtained during the fermentation process is displayed in Figure 8.



**Figure 7.** Pressure sensor data based on the force applied during the ensiling process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N



**Figure 8.** Pressure sensor data based on the force applied during the fermentation process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N

In order to examine the changes in compaction force, measured by pressure sensors, plexiglass silos containing corn harvest with a dry matter content of 32% were compressed with four different forces. As seen in Figure 7, the measured pressure data increased due to the increase in the applied force during the ensiling phase. This situation leads to the conclusion that pressure sensor data has been successfully obtained during the compression process.

It is expected that the pressure data will show a decreasing trend when the effect of the compaction force is removed from the material (Figure 8). Based on the measurement results, it has been concluded that the data obtained from the sensors are accurate and the current sensors can be used for this purpose. On the other hand, it has been determined that the location where the sensor is placed is suitable for measurement.

3.2. Temperature Sensors

Data acquisition test from temperature sensors was carried out during ensiling and fermentation stages. Temperature sensors were placed on the specially designed silo cover. The temperature changes in the material under the effect of different applied force were investigated. The temperature data (°C) collected during the ensiling process is shown in Figure 9, whereas the temperature data (°C) detected during the fermentation process is illustrated in Figure 10.

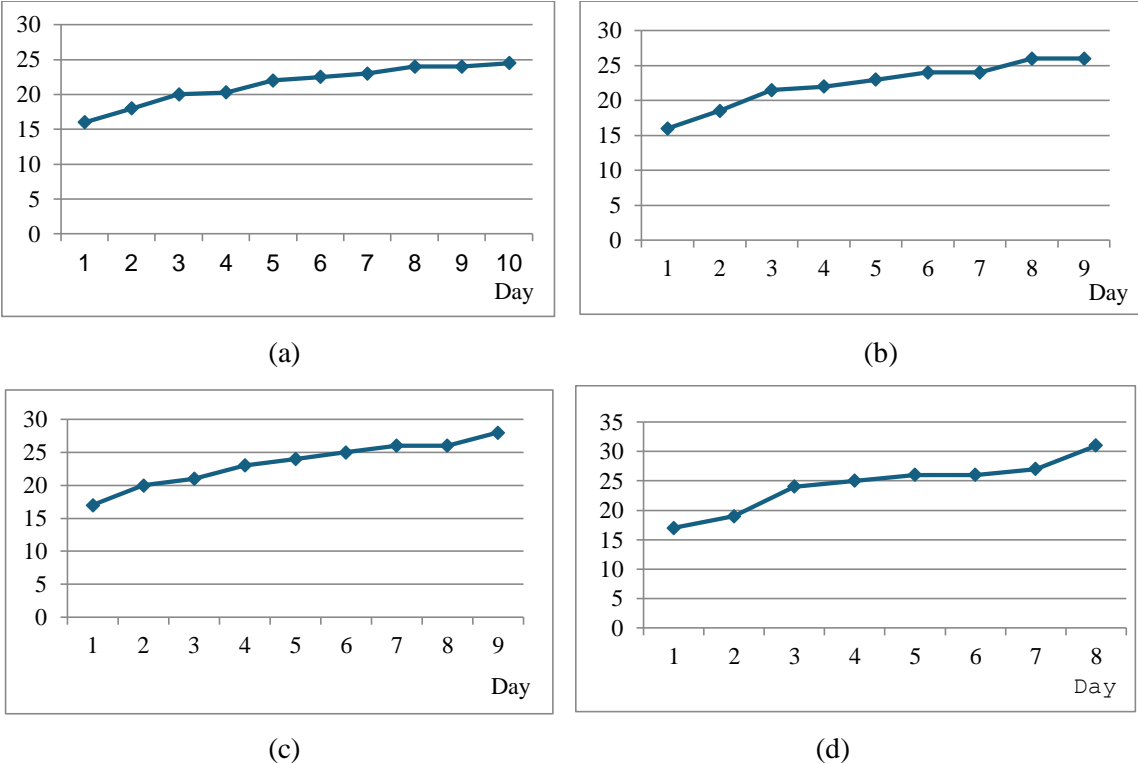
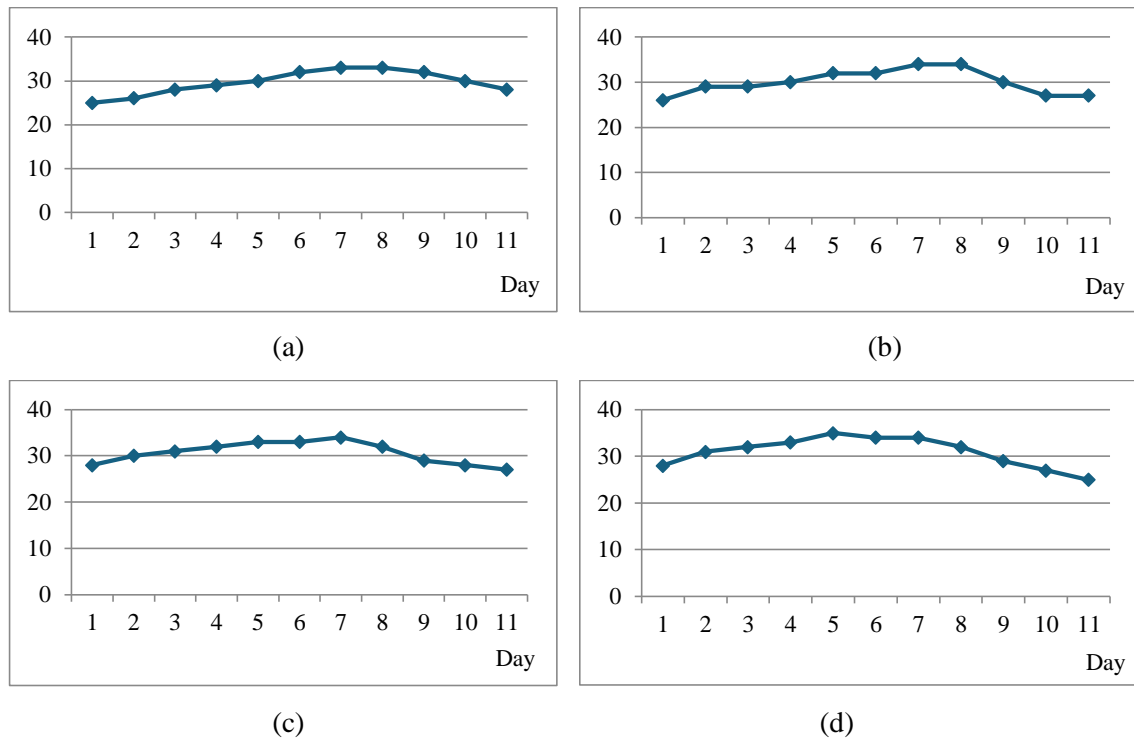


Figure 9. Temperature sensor data based on the force applied during the ensiling process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N

As observed from Figure 9, the temperature data also exhibits an increasing trend with the increase in the applied force during the ensiling process. This situation is interpreted as a successfully data acquisition from the temperature sensor during the compaction process.



**Figure 10.** Temperature sensor data based on the force applied during the fermentation process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N

With the effect of the fermentation process, it is expected that the temperature values of the ensiled materials will first tend to increase and then decrease (Figure 10). According to the obtained measurement results, it was concluded that the sensor measurements were accurate and the existing sensors could be effectively used for this purpose. Similar data were obtained in temperature measurements performed with wireless sensors. Additionally, it has been determined that the placement of the sensor is suitable for measurement. Measurement intervals are pre-set for both sensors. The advantage of the wireless sensor is that it can be used without any problems within the material and in many different positions.

Besides, its disadvantages are that during data acquisition, the data cannot be displayed in real-time, and the sensor needs to be taken out of the silage and the data can be read after transferring it to the computer. The disadvantages of using wireless sensors are as follows:

- Inability to view data in real-time during the data collection process
- The need to be taken out the sensor from inside the silo
- Necessity to transfer sensor data to a computer and read it after retrieval

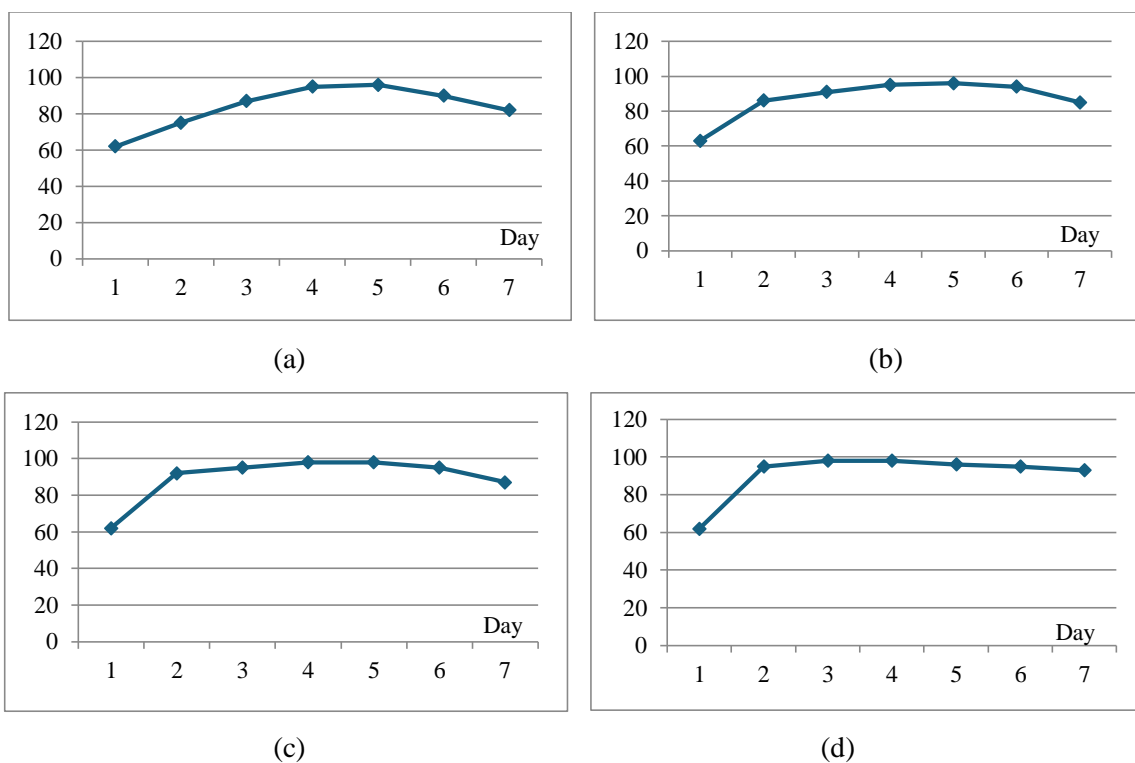
In this case, the biggest risk factor is that if the sensor fails to work for any reason, there will be no data available. This situation would require repeating the process.

### 3.3. Humidity Sensor

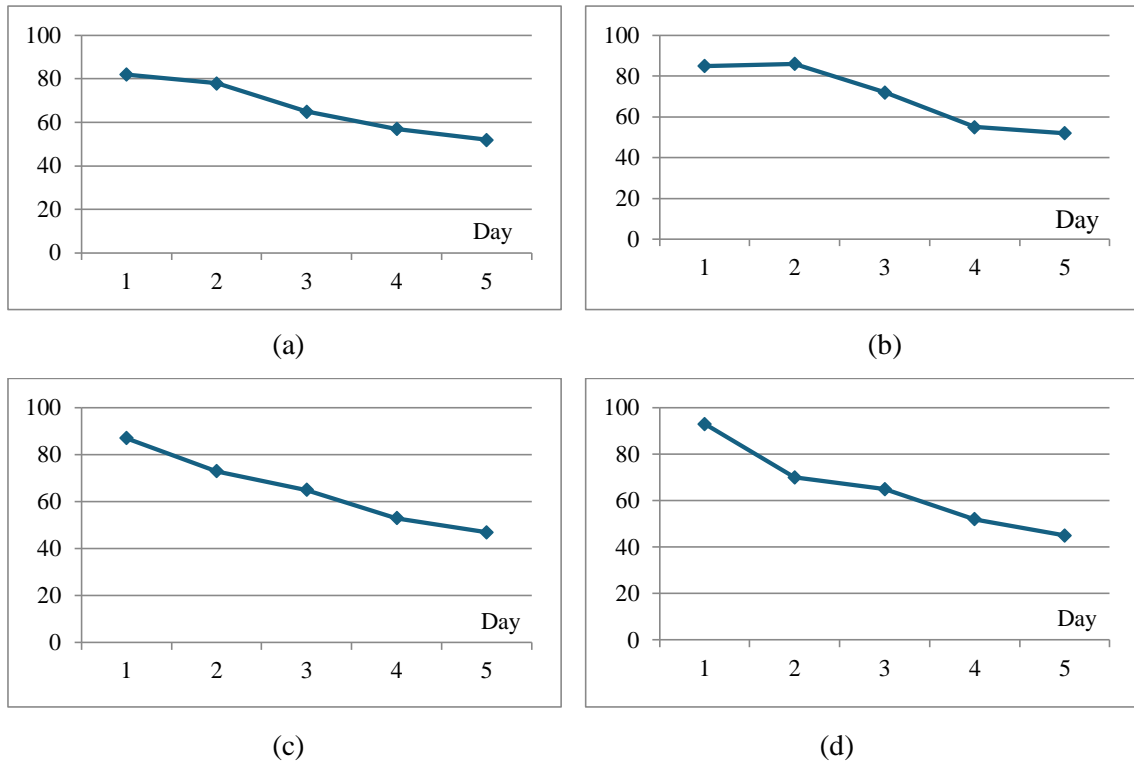
Data acquisition test from humidity sensors was also carried out during ensiling and fermentation stages. Humidity sensors are also placed on the specially designed silo cover in the system. Humidity content changes in the material were observed under the effect of different applied force. The humidity content data (%) detected by the humidity sensors during the ensiling process are presented in Figure 11, while the humidity content data (%) recorded during the fermentation process are shown in Figure 12. As seen in Figure 11, it can be observed that during the ensiling process, the increase in applied force corresponds to a rising trend in humidity sensor data, which is linked to the increasing water content. The moisture sensor data also exhibited a decreasing trend in accordance with the decreasing humidity content over time. This indicates a successfully data acquisition from the humidity sensor during the compaction process.

In Figure 12, a decrease in humidity values is expected due to the effect of fermentation process in the silage materials. When the data obtained from the humidity sensor were examined, the following results were obtained:

- The humidity sensor measurements are accurate,
- The current sensor type is suitable for this purpose,
- The placement of the sensor is appropriate.



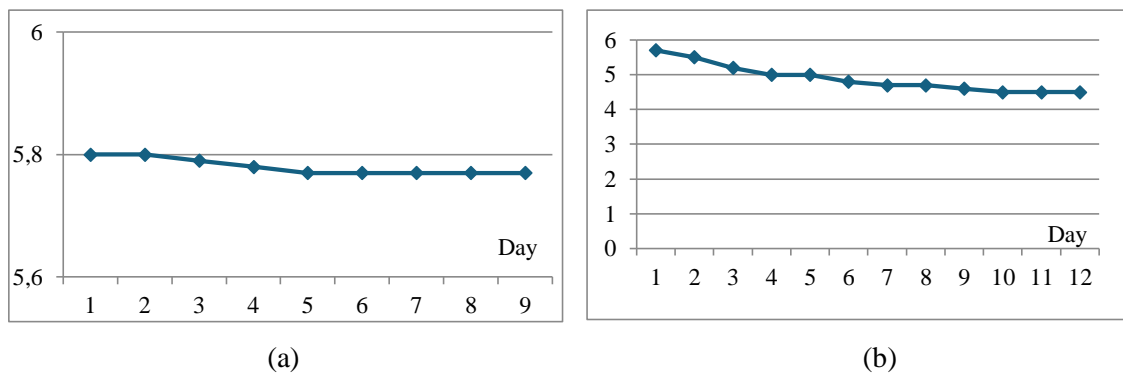
**Figure 11.** Humidity sensor data based on the force applied during the ensiling process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N



**Figure 12.** Humidity sensor data based on the force applied during the fermentation process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N

### 3.4. pH Sensors

The pH sensor is also placed on the specially designed silo cover in the system. The sensor test was conducted in both ensiling and fermentation stages. The changes in pH of the material were monitored under the influence of different applied forces. Due to minimal variations in pH measurements under the applied force effects, a single measurement was taken for both stages. The pH data gathered from the pH sensors during the ensiling process is shown in Figure 13a, and the pH data collected during the fermentation process is displayed in Figure 13.

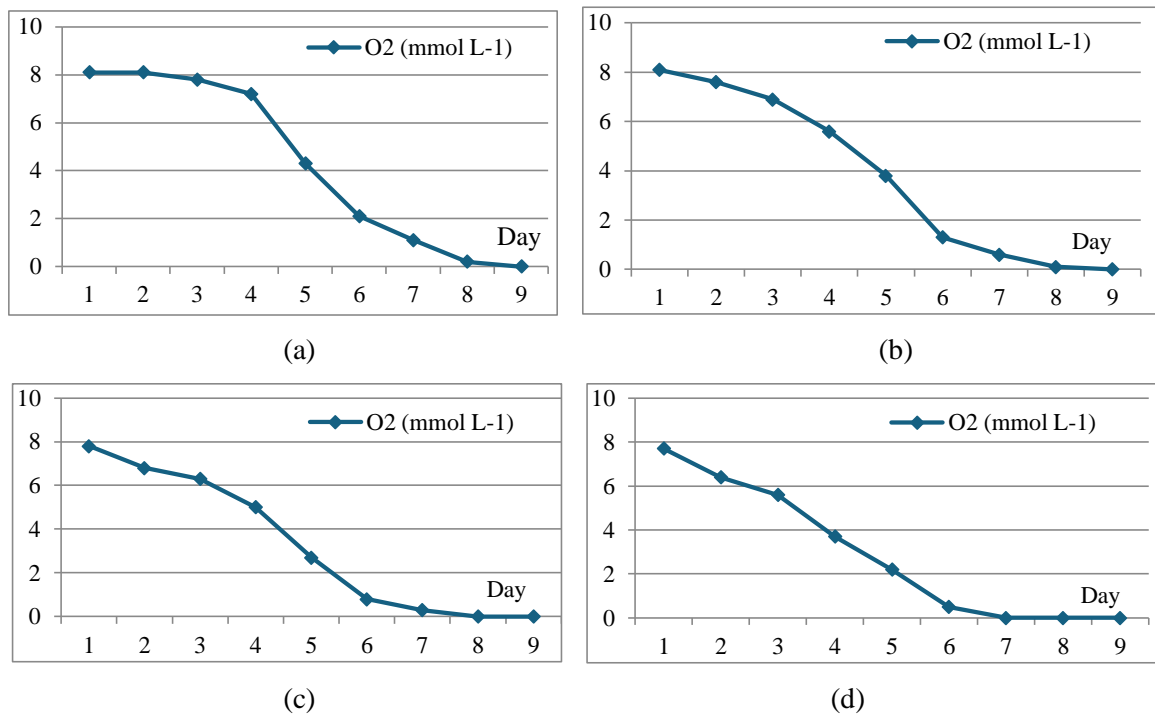


**Figure 13.** PH sensor data based on the force applied during both ensiling (a) and fermentation process (b)

It is expected that the pH value tends to decrease with the applied compaction force. This situation indicates that the silage quality and fermentation progress are improving positively. It was observed that the fermentation progress and sensor data values tended to decrease with time. This situation is interpreted as a successfully data acquisition from the PH sensor during the compaction process.

### 3.5. Oxygen ( $O_2$ ) Sensor

Data acquisition test from  $O_2$  sensor was carried out during fermentation stages.



**Figure 14.**  $O_2$  sensor data based on the force applied during the fermentation process (a) F500 N, (b) F1000 N, (c) F1500 N, (d) F2000 N

Oxygen values were not taken into account during the ensiling phase as they contain ambient values. The oxygen ( $O_2$ ) sensor is also placed on the specially designed silo cover. Oxygen changes in the material were observed under the effect of different applied force.  $O_2$  data obtained during the fermentation process is shown in Figure 14. It is expected that the Oxygen value tends to decrease with the applied compaction force. This situation indicates that the silage quality and fermentation progress are improving positively. The  $O_2$  sensor has been interpreted as successful in data acquisition. However, due to the short lifespan of the sensor, it is necessary to replace it with a new one at 3-month intervals. For this reason, it was decided to test different oxygen sensors for gathering oxygen data.

### 3.6. Carbon dioxide ( $CO_2$ ) Sensors

The sensor test was conducted in both stages. However, due to obtaining different values in the measurements, sensor specifications and positions were reviewed. Sensor calibration is not fully completed. Therefore, a different  $CO_2$  sensor was purchased. However, since the measuring ranges of

this sensor were below the expected value, the increased CO<sub>2</sub> values could not be measured. However, since the input measurement range of this sensor is smaller than the actual value to be measured, carbon dioxide levels of the silage could not be measured. The carbon dioxide level in the material is expected to increase rapidly in the closed environment during the fermentation phase. As a result, a third and different sensor was purchased, but due to the completion of the silage processes, this sensor could not be included in the evaluation test in time.

#### **4. Discussion and Conclusions**

Sensors with both wired and wireless communication capabilities were tested on the system developed for silage studies under laboratory conditions. Data acquisition were successfully carried out using these sensors placed on the silo cover. Different types of sensors based on the principle of working were used in the system. Due to the fermentation phase is in a closed environment in silage production, the working conditions were quite challenging.

When the material is compacted during silage making process, the air pockets decrease in size, which in turn reduces the amount of oxygen present. During the fermentation process, an increase in CO<sub>2</sub> is observed due to the biological activity. Similar results were also observed and explained by Shan et al., (2016) and Li et al., (2017). An increase in CO<sub>2</sub> levels was detected, but the input measurement range of the sensor we have has proven inadequate for measuring carbon dioxide levels of the material. Especially during fermentation phase, Li et al., (2017) have demonstrated CO<sub>2</sub> levels increased 3- to 5-fold, accompanied by a pronounced decline of pH levels. Decreasing pH values are also accepted as an important indicator for high-quality silage. Oxygen value tends to decrease with the applied compaction force. The oxygen content tended to decrease under applied compaction forces. For quality silage, it is not necessary to have oxygen in the silo (Savoie et al., 2004). It shows that the O<sub>2</sub> sensor can make accurate measurements (Tan et al., 2020). Temperature distributions were measured at appropriate intervals according to the applied compaction forces. Similar results were also observed and explained by Tan et al., (2018). The sensors used in our study (temperature, humidity, pH, pressure and oxygen) were found to have sufficient capacity for silage studies. Only the CO<sub>2</sub>sensor (5 000 ppm) did not have sufficient capacity for silage studies. It was found to have insufficient capacity due to the presence of CO<sub>2</sub> at values higher than the maximum measurement range. Therefore, it had to be replaced with a sensor with a high range of measurement capacity (40 000 ppm). The oxygen sensor is a sensitive sensor and is located in a closed box. When measuring, the box is opened and removed. These types of sensors provide a 3-month lifespan for an accurate and calibratable measurement. Due to this situation, the sensors were replaced with longer-lasting oxygen sensors instead of frequently changing them. It was concluded that the CO<sub>2</sub> sensor must be replaced with a new one by extending the input measuring range and the oxygen sensor must be replaced with a long-life one.



## **Acknowledgements**

This study was supported by Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under the Grant Number 119O161 The authors thank to TUBITAK for their supports.

## **Statement of Conflict of Interest**

The authors have declared no conflict of interest.

## **Author's Contributions**

The contribution of the authors is equal.

## **Abbreviations**

CO<sub>2</sub>: Carbon Dioxide

O<sub>2</sub>: Oxygen

DM: Dry matter

HMI: Human Machine Interface

F: Applied compaction force

## **References**

- Craig PH., Roth G. Penn State University bunker silo density study summary report 2004-2005". Pennsylvania State University, 2005.
- D'Amours L., Savoie P. Density profile of corn silage in bunker silo. *Can. Biosyst. Eng.*, 2005; 47, 21-28.
- Hoffmann T., Geyer S. Determination of silage density in bunker silos using a radiometric method. *Agronomy Research* 2014;12(1): 65-72.
- Holmes BJ., Muck RE. Managing and designing bunker and trench silo (AED-43). MidWest Plan Service. Ames, IA 2004.
- Jones CM., Heinrichs AJ., Roth GW., Ishler VA. From harvest to feed: understanding silage management. PennState College of Agricultural Sciences, Agricultural Research and Cooperative Extension 2004; 6-18.
- Latsch R., Sauter J. Comparison of methods for determining the density of grass silage. *Agricultural and Food Science* 2013; 22: 189-193.
- Li M., Jungbluth KH., Sun Y., Cheng Q., Maack C., Buescher W., Lin J., Zhou H., Wang Z. Developing a Penetrometer -based mapping system for visualizing silage bulk density from the bunker silo face. *Sensors* 2016;16, 1038; doi: 10.3390 / s16071038
- Li M., Shan G., Zhou H., Buescher W., Maack C., Jungbluth KH., Lipski A., Grantz DA., Fan Y., Ma D., Wang Z., Cheng Q., Sun Y. CO<sub>2</sub> production, dissolution and pressure dynamics during silage

- production: multi-sensor-based insight into parameter interactions. *Scientific Reports* 2017;| 7: 14721.
- Muck RE., Holmes BJ. Factors affecting bunker silo densities. St. Joseph, MI: ASAE 1999; ASAE Paper No. 991016
- Muck RE., Holmes BJ. Factors affecting bunker silo densities. *Applied Engineering in Agriculture* 2000; 16(6): 613-619.
- Muck RE., Savoie P., Holmes BJ. Laboratory assessment of bunker silo density, part I: Alfalfa and grass. *Applied Engineering in Agriculture* 2004; 20 (2): 157-164.
- NKU TR2021 009131 B Patent certificate 2022; Tan F., Dalmış S.I., Okur E., Dalmış F.
- Oelberg T., Harms C., Ohman D., Hinen J., Defrain J. Survey shows more packing of bunkers and piles needed. *Monsanto Dairy Business and Hubbard Dairy Services* 2005; 47-54.
- Roy MB., Treblay Y., Pomerleau P., Savoie P. Compaction and density of forage in bunker silo. *ASAE Annual International Meeting*, 2001; Paper No. 01-1089.
- Ruppel KA. Bunker silo management and its effects on hay crop quality. In proceedings from the national silage production conference: 1993;67-82. NRAES publication 67, cooperative extension, Ithaca, NY.
- Ruppel KA., Pitt RE., Chase LE., Dalton DM. Bunker silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms". *J. Dairy Sci.* 1995; 78(1): 141-153.
- Ruppel KA. Economics of silage management practices: what can I do to improve the bottom line in my ensiling business? silage: Field to Feedbunk (NRAES-99) 1997; Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, NY.
- Shan G., Sun Y., Li M., Jungbluth KH., Maack C., Buescher W., Schütt KB., Boeker P., Lammers PS., Zhou H., Cheng Q., Ma D. An assessment of three different in situ oxygen sensors for monitoring silage production and storage. *Sensors* 2016; 16, 91; doi:10.3390/s16010091
- Shaver RD. Forage particle length in dairy rations. 1990;Pages 58–64 in Proc. Dairy Feeding Systems Symp., NRAES, Ithaca, NY.
- Savoie P., Muck RE., Holmes BJ. Laboratory assessment of bunker silo density, part II: whole-plant corn. *Applied Engineering in Agriculture* 2004; 20(2): 165-171.
- Shinners KJ., Muck RE., Koegel RG., Straub RJ. Silage characteristics as affected by length-of-cut. 1994;ASAE Paper No. 94-1524. St. Joseph, Mich. :ASAE.
- Sun YR., Buescher W., Lin JH., Schulze Lammers P., Ross F., Maack C., Cheng Q., Sun W. An improved penetrometer technique for determining bale density. *Biosyst. Eng.* 2010;105: 273–277. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.09.020.
- Tan F., Kayısoglu B., Okur E. Effects of compaction pressure on the temperature distribution in bunker type silage silo. *Indian Journal of Animal Sciences* 2018; 88 (1): 116-120.
- Tan F., Dalmış İS., Dalmış F., Okur E. Laboratuvar tipi silaj yapım ve veri toplama sisteminin geliştirilmesi. 2020;TÜBİTAK 1002-1910161 Nolu Proje Sonuç Raporu.

- Visser B. Forage density and fermentation variation: A survey of bunkers, piles and bags across minnesota and wisconsin dairy farms. Four-State Dairy Nutrition and Management Conference 2005; MWPS-4SD18. Ames, IA.
- Wang R. Estimation of silage density in bunker silos by drilling. Master Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, 2012; Department of Animal Nutrition and Management.



OKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi  
8(1): 266-284, 2025

OKU Journal of The Institute of Science and  
Technology, 8(1): 266-284, 2025

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University  
Journal of The Institute of Science  
and Technology



## FUCOM ve MOORA Yöntemleri ile Hidrojen Enerjisinde Risk Faktörlerine Göre Tesis Yeri Seçimi

Ayşe Nuray CANAT<sup>1\*</sup>, Coşkun ÖZKAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-8527-550X>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-0318-8614>

\*Sorumlu yazar: ayse.canat@izu.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 15.05.2024

Kabul tarihi: 10.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Hidrojen enerjisi

Risk analizi ve değerlendirilmesi

Yer seçimi

FUCOM

MOORA

### ÖZ

Fosil yakıtların tükenmesi, küresel ısınmayı önlemek, yaşanabilir ve sürdürülebilir bir yaşam için temiz enerjinin önemi giderek artmaktadır. Bunu sağlamak için kullanılan yenilenebilir enerjiler çok çeşitlidir. Bu kaynaklardan olan hidrojen enerjisi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Hidrojen enerjisi, bu yüzyılın devamında en popüler enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu enerji tesisinin kurululumunun, üretiminin, taşınmasının ve depolanmasının içerdiği tehlikeler ve sonucunda oluşan riskler vardır. Yenilenebilir enerjiyi en uygun biçimde kullanabilmek ve maksimum yarar sağlayabilmek için bu risklerin tespiti, tanımlanması, analiz edilmesi ve önlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, hidrojen enerjisi üretim ve depolama tesisinde oluşması muhtemel tehlikeli durumlar ve riskler literatür taraması yoluyla analiz edilmiştir. Elde edilen risk faktörleri tecrübeli sektör çalışanları ve konusunda uzman akademisyenlerce değerlendirilmiştir. Hidrojen enerji tesis yeri seçimi için en önemli faktörlerden olan risk göz önüne alınarak yapılan ilk çalışma olması sebebiyle literatüre katkı sağlamaktadır. Karada veya denizde kurulması opsiyonel olan hidrojen enerji santrali için, risk faktörleri çerçevesinden FUCOM ve MOORA yöntemleri ile değerlendirme yapılmış ve enerji santralinin karada kurulmasına karar verilmiştir.

## Facility Location Selection According to Risk Factors in Hydrogen Energy with FUCOM and MOORA

### Research Article

#### Article History:

Received: 15.05.2024

Accepted: 10.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Hydrogen energy

Risk analysis and assessment

Site selection

FUCOM

MOORA

### ABSTRACT

The importance of clean energy is gradually increasing for the depletion of fossil fuels, preventing global warming, and a livable and sustainable life. The renewable energies used to achieve this are very diverse. Hydrogen energy from these sources is the subject of this study. Hydrogen energy is seen as the most popular energy source for the rest of this century. There are hazards and consequent risks involved in the installation, production, transportation and storage of this power plant. In order to use renewable energy in the most appropriate way and to provide maximum benefit, these risks need to be identified, defined, analyzed and prevented. In this study, possible dangerous situations and risks that may occur in the hydrogen energy production and storage facility were analyzed through literature review. Obtained risk factors were evaluated by experienced sector workers and academicians specializing in hydrogen energy. For the hydrogen power plant, which is optional to be built on land or at sea, an evaluation was made with the FUCOM and MOORA methods within the framework of risk factors, and it was decided to establish the power plant on land.

## **1. Giriş**

Dünya, artan sera gazı emisyonu, fosil kaynakların tükenmesi durumu ve buna karşın enerji talebinin gün geçtikçe artması sorunlarıyla karşı karşıyadır. Enerji kaynaklarının verimli kullanımını ve doğa dostu yeşil enerji üretimini sağlamak amacıyla dünya ülkeleri alternatif enerji kaynağı arayışına girmişlerdir. Bunu sağlamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelikli olarak da yeşil hidrojen üretimine yatırım yapmaya önem vermişlerdir. Yalnız doğadan sağladığımız enerjiler sürekli değildir ve bu durum enerji talebini karşılarken sıkıntı oluşturabilir. Bunun için yenilenebilir enerji kaynaklarında, enerji depolamasını sağlamak önemlidir. Böylelikle enerji talebinin yüksek olduğu zaman dilimlerinde depolanan enerjiden faydalanılabilir. Enerji depolama teknolojileri son yıllarda sıkça çalışma yapılan alanlardan biridir. Literatürde, enerji depolama teknolojisinin hat tıkanıklığı yönetimine, güç kalitesinin sağlanmasına, güç kaynağı güvenilirliğinin artırılmasına ve yüksek oranda yenilenebilir enerjinin soğurulmasında önemli bir rol oynadığına işaret edilmiştir (Albertus ve ark., 2020). Enerji depolama teknolojilerden hem yeşil enerji olması, hem de birçok kullanım alanının oluşmasından dolayı yenilenebilir enerjiden hidrojen enerjisi elde etmek tercih edilmektedir (Norouzi, 2021) Hidrojen enerjisi, uluslararası enerji ajansı tarafından geleceğin enerji vektörlerinden biri olarak görülmektedir (Bermudez ve Hannula, 2021).

Enerji santrali yer seçimi yapılırken literatürde yaygın olarak üretilecek enerjinin dağıtımı, enerji santrali kurulacak bölgenin ulaşım ağlarına yakınlığı, çevreye zarar oluşturabilecek durumlar gibi faktörler göz önüne alınmaktadır. Bunlar enerji tesis yeri seçimi için öncelikli konulardır. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken bir diğer unsur, tesisin oluşturabileceği risklerin de değerlendirmesi gerekliliğidir. Herhangi bir enerji tesisinin enerji üretimine başlaması için geçen süre uzun bir zaman dilimini kapsar. Bu zaman diliminde tesisin inşaatından işletmeye alınmasına kadar birçok operasyon söz konusudur. Her bir operasyon için de oluşabilecek riskler söz konusudur. Bu yüzden tehlikeli durumların incelenmesi, risklerin analiz edilmesi, değerlendirilmesi, azaltılması için alınacak önlemlerin oluşturulması, acil durum müdahaleleri, oluşabilecek sonuçların çevreye etkilerinin değerlendirilmesi vb. işlemler gerekmektedir. Bunun için tesisin yerinin seçimi yapılırken risk faktörünün de değerlendirmeye alınması gerekmektedir.

Risklerin değerlendirilmesinde çeşitli amaçlar vardır. Bunlardan ilki incelemek istediğimiz sistemdeki faaliyetler ve süreçler hakkında detaylı bilgi sahibi olup belirsizliklerin tespit edilmesidir. Bir diğeri de, elde ettiğimiz analiz neticesinde bu belirsizliklerden hangisinin ne ölçüde engellenebileceğini değerlendirip tanımlamaktır. Son olarak ise bu belirsizlikler karşısında nasıl seçenekler tasarlanıp, riski azaltmaya yönelik hangi uygulamaların yapılabileceğini belirlemektir. Hidrojen enerjisi gibi nispeten yeni teknolojilerde ve tesislerde tecrübe azlığından dolayı olası tüm tehlikelerin göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılan çalışma ile hidrojen enerjisindeki tehlikeli durumlar, bunların oluşturduğu riskler ve sonuçları hakkında fikir oluşturulmuştur. Kötü nihayetlenen olayların yaşanmaması ve/veya

azaltılması için ilgili riskler kategorize edilmiştir. Ana başlıklar üzerinden, tesis ve çevre güvenliği için hidrojen tesisinin kurulum yeri belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada diğer yer seçim faktörlerinden farklı olarak “risk“ faktörünün ele alınması enerji kaynağının kolay yanabilme ve patlama özelliğinin olmasından kaynaklanmaktadır. Fosil kaynakların tükenmek üzere olduğu, alternatif enerji kaynak arayışlarının arttığı günümüzde diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte hidrojen enerjisi çıkış kapısı olarak görülmektedir. Hidrojen enerjisindeki depolanabilme özelliği, ona diğer yenilenebilir kaynaklara göre avantaj kazandırmakla beraber hibrit sistemler için bulunmaz kılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sadece hidrojen enerji tesisleri için değil, hidrojen enerjisi ile birlikte kullanılacak tüm hibrit enerji sistemleri için yol gösterici niteliktedir.

## **2. Materyal ve Metot**

### *2.1. Hidrojen Enerjisi*

Hidrojen doğada en yaygın olarak bulunan elementtir. Diğer elementler ile birleşerek moleküler yapıda bulunur. Normal koşullarda zehirli ve zarar verici bir gaz değildir. Hidrojenin üç adet ana görevi bulunmaktadır. Bunlardan ilki araçlar için yakıt olarak kullanılmasıdır. Günümüzde hidrojenli yakıtlar özellikle Asya ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğerleri hammadde olması durumudur. Çeşitli üretim dallarında (örneğin metal sanayisi) hidrojen hammadde olarak kullanılmaktadır. Üçüncü görevi ise enerjiyi taşımak için kullanılmasıdır.

Hidrojen enerjisi, hidrojen moleküllerinin ayrışması neticesinde ortaya çıkan kimyasal bir enerjidir. Farklı metodolojiler kullanarak elektrik ve ısı formuna dönüştürülebilmektedir. Hidrojen enerjisi elde edilmesi için öncelikle hidrojen üretim kaynaklarının neler olduğunu bilmek gerekmektedir. Hidrojen, su, fosil kaynak, biyokütle vb. kaynaklardan elde edilebilir. Temiz enerji ve yeşil hidrojen üretimi için kaynağın ne olduğu dışında, hidrojenin elde ediliş yöntemi de büyük önem arz etmektedir. Hidrojen üretim yöntemleri için kimyasal, elektroliz, fotoliz, biyoliz, radyoliz ve termoradyoliz yöntemler sıralanabilir. Bu yöntemlerin altında farklı üretim metodolojilerine sahip çeşitlendirmeler mevcuttur. Günümüzde hidrojen üretimi için en yaygın olarak fosil kaynaklı enerji kullanılmaktadır. Hidrojen renk skalası kullanılarak, üretilen hidrojenin kaynağı ve üretim yöntemi hakkında fikir sahibi olunabilir. Gri hidrojen, üretim metodu olarak buhar metan reformasyonu kullanılırken kaynak olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Mavi renk skalasına sahip hidrojen üretiminde karbon yakalama ve depolama teknolojisi gibi karbon salınımını azaltıcı uygulamalar söz konusudur. Sarı hidrojen, suyun elektrolizi söz konusudur, elektroliz işlemi için nükleer enerji kaynakları kullanılmaktadır. Yeşil hidrojen de suyun elektrolizi söz konusudur. Elektroliz işlemi için gereken elektrik yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Gri renkten yeşil renge doğru giden bu skalada karbon salınımı gittikçe azalmaktadır. Temiz enerji için çevreyi kirletici kaynak ve teknolojileri kullanmak doğru değildir. Bunun için de hidrojen üretiminde üzerinde en çok durulan yöntem elektroliz yöntemidir. Elektroliz işlemi için gereken enerji, birincil enerji kaynaklarından sağlanabilmektedir. Yeşil hidrojen için birincil enerji kaynaklarının yenilenebilir olanları kullanılmaktadır.

Hidrojen enerjisi ile ilgili olarak üretim metodolojisi, birincil enerji kaynağı seçimi, üretim tesisinin kurulum yeri seçimi, tesisin bakım-onarımı ve işletilmesi, hidrojenin ilgili bölgelere taşınması ve depolanması gibi süreçlerde özenli ve duyarlı çalışılması gerekmektedir.

### *2.1.1. Literatür Taraması*

Hidrojen gazı kolay yanabilen bir gazdır. Hafifliğinden ötürü görünmeyen bir alev ya da yüksek basınçlı alanlardaki statik elektrik bile yanmasına sebep olabilir. Bu sebeple hidrojenle ilgili değerlendirme yapılırken tüm süreçlerin, tekniklerin, kullanım alanlarının göz önüne alınması büyük önem arz etmektedir. Hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması, yakıt olarak kullanılması vb. süreçlerindeki tehlikelerin tespit edilip güvenliğin sağlanması gerekmektedir. Literatür, hidrojen enerjisinin tehlikeleri, riskleri olarak tarandığında hidrojen enerjisinin tüm süreçleri hakkında çeşitli makaleler bulunmuştur. Literatürdeki çalışmalar incelenirken “hidrojen enerjisi”, “hidrojen enerjisindeki riskler”, “hidrojen üretimi”, “hidrojen taşınması”, “hidrojen depolanması”, “hidrojen üretimindeki tehlikeler ve riskler”, “hidrojen taşınmasındaki tehlikeler ve riskler”, “hidrojen depolanmasındaki riskler ve tehlikeler”, “hidrojen veri tabanlarındaki kazalar”, “iş sağlığı ve güvenliği açısından hidrojen”, “hidrojen kullanım alanları” terimlerini içeren makaleler WOS ( Web of Science), Scopus, Wiley Online Library, SpringerLink, ScienceDirect, Taylor & Francis Online Journals, Ulakbim veri tabanlarında taranmıştır. Literatürdeki yayınlar farklı sınıflandırmalar ile tablolaştırılarak Tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Literatürdeki risk perspektifiyle hidrojen enerjisi ile ilgili yayınlar

Referans	Üretim Tesisleri	Depolama Tesisleri	Lojistik	Yakıt İkmal İstasyonu (gaz)	Yakıt İkmal İstasyonu (sıvı)	Sıvı Hidrojen Kapları	Genel Risk Çerçevesi Değerlendirmesi	Simülasyon	Üretim Yöntemleri (Elektroliz, metan buhar reformasyonu vb.)	HyRAM	Hidrojen Güvenliği
Aprea, 2009									✓		
Zhiyong ve ark., 2010				✓							
Zhiyong ve ark., 2011				✓							
Mirza ve ark., 2011							✓				
Haugom ve Friis-Hansen, 2011				✓							
Lachance ve ark., 2011	✓										
Pasman, 2011											✓
Kim ve ark., 2011											✓
Cristina Galassi ve ark., 2012							✓				
Jafari ve ark., 2012									✓		
Najjar, 2013							✓				
Groth ve Tchouvelev, 2014			✓								
Lowesmith ve ark., 2014					✓						
Groth ve Hecht, 2015										✓	
Mohammadfam ve Zarei, 2015									✓		



**Tablo 1.** Literatürdeki risk perspektifiyle hidrojen enerjisi ile ilgili yayınlar (devamı)

Referans	Üretim Tesisleri	Depolama Tesisleri	Lojistik	Yakıt İkmal İstasyonu (gaz)	Yakıt İkmal İstasyonu (sıvı)	Sıvı Hidrojen Kapları	Genel Risk Çerçevesi Değerlendirmesi	Simülasyon	Üretim Yöntemleri (Elektroliz, metan buhar reformasyonu vb.)	HyRAM	Hidrojen Güvenliği
Kasai ve ark., 2016									✓		
LaFleur ve ark., 2017				✓							
Groth ve Hecht, 2017										✓	
Skjold ve ark., 2017										✓	
Huang ve Ma, 2018	✓										
Honselaar ve ark., 2018							✓				
Spada ve ark., 2018		✓									
Pu ve ark., 2019					✓						
Lam ve ark., 2019			✓								
Chang ve ark., 2019				✓							
Moradi ve Groth, 2019		✓									
Shi ve ark., 2020	✓										
Ustolin ve ark., 2020						✓					
Li ve ark., 2020									✓		
Malakhov ve ark., 2020								✓			

**Tablo 1.** Literatürdeki risk perspektifiyle hidrojen enerjisi ile ilgili yayınlar (devamı)

Referans	Üretim Tesisleri	Depolama Tesisleri	Lojistik	Yakıt İkmal İstasyonu (gaz)	Yakıt İkmal İstasyonu (sıvı)	Sıvı Hidrojen Kapları	Genel Risk Çerçevesi Değerlendirmesi	Simülasyon	Üretim Yöntemleri (Elektroliz, metan buhar reformasyonu vb.)	HyRAM	Hidrojen Güvenliği
Hansen, 2020							✓				
Hadeif ve ark., 2020											✓
Abohamzeh ve ark., 2021											✓
Zarei ve ark., 2021									✓		
Yoo ve ark., 2021				✓							
Correa-Jullian ve Groth, 2022					✓						

Hidrojen enerjisinde risk analiz ve değerlendirmesi yapabilmek için literatürdeki kaynaklar taranmış ve olaylar ana olay, ara olay ve son olay olarak gruplandırılmıştır. Ana olay, olayın başlamasına sebebiyet veren sorunlar olarak tanımlanmıştır. Hidrojen enerjisi santrali için ana olaylar; hatalı çalışma, yetersiz bakım, yetersiz tasarım, yanlış yapım ve montaj, dış etkiler olarak ifade edilebilir. Ara olaylar ise, ana olayın sebebiyet verdiği sızıntı, yırtılma, delinme, tutulma, çatlak/delik gibi sorunlardır. Son olaylar da ara olayların neticesinde oluşur. Genel başlıklar halinde sıralayacak olursak yangın, patlama ve toksik salınım gibi insan sağlığına ve çevreye büyük zararları olan durumlardır. Bu sınıflandırmadan yola çıkarak hidrojen enerjisi santralleri için risk oluşturacak kriterler beş ana başlık altında toplanmıştır. Bu başlıklar yönetim, tasarım hatası, teknik (yanlış yapım ve montaj), bakım-onarım, operatör hatasıdır. Çalışmada, tesis yeri seçimi için ilk aşama olan, “karada mı, deniz üstünde mi üretim yapalım?” sorusuna risk faktörü perspektifinden cevap aranmaktadır. Yapılan literatür taramasında bu içerikte bir çalışmanın olmadığı görülmektedir. Çalışma bu yönü ile bundan sonraki çalışmalar için yol gösterici olacak niteliktedir.

## 2.2. FUCOM (Tam Tutarlılık Yöntemi)

Pamucar ve arkadaşları (Pamučar ve ark., 2018) tarafından geliştirilen bu yöntemde doğrusal programlama temeli model olarak alınmıştır. Yöntemde, ilgili kriterlerin karşılaştırmalı öncelikleri kriterlerin arasındaki ilişkiyi belirlemektedir. Modelin çözümünde optimal ağırlık değerleri ve tam tutarlılıktan sapma (TTS) derecesi bulunur. TTS ile kriter ağırlıklarının güvenilir olup olmadığı sonucuna ulaşılır. Daha az sayıda karşılaştırma yaparak sonuca ulaşması hem kolaylık hem de güvenilirlik olarak yöntemde olumlu değer katmaktadır.

Yöntem, sosyal sürdürülebilirliği göz önüne alan tedarikçi seçim sürecinde (Nasseri ve ark., 2023), tedarik zincirinin performansını iyileştirmek için üçüncü taraf lojistik hizmet sağlayıcılarının seçiminde (Nila & Roy, 2023), video oyun endüstrisinin değerlendirilmesinde (Nemati ve ark., 2023), iş güvenliği risklerinin önceliklendirilmesinde (Gölcük ve ark., 2023), elektrikli şarj istasyonları için yer seçiminde (Gökler, 2024) gibi farklı karar problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yöntemin işlem basamakları aşağıda özetlenmiştir (Pamučar ve ark., 2018).

**Adım 1.** Karar vericiler tarafından kriterler önem düzeylerine göre sıralanır (Eşitlik 1). Sıralama, en önemli olandan en az önemli olana doğru yapılmaktadır. Aynı önem derecesine sahip kriterler arasında eşitlik “=” işareti konulmaktadır.

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \quad (1)$$

**Adım 2.** Sıralanan kriterler arasındaki karşılaştırmalı öncelikler belirlenir.  $\varphi_{k/(k+1)}$ , burada k ile kriterlerin sırası temsil edilmektedir.

$\varphi_{k/(k+1)}$ ,  $C_{j(k)}$  kriterinin sıralamasının  $C_{j(k+1)}$  kriterinin sıralamasına göre avantajını temsil eder. Böylece Eşitlik 2’deki değerlendirme kriterlerinin karşılaştırmalı önceliklerinin vektörleri elde edilir:

$$\Phi = ( \varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \varphi_{3/4}, \dots, \varphi_{k/(k+1)} ) \quad (2)$$

FUCOM yönteminde karar vericiler, kriterleri ikili karşılaştırırken tamsayı, ondalık değer vb. ölçek değerleri kullanılabilir.

Son adımda, değerlendirme kriterinin ağırlık katsayılarının son değerleri  $( w_1, w_2, w_3, \dots, w_n )^T$  hesaplanır. Ağırlık katsayılarının son değerlerinin aşağıda belirtilen iki koşulu sağlaması gerekmektedir.

Koşul 1. Ağırlık katsayılarının oranı, Eşitlik 3’de belirtildiği gibi gözlemlenen kriterler arasındaki karşılaştırmalı önceliğe  $(\varphi_{k/(k+1)})$  eşittir.

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \quad (3)$$

Koşul 2. Ağırlık katsayılarının son değerleri, matematiksel geçişlilik koşulunu sağlamalıdır, yani

$$\varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$$

Ayrıca  $\varphi_{k/(k+1)} = \frac{w_k}{w_{k+1}}$  ve  $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}}$  olduğu için  $\frac{w_k}{w_{k+1}} \times \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} = \frac{w_k}{w_{k+2}}$  elde edilir. Böylece, değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının nihai değerlerinin yerine getirmesi gereken başka bir koşul Eşitlik 4’teki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (4)$$

Tam tutarlılık, yani minimum TTS ( $\chi$ ), yalnızca geçişliliğe tam olarak uyulduğunda gerçekleşir. Bu şekilde maksimum tutarlılık (0,000) sağlanır, yani ağırlık katsayılarının elde edilen değerleri için TTS değeri  $\chi=0$ ’dır.

Sonuç olarak, tanımlanan ayarlara dayanarak değerlendirme kriterlerinin ağırlık katsayılarının son değerlerinin belirlenmesine yönelik nihai model Eşitlik 5’teki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{array}{l} \min \chi \text{ s.t.} \\ \left. \begin{array}{l} \left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+1)}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi, \forall j \\ \left| \frac{w_{j(k)}}{w_{j(k+2)}} - \varphi_{k/(k+1)} \times \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi, \forall j \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0, \forall j \end{array} \right\} \quad (5) \end{array}$$

Eşitlik 5’teki modelin çözülmesi ile değerlendirme kriterlerinin  $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$  nihai değerleri ve TTS ( $\chi$ ) derecesi elde edilir.

#### 2.4. MOORA (Oran Analizi ile Çok Amaçlı Optimizasyon)

MOORA metodu; ilk olarak 2006 yılında Brauers ve Zavadskas tarafından önerilmiştir (Brauers ve Zavadskas, 2006). Yöntemde tüm hedeflerin, alternatiflerin ve ikisi arasındaki etkileşimin eş zamanda değerlendirilmesi öne çıkan özelliktir. Literatürde yöntemin farklı alt yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar; Oran Metodu, Referans Nokta Yaklaşımı, Önem Katsayısı gibi. Yapılan çalışmalarda oran yöntemleri ve referans noktası yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada MOORA oran yönteminin kullanılmıştır. Oran yönteminin çözüm aşamaları aşağıda verilmiştir (Brauers ve Zavadskas, 2006).

##### **Adım 1.** Amaçların ve Alternatiflerin Performans Değerlerinin Belirlenmesi:

Amaçların belirlenmesi ve farklı alternatif değerlerinin ortak tek bir matriste gösterilmesiyle başlar. Eşitlik 6'da bu şekilde oluşturulan matris gösterilmektedir. Kriterlerin maliyet ve fayda olup olmadığı belirtilmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

##### **Adım 2.** Matris normalizasyonu:

Eşitlik 7 ile normalizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. İşlem sırasında, her bir hücredeki değerin bulunduğu sütundaki değerlerin karelerinin toplamının kareköküne bölünmesi söz konusudur.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (7)$$

( $x_{ij}^*$  normalize edilmiş karar matrisini ifade etmek üzere)

##### **Adım 3.** Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin elde edilmesi

Kriterlerin ağırlık değerlerini bulunduğu sütundaki her bir değer ile çarptığımızda elde edilir.

##### **Adım 4.** Alternatiflerin sıralanması

Sıralamayı yaparken Eşitlik 8'deki formül kullanılmaktadır.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n x_{ij}^* \quad (8)$$

( $j=1,2,\dots,g$  maksimize edilecek hedefler için ;  $j=g+1,g+2,\dots,n$  minimize edilecek hedefler için)

Formüldeki  $y_i^*$ , j alternatifinin tüm hedeflere göre normalleştirilmiş değerlendirilmesi, maksimize edilen değerlerin toplamı ile minimize edilen değerlerin toplamı arasındaki farkı ifade etmektedir. Sıralama aşamasında ise en büyük değere sahip olan  $y_i^*$  değeri en iyi alternatif olarak ifade edilmektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Kriterlerin Belirlenmesi

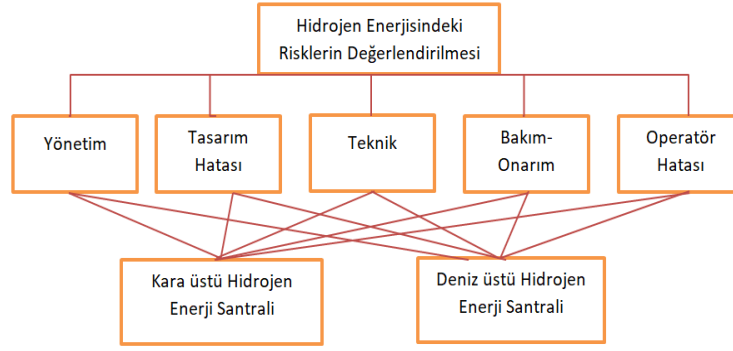
Çalışmada hidrojen enerjisi santrali yer seçimi çalışması yapılacaktır. Karada ve deniz üstünde hidrojen tesisi olmak üzere iki adet alternatif mevcuttur. Yer seçimi yaparken sadece oluşabilecek riskler ve bu risklerin sonuçlarının doğuracağı etkiler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Problemin hiyerarşik yapısı Şekil 1’de verilmektedir.

Çalışmada kullanılacak risk faktörleri literatür taraması yoluyla elde edilmiş ve benzer faktörler birleştirilerek yönetim, tasarım hatası, teknik, bakım ve çalışan hatası olmak üzere 5 ana başlık elde edilmiştir. Bu faktörler elde edilirken ( Mirza ve ark., 2011; Lowesmith ve ark., 2014; Li ve ark., 2020) çalışmalarındaki veriler baz alınmış olup, uzmanlarca uygunluğu değerlendirildikten sonra çalışmanın kriterleri belirlenmiştir. Tablo 2’de kriterler ve tanımlamaları gösterilmektedir.

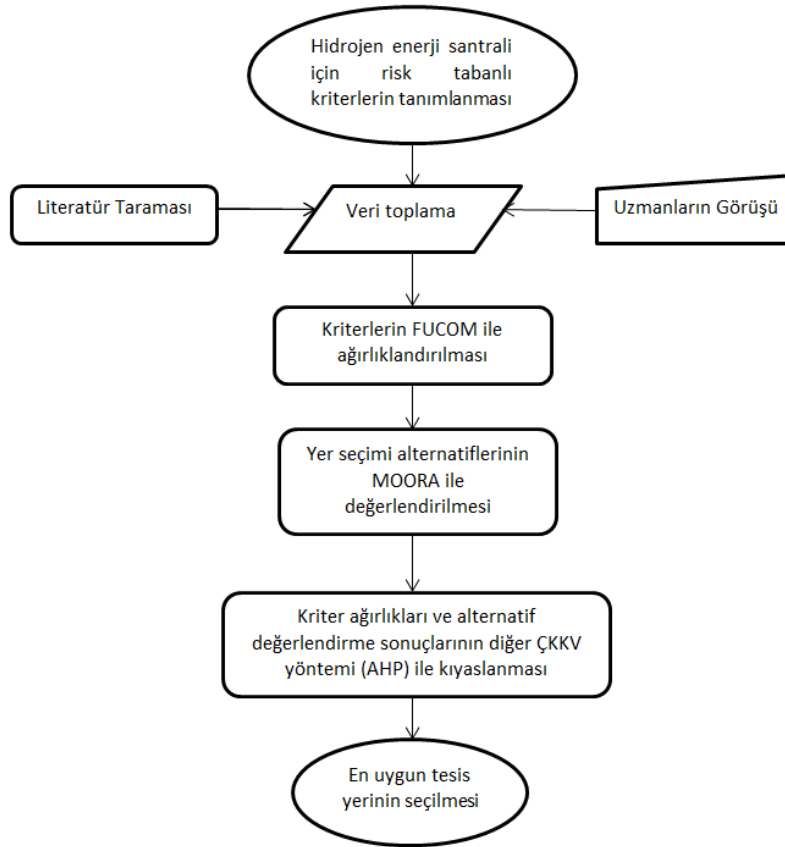
**Tablo 2.** Hidrojen tesisi yer seçimi için risk perspektifli kriterler ve tanımlamaları

<b>Kriterler</b>	<b>Açıklamaları</b>
<b>Yönetim (K1)</b>	Yönetim ifadesi ile fabrikanın sorumlu bölümü tarafından alınan bir karar neticesinde istenmeyen bir olayla sonuçlanması muhtemel durumları ifade etmek için kullanılmaktadır.
<b>Tasarım Hatası (K2)</b>	Tesisin işletmeye alınmadan evvel mevcut olan ve istenmeyen bir olaya sebebiyet verebilecek kusurlarından bahsedilmektedir.
<b>Teknik (K3)</b>	Santral işletmeye alındıktan sonra teknik personel tarafından yapılan yanlış ekipman kurulumu, yanlış karar gibi nedenlerden kaynaklanan tüm sorunları içerir.
<b>Bakım-Onarım (K4)</b>	Tesisin rutin kontrollerinde, kontroller neticesinde oluşan onarım işlemleri sırasında çıkan tüm nedenleri içerir.
<b>Operatör Hatası (K5)</b>	Operatörlerin olması istenmeyen bir olayla sonuçlanan tüm hatalarını içermektedir.

Nihai durumda, belirlenen kriterler değerlendirme yapması için hidrojen enerjisi konusunda tecrübeli sektör çalışanlarına ve akademisyenlere iletilmiştir. Değerlendirme yapması için seçilen 8 uzman, konusunda tecrübeli akademisyen ve enerji sektörü çalışanından oluşmaktadır. Kriterlerin ağırlıklandırılması yapılırken ana başlık altında bulunan faktörler için uzmanlara bilgilendirme yapılmıştır. Çalışmada yöntem olarak kriterlerin ağırlıklandırılması için FUCOM, alternatiflerin sıralanması için MOORA yöntemi kullanılmıştır. Sonuçların tutarlılığını göstermek için AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) yöntemiyle hem kriter ağırlıklandırılması hem de alternatif sıralaması yapılmıştır. Önerilen metodolojinin şeması Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Problemin hiyerarşik yapısı



Şekil 2. Önerilen metodolojinin akış şeması

### 3.2. Uygulama

Tablo 3'te uzmanlar (U1: 1. uzmanı temsil etmek üzere) tarafından kriterlerin öncelik sıralamaları oluşturulmuştur. Öncelik sıralaması oluşturulurken uzmanların tecrübeleri ve bilgilerinden faydalanılmaktadır. Uzmanlar, her bir kriteri 1-9 ölçeğinde puanlandırmışlardır. Burada, 1 en düşük skoru, 9 en büyük skoru ifade etmektedir. Karşılaştırma yapılırken en fazla önem verilen kriter baz alınarak puanlama yapılmaktadır.

**Tablo 3.** Kriterlerin uzman görüşlerine göre sıralanması\*

Uzmanlar	Kriter Önem Sıralaması
U1	K4>K2=K3>K1>K5
U2	K3>K2>K4>K1>K5
U3	K3>K2>K4>K1>K5
U4	K4>K5>K3=K2>K1
U5	K3>K2>K4>K1=K5
U6	K3=K4>K1>K2>K5
U7	K3>K4>K1>K2>K5
U8	K3>K4>K1>K2>K5

\*K1:Yönetim, K2: Tasarım Hatası, K3:Teknik, K4: Bakım- Onarım, K5: Operatör Hatası

Tablo 4'te uzmanların belirlediği puanlamalara göre hesaplanan kriter ağırlıkları verilmektedir. Her bir kriterin nihai ağırlığı satır ortalaması alınarak bulunmaktadır. Tablo 2'de belirtildiği gibi "Teknik" kriteri hidrojen enerjisi üretim santralının açılması için 0,412'lik ağırlığıyla yer seçiminde öncelik belirleyici olarak bulunmuştur. Bu kriteri, sırasıyla "Bakım-Onarım" ve "Tasarım Hatası" kriterleri izlemektedir.

**Tablo 4.** Kriterlerin nihai ağırlıkları

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	Ağırlıklar
<b>Yönetim</b>	0,1	0,091	0,077	0,083	0,078	0,099	0,1	0,111	0,092
<b>Tasarım Hatası</b>	0,166	0,183	0,18	0,167	0,233	0,057	0,083	0,069	0,142
<b>Teknik</b>	0,166	0,548	0,54	0,125	0,467	0,397	0,498	0,555	0,412
<b>Bakım-Onarım</b>	0,498	0,11	0,135	0,5	0,156	0,397	0,249	0,185	0,279
<b>Operatör Hatası</b>	0,071	0,068	0,068	0,167	0,067	0,05	0,071	0,0079	0,08

Kriterlerin ağırlıkları belirlendikten sonra alternatiflerin sıralanması için MOORA-Oran Yöntemi kullanılmıştır. Uzmanlar, alternatifleri değerlendirdikten sonra ortalamaları alınmıştır. İlgili hesaplamalar yapıldıktan sonra  $y_i^*$  bulunmuştur, değerlerin büyüklüğüne göre sıralama yapıldığında Kara Hidrojen Enerji Santralının birinci sırada olduğu gözlemlenmiştir. Risk oluşturma açısından ilgili kriterler göz önüne alındığında karada tesisi kurmak daha avantajlı gözükmektedir. Sonuçlar Tablo 5'te gösterilmektedir.

**Tablo 5.** MOORA Oran yöntemine göre alternatiflerin sıralanması

		min	min	min	min	min	$y_i^*$	Sıra
<b>Ağırlıklar</b>		0,091	0,141	0,41	0,277	0,08		
<b>Alternatifler</b>		<b>Yönetim</b>	<b>Tasarım Hatası</b>	<b>Teknik</b>	<b>Bakım-Onarım</b>	<b>Operatör Hatası</b>		
<b>Kara Santrali</b>	<b>Hidrojen</b>	0,0515	0,0670	0,2109	0,1387	0,0359	-0,5043	1
<b>Deniz üstü Santrali</b>	<b>Hidrojen</b>	0,0741	0,1228	0,3430	0,2393	0,0473	-0,0826	2

Sonuçların tutarlılığını göstermek için aynı veriler kullanılarak kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin sıralanması AHP yöntemi ile yapılmıştır. Tablo 6'da kriter ağırlıkları gösterilmektedir. İlgili kriterler arasında kıyaslama yapıldığında kriterlerin ağırlık sıralamasında bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Ağırlık değerleri farklılık göstermektedir.



**Tablo 6.** Ana kriterlerin AHP değerlendirmesi sonuçları

<b>Ana Kriterler</b>	<b>Ağırlıkları</b>
<b>Yönetim</b>	0,073666
<b>Tasarım Hatası</b>	0,162029
<b>Teknik</b>	0,435759
<b>Bakım- Onarım</b>	0,284201
<b>Operatör Hatası</b>	0,044345

Tablo 7’de AHP yöntemi kullanılarak alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Alternatiflerin sıralama sonucunda da herhangi bir değişiklik görülmemektedir. Yalnız AHP yönteminde sıralama skorları arasında daha büyük bir fark varken MOORA yönteminde farklar bu kadar belirgin değildir.

**Tablo 7.** Alternatiflerin sıralanmasının AHP yöntemi sonucu

<b>Alternatifler</b>	<b>Seçim Skoru</b>	<b>Sıralama</b>
<b>Kara Hidrojen Santrali</b>	0,846764356	1
<b>Deniz üstü Hidrojen Santrali</b>	0,153235644	2

#### **4.Sonuçlar**

Çalışmada 5 ana kriter başlığı değerlendirilerek hidrojen üretim tesisi için risk tabanlı yer seçimi yapılmıştır. Konusunda uzman sekiz kişi tarafından yapılan değerlendirme neticesinde hidrojen üretim tesisinin karada kurulmasının riskleri azaltma açısından daha iyi olacağı sonucuna varılmıştır. Hidrojen enerji tesisinin oluşturacağı risklerin denizde daha az hasar yaratacağı ilk etapta düşünölmekle beraber, karada tesis kurulumu sağlandığında risklerin olası sonuçlarına daha hızlı ve kolay ulaşım sağlanacağı uzmanlarca değerlendirilmiştir. Tesisin kurulum aşamasından itibaren deniz üstü tesis konusunda yeterince tecrübe bulunmaması durumunda birçok risk oluşabileceğı uzmanlarca öngörölmüştür. Tesisin deniz üstünde olmasının bakım-onarım faaliyetleri için zorluk oluşturabileceğı ve buna bağlı aksamaların oluşabileceğı değerlendirilmiştir. Ağırlık olarak daha yüksek yüzdeye sahip olan teknik ve bakım-onarım konuları deniz üstü santralin daha geri planda kalmasına sebep olmuştur. Diğer kriterler için tesis yeri seçimi nispeten daha opsiyonel olabilmektedir. Kriterler açısından çalışmanın sonuçlarının değerlendirilmesi maddeler halinde aşağıda açıklanmaktadır.

##### *4.1. Teknik kriterinin değerlendirilmesi*

Risk oluşturan faktörlerden “Teknik” faktörünün 0,412’lik ağırlık puanı ile diğer faktörlere göre oldukça önemli olduğı görölmektedir. Teknik denilince santralin kurulumu için tedarik aşamasından santralin çalışır hale gelinceye kadar geçireceğı tüm operasyonlar bu kapsamın içinde değerlendirilmektedir. Teknik faktörünün risk oluşturmamasını engellemek ve/veya azaltmak için sistem bileşenlerinin performansları devamlı surette takip edilmeli ve bozulmalara meydan verilmemelidir. Tesis için her zaman yedek elektrik sistemi olmalıdır. Vanalar, yüklerinde herhangi bir dengesizliğin olup olmadığı

belirlemek için periyodik olarak kontrol edilmelidir. Tesisin tasarımı ve havalandırma koşulları güvenli çalışmaya uygun ortam sağlamalıdır. Patlama ve diski ve contaları seçimi teknik şartnamelere uygun olmalıdır. Sızdırmazlık ortamı için doğru tercih yapılmalıdır. Acil durum alarmının aktifliği de önem arz etmektedir.

#### *4.2. Bakım-Onarım kriterinin değerlendirilmesi*

Ağırlık tablosu incelendiğinde ikinci önem verilmesi gereken faktörün 0,279'luk ağırlık puanı ile "Bakım-Onarım" olduğu görülmektedir. Hidrojen enerji tesislerinde kazalara sebebiyet veren önemli faktörlerden biri yetersiz bakımdır. Bu sebeple enerji tesisinin düzenli denetim ve bakımı büyük önem arz etmektedir. Akış sistemlerindeki çıkmaz borular, vanalar risk oluşturan önemli komponentlerdir. İlgili teknik personeller tarafından belli periyotlarla sistem bileşenlerinin bakımlarının yapılması, ihtiyaca binaen onarımın ivedilikle gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca güvenlik cihazlarının çalışır durumda olduğu ve kalibrasyonları da dikkat edilmesi gereken hususlardır.

#### *4.3. Tasarım Hatası kriterinin değerlendirilmesi*

"Tasarım hatası" 0,142'lik ağırlık puanı ile önceliklendirme içinde üçüncü sırada yer almaktadır. Tasarım hatasına bağlı riskleri en aza indirmek için öncelikle malzeme seçiminin düzgün yapılması (uygun alaşım malzemelerin kullanımı) gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda herhangi bir deformasyona uğramayan boru vb. ekipman malzemeleri tercih edilmesi önemlidir. Hidrojen gazının salınımını engellemek için küçük çaplı vana kullanımı, tesis tasarımı yapılırken kurulum yerine dikkat edilerek tasarımın yapılması bu faktöre bağlı riskleri azaltmak için kullanılabilir.

#### *4.4. Yönetim kriterinin değerlendirilmesi*

"Yönetim" faktörüne bağlı riskleri önlemek için öncelikle yönetimi riskler ve sonuçları konusunda yeterince bilgilendirmek gerekmektedir. Bu konular; eksik işlemler ve bakımın ihmal edilmemesi, bakım-onarım prosedürlerinin tam olarak yerine getirildiğinden emin olunması, çalışanlar ile doğru iletişim kurulması ve gerekli bilgilendirmelerin zamanında yapılması, operatör denetiminin yapılması ve yetersiz denetimi engelleme, hidrojen sızıntısı tespit ekipmanlarının gerektiği gibi olması, tehlike durumu için yazılı acil durum prosedürlerinin oluşturulması, uygun emir zinciri gibi konularda yapılabilir.

#### *4.5. Operatör hatası kriterinin değerlendirilmesi*

Son faktör, 0,08'lik ağırlık puanına sahip olan "Operatör hatası"dır. Bu faktör değerlendirildiğinde personele tehlikeli sahalarda çalıştığı için özel eğitim verilmesi gerekliliği öncelikli olarak ele alınmalıdır. Operatörlere, kullanacakları makine-teçhizatlar ile ilgili eğitim verilmelidir. Aynı zamanda tehlike anında kullanabilmesi için "yangın söndürme malzemeleri (su ve nitrojen gibi) kullanımı eğitimi", "yüksek sıcaklık ve elektriği yanlış kullanmanın tehlikeleri eğitimi" gibi eğitimlerin verilmesi

kaza riskini düşürür. Operatörlerin disiplinini sağlamak için sürekli olarak izlem altında tutulmaları gerekmektedir. Operatörler, bireysel karar vermesine gerek kalmayacak şekilde iş akışı içinde çalışmalıdır. Ayrıca operatörlerin müdahale süresini arttırmak için de uygun eğitimlerin verilmesi uygundur. Bu şekilde artan operatör tepki süresi ile operatörlerin üzerindeki baskı azalır ve tesisteki kazaların sayısında azalma olur.

Yapılan çalışmanın neticesinde hidrojen enerji tesisinin kurulum yeri, kara olarak belirlenmiştir. Yalnız, günümüzde hidrojen üretim tesislerinin fosil kaynaklardan enerji temin etmesi arzulanmamaktadır, gereken enerjiyi yeşil enerji kaynaklarından elde etmesi istenmektedir. Hidrojen üretimi için de elektroliz yöntemi üzerinde çalışılmaktadır. Gerekli elektrolizör kapasiteleri sağlanarak sudan yeşil hidrojen üretimi sağlamak istenmektedir. Bunun için hidrojen üretim tesislerinin deniz/okyanus kıyı şeridinde yapılması mantıklı görülmektedir. Sonraki çalışmalarda hem su kaynaklarına yakınlık hem de risk faktörlerini göz önüne alan yer seçimi problemleri üzerinde çözümler yapılabilir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması söz konusu değildir.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

### **Kaynaklar**

- Abohamzeh E., Salehi F., Sheikholeslami M., Abbassi R., Khan F. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2021; 72(3): 104569.
- Albertus P., Manser JS., Litzelman S. Long-duration electricity storage applications. *Economics, and Technologies Joule* 2020; 4(1): 21–32.
- Apra JL. Hydrogen energy demonstration plant in Patagonia: Description and safety issues. *International Journal of Hydrogen Energy* 2009; 34(10): 4684–4691.
- Bermudez JM., Hannula İ. Hydrogen. Iea 2021. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- Brauers WKM., Zavadskas EK. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics* 2006; 35(2): 445-469.
- Chang Y., Zhang C., Shi J., Li J., Zhang S., Chen, G. Dynamic Bayesian network based approach for risk analysis of hydrogen generation unit leakage. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(48): 26665-26678.
- Correa-Jullian C., Groth KM. Data requirements for improving the quantitative risk assessment of liquid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022; 47(6):4222-4235.

- Cristina Galassi M., Papanikolaou E., Baraldi D., Funnemark E., Håland E., Engebo A., Haugom GP., Jordan T., Tchouvelev AV. HIAD-hydrogen incident and accident database. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; 37(22): 17351-17357.
- Gökler SH. Optimal site selection for electric vehicle charging stations: Analysis with hybrid FUCOM and geographic information systems. *Energy* 2024; 307: 132659-132673.
- Gölcük İ., Durmaz ED., Şahin R. Prioritizing occupational safety risks with fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2023; 38(1): 57-69.
- Groth KM., Hecht ES. HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(11): 7485-7493.
- Groth KM., Hecht ES., Reynolds JT. Methodology for assessing the safety of Hydrogen Systems : HyRAM 1 . 0 technical reference manual. Sandia Report 2015; March: 1-44.
- Groth KM., Tchouvelev AV. A toolkit for integrated deterministic and probabilistic risk assessment for hydrogen infrastructure. *Probabilistic Safety Assessment and Management* 2014: 1-11.
- Hadef H., Negrou B., Ayuso TG., Djebabra M., Ramadan M. Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(20): 11855-11865.
- Hansen OR. Hydrogen infrastructure-Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions. *Process Safety and Environmental Protection* 2020; 143: 164–176.
- Haugom GP., Friis-Hansen P. Risk modelling of a hydrogen refuelling station using Bayesian network. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(3): 2389-2397.
- Honselaar M., Pasaoglu G., Martens A. Hydrogen refuelling stations in the Netherlands: An intercomparison of quantitative risk assessments used for permitting. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; 43(27): 12278–12294.
- Huang Y., Ma G. A grid-based risk screening method for fire and explosion events of hydrogen refuelling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; 43(1): 442–454.
- Jafari MJ., Zarei E., Badri N. The quantitative risk assessment of a hydrogen generation unit. *International Journal of Hydrogen Energy* 2012; 37(24): 19241-19249.
- Kasai N., Fujimoto Y., Yamashita I., Nagaoka, H. The qualitative risk assessment of an electrolytic hydrogen generation system. *International Journal of Hydrogen Energy* 2016; 41(30): 13308-13314.
- Kim J., Lee Y., Moon I. An index-based risk assessment model for hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(11): 6387-6398.
- Lachance J., Tchouvelev A., Engebo A. Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(3): 2381-2388.

- LaFleur AC., Muna AB., Groth KM. Application of quantitative risk assessment for performance-based permitting of hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(11): 7529-7535.
- Lam CY., Fuse M., Shimizu T. Assessment of risk factors and effects in hydrogen logistics incidents from a network modeling perspective. *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(36): 20572-20586.
- Li X., Han Z., Zhang R., Zhang Y., Zhang L. Risk assessment of hydrogen generation unit considering dependencies using integrated DEMATEL and TOPSIS approach. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(53): 29630–29642.
- Lowesmith BJ., Hankinson G., Chynoweth S. Safety issues of the liquefaction, storage and transportation of liquid hydrogen: An analysis of incidents and HAZIDS. *International Journal of Hydrogen Energy* 2014; 39(35): 20516–20521.
- Malakhov AA., Avdeenkova AV., du Toit MH., Bessarabov DG. CFD simulation and experimental study of a hydrogen leak in a semi-closed space with the purpose of risk mitigation. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(15): 9231–9240.
- Mirza NR., Degenkolbe S., Witt W. Analysis of hydrogen incidents to support risk assessment. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(18): 12068-12077.
- Mohammadfam I., Zarei E. Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: A comprehensive risk analysis framework. *International Journal of Hydrogen Energy* 2015; 40(39): 13653-13663.
- Moonis M., Wilday AJ., Wardman MJ. Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society. *Process Safety and Environmental Protection* 2010; 88(2): 97-108.
- Moradi R., Groth KM. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. In *International Journal of Hydrogen Energy* 2019; 44(23): 12254-12269.
- Najjar YSH. Hydrogen safety: The road toward green technology. *International Journal of Hydrogen Energy* 2013; 38(25): 10716-10728.
- Nasseri H., Chen HK., Huo KZ., Lo YF. A Hybrid grey decision methodology in social sustainable supplier selection. *Sustainability* 2023;15: 11777-11781.
- Nila B., Roy J. A new hybrid MCDM framework for third-party logistics provider selection under sustainability perspectives. *Expert Systems with Applications* 2023; 234: 121009-121033.
- Nemati A., Hashemkhani Zolfani S., Khazaelpour P. A novel gray FUCOM method and its application for better video games experiences. *Expert Systems with Applications* 2023; 234: 121041-121061.
- Norouzi N. An overview on the renewable hydrogen generation market. *International Journal of Energy Research* 2021; 7513(1): 1–2.

- Pamučar D., Stević Ž., Sremac S. A new model for determining weight coefficients of criteria in MCDM models: Full Consistency Method (FUCOM). *Symmetry* 2018; 10(9): 1-22.
- Pasman HJ. Challenges to improve confidence level of risk assessment of hydrogen technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(3): 2407-2413.
- Pu L., Shao X., Zhang S., Lei G., Li Y. Plume dispersion behaviour and hazard identification for large quantities of liquid hydrogen leakage. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 2019; 14(2): 2299.
- Shi J., Chang B., Khan F., Chang Y., Zhu Y., Chen G., Zhang C. Stochastic explosion risk analysis of hydrogen production facilities. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45(24): 13535-13550.
- Skjold T., Siccama D., Hisken H., Brambilla A., Middha P., Groth KM., LaFleur AC. 3D risk management for hydrogen installations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42(11): 7721-7730.
- Spada M., Burgherr P., Boutinard Rouelle P. Comparative risk assessment with focus on hydrogen and selected fuel cells: Application to Europe. *International Journal of Hydrogen Energy* 2018; 43(19): 9470–9481.
- Ustolin F., Paltrinieri N., Landucci G. An innovative and comprehensive approach for the consequence analysis of liquid hydrogen vessel explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2020; 68.
- Yoo BH., Wilailak S., Bae SH., Gye HR., Lee CJ. Comparative risk assessment of liquefied and gaseous hydrogen refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2021; 46(71): 35511–35524.
- Zarei E., Khan F., Yazdi M. A dynamic risk model to analyze hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy* 2021; 46(5): 4626-4643.
- Zhiyong L., Xiangmin P., Jianxin M. Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station in Shanghai. *International Journal of Hydrogen Energy* 2010; 35(13): 6822-6829.
- Zhiyong L., Xiangmin P., Jianxin M. Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36(6): 4079-4086.

## Sıvı Hayvan Gübresinin Macar Fiğinin Ot Verimi ve Kalitesi Üzerine Etkisinin Araştırılması

Ayşe ARIGTEKİN<sup>1</sup>, Erdal ÇAÇAN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı, 12000, Bingöl

<sup>2</sup>Bingöl Üniversitesi, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 12000, Bingöl

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0006-7189-1500>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9469-2495>

\*Sorumlu yazar: ecacan@bingol.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 07.06.2024

Kabul tarihi: 11.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

*Vicia pannonica*

Verim

Kalite

Makro elementler

Mikro elementler

### ÖZ

Bu çalışma, taban gübre ve üst gübre olarak sıvı hayvan gübresinin Macar fiğinin verim, kalite ve mineral madde içerikleri üzerindeki etkisini tespit etmek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada taban gübre ve üst gübre uygulaması olarak iki deneme birlikte yürütülmüştür. Her iki denemede de kontrol grubu ile dekara 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4000 kg ve 5000 kg olacak şekilde sıvı gübre uygulaması yapılmıştır. Macar fiğinde deneme faktörlerinin etkisi altında verim ve kaliteyi belirlemek için bitki boyu, yeşil ot verimi, kuru ot verimi, ham protein, ADF, NDF, makro (Ca, Mg, P, K) ve mikro (Cu, Fe, Mn, Mo ve Zn) element içerikleri incelenmiştir. Taban gübre ve üst gübre olarak uygulanan sıvı hayvan gübresinin Macar fiğinin verim özellikleri ile önemli bir kalite kriteri olan ham protein oranı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemsiz, taban gübrenin ADF, K, Ca, Zn ve Mn, üst gübrenin de ADF, NDF, P, K, Ca, Mg ve Fe üzerindeki etkisinin önemli olduğu görülmüştür ( $P \leq 0.01$ ,  $P \leq 0.05$ ). Bir yıllık çalışma neticesinde, sıvı gübre dozlarının Macar fiğinde verimi artırmaktan ziyade, besin elementi içeriklerinin zenginleştirilmesi ve sindirilebilirliğin artırılması amacıyla kullanılmasının daha isabetli olacağı kanaatine varılmıştır.

## Investigation of the Effect of Liquid Animal Manure on Forage Yield and Quality of Hungarian Vetch

### Research Article

#### Article History:

Received: 07.06.2024

Accepted: 11.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

*Vicia pannonica*

Yield

Quality

Macro elements

Micro elements

### ABSTRACT

This study was conducted to determine the effect of liquid animal manure as a base fertilizer and top fertilizer on the yield, quality and elemental nutrition contents of Hungarian vetch. In the study, two trials were conducted together as base fertilizer and top fertilizer applications. In both trials, 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4000 kg and 5000 kg of liquid fertilizer were applied per decare together with the control group. Plant height, fresh forage yield, dry forage yield, crude protein, ADF, NDF, macro (Ca, Mg, P, K) and micro (Cu, Fe, Mn, Mo and Zn) elemental nutrition contents were analyzed to determine yield and quality under the influence of trial factors. It was found that the effect of liquid animal manure applied as base fertilizer and top fertilizer on yield characteristics of Hungarian vetch and crude protein ratio, which is an important quality criterion, was statistically insignificant, while the effect on base fertilizer on ADF, K, Ca, Zn and Mn, and top fertilizer on ADF, NDF, P, K, Ca, Mg and Fe was significant ( $P \leq 0.01$ ,  $P \leq 0.05$ ). As a result of a one-year study, it was concluded that it would be more appropriate to use liquid fertilizer doses to enrich the nutrient content and increase digestibility of Hungarian vetch rather than increasing the yield.

## 1. Giriş

Macar fiği, dünyada olduğu gibi ülkemizde de en çok yetiştirilen fiğ türleri içerisinde yer almaktadır (Orak, 2000). Sert iklim koşullarında don ve soğuklara karşı dayanıklı ve verimli olmasından dolayı önemli bir yem bitkisidir. Deniz seviyesinden 2200 m yüksekliğe kadar olan yaşam alanlarında gelişim gösterebilmektedir (Maxted, 1995). Bu özelliğinden dolayı Doğu Anadolu koşullarında kışlık yem bitkisi olarak yetiştirilmektedir (Serin ve Tan, 2008). Ülkemizin tüm bölgelerinde ana ürün veya ikinci ürün olarak Macar fiği tarımı rahatlıkla yapılmaktadır (Açıkgöz, 2013). Kışlık yem bitkisi olmasının yanında baklagiller familyasına ait olma özelliği sayesinde toprağa bol miktarda azot bırakmakta, böylece kendisinden sonra gelen ürünün veriminin artmasını sağlayabilmektedir. Kurağa dayanıklılık gösterdiğinden dolayı kıraç koşullarda da yetiştirilebilmektedir. Toprak bakımından pek seçici olmaması, ağır-killi topraklara uyum sağlayabilmesi, en kötü koşullarda bile iyi ot vermesi bitkinin önemini artırmaktadır (Serin ve Tan, 2013). Ot verimi ve besleme değeri çok yüksek olan, bünyesinde %15-17 oranında ham protein bulduran önemli bir bitki olma özelliğini ile dikkat çekmektedir (Balabanlı ve ark., 2009). Ayrıca tarla koşullarında ekimi yapılan Macar fiğinden dekara 3000-4000 kg yeşil ot ya da bitkinin kurutulmasından sonra 750-1000 kg kadar kuru ot elde edilebilmektedir (Sadık, 2011).

Ülkemizdeki toprakların %75'ten fazlasında organik madde miktarının çok az veya az olduğu bilinmektedir. Ülkemizin yeterli oranda organik madde içeren toprak oranı %6 civarındadır ve topraklarımızdaki organik madde ve besin elementlerinin eksikliği, topraklara gübre verilmesinin önemini açıkça ortaya koymaktadır (Aygün ve Acar, 2004). Gübre, bitkilerin beslenmesi ve gelişmesi için gerekli besin maddesini içeren çeşitli organik, inorganik, doğal veya yapay maddelerdir. Gübreleme ile toprağın bitki besin maddeleri yönünden zenginleşmesi ve toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik açıdan ıslah edilmesini sağlamaktadır (Karaöz 1992). Gübre kullanımının tarım mahsullerinde sağlamış olduğu artış ortalama olarak %50 civarında olup, bu oran bazı mahsullerde %80'e kadar çıkabilmektedir (Aygün ve Acar, 2004).

Gübreler; kendi içerisinde organik (doğal) ve ticari (yapay) gübreler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Organik gübreler, organik üretim yapan işletmelerdeki hayvan ve bitki kalıntılarından elde edilen doğal gübrelerdir. Organik gübrelerin, bitki besin madde içerikleri ticari gübrelere oranla daha az olmasına rağmen özellikle toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini ıslah etmesi yönünden oldukça önemlidir. Toprakta yaşayan mikroorganizmaların besin kaynağını oluşturan organik gübreler, biyolojik aktivitenin artmasını sağlamaktadırlar. Biyolojik aktivite sonucunda toprağa azotun bağlanması gibi bitki beslenmesini olumlu yönde etkileyen durumlar ile ön plana çıkmaktadırlar. Ayrıca gübreler form yapılarına göre katı, toz ve sıvı gübreler olarak da sınıflandırılmaktadırlar (Karaöz, 1992). Sıvı gübreler, sıvı olarak yani çözelti halinde bulunmakta, doğrudan toprağa verilebilmekte veya sulandırıp bitkiler üzerine püskürtülerek bitkiye uygulanabilmektedir.



Sıvı gübreler, hayvan gübresinin işlenmesiyle elde edilmekte ve diğer gübre çeşitlerine kıyasla toprağa uygulanmasının daha pratik olduğu bilinmektedir. Sıvı gübreler, bitkinin su ihtiyacını azaltmakta ve bitki besin elementlerinin alımını kolaylaştırmaktadır. Bitkiler, sıvı gübre ile beslendiklerinde toprağa daha sağlam tutunmakta ve kökleri daha fazla güçlenmektedir. Bu sayede su, bitkiye daha verimli bir şekilde iletilmektedir. Sıvı gübreler ile bitkiler daha iyi beslendiği için toprağın erozyona uğrama riski de azalmakta ve sıvı gübrelerin topraktaki mikroorganizmalara zarar verme riski daha düşük olmaktadır. Sıvı gübrelerin bir diğer özelliği ise tohumu, tohum yatağındaki zararlılara karşı da korumasıdır. Bunun yanında sıvı gübreler, bitkiye zarar vermediği için bitkinin her gelişim aşamasında kullanılabilmekte, topraktaki mikrobiyolojik faaliyetleri artırarak toprağın besin değerini yükseltmekte ve bitkinin büyümesini hızlandırmaktadır (Çelik, 2020; Aktepe, 2021).

Son yıllarda kimyasal gübre kaynaklarının sebep olduğu çevre problemleri ve organik üretime dayalı tarımsal faaliyetlerin artışı ile birlikte bitkisel üretimde yeni organik kaynaklı gübrelerin araştırılması ihtiyacı artmıştır. Bu yüzden bu çalışmada, sıvı hayvan gübresinin hem taban hem de üst gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinin kaba yem verimi ve kalitesi üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Araştırmada materyal olarak Macar fiğinin Tarm Beyazı-98 çeşidi kullanılmıştır. Bu çeşit, hem ülkede hem de bölgede yaygın olarak kullanılan bir çeşit olması ve daha önce yapılan çalışmalarda da bu çeşitten Bingöl ilinde yüksek verim elde edilmesi gibi avantajları açısından tercih edilmiştir (Kutlu ve ark., 2022; Gök ve Çağan, 2023).

**Tablo 1.** SÜTAŞ Bingöl Entegre Tesislerinden temin edilen sıvı gübrenin analiz sonuçları

Parametre	Tespit edilen miktar
Toplam azot (N)	%0,5
Suda çözünür fosfor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Tespit edilemedi
Suda çözünür potasyum oksit (K <sub>2</sub> O)	Tespit edilemedi
Suda çözünür kükürt (S)	%0,022
Suda çözünür magnezyum (MgO)	%0,005
Suda çözünür demir (Fe)	%0,009
Suda çözünür bakır (Cu)	%0,004
Suda çözünür mangan (Mn)	Tespit edilemedi
Suda çözünür molibden (Mo)	%0,0004
Suda çözünür çinko (Zn)	%0,001
Suda çözünür bor (B)	%0,001
pH	8,1
EC	2,36 dS/m
Organik madde	%7,14
Organik karbon	%3,19
Toplam asit (Hüyük+Fulvik)	%0,3

Araştırmada kullanılan sıvı gübre, SÜTAŞ Bingöl Entegre Tesislerinden temin edilmiştir. Temin edilen sıvı gübrenin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de de belirtildiği üzere;

sıvı gübrenin %0,5 oranında N, eser düzeylerde S, Mg, Fe, Cu, Mo, Zn ve B içerdiği, pH düzeyinin 8,1, EC içeriğinin 2,36 dS/m, organik madde oranının %7,14, organik karbon oranının %3,19 ve toplam asit oranının da %0,3 olduğu görülmektedir. Ayrıca sıvı gübre içeriğinde; P, K ve Mn besin elementi içerikleri tespit edilememiştir.

Bu araştırma ile ilgili arazi çalışması, Bingöl Üniversitesi Tarımsal Uygulama ve Araştırma Merkezi alanında ve 2022-2023 yılı yetiştirme sezonunda yürütülmüştür. Arazi Bingöl il merkezine yaklaşık 15 km mesafede yer almaktadır. Bingöl İl Meteoroloji Müdürlüğü'nden temin edilen iklim verileri Tablo 2'de verilmiştir.

İklim verileri incelendiğinde, çalışmanın yürütüldüğü 2022-2023 yıllarına ait sıcaklık ortalaması 13,6 °C, toplam yağış 855 mm ve ortalama nispi nem değeri ise %54,8 olarak ölçülmüştür. Çalışmanın yapıldığı 2022-2023 yılları ve uzun yıllara ait iklim verileri karşılaştırıldığında; 2022-2023 yıllarının uzun yıllara ait ortalamalara kıyasla aylık ortalama sıcaklık verileri daha yüksek, toplam yağış miktarı ve nispi nem değerleri ise daha düşük olduğu görülmüştür (Tablo 2).

Araştırma alanına ait toprak örneklerinde yapılan analiz sonuçlarına göre; toprak yapısının tınlı, nötr (pH: 6,47), tuzsuz (%0,0016), kireçsiz (%0,84), organik madde içeriği az (%1,97), alınabilir fosfor oranı az (4,85 kg/da) ve alınabilir potasyum oranı yeterli (27,3 kg/da) olarak tespit edilmiştir.

Deneme alanının toprak hazırlığı, 2022 yılı sonbaharında pulluk ile derin sürüm yapılmış ve ardından ekim öncesinde kültivatör ile sürüm gerçekleştirilmiştir. Denemede parsel boyları 5 m, her parselde 6 sıra ve sıra arası mesafe 20 cm olarak belirlenmiş olup ekim işlemi, 20 Ekim 2022 tarihinde yapılmış, dekara 12 kg tohumluk kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Bingöl ilinin 2022/2023 ve uzun yıllara ait iklim verileri

Aylar	Aylık Ortalama Sıcaklık (°C)		Aylık Ortalama Toplam Yağış (mm)		Aylık Ortalama Nispi Nem (%)	
	2022-2023	Uzun Yıllar	2022-2023	Uzun Yıllar	2022-2023	Uzun Yıllar
Eylül	22,5	21,3	5,3	12,6	30,9	40,3
Ekim	16,6	14,3	19,6	65,4	47,1	56,1
Kasım	8,4	6,8	91,0	105,9	69,1	67,5
Aralık	5,1	0,7	9,6	134,3	71,3	74,2
Ocak	1,2	-2,1	21,0	139,6	68,1	72,7
Şubat	-2,6	-0,6	130,2	127,3	69,2	70,9
Mart	8,3	4,7	214,6	135,3	70,6	65,3
Nisan	11,1	11,1	182,2	105,7	67,2	60,3
Mayıs	16,0	16,3	139,0	78,8	55,7	56,3
Haziran	21,7	22,3	23,4	20,5	47,8	43,8
Temmuz	26,7	26,8	12,8	6,6	33,6	36,7
Ağustos	28,1	26,7	6,0	4,8	27,3	35,6
<b>Ort/Toplam</b>	<b>13,6</b>	<b>12,4</b>	<b>855</b>	<b>937</b>	<b>54,8</b>	<b>56,6</b>

Araştırmada kullanılan sıvı gübrenin uygulanma şekilleri ve dozları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere iki adet gübre uygulaması, iki farklı deneme olarak kurulmuştur. Taban gübresi ekim ile birlikte sıvı gübre toprağa karıştırılarak, üst gübreleme ise 25.04.2023 tarihinde bitki çiçeklenme öncesi dönemde iken toprak üzerinden verilmek suretiyle yapılmıştır. Araştırmada kontrol grubu ile

dekara 1000 kg, 2000 kg, 3000 kg, 4000 kg ve 5000 kg olacak şekilde sıvı gübre uygulaması yapılmıştır. Denememin ot amaçlı hasadı alt baklaların oluşması ile 01.06.2023 tarihinde yapılmıştır.

**Tablo 3.** Deneme alanında sıvı gübrenin kullanılma şekilleri ve uygulanan dozlar

Taban gübre uygulaması	Üst gübre uygulaması
K (0 kg/da)	K (0 kg/da)
D <sub>1</sub> (1000 kg/da)	D <sub>1</sub> (1000 kg/da)
D <sub>2</sub> (2000 kg/da)	D <sub>2</sub> (2000 kg/da)
D <sub>3</sub> (3000 kg/da)	D <sub>3</sub> (3000 kg/da)
D <sub>4</sub> (4000 kg/da)	D <sub>4</sub> (4000 kg/da)
D <sub>5</sub> (5000 kg/da)	D <sub>5</sub> (5000 kg/da)

Araştırmada sıvı gübrenin taban gübre ve üst gübre olarak Macar fiğine uygulaması ile aşağıda verilen verim ve kalite özellikleri ile besin elementi içerikleri incelenmiştir. Her parselden rastgele 10 bitkinin toprak yüzeyi ile en üst noktasına kadar olan mesafe ölçülerek bitki boyu elde edilmiştir. Her parselin kenar tesiri alındıktan sonra hasadı yapılmış ve biçilen alanlardaki yeşil ot miktarı tartılıp, dekara verim olarak hesaplanmıştır. Kuru ot verimini için ise tesadüfen her parselden 500 g bitki örneği alınmış ve alınan bitki örnekleri 48 saat boyunca 70 °C’de sıcaklıkta, etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuştur. Daha sonra tekrar tartılarak, kuru ot oranları üzerinden dekara kuru ot verimi hesaplanmıştır (TOB, 2019).

Kuru madde verimini belirlemek için tartılan ve kurutulmuş ot örnekleri, 1 mm’lik elekten geçirilerek öğütülen örneklerin ham protein, asit deterjanda çözünmeyen lif (ADF), nötr deterjanda çözünmeyen lif (NDF), fosfor (P), potasyum (K), kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) oranları, Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Laboratuvarında Near Infrared Spectroscopy cihazı (NIRS) yardımıyla belirlenmiştir (Ercan ve ark., 2019). Kuru madde verimi belirlenen ve 1 mm’lik elekten geçirilerek öğütülen örneklerin demir (Fe), bakır (Cu), çinko (Zn) ve mangan (Mn) içerikleri, Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezinde İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma-Kütle Spektrometresi cihazı (ICP-MS) yardımı ile belirlenmiştir (Başaran ve ark., 2021; Çaçan ve Kökten, 2023).

Taban gübre uygulaması ile üst gübre uygulaması iki farklı deneme olarak yan yana kurulmuş ve her iki denemede tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak yürütülmüştür. JMP Pro 14.0.0 istatistik paket programı yardımıyla LSD testi yapılarak, elde edilen verilerin farklılıkları ve benzerlikleri karşılaştırılmıştır. İncelenen özelliklere ait biplot analizi de yine aynı program vasıtasıyla oluşturulmuştur (Erol ve ark., 2023).

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Bitki Boyu, Yeşil Ot Verimi, Kuru Ot Verimi, Ham Protein, ADF ve NDF Oranları

Sıvı gübrenin taban gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinden elde edilen bitki boyu, yeşil ot ve kuru ot verimleri ile ham protein, ADF ve NDF oranları Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 4’e göre; sıvı

gübre dozlarının Macar fiğinin bitki boyu, yeşil ot verimi, kuru ot verimi, ham protein ve NDF oranları üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemsiz, ADF oranı üzerindeki etkisinin ise önemli olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4.** Taban gübre olarak uygulanan sıvı gübre ile Macar fiğinden elde edilen bitki boyu, yeşil ot ve kuru ot verimleri ile ham protein, ADF ve NDF oranları

Dozlar	Bitki boyu (cm)	Yeşil ot verimi (kg/da)	Kuru ot verimi (kg/da)	Ham protein (%)	ADF (%)	NDF (%)
K (0 kg/da)	71,1	2022	645	14,8	37,9 a**	44,0
D1 (1000 kg/da)	71,5	2010	783	15,3	36,5 ab	44,7
D2 (2000 kg/da)	72,5	1997	757	14,6	36,6 ab	42,4
D3 (3000 kg/da)	72,7	2460	883	15,8	37,5 a	44,8
D4 (4000 kg/da)	73,0	2447	890	14,5	35,4 b	43,3
D5 (5000 kg/da)	73,7	2377	873	15,5	35,6 b	43,0
<b>Ortalama</b>	<b>72,4</b>	<b>2219</b>	<b>805</b>	<b>15,1</b>	<b>36,6</b>	<b>43,7</b>
CV (%)	6,52	12,46	12,51	6,15	2,27	2,38

\*\* : P<0.01

Sıvı gübrenin taban gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinin bitki boyu 71,1-73,7 cm, yeşil ot verimi 1997-2460 kg/da, kuru ot verimi 645-890 kg/da, ham protein oranı %14,5-15,8, ADF oranı %35,4-37,9 ve NDF oranı %42,4-44,8 arasında değişim göstermiştir. En yüksek ADF oranları kontrol grubu (%37,9) ile birlikte D1 (%36,5), D2 (%36,6) ve D3 (%37,5) uygulamalarından alınırken, en düşük ADF oranları D4 (%35,4) ve D5 (%35,6) uygulamalarından alınmıştır (Tablo 4).

Sıvı gübrenin üst gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinden elde edilen bitki boyu, yeşil ot ve kuru ot verimleri ile ham protein, ADF ve NDF oranları Tablo 5'te verilmiştir. Sıvı gübre dozlarının Macar fiğinin bitki boyu, yeşil ot verimi, kuru ot verimi ve ham protein oranı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemsiz, ADF ve NDF oranları üzerindeki etkisinin ise önemli olduğu belirlenmiştir (Tablo 5).

**Tablo 5.** Üst gübre olarak uygulanan sıvı gübre ile Macar fiğinden elde edilen bitki boyu, yeşil ot ve kuru ot verimleri ile ham protein, ADF ve NDF oranları

Dozlar	Bitki boyu (cm)	Yeşil ot verimi (kg/da)	Kuru ot verimi (kg/da)	Ham protein (%)	ADF (%)	NDF (%)
K (0 kg/da)	67,4	2080	583	14,3	35,3 ab**	46,1 a**
D1 (1000 kg/da)	75,1	2760	747	14,9	36,6 a	43,8 b
D2 (2000 kg/da)	68,4	2517	733	14,3	36,9 a	41,4 bc
D3 (3000 kg/da)	66,8	2737	743	14,5	34,9 b	43,2 bcd
D4 (4000 kg/da)	65,1	2320	623	16,3	34,1 bc	42,3 cd
D5 (5000 kg/da)	63,0	1953	570	16,4	32,5 c	40,4 d
<b>Ortalama</b>	<b>67,6</b>	<b>2394</b>	<b>667</b>	<b>15,1</b>	<b>35,0</b>	<b>42,9</b>
CV (%)	8,36	19,66	16,23	8,32	2,70	2,74

\*\* : P<0.01

Sıvı gübrenin üst gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinin bitki boyu 63,0-75,1 cm, yeşil ot verimi 1953-2760 kg/da, kuru ot verimi 570-747 kg/da, ham protein oranı %14,3-16,4, ADF oranı %32,5-36,9 ve NDF oranı %40,4-46,1 arasında değişim göstermiştir. En yüksek ADF oranı kontrol grubu (%35,3) ile D1 (%36,6) ve D2 (%36,9) uygulamalarından alınırken, en düşük ADF oranları D4 (%34,1) ve D5 (%32,5) uygulamalarından alınmıştır. En yüksek NDF oranı kontrol grubundan (%46,1) alınırken, sıvı gübre uygulaması ile NDF oranının düşmeye başladığı ve en düşük değerlerin D3 (%43,2), D4 (%42,3) ve D5 (%40,4) uygulamalarından alındığı görülmektedir (Tablo 5).

Macar fiğinde Sayar ve ark. (2012) bitki boyunu 52,27-63,10 cm, Seydoşoğlu (2014) bitki boyunu 46,3-55,1 cm, yeşil ot verimini 1986-3094 kg/da, kuru ot verimini 523-816 kg, Özel ve ark. (2016) bitki boyunu 28,60-98,43 cm, Budak (2017) kuru ot verimini 644-741 kg/da, Hashalıcı ve ark. (2017) bitki boyunu 48,8-76,3 cm, yeşil ot verimini 1160-2600 kg/da, kuru ot verimini 393-782 kg/da, Ertekin ve ark. (2020) yeşil ot verimini 1900-2045 kg/da, Çağan ve ark. (2021) bitki boyunu 50,8-93,3 cm, Ülker ve Yüksel (2021) yeşil ot verimini 1872-2607 kg/da, kuru ot verimini 421-606 kg/da ve Özcan ve ark. (2023) kuru ot verimini 417-755 kg/da olarak tespit etmişlerdir. Verim ile ilgili olarak araştırmacılar tarafından elde edilen bu bulgular, özellikle kontrol grubunda elde edilen bulgular ile benzerlikler göstermektedir.

Macar fiğinde Hashalıcı ve ark. (2017) ham protein oranını %16,0-18,6, ADF oranını %30,01-37,14 ve NDF oranını %39,05-46,79, Kaplan ve ark. (2019) ADF oranını %34,3-40,7, Dağoğlu ve Çağan (2022) ADF oranını %31,6-37,3, Düzçekiç ve ark. (2022) NDF oranını %48,24-47,74, Özdemir ve Kökten (2022) ham protein oranını %7,04-15,04, ADF oranını %29,28-49,72, NDF oranını %44,18-63,64, Uçar ve ark. (2022) ham protein oranını %8,0-18,0, Siverek ve Çağan (2023) NDF oranını %44,4-49,3 olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen bulguların, araştırmacıların elde ettikleri bulgular ile kısmen benzerlikler gösterdiği görülmektedir.

### *3.2. Makro ve Mikro Element İçerikleri*

Sıvı gübrenin taban gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinden elde edilen makro elementlerden P, K, Ca ve Mg oranları ile mikro elementlerden Fe, Cu, Zn ve Mn içerikleri ve ortalamaları Tablo 6'da verilmiştir. Taban olarak verilen farklı sıvı gübre dozlarının P, Mg, Fe ve Cu oranları üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemsiz, K, Ca, Zn ve Mn üzerindeki etkisinin ise istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür.

Sıvı gübrenin taban gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinin P oranları %0,261-0,289, K oranları %1,724-2,254, Ca oranları %1,657-1,827, Mg oranları %0,358-0,397, Fe içerikleri 112,9-154,2 mg/kg, Cu içerikleri 2,547-2,653 mg/kg, Zn içerikleri 12,6-13,9 mg/kg ve Mn içerikleri 17,6-20,3 mg/kg arasında değişim göstermiştir. Taban gübre uygulamasında en yüksek K oranı D2 (%2,022), D3 (%2,254), D4 (%2,051) ve D5 (%2,171) gübre uygulamalarından alınırken, en düşük K oranı kontrol grubundan (%1,724) alınmıştır. En yüksek Ca oranı kontrol grubu (%1,827) ile D1 (%1,710) ve D2 (%1,816) gübre uygulamalarından alınırken, en düşük Ca oranları D3 (%1,668), D4 (%1,685) ve D5

(%1,657) uygulamalarından alınmıştır. En yüksek Zn içeriği D4 (13,9 mg/kg) ve D5 (13,2 mg/kg) gübre uygulamalarından alınırken, geriye kalan diğer dozlar en düşük değerleri veren grupları oluşturmuştur. En yüksek Mn içeriği D3 (19,2 mg/kg), D4 (19,5 mg/kg) ve D5 (20,3 mg/kg) uygulamalarından alınmıştır. Kontrol grubu (17,6 mg/kg), D1 (18,5 mg/kg) ve D2 (18,5 mg/kg) uygulamaları ise en düşük değeri veren gruplar olmuştur (Tablo 6).

**Tablo 6.** Taban gübre olarak uygulanan sıvı gübre ile Macar fiğinden elde edilen makro ve mikro element içerikleri

Dozlar	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)
K (0 kg/da)	0,261	1,724 c*	1,827 a*	0,397	116,4	2,587	13,0 b*	17,6 c*
D1 (1000 kg/da)	0,270	1,992 b	1,710 ab	0,381	154,2	2,580	13,0 b	18,5 bc
D2 (2000 kg/da)	0,274	2,022 ab	1,816 a	0,394	113,4	2,605	12,6 b	18,5 bc
D3 (3000 kg/da)	0,289	2,254 a	1,668 b	0,373	153,0	2,653	12,7 b	19,2 ab
D4 (4000 kg/da)	0,264	2,051 ab	1,685 b	0,371	139,0	2,547	13,9 a	19,5 ab
D5 (5000 kg/da)	0,278	2,171 ab	1,657 b	0,358	112,9	2,604	13,2 ab	20,3 a
<b>Ortalama</b>	<b>0,273</b>	<b>2,036</b>	<b>1,727</b>	<b>0,379</b>	<b>131,5</b>	<b>2,596</b>	<b>13,1</b>	<b>18,9</b>
CV (%)	5,45	6,74	4,00	4,75	15,16	3,63	3,16	3,72

\*: P≤0.05

Sıvı gübrenin üst gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinden elde edilen makro elementlerden P, K, Ca ve Mg oranları ile mikro elementlerden Fe, Cu, Zn ve Mn içerikleri ve ortalamaları Tablo 7’de verilmiştir. Üst gübre olarak verilen farklı sıvı gübre dozlarının Cu, Zn ve Mn içerikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak önemsiz, P, K, Ca, Mg ve Fe içerikleri üzerindeki etkisinin ise istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür.

**Tablo 7.** Üst gübre olarak uygulanan sıvı gübre ile Macar fiğinden elde edilen makro ve mikro element içerikleri

Dozlar	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)
K (0 kg/da)	0,261 c**	1,801 c**	1,735 a**	0,382 a**	149,1 ab**	2,929	13,0	19,0
D1 (1000 kg/da)	0,263 c	1,790 c	1,732 a	0,376 ab	183,4 a	2,161	8,1	18,2
D2 (2000 kg/da)	0,256 c	1,658 c	1,576 b	0,364 abc	189,7 a	2,716	11,4	19,7
D3 (3000 kg/da)	0,274 c	1,937 bc	1,477 b	0,358 bc	130,3 b	2,198	9,8	20,1
D4 (4000 kg/da)	0,316 a	2,361 a	1,548 b	0,355 bc	119,6 b	3,105	11,8	20,6
D5 (5000 kg/da)	0,295 b	2,167 ab	1,519 b	0,346 c	129,1 b	2,730	10,3	18,2
<b>Ortalama</b>	<b>0,277</b>	<b>1,952</b>	<b>1,598</b>	<b>0,364</b>	<b>150,2</b>	<b>2,640</b>	<b>10,7</b>	<b>19,3</b>
CV (%)	3,53	8,96	4,50	3,17	17,36	14,66	16,63	7,16

\*\* : P≤0.01

Sıvı gübrenin üst gübre olarak uygulanması ile Macar fiğinin P oranı %0,256-0,316, K oranı %1,658-2,361, Ca oranı %1,477-1,735, Mg oranı %0,346-0,382, Fe içeriği 119,6-189,7 mg/kg, Cu içeriği

2,161-3,105 mg/kg, Zn içeriği 8,1-13,0 mg/kg ve Mn içeriği 18,2-20,6 mg/kg arasında değişim göstermiştir. Üst gübre uygulamasında en yüksek P oranı D4'ten (%0,316) alınmış ve bunu D5 (%0,295) uygulaması takip etmiştir. Geriye kalan tüm dozlar ise en düşük P oranını veren grup içerisinde yer almıştır. En yüksek K oranı D4 (%2,361) ve D5 (%2,167) gübre uygulamalarından alınırken, en düşük K oranları da kontrol (%1,801) ile birlikte D1 (%1,790) ve D2 (%1,658) uygulamalarından alınmıştır. En yüksek Ca oranı kontrol grubu (%1,735) ve D1 (%1,732) gübre uygulamasından alınmıştır. Geriye kalan diğer dozlar en düşük Ca oranını veren grup içerisinde yer almıştır. Üst gübre uygulamasında en yüksek Mg ve Fe içerikleri kontrol grubu ile birlikte D1 ve D2 uygulamalarından alınırken, geriye kalan diğer doz uygulamaları ise en düşük değeri veren grup içerisinde yer almıştır (Tablo 7).

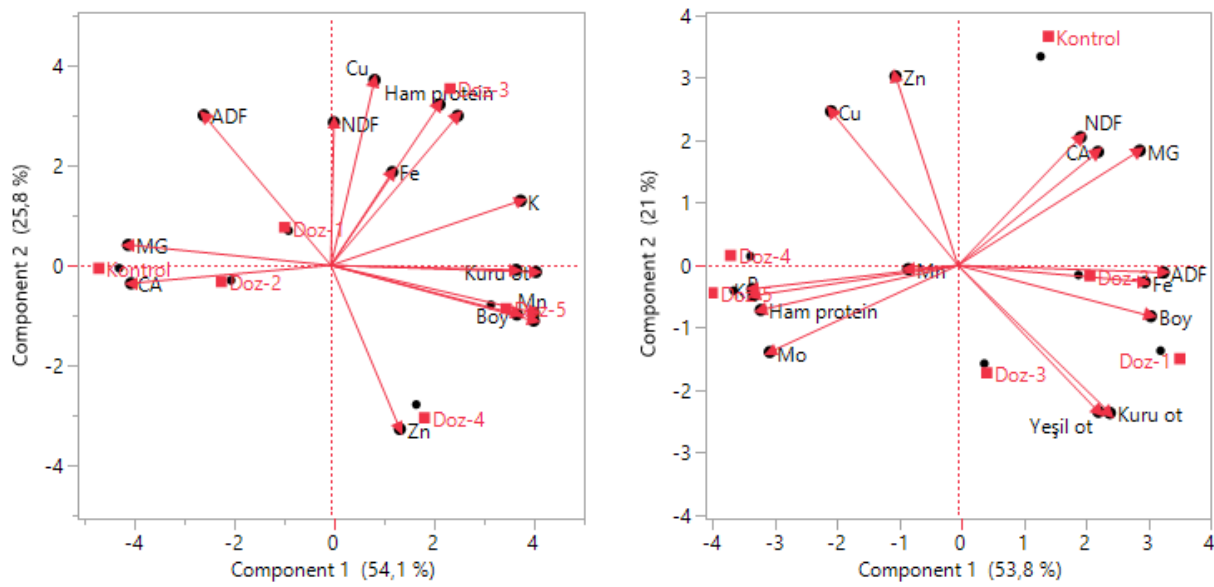
Motsara ve Roy (2008) bitkilerde P içeriğinin %0,2-0,5, K içeriğinin %1,0-5,0, Ca içeriğinin %0,1-1,0 ve Mg içeriğinin %0,1-0,4 arasında olması gerektiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen P, K ve Mg oranlarının bildirilen bu sınır değerler arasında, Ca oranlarının ise bildirilen bu sınır değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir. Daha önceki çalışmalarda da Macar fiğinde Çačan ve Yılmaz (2015) P oranını %0,31, K oranını %1,87, Ca oranını %1,55 ve Mg oranını %0,29, Gülümser ve Acar (2017) P oranını %0,38, K oranını %3,09, Ca oranını %1,31 ve Mg oranını %0,27, Turan ve ark. (2018) P oranını %0,29, K oranını %2,13-2,57, Ca oranını %1,28-1,53 ve Mg oranını %0,23-0,28, Mut ve ark. (2020) K oranını %2,754, Ca oranını %1,016 ve Mg oranını %0,227, Uçar ve ark. (2022) P oranını %0,24, K oranını %1,72 ve Ca oranını %1,79 olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen bulguların, araştırmacılar tarafından elde edilen bulgular ile büyük oranda benzerlikler gösterdiği anlaşılmaktadır.

Motsara ve Roy (2008) bitkilerde Fe içeriğinin 50-250 ppm, Cu içeriğinin 5-20 ppm, Zn içeriğinin 20-100 ppm ve Mn içeriğinin de 20-300 ppm arasında olması gerektiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen Fe içeriklerinin bu sınır değerler içerisinde, Cu ve Zn içeriklerinin bu sınır değerlerin altında, Mn içeriklerinin ise belirlenen bu sınır değerlere yakın olduğu görülmüştür. Macar fiğinde Hashalıcı (2016) Fe içeriğini 150,2 -169,8 ppm, Cu içeriğini 7,21-7,31 ppm, Zn içeriğini 56,57-57,73 ppm, Mn içeriğini 49,34-61,84 ppm, Dađođlu ve Çačan (2022) Fe içeriğini 304,4-467,7 ppm, Cu içeriğini 63,7-95,6 ppm, Zn içeriğini 21,2-42,8 ppm ve Mn içeriğini 34,8-49,1 ppm, Siverek ve Çačan (2023) Fe içeriğini 428 ppm, Cu içeriğini 89,9 ppm, Zn içeriğini 68,0 ppm ve Mn içeriğini 83,3 ppm olarak tespit etmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen bulguların, araştırmacılar tarafından elde edilen bulgulardan daha düşük olduğu görülmektedir.

### 3.3. İncelenen Özelliklere Ait Biplot Analizi

Sıvı gübre uygulamasının taban gübre ve üst gübre olarak uygulanması sonucunda Macar fiğinde incelenen özelliklere ait biplot analizi Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde taban gübre için özdeğeri 1'den yüksek olan 3 temel bileşen ekseni ve birbirinden bağımsız 5 adet temel bileşen, üst gübre için özdeğeri 1'den yüksek olan 4 temel bileşen ekseni ve birbirinden bağımsız 5 adet bileşen

elde edildiği görülmektedir. Taban gübre için toplam varyasyonun %79,9, üst gübre için %74,8'ini oluşturan ilk iki temel bileşen (PC1 ve PC2) eksenleri özdeğerleri taban gübre için 8,120 ve 3,873, üst gübre için 8,064 ve 3,147 olduğu görülmektedir. Elde edilen bu değerler yapılan temel bileşenler analizinin başarılı olarak yorumlanabileceğini ifade etmektedir (Özaktan ve ark., 2022; Özaktan ve Erol, 2023). Taban gübre açısından D4 ve D5 uygulamalarının bitki boyu, yeşil ot verimi, kuru ot verimi, ADF, NDF, Mn ve Zn açısından, D3 uygulamasının ham protein, P, K, Cu ve Fe açısından, Kontrol ve D2 uygulamalarının ise Ca ve Mg açısından öne çıktığı görülmektedir. Üst gübre açısından ise D1 ve D2 uygulamalarının bitki boyu ve Fe açısından, D3 uygulamasının yeşil ve kuru ot verimi açısından, D4 ve D5 uygulamalarının ham protein, ADF, NDF, K ve Mo açısından, Kontrol grubunun ise Ca ve Mg açısından öne çıktığı görülmektedir (Şekil 1).



Eksen	Özdeğer	Varyans		Eksen	Özdeğer	Varyans	
1	8.120	54.1	20 40 60 80	1	8.064	53.8	20 40 60 80
2	3.873	25.8		2	3.147	21.0	
3	1.978	13.2		3	1.852	12.3	
4	0.572	3.8		4	1.113	7.4	
5	0.456	3.0		5	0.824	5.5	
Taban gübre				Üst gübre			

Şekil 1. Sıvı gübre uygulaması ile Macar fiğinde incelenen özelliklere ait biplot analizi

#### 4.Sonuçlar

Macar fiğine taban ve üst gübre olarak uygulanan farklı sıvı gübre dozlarının Macar fiğinin ot verimi ve kalitesi üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla yürütülen bu çalışmadan elde edilen bilgiler ışığında; Macar fiği üzerinde gerek taban gübresi ve gerekse de üst gübre olarak uygulanan sıvı gübre dozlarının verim üzerinde ve önemli bir kalite kriteri olan ham protein oranı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Sıvı gübre dozları, taban gübre uygulamasında ADF oranını, üst gübre uygulamasında hem ADF ve hem de NDF oranlarını düşürerek yemin sindirilebilirliğini



artırmıştır. Gerek taban gübre ve gerekse üst gübre olarak uygulanan sıvı gübre dozlarının makro ve mikro element içerikleri üzerinde etkisinin olduğu ve bu etkininin istatistiksel olarak önemli olduğu görülmüştür. Macar fiğinde farklı sıvı gübre dozlarına karşı farklı miktarlarda makro ve mikro element içerikleri elde edilmiştir. Sonuç olarak; sıvı gübre dozlarının Macar fiğinde verimden ziyade, besin elementi içeriklerinin zenginleştirilmesi ve sindirilebilirliğin artırılması amacıyla kullanılmasının daha isabetli olacağı kanaatine varılmıştır. Ancak bu durumun kontrolü için de bir yıllık olarak yürütülen bu çalışmaya ilaveten bir veya iki yıl süreyle çalışmanın genişletilmesinin, elde edilecek sonuçların kesinliği açısından önemli olduğu ve dikkate alınması gerektiği öngörülmektedir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: BAP-GTHMYO.2023.01). Desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederiz.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

### **Kaynakça**

- Açıkgöz E. Yem bitkileri yetiştiriciliği. Süt Hayvancılığı Eğitim Merkezi Yayınları No: 8, 2013.
- Aktepe BB. Sıvı gübre tertibatlı anıza tahıl ekimi yapan doğrudan ekim makinesi için otomasyon sisteminin tasarımı. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:10, Tekirdağ, Türkiye, 2021.
- Aygün Y., Acar M. Organik gübreler ve önemi. Hasat Dergisi 2004; 228: 68-72.
- Başaran U., Gülümser E., Yaman C., Doğrusöz MÇ., Mut H. Antioxidants and mineral contents of chicory as coffee additive. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology 2021; 9(1): 217-223.
- Balabanlı C., Avcıoğlu R., Hatipoğlu R., Karadağ Y. Yem bitkileri, baklagil yem bitkileri Cilt II. İzmir: T.C. Tarım Bakanlığı Tarımsal Üretim ve Geliştirme Genel Müdürlüğü Yayınları, 417-418; 2009.
- Budak F. İğdır ekolojik şartlarında bazı Macar fiğ (*Vicia pannonica* Crantz) çeşitlerinin verim ve verim komponentlerinin belirlenmesi. KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi 2017; 20: 28-32.

- Çaçan E., Yılmaz H. Bingöl koşullarında değişik Macar fiği (*Vicia pannonica* Crantz) + buğday (*Triticum aestivum* L.) karışım oranlarının ot verimi ve kalitesi üzerine etkileri. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 2015; 2(3): 290-296.
- Çaçan E., Nursoy H., Şahin E. Macar fiğinin (*Vicia pannonica* Crantz) farklı ekim zamanlarına göre verim, kalite ve besin elementleri içeriklerinin değişimi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi 2021; 31(3): 733-741.
- Çaçan E., Kökten K. Azot ve fosfor gübrelemesinin mera otunun makro ve mikro element içeriğine etkisi. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi 2023; 38(1): 19-32.
- Çelik Y. Sıvı gübre tertibatlı anıza tahıl ekimi yapan doğrudan ekim makinesinin uygulama olanaklarının irdelenmesi üzerine bir araştırma. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:11, Tekirdağ, Türkiye, 2020.
- Dağoğlu S., Çaçan E. Muş ili ekolojik koşulları için uygun Macar fiği (*Vicia pannonica* Crantz) çeşitlerinin belirlenmesi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 11(2): 361-371.
- Düzçekiç Y., Özaktan H., Okumuş O., Uzun S. Kayseri ekolojik koşullarında Macar fiği (*Vicia pannonica* Crantz.) + arpa (*Hordeum vulgare* L.) karışık ekim sisteminde uygun karışım oranlarının belirlenmesi. Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi 2022; 5(2): 50-55.
- Ercan MYİ., Uzun S., Özaktan H. Kayseri ekolojik koşullarında farklı ekim zamanlarının nohut (*Cicer arietinum* L.) bitkisinde verim, verim unsurları ve kalite üzerine etkileri. European Journal of Science and Technology 2019, 16: 434-440.
- Erol O., Özaktan H., Tosun Z., Kayseri ekolojik koşullarında yetiştirilen bazı tescilli nohut (*Cicer arietinum* L.) çeşitlerinin teknolojik özelliklerinin çok değişkenli istatistiksel analizlerle belirlenmesi. Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi 2023, 38(1): 66-75.
- Ertekin İ., Atış İ., Yılmaz Ş. Bazı fiğ türlerinin yem verim ve kalitesi üzerine farklı organik gübrelerin etkileri. Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi 2020; 25(2): 243-255.
- Gök MR., Çaçan E. Farklı sıra aralıklarının Macar fiğinde (*Vicia pannonica* Crantz.) ot verimi ve kalitesi ile arıcılık açısından önem arz eden bazı özellikler üzerine etkileri. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2023; 60(3): 529-538.
- Gülümser E., Acar Z. Biçim zamanı ve tohum oranlarının Macar fiği tahıl karışımlarının bazı kalite özellikleri üzerine etkisi. Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi 2017; 31(2): 14-21.
- Hashalıcı S. Kayseri kıraç koşullarında bazı Macar fiği çeşitlerinin ot verimleri ve kalitelerinin belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:18, Kayseri, Türkiye, 2016.
- Hashalıcı S., Uzun S., Özaktan H., Kaplan M. Kayseri kıraç koşullarında yetiştirilen bazı Macar fiği çeşitlerinin ot verimleri ve kalitelerinin belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi 2017; 14(2): 113-123.

- Karaöz M. Gübreler ve peyzaj uygulamalarında gübreleme teknikleri. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi 1992; 42(3-4): 49-60.
- Kaplan M., Kökten K., Özdemir S. Macar fiğ (*Vicia pannonica Crantz*) genotiplerinin saman verimi ve kalitesindeki farklılıklar. Doğa Bilimlerinde Güncel Eğilimler 2019; 8(16): 205-211.
- Kutlu MA., Uçar R., Özdemir S., Ekmekçi M., Mokhtarzadeh S., Kökten K., Çağan E. Determination of some yield characteristics of Hungarian vetch varieties and their evaluation as bee pasture. Bee Studies 2022; 14(1): 1-7.
- Maxted N. An Ecogeographical study of *Vicia* subgenus *Vicia*. Rome: Systematic and Ecogeographic Studies on Crop Studies, IPGRI, No: 8, 1995.
- Motsara MR., Roy RN. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, No, 19-78, 2008.
- Mut H., Gülümser E., Çopur Doğrusöz M., Başaran U. Effect of different companion crops on alfalfa silage quality. KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi 2020; 23(4): 975-980.
- Orak A. Macar fiğ (*Vicia pannonica Crantz*) hatlarında genotipik ve fenotipik değişkenlik ve kalıtım derecesi. Acta Agronomica Hungarica 2000; 48(3): 289-293.
- Özaktan H., Kıbık G., Erol O. Yeni nohut (*Cicer arietinum L.*) çeşitlerinin Kayseri koşullarında agromorfolojik özelliklerinin belirlenmesi. Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi 2022; 5(2): 62-70.
- Özaktan H., Erol O. Kayseri ekolojik koşullarında yetiştirilen nohut (*Cicer arietinum L.*) çeşitlerinin bazı fiziksel özelliklerinin belirlenmesi. Erciyes Tarım ve Hayvan Bilimleri Dergisi 2023; 6(1): 67-72.
- Özel S., Gökkuş A., Alatürk F. Farklı sulama seviyelerinin Macar fiği (*Vicia pannonica Crantz.*) ve yem bezelyesinin (*Pisum arvense L.*) gelişimine etkileri. Alınları Zirai Bilimler Dergisi 2016; 30(1): 46-52.
- Özcan G., Tezel M., Arıcı RÇ., Eser C. Yarı kurak koşullarda bazı Macar fiği (*Vicia pannonica L.*) genotiplerinin değerlendirilmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 13(3): 2229-2238.
- Özdemir S., Kökten K. Bazı Macar fiği (*Vicia pannonica Crantz.*) genotiplerinin tohum ve kes verimleri ile kes kalitelerinin belirlenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 2022; 9(3): 524-534.
- Sadık E. Yem bitkileri yetiştiriciliği. Bursa: T.C. Bursa Valiliği, İl Gıda Tarım Hayvancılık Müdürlüğü, 2011.
- Sayar M., Karahan H., Han Y., Tekdal S., Başbağ M. Kızıltepe ekolojik koşullarında bazı Macar fiğ (*Vicia pannonica Crantz.*) genotiplerinin ot verimi, ot verimini etkileyen özellikler ile özellikler arası ilişkilerin belirlenmesi. Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi 2012; 5(2): 126-130.
- Serin Y., Tan M. Macar fiği tarımı. Kayseri: Yem bitkileri ve meraya dayalı hayvancılık eğitimi, Erciyes Üniversitesi, Yayın No:160, 107-17; 2008.

- Serin Y., Tan M. Baklagil yem bitkileri. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Yayınları No:190, 2013.
- Seydoşoğlu S. Diyarbakır ekolojik koşullarında bazı Macar fiği genotiplerinin verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. Türk Doğa ve Fen Dergisi 2014; 3(1): 49-54.
- Siverek E., aan E. Bingöl ili ekolojik koşullarında bazı Macar fiği çeşitlerinin verim ve kalite potansiyellerinin belirlenmesi. Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi 2023; 9(1): 91-97.
- TOB. Baklagil yem bitkileri tarımsal değerleri ölçme denemeleri teknik talimatı. Tarım ve Orman Bakanlığı Bitkisel Üretim Genel Müdürlüğü, 2019, (Erişim adresi [www.tarimorman.gov.tr](http://www.tarimorman.gov.tr)).
- Turan N., Özyazıcı MA., Açıkbaş S., Seydoşoğlu S. Fiğ (*Vicia* sp.) cinslerine ait genotiplerin bazı makro element kapsamının belirlenmesi. III. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi, 21-22 Haziran 2018, sayfa no:3705-3712, Gaziantep.
- Uçar R., Ekmekçi M., Kutlu MA., Özdemir S., aan E., Kökten K., Mokhtarzadeh S. Macar fiği (*Vicia pannonica* Crantz) eşitlerinin kes verimi ve kes kalitesi açısından değerlendirilmesi. Adyutayam Dergisi 2022; 10(1): 75-82.
- Ülker E., Yüksel O. Uşak şartlarında bazı Macar fiği (*Vicia pannonica* Crantz.) eşitlerinin verim ve tarımsal özelliklerinin belirlenmesi. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2021; 16(1): 52-58.

## Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Traverten Taşların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Metehan ARDAHANLI<sup>1\*</sup>, Türkay KOTAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup>Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-8091-2792>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-9125-8220>

\*Sorumlu yazar: metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 13.06.2024

Kabul tarihi: 19.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Traverten

Fiziksel özellikler

Mekanik özellikler

Aşınma direnci

### ÖZ

Doğal taşların kullanılması ile inşa edilen tarihi yapılar zamanla birçok faktöre bağlı olarak zarar görebilmektedir. Bu tarihi yapıların mevcut durumlarının korunması için restorasyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada; Kars-Ani harabeleri bölgesindeki kırmızı ve siyah renge sahip 2 farklı traverten taşın birim ağırlık, yoğunluk, porozite, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases hızı, dinamik elastisite modülü, kılcal su emme, böhme aşınma dayanımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; siyah traverten taşının, kırmızı traverten taşına göre yüksek basınç ve çekme dayanımına, düşük porozite ile kılcal su emme miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca her iki traverten taşının böhme aşınma kayıp miktarları yaklaşık eş değer olarak elde edilmiştir.

## Investigation of Physical and Mechanical Properties of Travertine Stones in the Kars-Ani Ruins Region

### Research Article

#### Article History:

Received: 13.06.2024

Accepted: 19.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Travertine

Physical properties

Mechanical properties

Abrasion resistance

### ABSTRACT

Historical buildings built with the use of natural stones can be damaged over time due to many factors. Restoration is needed to preserve the current condition of these historical buildings. In this study, two different red and black travertine stones in the Kars-Ani ruins area; unit weight, density, porosity, compressive strength, splitting tensile strength, ultrasound velocity, dynamic elasticity module, capillary water absorption, Bohme abrasion resistance were examined. According to the results obtained; It was determined that black travertine stone has higher compressive and tensile strength, lower porosity and capillary water absorption than red travertine stone. In addition, the Bohme abrasion loss amounts of both travertine stones were obtained as approximately equivalent.

**To Cite:** Ardahanlı M., Kotan T. Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Traverten Taşların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 299-313.

## 1. Giriş

Doğal taşlar sahip oldukları yüksek dayanım, dayanıklılık ve farklı renk çeşitlikleri sayesinde geçmişten günümüze kadar birçok tarihi yapıda tercih edilmiştir (Gürdal ve Özgünler, 2016; Süer ve Yakar, 2020; Li ve ark., 2024). Bu doğal taşlar çoğunlukla bazalt, granit, andezit ve traverten olabilmektedir. Bu doğal yapı malzemelerinden birisi olan traverten taşları kullanıldıkları yerlerde birçok avantaja sahiptir (Kahraman ve Eser, 2015). Bu avantajlar başlıca homojen boşluklu yapılara sahip olmaları,

işlenmelerinin kolay ve ucuz olması (Demirdağ, 2009), yüksek boşluk oranından dolayı hafif ve düşük özgül ağırlıklı olmaları (Erdoğan, 2011) şeklinde sıralanabilmektedir.

Traverten taşının tarihi yapılardaki ilk kullanımları eski Mısır tarihine kadar ulaşmaktadır. Bu taşın kullanıldığı dünyadaki örneklerine Antik Roma zamanlarında da rastlanmaktadır. Roma’da bulunan Concordia Tapınağı, Kolezyum ve Sant'Angelo Katedrali en bilinen örnekleridir (Huertas, 2005; Jackson ve ark., 2005; Pentecost, 2005). Ülkemizde ise Selçuklu ve Osmanlı dönemine ait birçok tarihi yapıda traverten taşı mevcuttur (Demir ve ark., 2023). Günümüzde ise traverten taşı çoğunlukla restorasyon ve dış cephe kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Traverten taşının özelliklerine ait literatür incelenirse;

Doležel ve ark. (2004) deneyler için uygun boyuta getirdikleri traverten taşı numunelerinin basınç dayanımlarının 51 MPa ve elastisite modüllerinin ise 20,19 GPa seviyesine ulaşabileceğini tespit etmiştir. Ayaz ve Karacan (2000) Sivas’ın batısında yer alan travertenlerin yüzey kaplaması olarak kullanılabilirliğini, Özdemir (2021) ise kaplama olarak kullanılan traverten taşlarının olumsuz iklim şartları altında mekanik özelliklerinin zayıflayabileceğini belirlemiştir. Török ve Vásárhelyi (2010) çalışmalarında, traverten taşının boşluk miktarının travertenin dayanımı ve dayanıklılığında doğrudan etkili olduğu, az boşluklu daha homojen yapıdaki traverten taşlarının daha yüksek dayanım ile ultrases hızına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca Distelhorst (2002) çalışmasında, travertenlerin sertlik, yoğunluk ve boşluk oranı açısından büyük farklılıklara sahip olabileceğini ifade etmiştir.

Bu çalışmada, Kars il sınırların içerisinde yer alan Ani Harabeleri (Şekil 1) bölgesindeki kırmızı ve siyah renge sahip 2 farklı traverten taşının fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 1. Ani Harabeleri (Anonim, 2023; Anonim, 2024; Anonim, 2024)

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Traverten Taşı

Çalışmada, kırmızı traverten taşı Kars Arazoğlu köyü çevresinden, siyah traverten taşı ise Kars Yalçınlar köyü çevresinden temin edilerek (Şekil 2) kullanılmıştır. Bu doğal taşların yöntem kısmında belirtilen deneyler ile fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 2. Kırmızı ve siyah renkli traverten taşı

### 2.2. Metot

Kars il sınırları içerisinde bulunan Ani Harabeleri bölgesindeki 2 farklı renk ve dokudaki traverten taşları, yapı malzemesi laboratuvarında kesilerek fiziksel ve mekanik deneyler için uygun numune boyutlarına getirilmiştir. Numunelere; birim ağırlık, yoğunluk, porozite, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases hızı, dinamik elastisite modülü, kılcal su emme, böhme aşınma dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

#### 2.2.1. Birim Ağırlık, Yoğunluk, Porozite ve Su Emme Oranı Deneyleri

Traverten taş numunelerin birim ağırlıkları TS EN 1936 (Anonim 2007)'ye göre belirlenmesi için; 110±5 °C'de 24 saat etüv kurusu ağırlıkları ile hava ve suda doymuş kuru yüzey durumundaki ağırlıkları belirlenmiş ve numunelerin birim ağırlıkları Denklem (1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Birim Ağırlık (BA)} = W_d / V_g \quad (1)$$

Denklem (1)'de;  $W_d$ ; etüv kurusu ağırlığı,  $V_g$ ; görünür numune hacmini ( $e_n \times \text{boy} \times \text{yükseklik}$ ) ifade etmektedir.

Numunelerin görünür yoğunlukları TS EN 1097-6 (Anonim 2022)'e göre hazırlanan toz örnekleri üzerinde piknometre metodu kullanılarak aşağıdaki Denklem (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Yoğunluk (D)} = M_4 / [M_4 - (M_2 - M_3)] \quad (2)$$

Denklem (2)'de;  $M_2$ ; Doygun durumdaki deney numunesi ve piknometrenin kütlesini,  $M_3$ ; Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesini,  $M_4$ ; Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesini ifade etmektedir.

Önceki adımlarda belirlenen birim ağırlık ve yoğunluk değerleri kullanılarak numunelerin porozite değerleri Denklem (3) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Porozite (P)}=1-(BA/D) \quad (3)$$

Taş numunelerin hacimsel ve ağırlıkça su emme oranları TS EN 699 (Anonim 2009)'a göre Denklem (4) ve Denklem (5) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Hacimsel Su Emme Oranı (Sh)}=(W_{ssd}-W_d)/V_g \quad (4)$$

$$\text{Ağırlıkça Su Emme Oranı (Sa)}=(W_{ssd}-W_d)/W_d \quad (5)$$

Denklem (4) ve Denklem (5)'de;  $W_d$ ; numunenin etüv kurusu ağırlığını,  $W_{ssd}$ ; doygukuru yüzey durumunda numunenin havadaki ağırlığını,  $V_g$ ; görünür numune hacmini ( $en \times boy \times yükseklik$ ) ifade etmektedir. .

### 2.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi  $100 \times 100 \times 100$  mm boyutlu numunelerde TS EN 12390-3 (Anonim, 2019) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde, standarda uygun olarak yükleme hızı 0,4 MPa/s olarak alınmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Basınç dayanımı deneyi

### 2.2.3. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi kesilen  $100 \times 100 \times 100$  mm boyutlu prizma numuneler üzerinde, bilgisayar kontrollü ve çok üniteli hidrolik bir cihaz kullanılarak TS EN 12390-6 (Anonim, 2024) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde, standarda uygun olarak yükleme hızı 0,4 MPa/s olarak alınmıştır (Şekil 4).





**Şekil 4.** Yarmada çekme dayanımı deneyi

#### 2.2.4. Ultrases Hızı Deneyi

Ultrases hızı deneyi 100×100×100 mm boyutlu küp numunelerde ve her iki grup içinde üçer numune üzerinde TS EN 12504-4 (Anonim, 2021) standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 5). Ultrases hızı ölçümü yapılan bu cihaz (Şekil 5) yardımıyla traverten taş numunelerin dinamik elastisite modülleri de ölçülmüştür.



**Şekil 5.** Ultrases hızı deneyi ve dinamik elastisite modülü ölçümü

#### 2.2.5. Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi TS EN 13057'e (Anonim, 2004) göre yapılmıştır (Şekil 6). Traverten taş numuneler, 24 saat kadar 105 °C etüvde tutulduktan sonra alt yüzeyleri yaklaşık 5 mm suya batacak şekilde konulup bekletilen numunelerin 5, 10, 20 dakika, 1, 2, 4, 8, 24 saat sonunda kapilarite ile emdikleri su miktarı belirlenir.



Şekil 6. Kılcal su emme deneyi

### 2.2.6. Böhme Aşınma Deneyi

Böhme aşınma dayanımı deneyi (Şekil 7), TS 2824 EN 1338 (Anonim, 2005) standardına göre; her yüzeye 88 tur olacak şekilde ve her bir numune için toplam 352 tur uygulanmıştır. Deney sonunda ağırlık kaybı belirlenerek aşınma miktarı belirlenmiştir.

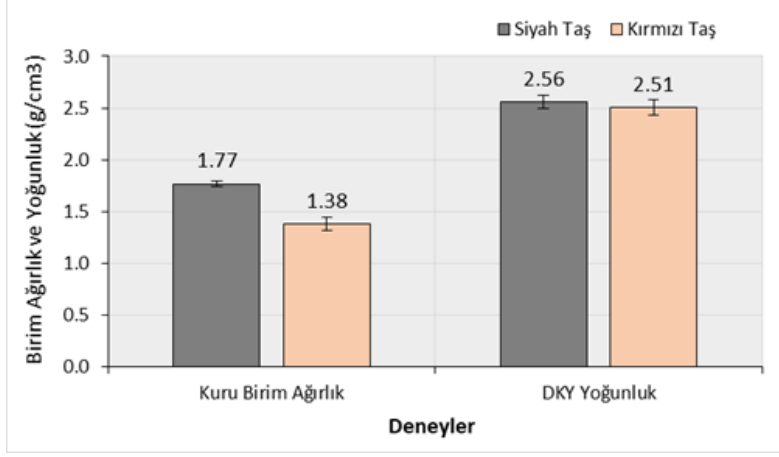


Şekil 7. Böhme aşınma deneyi

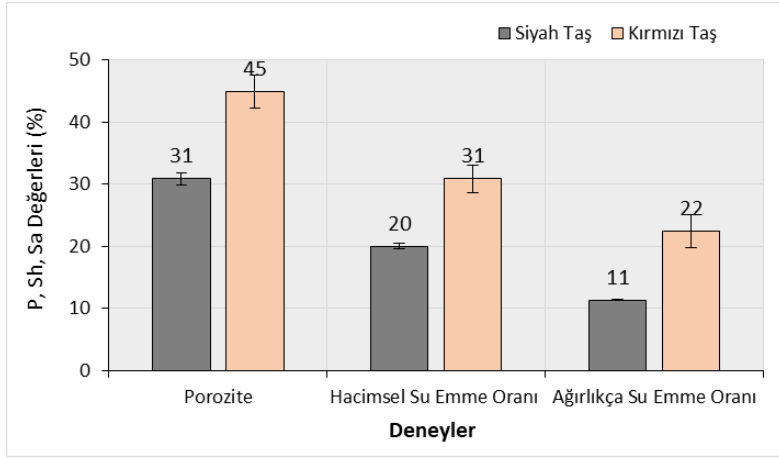
## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Birim Ağırlık, Yoğunluk, Porozite ve Su Emme Oranı Sonuçları

Traverten taş numunelere ait birim ağırlık ve yoğunluk sonuçları Şekil 8’de, porozite ve su emme oranı sonuçları ise Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, siyah traverten taşına ait birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin kırmızı traverten taşından daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca birim ağırlık ve yoğunluğu daha fazla olan siyah taşın iç yapısında sahip olduğu boşluk miktarının kırmızı taştan daha az olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). Traverten taş numunelerine ait bu porozite değerleri birim ağırlık ve yoğunluk sonuçlarını destekler niteliktedir. İç yapısındaki boşluk oranı daha fazla olan kırmızı traverten taşın birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin düşük çıkması beklenen bir sonuçtur.



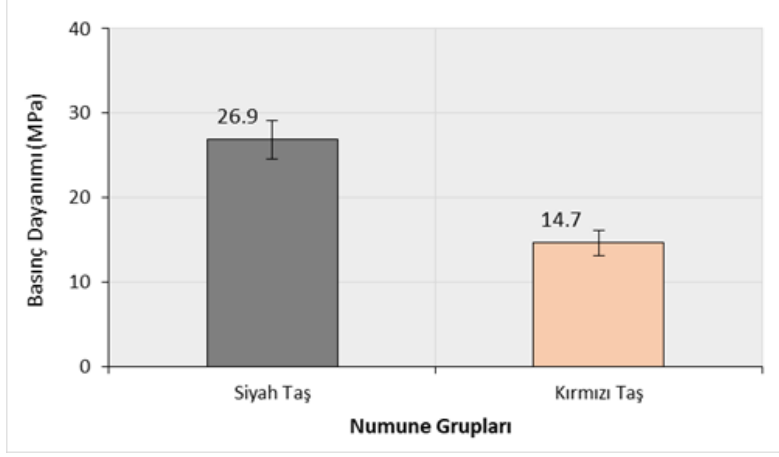
Şekil 8. Birim ağırlık ve yoğunluk sonuçları



Şekil 9. Porozite ve su emme oranı sonuçları

### 3.2. Basınç Dayanımı Sonuçları

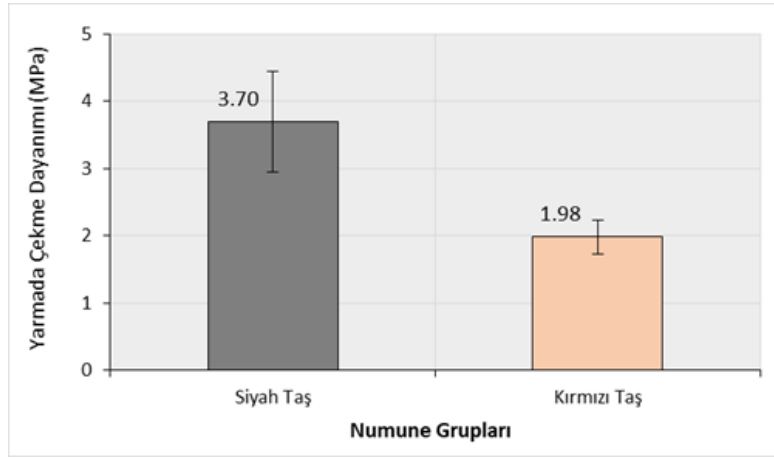
Traverten taş numunelere ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde, siyah traverten taşın basınç dayanımının kırmızı traverten taşa göre daha yüksek olduğu ve her iki traverten taşında da elde edilen basınç dayanımı değerlerinin doğal taşların sahip olabileceği yüksek basınç dayanım değerlerine (Mohammed ve ark., 2021) göre daha düşük kaldığı belirlenmiştir. Bu durumun temel sebebi olarak, taşların iç yapılarındaki boşluk miktarının fazla (Şekil 9) olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Traverten taşları, sahip oldukları boşluk miktarına göre çok çeşitlilik göstermekte olup boşluk miktarı fazla olan türlerinde basınç dayanımı sonuçlarının düştüğü (Distelhorst, 2002) literatür ile desteklenmektedir.



Şekil 10. Basınç dayanımı sonuçları

### 3.3. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

Traverten taş numunelere ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 11’de verilmiştir. Düşük boşluk oranına (Şekil 9), yüksek birim ağırlık, yoğunluk (Şekil 8) ve basınç dayanımına (Şekil 10) sahip olan siyah traverten taşın yarmada çekme dayanımının, kırmızı traverten taşından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Siyah traverten taşının sahip olduğu düşük porozitenin, basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi yarmada çekme dayanımı sonuçlarına da olumlu etki yaptığı düşünülmektedir. Öyle ki, Chentout ve ark. (2015)’e göre; genel olarak porozite arttıkça basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülünün azalması, büyük ölçüde daha yüksek heterojenlik ve çok gözenekli kayalardaki gözenekler, boşluklar ve mikro çatlaklar sonucu oluşan zayıf bağların varlığı ile açıklanabilir.

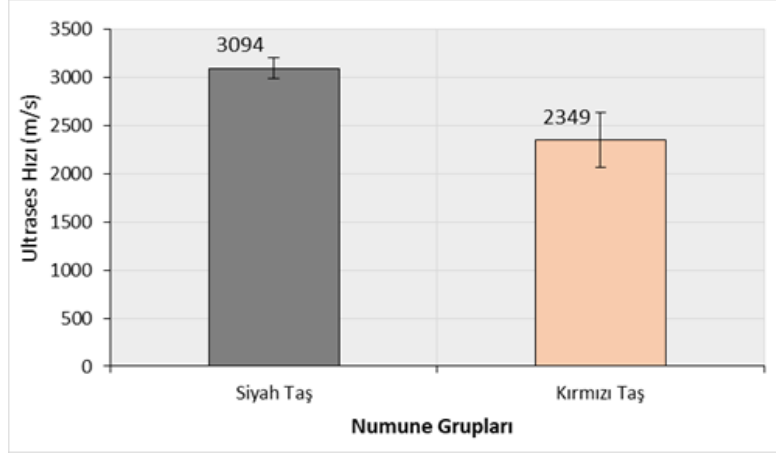


Şekil 11. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

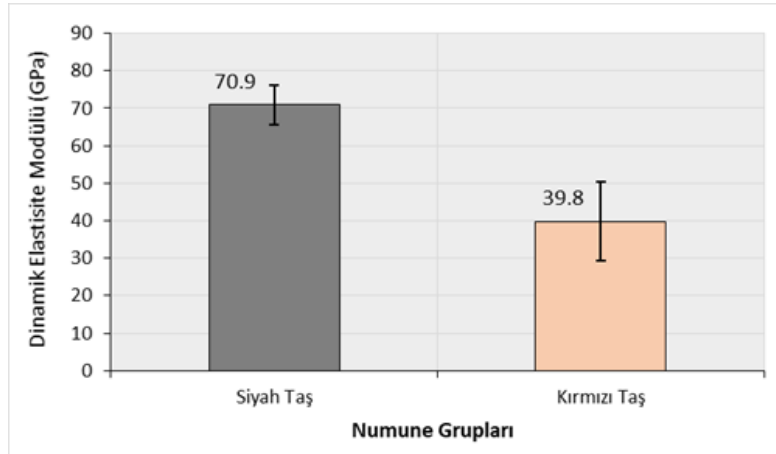
### 3.4. Ultrases Hızı Sonuçları

Traverten taş numunelere ait ultrases hızı sonuçları Şekil 12’de, dinamik elastisite modülü sonuçları ise Şekil 13’te verilmiştir. Siyah traverten taşından elde edilen ultrases hızı ile dinamik elastisite modülünün kırmızı traverten taşa göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Siyah traverten taşın kırmızı traverten taşına göre sahip olduğu yüksek basınç ve çekme dayanımı ile daha düşük porozite özellikleri, elde edilen daha yüksek ultrases hızı sonuçlarını desteklemektedir. Bu bulgular, Chentout ve ark. (2015)’in;

travertenler için porozite arttıkça ultrases hızının azaldığını ve Brotons ve ark. (2016)'nın; çeşitli kayalarda porozitenin artması ile ultrases hızı ve dinamik elastisite modülünün azaldığını, ayrıca Palchik (1999)'un; gözenekli kumtaşı kayalarında basınç dayanımı ve elastisite modülünün doğrusal ilişkisini ortaya koyan bazı önceki çalışmalar ile doğrulanmaktadır.



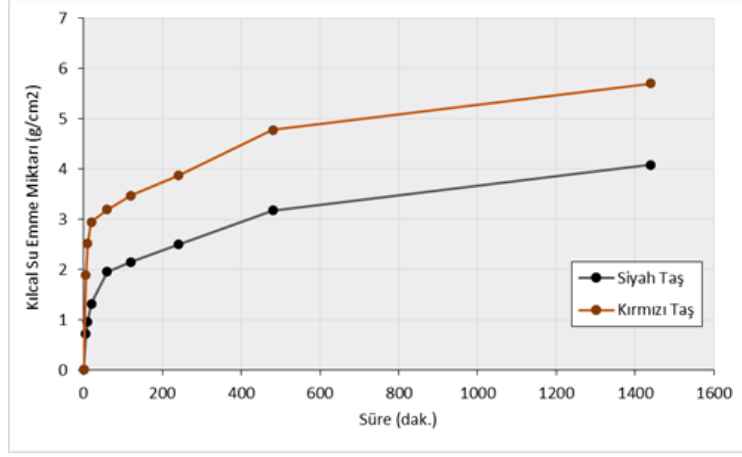
Şekil 12. Ultrases hızı sonuçları



Şekil 13. Dinamik elastisite modülü sonuçları

### 3.5. Kılcal Su Emme Sonuçları

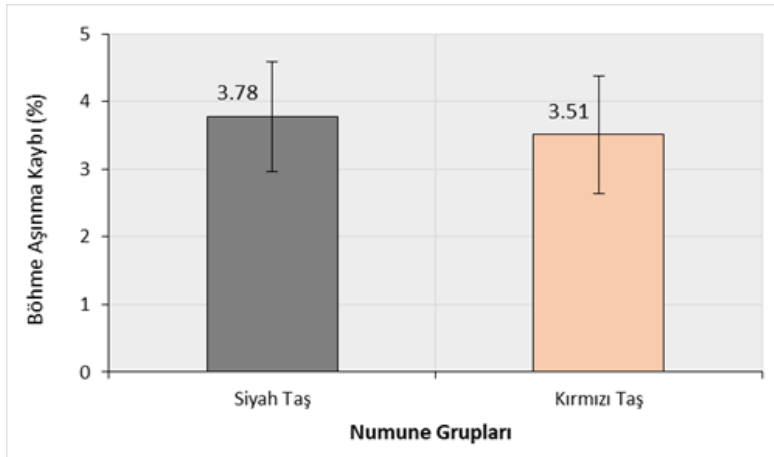
Ani Harabeleri bölgesindeki traverten taş numunelerine ait kılcal su emme miktarları Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14 incelendiğinde, kırmızı traverten taş numunelerin kılcal su emme miktarlarının siyah traverten taş numunelerin kılcal su emme miktarlarından fazla olduğu görülmektedir. Kırmızı traverten taşın iç yapısındaki boşluk oranının siyah traverten taşa göre fazla olduğu (Şekil 9) ve ayrıca Şekil 14'te görüldüğü üzere kırmızı traverten taşındaki kapiler boşluk miktarının da siyah traverten taşa göre fazla olduğu belirlenmiştir. Çobanoğlu (2015) önceki çalışmasında, Denizli (Türkiye) yöresi travertenlerinde porozite ile kapiler su emme özellikleri arasında belirlenen doğrusal ilişki, bu bulguyu destekler niteliktedir.



Şekil 14. Kılcal su emme miktarları

### 3.6. Böhme Aşınma Deneyi Sonuçları

Traverten taş numunelerine Böhme aşınma deneyi uygulanmış ve numunelerin deney sonundaki ağırlık kayıpları yüzde olarak Şekil 15’te verilmiştir. Siyah traverten taş numunelerin Böhme aşınma kayıpları kırmızı traverten taş numunelere göre kısmen daha yüksek elde edilmiştir. Numuneler arasındaki bu aşınma kaybı farkının yüksek olmamasından dolayı her iki taş türünün de böhme aşınma kayıplarının yaklaşık eş değer olduğu kabul edilebilir. Adam Mohammed ve ark. (2021) önceki çalışmasında, aralarında traverten örneklerinin de bulunduğu Orta Anadolu’dan alınan kayaçların yoğunluk ve Böhme aşınma hızı arasında güçlü bir ters logaritmik ilişki belirlenmiş olup, bu çalışmadaki siyah ve kırmızı traverten taşların yoğunluk ve aşınma kaybı sonuçları yakın değerlerle bu eğilime uymaktadır.

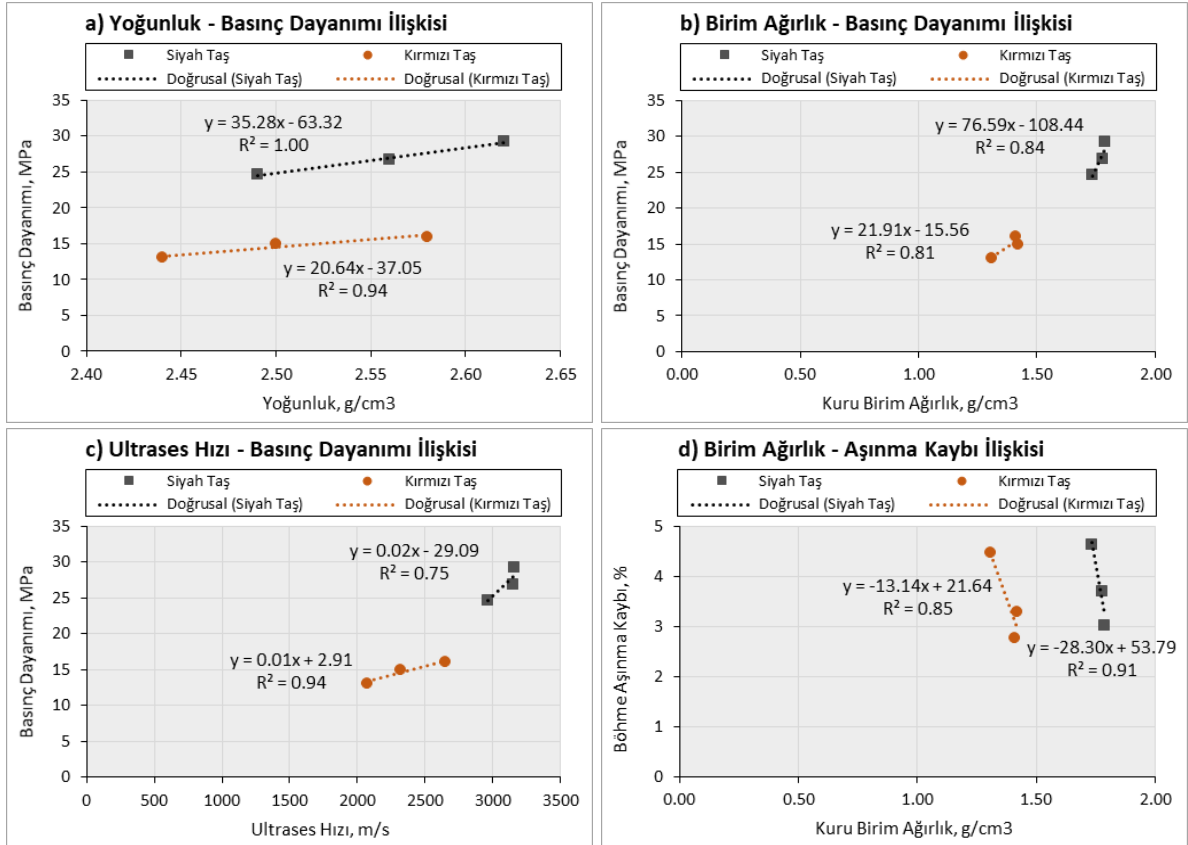


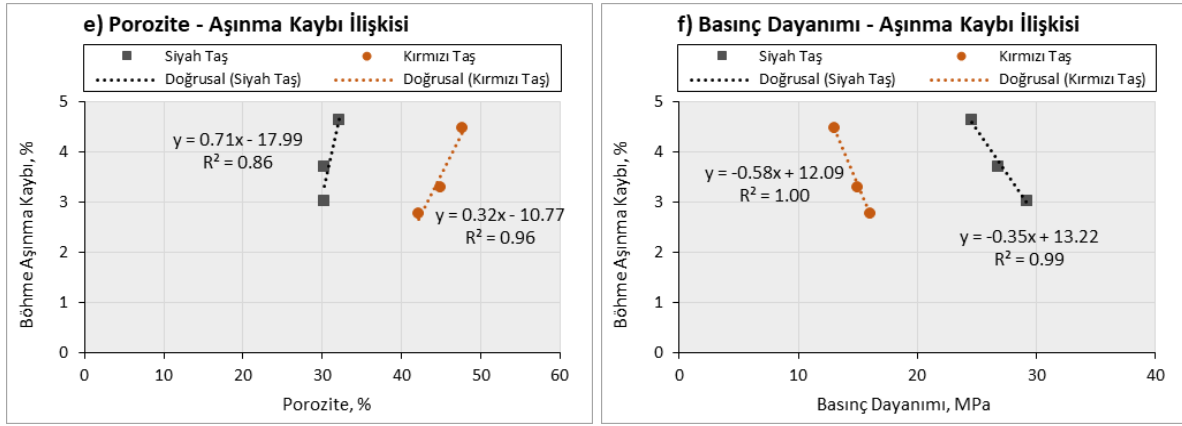
Şekil 15. Böhme aşınma kaybı sonuçları

### 3.7. Fiziksel ve Mekanik Özellikler Arası İstatistiksel İlişki Sonuçları

Çalışmada ayrıca, traverten taş numunelerinin belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkiler incelenerek elde edilen bulgular Şekil 16’da gösterilmiştir. Siyah ve kırmızı traverten taşların, Şekil 16 (a)’da yoğunluk ile basınç dayanımı, Şekil 16 (b)’de kuru birim ağırlık ile basınç dayanımı ve Şekil 16 (c)’de ultrases hızı ile basınç dayanımı özellikleri arasında belirlenen çok güçlü pozitif doğrusal ilişkiler görülmektedir. Bu bulgular, Török ve Vászrhelyi (2010) önceki çalışma

sonuçları ile benzer eğilimdedir. Nitekim bu gözenekli malzemelerin içyapısındaki boşluk miktarının artması, beklendiği üzere birim hacmi dolduran katı malzeme kütlelerinin azalmasına, basınç altında daha küçük katı parçacık en kesitlerinde büyüyen ve daha kolay yayılan iç gerilmeler ile daha boşluklu iç yapıda ultrases dalgaların daha dolambaçlı ve uzun bir katı parçacık yolu izleyerek yayılması ilişkileri açıklayan muhtemel nedenler olabilir. Traverten taş numunelerinin, Şekil 16 (d)'de birim ağırlık ile böhme aşınma kaybı, Şekil 16 (e)'de porozite ile böhme aşınma kaybı ve Şekil 16 (f)'de ise basınç dayanımı ile böhme aşınma kaybı özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkiler görülmektedir. Her iki tür traverten taşların, porozite ile böhme aşınma kaybı özellikleri arasında (Şekil 16 (e)) çok güçlü pozitif doğrusal ilişkiler belirlenmiş iken, Şekil 16 (d) ve Şekil 16 (f)'deki özellikler arasında çok güçlü negatif doğrusal ilişkiler olduğu tespit edilmiştir. Bu ilişkiler de gözenekli gevrek malzemeler için genel literatürdeki beklentiye uygun ve Adam Mohammed ve ark. (2021) önceki çalışma sonuçlarını destekler niteliktedir. Öyle ki traverten taşların birim ağırlık ve porozite ile aşınma kaybı özellikleri arasındaki bu ilişkiler, içyapıdaki boşluk miktarının artması ile azalan katı parçacık en kesitlerinde ve boşluk cidarlarında abrasif etki ile oluşan iç gerilmelerin büyümesi sonucu aşınma kayıplarının artması şeklinde açıklanabilir.





**Şekil 16.** Özellikler arası istatistiksel ilişkiler (**a:** Yoğunluk – Basınç dayanımı ilişkisi, **b:** Birim ağırlık – Basınç dayanımı ilişkisi, **c:** Ultrases hızı – Basınç dayanımı ilişkisi, **d:** Birim ağırlık – Böhme aşınma kaybı ilişkisi, **e:** Porozite – Böhme aşınma kaybı ilişkisi, **f:** Basınç dayanımı – Böhme aşınma kaybı ilişkisi)

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Ani Harabeleri bölgesindeki 2 farklı renk ve dokuda olan (kırmızı ve siyah) traverten taşların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- Siyah traverten taşının birim ağırlığı ve yoğunluğu kırmızı traverten taşına göre daha yüksektir.
- Siyah traverten taşının iç yapısındaki boşluk oranı kırmızı traverten taşına göre daha düşüktür.
- Siyah traverten taşının basınç ve çekme dayanımları kırmızı traverten taşına göre daha yüksek elde edilmiştir.
- Kırmızı traverten taşının kılcal su emme miktarının siyah traverten taşına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Her iki traverten taşının da Böhme aşınma kayıpları yaklaşık eş değerdir.
- Siyah ve kırmızı traverten taşların birim ağırlık, yoğunluk, porozite, ultrases hızı, basınç dayanımı ve Böhme aşınma kaybı özellikleri arasında yüksek dereceli istatistiksel ilişkiler belirlenmiştir.
- Siyah ve kırmızı traverten taşların TS 10449 (Anonim 1992), TS 11143 (Anonim 1993) ve TS 11443 (Anonim 1994) standartlarında döşeme ve duvar kaplama taşı olarak kullanım için belirtilen 2,3 ve 2,6 g/cm<sup>3</sup> birim ağırlık ile 510, 489 kgf/cm<sup>2</sup> (döşeme kaplama) ve 305 kgf/cm<sup>2</sup> (duvar kaplama) basınç dayanımı sınırlarını sağlayamadıklarından bu amaçlarla kullanıma elverişli olmadıkları belirlenmiştir.
- Öte yandan, siyah ve kırmızı traverten taşlar sahip oldukları hafiflik, yüksek gözeneklilik, kolay işlenebilirlik, üniform ve estetik yüzey dokusu özellikleri nedeniyle, yapılarda konsantre yük etkilerine maruz kalmayacak şekilde dekoratif amaçlı kullanılabilir.

Sonraki çalışmalarda her iki taşın,

- Donma-çözülme altındaki davranışlarının incelenmesi,



- Kılcal su emmelerin oluşturduğu duruma bağlı olarak sülfat etkisi altındaki davranışının incelenmesi önerilmektedir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Her bir yazar makaleye %50 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

### **Kaynakça**

- Adam Mohammed AA., Fener M., Comakli R., İnce İ., Balci MC., Kayabalı K. Investigation of the relationships between basic physical and mechanical properties and abrasion wear resistance of several natural building stones used in Turkey. Journal of Building Engineering 2021; 42.
- Anonim. Ani Katedrali kültür envanteri. <https://kulturenvanteri.com/yer/?p=11952> 2023. Erişim 9 Mayıs 2024.
- Anonim. Ani. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Ani> 2024.
- Anonim. Kars. <https://tr.pinterest.com/pin/56928382798031780/> 2024.
- Anonim. TS 10449: Mermer-kalsiyum karbonat esaslı-yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan. Türk Standartları Enstitüsü 1992; Ankara.
- Anonim. TS 11143: Traverten-yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan. Türk Standartları Enstitüsü 1993; Ankara.
- Anonim. TS 11443: Oniks mermeri- kalsiyum karbonat esaslı-yapı ve kaplama taşı olarak kullanılan tadil 1. Türk Standartları Enstitüsü 1994; Ankara.
- Anonim. TS 2824 EN 1338: Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-gerekli şartlar ve deney metotları. Türk Standartları Enstitüsü 2005; Ankara.
- Anonim. TS EN 1097-6: Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, Türk Standartları Enstitüsü 2022; Ankara.
- Anonim. TS EN 12390-3: Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2019; Ankara.
- Anonim. TS EN 12390-6: Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2024; Ankara.
- Anonim. TS EN 12504-4: Yapılarda beton deneyleri- bölüm 4: ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2021; Ankara.
- Anonim. TS EN 13057: Beton yapılar- koruma ve tamir için mamul ve sistemler-deney metotları- kılcal su emmeye direncin tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2004; Ankara.
- Anonim. TS EN 1936: Doğal taşlar- deney yöntemleri- gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2007; Ankara.

- Ayaz E., Karacan E. Sivas batısındaki traverten oluşumlarının yapı ve yüzey kaplama taşı olarak kullanılabilirliklerinin incelenmesi. *Jeoloji Mühendisliği* 2000; 24(1): 87-99.
- Brotons V., Tomás R., Ivorra S., Grediaga A., Martínez-Martínez J., Benavente D., Gómez-Heras M. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Materials and Structures* 2015; 49: 3021-3037.
- Chentout M., Alloul B., Rezkouk A., Belhai D. Experimental study to evaluate the effect of travertine structure on the physical and mechanical properties of the material. *Arabian Journal of Geosciences* 2015; 8: 8975-8985.
- Çobanoğlu İ. Prediction and identification of capillary water absorption capacity of travertine dimension stone. *Arabian Journal of Geosciences* 2015; 8: 10135-10149.
- Demir BG., Özdoğan AK., Akbulut A. Türkiye'deki travertenlerin tarih, turizm, madencilik ve doğal taş ihracatı açısından değerlendirilmesi. *Aurum Mühendislik Sistemleri ve Mimarlık Dergisi* 2023; 7(2): 291-302.
- Demirdağ S. The effect of using different polymer and cement based materials in pore filling applications on technical parameters of travertine stone. *Construction and Building Materials* 2009; 23(1): 522-530.
- Distelhorst G. The beauty of natural stone—elegant, enchanting, enduring and more affordable than ever before. *Architectural Record Continuing Education Series, Marble Institute of America Setting the Standards in the Natural Stone Industry* 2002.
- Doležel T., Drdácý M., Konvalinka P., Kopecký L. Experimental analysis of sandstone and travertine. *Acta Polytechnica* 2004; 44(5-6).
- Erdoğan Y. Engineering properties of Turkish travertines. *Scientific Research and Essay* 2011; 6(21): 4551-4566.
- Gürdal E. Özgünler AS. Tarihi yapıların onarımında doğal taş seçimi ve kullanımı. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi* 2016; 16: 27-35.
- Gürocak Z., Alemdağ S. Pelte (Elazığ) bölgesindeki traverten ve oniks mermerlerin yapı ve kaplama taşı olarak kullanılabilirliği. *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2009; 21(1): 85-94.
- Huertas BS. El travertino rojo de Mula, (Murcia) definición de un mármol local1. *Región De Murcia* 2005; 141.
- Jackson MD., Marra F., Hay RL., Cawood C., Winkler EM. The Judicious selection and preservation of tuff and travertine building stone in ancient Rome. *Archaeometry* 2005; 47(3): 485-510.
- Kahraman E., Eser A. Elazığ bölgesi travertenlerinin kaplama taşı olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2015; 30(2): 243-253.
- Li T., Tang X., Xia J., Gong G., Xu Y., Li M. Investigation of mechanical strength, permeability, durability and environmental effects of pervious concrete from travertine waste material. *Construction and Building Materials* 2024; 426.

- Özdemir E. Farklı pH çözeltileri ve donma çözülmenin travertenlerin fiziko-mekanik özelliklerine birlikte etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2021; 32: 1-6.
- Palchik V. Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 1999; 32: 303-309.
- Pentecost A. *Travertine*. Springer 2005.
- Süer M., Yakar, F. Alaşehir (Manisa) bölgesi traverten atıklarının yol alttemel ve temel tabakalarında kullanılabilirliğinin araştırılması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 2020; 8(2): 388-395.
- Török Á., Vásárhelyi B. The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology* 2010; 115(3-4): 237-245.

## ZnNi Kaplı Karbon Çelik Yüzeyine Sentezlenen Poli(anilin-ko-N-metilpirol) ve Poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin)

Abdurrahman AKDAĞ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO, Şanlıurfa

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5292-8001>

\*Sorumlu yazar: ab.ak@hotmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 22.05.2024

Kabul tarihi: 26.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

ZnNi

Empedans

Voltametri

Poli(anilin-ko-N-metilpirol)

Poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin)

### ÖZ

Poli(anilin-ko-N-metilpirol) ve poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kopolimerleri ZnNi kaplı karbon çelik (CS/ZnNi) elektrot yüzeyine döngülü voltametri yöntemiyle sentezlenmiştir. Kopolimer film kaplı elektrotlar anodik polarizasyon, doğrusal taramalı voltametri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Doğrusal taramalı voltametri ile sentezlenen kopolimer filmlerin altında ZnNi alaşımı bulunduğu belirlenmiştir. Anodik polarizasyon eğrileri poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kaplı CS/ZnNi elektrodun akım değerlerinin daha düşük olduğunu göstermiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi korozif ortamda uzun bekleme süresi olan 168 saat sonunda poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kaplı CS/ZnNi elektrodun polarizasyon direncinin Poli(anilin-ko-N-metilpirol) kaplı elektroda göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

## Poly(aniline-co-N-methylpyrrole) and Poly(N-methylpyrrole-co-N-methylaniline) Synthesized on ZnNi Coated Carbon Steel Surface

### Research Article

#### Article History:

Received: 22.05.2024

Accepted: 26.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

ZnNi

Impedance

Voltammetry

Poly(aniline-co-N-methylpyrrole)

Poly(N-methylpyrrole-co-N-methylaniline)

### ABSTRACT

Poly(aniline-co-N-methylpyrrole) and poly(N-methylpyrrole-co-N-methylaniline) copolymers were synthesized on the ZnNi-coated carbon steel (CS/ZnNi) electrode surface by cyclic voltammetry method. Copolymer film-coated electrodes were characterized by anodic polarization, linear sweep voltammetry, and electrochemical impedance spectroscopy. It was determined that there was a ZnNi alloy underlying the copolymer films synthesized by linear sweep voltammetry. Anodic polarization curves showed that the current values of the poly(N-methylpyrrole-co-N-methylaniline) coated CS/ZnNi electrode were lower than the poly(aniline-co-N-methylpyrrole) coated CS/ZnNi electrode. Electrochemical impedance spectroscopy results showed that the polarization resistance of the poly(N-methylpyrrole-co-N-methylaniline) coated CS/ZnNi electrode was higher than the poly(aniline-co-N-methylpyrrole) coated CS/ZnNi electrode after a long waiting time of 168 hours in a corrosive environment.

**To Cite:** Akdağ A. ZnNi Kaplı Karbon Çelik Yüzeyine Sentezlenen Poli(anilin-ko-N-metilpirol) ve Poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin). Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 314-324.

## Giriş

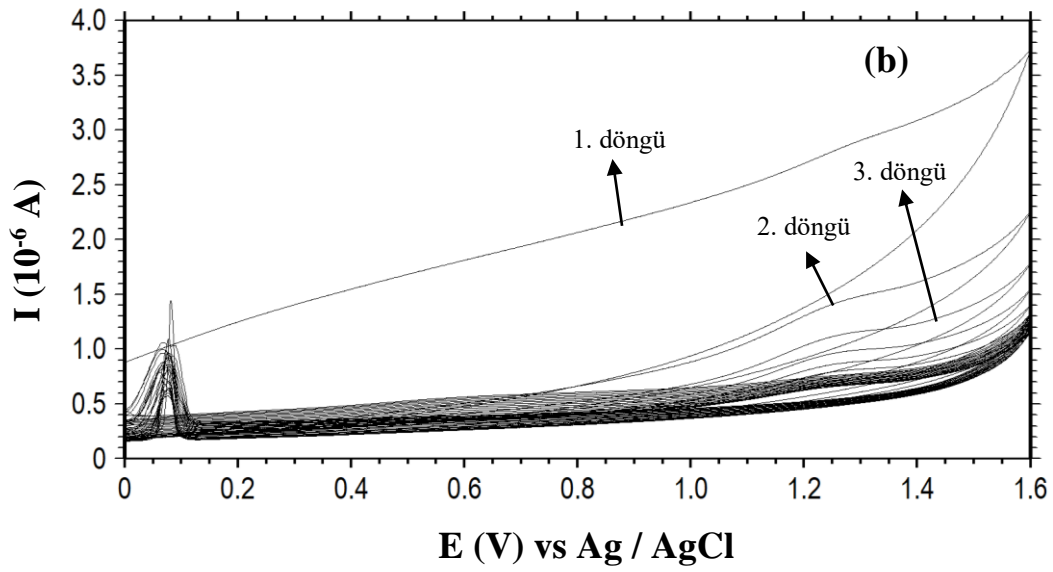
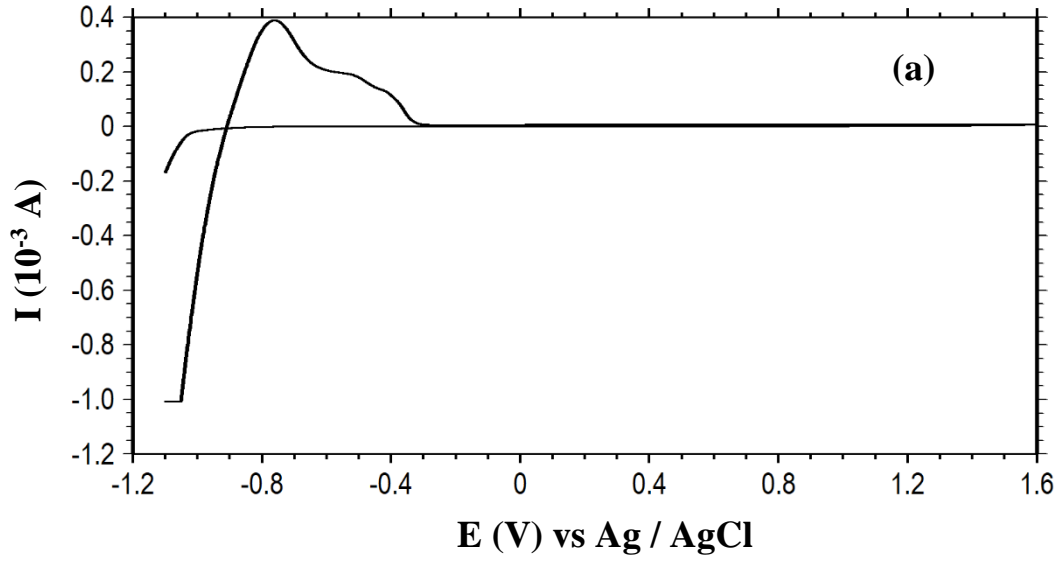
Korozyon metalik malzemelerin çevrenin etkileriyle kimyasal veya elektrokimyasal olarak değişmesi olayıdır. Günümüzde endüstrinin en önemli sorunlarının başında korozyon gelmektedir. Çünkü korozyonun ekonomik maliyeti ülkelerin gayri safi milli hasıllarının yaklaşık %3-4'üne tekabül etmektedir (Koch, 2017; Fayomi ve ark. 2019). Bu oranı ülkemiz özelinde değerlendirdiğimizde 2023 yılı için yaklaşık olarak 35-40 milyar dolar etmektedir ki bu rakam 2023 yılında ülkemizdeki Milli Eğitime ayrılan bütçenin yaklaşık olarak iki katıdır. Korozyonun ülke ekonomilerine neden olduğu bu kadar yüksek maliyetler elbette onun önlenmesi için yoğun araştırmalar yapmayı önemli hale getirmiş durumdadır. Günümüzde korozyonu önlemek için anodik koruma, katodik koruma, inhibitör, boya ve metalik kaplama gibi bir kısım uygulamalar yapılmaktadır. Metalik kaplamalar korozyonu önlemede en çok kullanılan yöntemlerdendir. Çünkü korozyona karşı etkinliği oldukça dikkat çekicidir. Örneğin sıcak daldırma yöntemiyle yapılan bir çinko kaplama birinci sınıf bir antikoroziv boyama ile benzer maliyettedir ancak korozyona karşı koruyuculuğu daha uzundur (Üneri, 1998). Korozyonu önlemeye yönelik metalik kaplamalar yalın olarak kullanıldığı gibi alaşım olarak da kullanılabilir (Sere ve ark., 1998; De Abreu ve ark., 1999; Marder, 2000; Song ve ark., 2006; Hosking ve ark., 2007; Edavan ve Kopinski, 2009; Dutra ve ark., 2012; Tada ve Miura, 2016; Beheshti ve ark., 2018; El Fazazi ve ark., 2021). Literatürde alaşım kaplamaların yalın metallerden daha iyi koruyucu etki gösterdiğini ifade eden çalışmalar mevcuttur (Kirilova ve ark., 1997; Pech-Canul ve ark., 1997; Boshkov ve ark., 2002; Roventi ve ark., 2006; Karahan ve ark., 2009). Örneğin Hosseini ve ark. (2008) sentezledikleri ZnNi alaşımının yalın çinkoya göre daha iyi koruyucu etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Son yıllarda metalik kaplamaların yüzeylerinin iletken polimer filmlerle kaplanarak koruyuculuklarının artırılmasına yönelik çalışmalar da mevcuttur (Tsuchiya ve ark., 2007; Et Taouil ve ark., 2012; Ryu ve ark., 2012; Akdağ, 2020). Örneğin Ozyılmaz ve ark. (2014) karbon çelik yüzeyine sentezledikleri ZnCo alaşımının karbon çeliğin korozyonunu önlemede etkili olduğunu, ZnCo kaplı karbon çelik yüzeyine sentezledikleri polianilin kaplamasının koruyuculuğunun ise polimer kaplamasız ZnCo kaplı karbon çelik elektroda göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da metalik kaplama yapılmış karbon çelik elektrot yüzeyi iletken kopolimerlerle kaplanmıştır. ZnNi kaplı elektrot yüzeyine poli(N-metilpirol) homopolimerinin sentezini daha önceki çalışmamızda gerçekleştirmiştik (Akdağ ve Ozyılmaz, 2017). Bu çalışmada ise ZnNi kaplı karbon çelik elektrot yüzeyi 0.30 M okzalik asit ortamında ilk defa poli(anilin-ko-N-metilpirol) (PANI-PNMP) ve poli(N-metilpirol-ko-N-metilanolin) (PNMP-PNMA) kopolimerleri ile kaplanmış ve antikoroziv özellikleri incelenmiştir.

## Materyal ve Metod

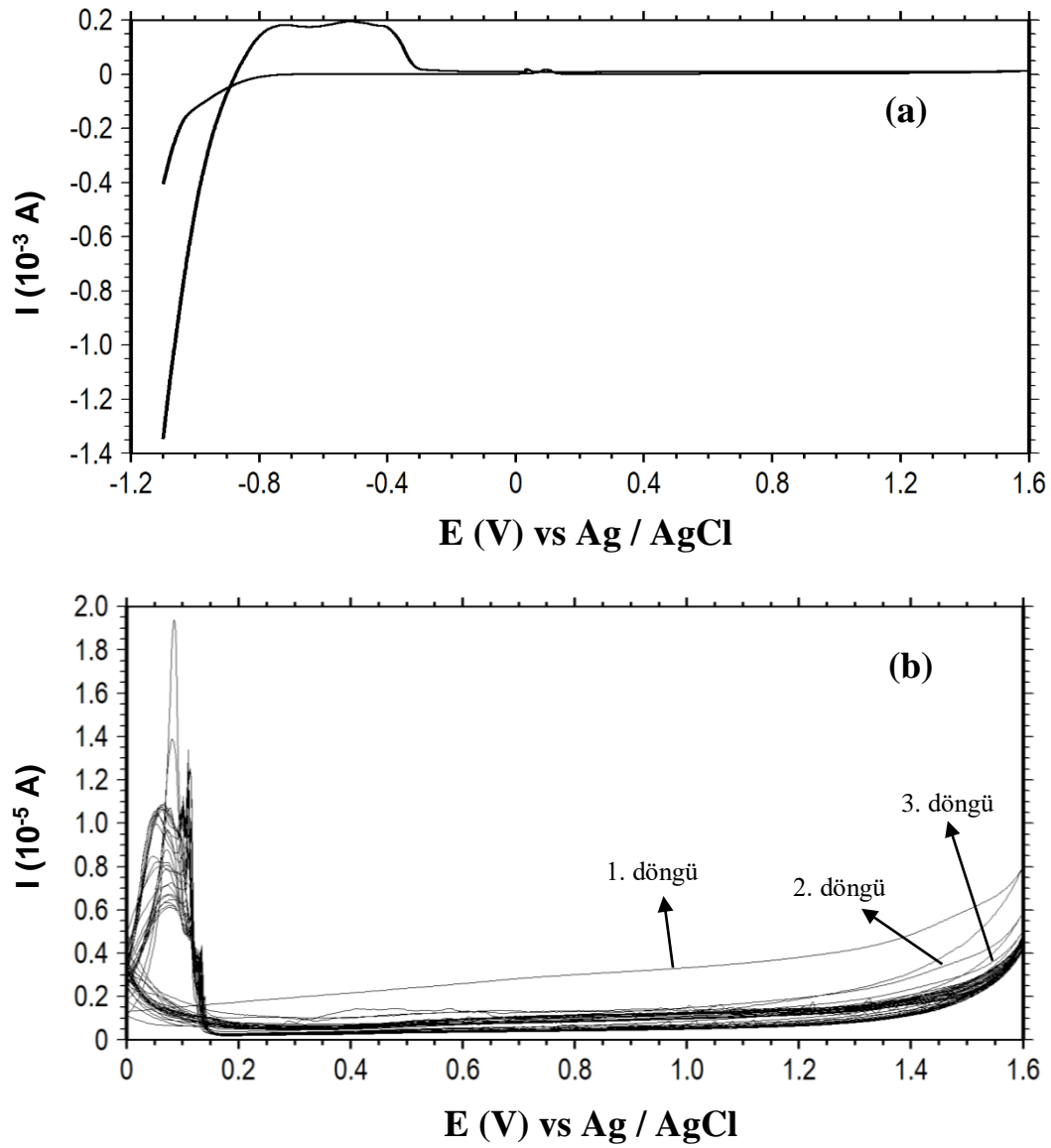
Elektrokimyasal ölçümler CHI 660E elektrokimyasal analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan kimyasallardan anilin, N-metilanilin, okzalik asit, sodyum sülfat, nikel sülfat ve borik asit Merck firmasından, N-metil pirol ve p-toluen sülfonik asit Acros Organics firmasından EDTA ise Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Poli(anilin-ko-N-metilpirol) ve poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kopolimerleri döngülü voltametri yöntemiyle sentezlenmiştir. Sentezde Platin karşı elektrot, Ag/AgCl (3 M, KCl) referans elektrot olarak kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak yüzey alanı 0,05 cm<sup>2</sup> olan karbon çelik (CS) elektrotlar kullanılmıştır (Ozyılmaz ve ark., 2013). ZnNi kaplama 400 saniye boyunca 1 mA'lık sabit akımda pH'ı 5,5 olan çözeltide (% 200 g/L ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, % 140 g/L NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O, 20 g/L H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 2 g/L CH<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>SO<sub>3</sub>H·H<sub>2</sub>O) gerçekleştirilmiştir (Akdag ve Ozyılmaz, 2017). Empedans ölçümleri % 3,5'lik NaCl çözeltisinde 24, 48 ve 168 saat sonra 10<sup>5</sup> Hz ile 10<sup>-2</sup> Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir.

## Bulgular ve Tartışma

Şekil 1a ve 2a, 0,025 M anilin+0,025 M N-metilpirol ile 0,025 M N-metilpirol+0,025 M N-metilanilin içeren 0,30 M okzalik asit çözeltisinde sentezlenen sırasıyla poli(anilin-ko-N-metilpirol) (PANI-PNMP) ve poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) (PNMP-PNMA) kopolimerlerinin birinci dönüşümlü eğrilerini göstermektedir. Sentezler 100 mV/s tarama hızında -1,20 ile 1,60 V potansiyel aralığında gerçekleştirilmiştir. Üst potansiyel sınırının 1.60 V'dan daha yüksek olduğu potansiyellerde oksijen çıkışı gerçekleştiğinden polimer sentezine olumsuz etki etmektedir. Üst potansiyel sınırının düşük olması durumunda ise monomer oksidasyonunun gerçekleşme potansiyeline ulaşılmaması durumu söz konusu olabildiğinden, üst sınır 1.60 V seçilmiştir. Şekil 1a ve 2a'daki eğrilerde 0,025 M anilin+0,025 M N-metilpirol içeren ortam için yaklaşık -0,91 ile -0,30 V arasında, 0,025 M N-metilpirol+0,025 M N-metilanilin içeren ortam için ise yaklaşık -0,89 ile -0,29 V arasındaki pikler elektrotların yüzeylerindeki Zn ve Ni iyonlarının çözünüp çözeltideki okzalat iyonları ile birleşmesine karşılık gelen piklerdir (Akdag ve Ozyılmaz, 2017). Şekil 1b ve 2b 25 döngü uygulanarak sentezlenen kopolimer filmlerin film gelişim eğrilerini göstermektedir. Bu eğrilerde hem poli(anilin-ko-N-metilpirol) hem de poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) için döngülerdeki akım değerlerinin kendilerinden bir önceki döngüye göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum sentez esnasında döngü sayısının elde edilen akım miktarı ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Yani döngü sayısı arttıkça akım azalmaktadır. Döngü sayısı arttıkça akımın azalması ise gerçekleştirilen döngüler boyunca yüzeyin kopolimer filmlerle kapandığına işaret etmektedir (Akdag ve Ozyılmaz, 2017). Çünkü kopolimer filmlerle yüzey kapandıkça yüzeydeki iletkenlik azalmakta olup yalıtkanlık artmaktadır.



**Şekil 1.** CS/ZnNi elektrodun yüzeyine sentezlenen poli(anilin-ko-N-metilpirol) için ilk voltamogram (a) ve film oluşum voltamogramları (b).

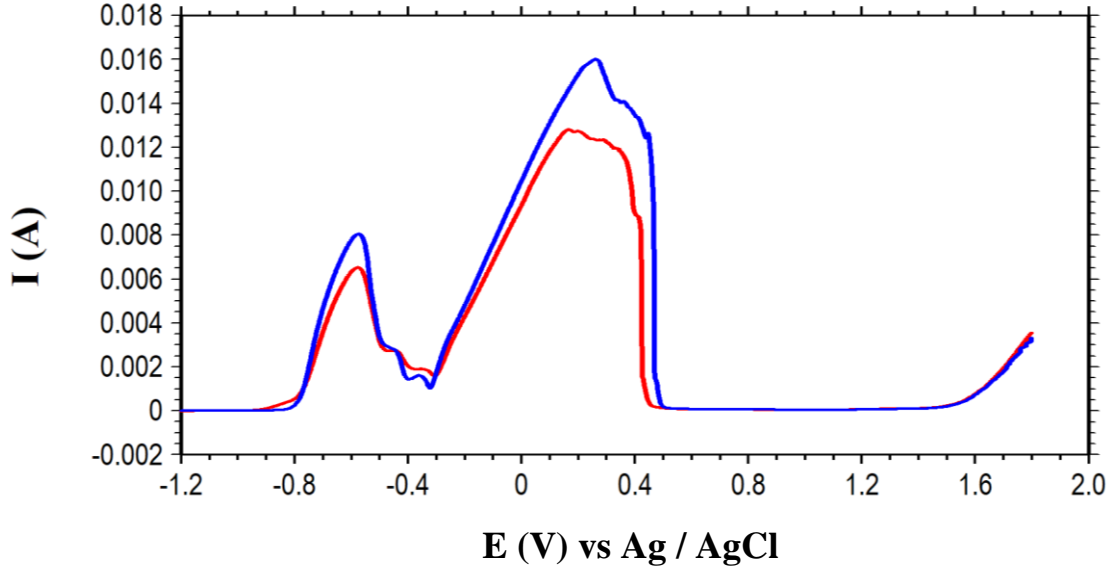


**Şekil 2.** CS/ZnNi elektrot yüzeyine sentezlenen poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) için ilk voltamogram (a) ve film oluşum voltamogramları (b).

Şekil 3, poli(anilin-ko-N-metilpirol) (PANI-PNMP) kaplı CS/ZnNi (CS/ZnNi/PANI-PNMP) ve poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) (PNMP-PNMA) kaplı CS/ZnNi (CS/ZnNi/PNMP-PNMA) elektrotlarının 0,5 g/L EDTA içeren 0,05 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ortamındaki doğrusal taramalı voltametri eğrilerini göstermektedir. Bu eğrilerde CS/ZnNi/PANI-PNMP için -0,84 ile -0,32 V arasındaki piklerle CS/ZnNi/PNMP-PNMA için -0,93 ile -0,30 V arasındaki pikler Zn ve Ni iyonlarının EDTA ile kompleks oluşturmasını göstermektedir. CS elektrot için bu aralıkta herhangi bir pik görünmediği için (Akdag, 2020) bu durum kopolimer film kaplı elektrotların tabanında ZnNi alaşımının mevcut olduğunu göstermektedir. Anodik taramada görülen diğer geniş pik demir

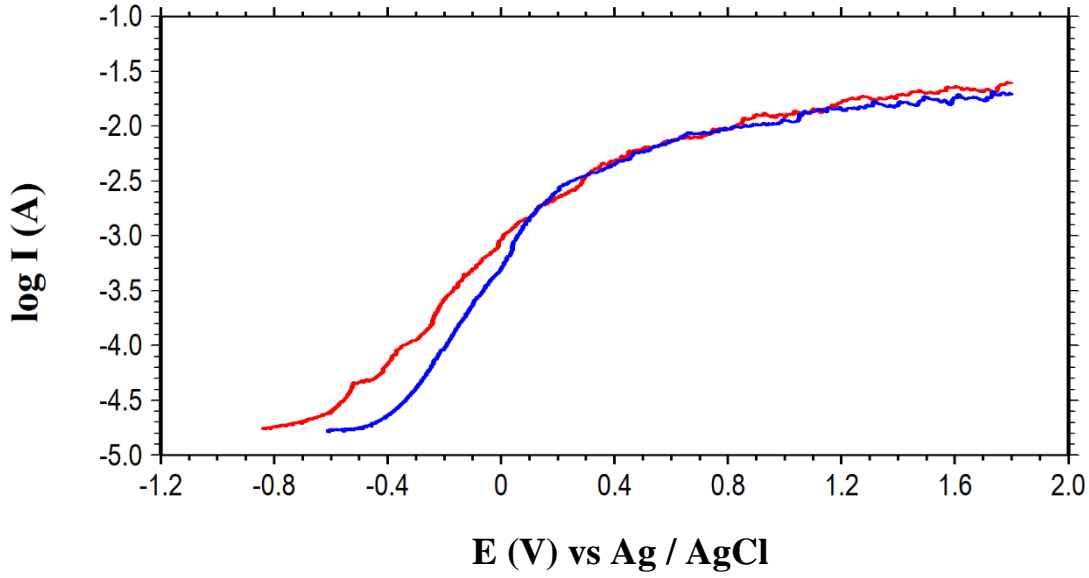


iyonlarının EDTA ile yaptığı kompleksi göstermektedir (Akdag ve ark., 2018). 1,5 V'den sonra görülen akım artışı ise oksijen çıkışını göstermektedir.



**Şekil 3.** CS/ZnNi/PANI-PNMP (—) CS/ZnNi/PNMP-PNMA (—) elektrotların doğrusal taramalı voltametri eğrileri.

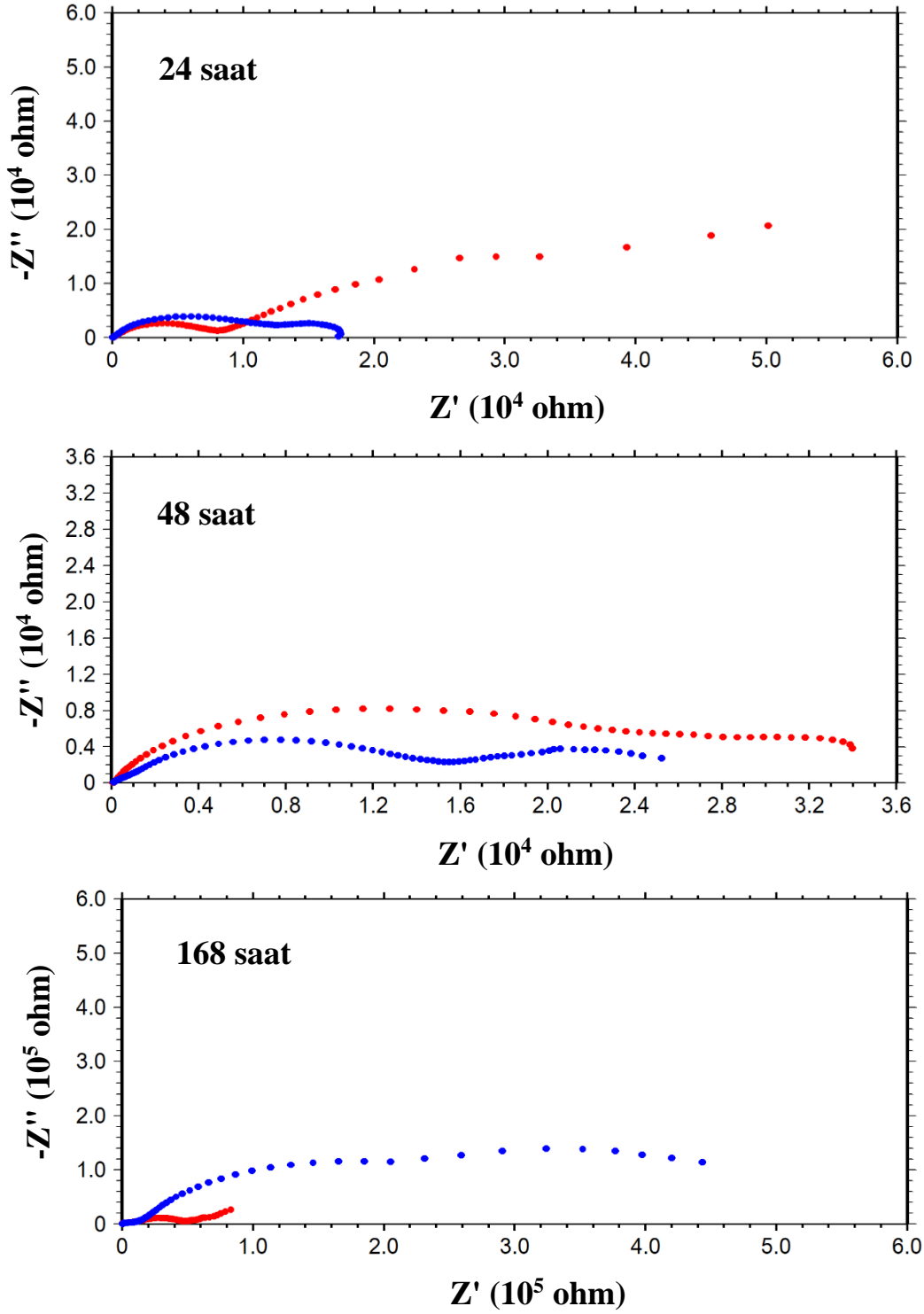
Şekil 4, CS/ZnNi/PANI-PNMP ve CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrotların anodik polarizasyon eğrilerini göstermektedir. Bu eğrilerde CS/ZnNi/PANI-PNMP elektrodun korozyon potansiyeli -0,835 V iken CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrodun korozyon potansiyeli -0,607 V'dir. Akım değerlerine bakıldığında ise CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrodun akım değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrodun CS/ZnNi/PANI-PNMP elektroduna göre korozyon potansiyelinin yüksek, akım değerlerinin ise daha düşük olması PNMP-PNMA kopolimer filmin NaCl korozif çözeltisine karşı koruyuculuğunun daha iyi olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.** CS/ZnNi/PANI-PNMP (—) CS/ZnNi/PNMP-PNMA (—) elektrotların 168 saat sonundaki anodik polarizasyon eğrileri

Şekil 5, CS/ZnNi/PANI-PNMP ve CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrotların elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümlerinden elde edilen Nyquist eğrilerini göstermektedir. Nyquist eğrilerinde belirlenen polarizasyon dirençlerinin büyüklüğü elektrot yüzeyindeki maddenin korozyona karşı dayanıklılığı ile doğru orantılıdır. Bu eğrilerde 24 saatlik ölçümlerdeki yük transfer direnci ve yüzeydeki film direncinin toplamına eşit olan polarizasyon direnci CS/ZnNi/PANI-PNMP elektrodu için daha yüksektir. CS/ZnNi/PANI-PNMP için polarizasyon direnci yaklaşık 51000 ohm iken CS/ZnNi/PNMP-PNMA için bu değer yaklaşık 16200 ohm'dur. 48 saatlik ölçümlerde CS/ZnNi/PANI-PNMP ve CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrotların polarizasyon dirençlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ancak 24 saate göre CS/ZnNi/PANI-PNMP elektrodun direncinde azalma söz konusu iken CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrodun polarizasyon direncinde artış söz konusudur. Uzun bekleme süresi olan 168 saatlik ölçümlerde CS/ZnNi/PANI-PNMP elektrot için sınırlı bir artış gözlenirken CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrot için çok yüksek bir artış gözlenmiştir. CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrot için bu durumun yüzeydeki metalik alaşım tabakasındaki iyonların kısmen çözünmesi sonucu oluşan oksit tabakalar ve polimer filmin indirgenmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Uzun bekleme süresindeki bu yüksek direnç PNMP-PNMA filmin antikorozyif özelliğinin PANI-PNMP filmine göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Anodik polarizasyon eğrilerindeki bulgular da bu düşünceyi desteklemektedir. Ayrıca 168 saat sonunda her iki elektrodun polarizasyon direnci kaplamasız karbon çelik elektroda (polarizasyon direnci 6776 ohm) göre daha yüksek iken ZnNi

kaplı karbon çelik elektroda (polarizasyon direnci 71250 ohm) (Akdağ ve Ozyılmaz, 2017) göre ise sadece CS/ZnNi/PNMP-PNMA elektrodun daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. CS/ZnNi/PANI-PNMP (—) CS/ZnNi/PNMP-PNMA (—) elektrotların % 3,5'lik NaCl ortamındaki Nyquist eğrileri

## **Sonuçlar**

CS/ZnNi elektrot yüzeyine poli(anilin-ko-N-metilpirol) ve poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kopolimer filmler sentezlendi. Doğrusal taramalı voltametri sonuçları ile elektrotların yüzeylerindeki polimer tabakanın altında ZnNi alaşım tabakasının varlığı doğrulandı. Anodik polarizasyon eğrileri ile poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kaplı CS/ZnNi elektrodun poli(anilin-ko-N-metilpirol) kaplı CS/ZnNi elektroda göre akım değerlerinin daha düşük korozyon potansiyelinin ise daha yüksek olduğu belirlendi. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi sonuçları ile poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kaplı CS/ZnNi elektrodun polarizasyon direncinin koroziv ortamda bekleme süresi artmasına rağmen arttığı görüldü. Her iki elektrodun 168 saat sonundaki polarizasyon dirençlerinin kaplamasız karbon çelik elektroda göre oldukça yüksek olduğu, ZnNi kaplı karbon çelik elektroda göre ise sadece poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kaplı CS/ZnNi elektrodun daha yüksek olduğu belirlendi. Koroziv ortamda uzun bekleme sürelerinde poli(N-metilpirol-ko-N-metilanilin) kaplı CS/ZnNi elektrodun poli(anilin-ko-N-metilpirol) kaplı CS/ZnNi elektroda göre korozyona karşı koruyuculuğunun daha iyi olduğu tespit edildi.

## **Araştıracının Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamıştır.

## **Kaynaklar**

- Akdağ A. Çinko-demir kaplı elektrot yüzeyindeki poli(anilin-co-pirol) ve poli(anilin-co-N-metilpirol) kopolimerlerin korozyon performansı. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2020; 7(1): 231-238.
- Akdag A. Electrochemical synthesis and corrosion behaviour of poly (o-anisidine)-TiO<sub>2</sub> nanocomposite on ZnNi-plated carbon. ChemistrySelect 2020; 5: 2496–2500.
- Akdag A., Ozyilmaz AT. Poly(N-methylpyrrole) film on znni plated carbon steel electrode. Acta Chimica Slovenica 2017; 64(2): 312–318.
- Akdag A., Ozyilmaz G., Ozyilmaz AT. Poly(2-chloroaniline) and poly(aniline-co-2-chloroaniline) films on ZnFe alloy plating. Anti-Corrosion Methods and Materials 2018; 65(6): 580–586.
- Beheshti M., Ismail MC., Kakooei S., Shahrestani S., Mohan G., Zabihiazadboni M. Influence of deposition temperature on the corrosion resistance of electrodeposited zinc-nickel alloy coatings. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik 2018; 49(4): 472–482.

- Boshkov N., Petrov K., Vitkova S., Nemska S., Raichevsky G. composition of the corrosion products of galvanic alloys Zn–Co and their influence on the protective ability. *Surface and Coatings Technology* 2002; 157(2–3): 171–178.
- De Abreu Y., Da Silva A., Ruiz A., Réquíz R., Angulo N., Alanis R. Study of zinc coatings on steel substrate attained by two different techniques. *Surface and Coatings Technology* 1999; 120–121: 682–686.
- Dutra CA., Codaro EN., Nakazato RZ. Electrochemical behavior and corrosion study of electrodeposits of Zn and Zn-Fe-Co on steel. *Materials Sciences and Applications* 2012; 3(6): 348-354.
- Fayomi OSI., Akande IG., Odigie S. Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: an overview. *Journal of Physics: Conference Series* 2019; 1378(2): 022037.
- Edavan RP., Kopinski R. Corrosion resistance of painted zinc alloy coated steels. *Corrosion Science* 2009; 51(10): 2429-2442.
- El Fazazi A., Ouakki M., Cherkaoui M. Electrochemical deposition and spectroscopy investigation of Zn coatings on steel. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* 2021; 7(2): 58.
- Et Taouil A., Mahmoud MM., Lallemand F., Lallemand S., Gigandet MP., Hihn JY. Corrosion protection by sonoelectrodeposited organic films on zinc coated steel. *Ultrasonics Sonochemistry* 2012; 19(6): 1186-1193.
- Hosking NC., Ström MA., Shipway PH., Rudd CD. Corrosion resistance of zinc–magnesium coated steel. *Corrosion Science* 2007; 49(9): 3669–3695.
- Hosseini MG., Ashassi-Sorkhabi H., Ghiasvand HAY. Electrochemical studies of Zn–Ni alloy coatings from non-cyanide alkaline bath containing tartrate as complexing agent. *Surface and Coatings Technology* 2008; 202(13): 2897–2904.
- Karahan IH., Karabulut O., Alver U. A study on electrodeposited Zn–Co alloys. *Physica Scripta* 2009; 79(5): 055801.
- Kirilova I., Ivanov I., Rashkov ST. Electrodeposition of Zn–Co alloy coatings from sulfate–chloride electrolytes. *Journal of Applied Electrochemistry* 1997; 27(12): 1380–1384.
- Koch G. Cost of corrosion. In *trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies* 2017; 3–30, Elsevier.
- Marder AR. The metallurgy of zinc-coated steel. *Progress in Materials Science* 2000; 45(3): 191–271.
- Ozyilmaz AT., Akdag A., Karahan IH., Ozyilmaz G. The influence of polyaniline (pani) coating on corrosion behaviour of zinc-cobalt coated carbon steel electrode. *Progress in Organic Coatings* 2013; 76(6): 993–997.

- Ozyilmaz AT., Akdag A., Karahan IH., Ozyilmaz G. Electrochemical synthesis of polyaniline films on zinc-cobalt alloy deposited carbon steel surface in sodium oxalate. *Progress in Organic Coatings* 2014; 77(4): 872–879.
- Pech-Canul MA., Ramanauskas R., Maldonado L. An Electrochemical investigation of passive layers formed on electrodeposited Zn and Zn-alloy coatings in alkaline solutions. *Electrochimica Acta* 1997; 42(2): 255–260.
- Roventi G., Bellezze T., Fratesi R. Electrochemical study on the inhibitory effect of the underpotential deposition of zinc on Zn–Co alloy electrodeposition. *Electrochimica Acta* 2006; 51(13): 2691–2697.
- Ryu H., Sheng N., Ohtsuka T., Fujita S., Kajiyama H. Polypyrrole film on 55% Al–Zn coated steel for corrosion prevention. *Corrosion Science* 2012; 56: 67–77.
- Seré PR., Zapponi M., Elsner CI., Di Sarli AR. Comparative corrosion behaviour of 55Aluminium–zinc alloy and zinc hot-dip coatings deposited on low carbon steel substrates. *Corrosion Science* 1998; 40(10): 1711–1723.
- Song GM., Sloof WG., Pei YT., De Hosson JTM. Interface fracture behavior of zinc coatings on steel: Experiments and finite element calculations. *Surface and Coatings Technology* 2006; 201(7): 4311–4316.
- Tada E., Yusuke M. Hydrogen absorption behavior into Zn and Zn–Al coated steels during corrosion in aqueous solutions. *The Iron and Steel Institute of Japan International* 2016; 56(3): 444–451.
- Tsuchiya S., Ueda M., Ohtsuka T. Polypyrrole coating on zinc for corrosion prevention of zinc-coated steels. *The Iron and Steel Institute of Japan International* 2007; 47: 151–156.
- Üneri S. Korozyon ve önlenmesi. *Korozyon Deneği Yayınları*, 1998; Ankara.
- Yadav AP., Katayama H., Noda K., Masuda H., Nishikata A., Tsuru, T. Effect of Fe–Zn alloy layer on the corrosion resistance of galvanized steel in chloride containing environments. *Corrosion Science* 2007; 49(9): 3716–3731.

## Afrika Akbaları Optimizasyon Algoritmasının Güncel Metasezgisellerle Karşılaştırmalı Analizi

Sibel ARSLAN<sup>1\*</sup>, Yıldız ZORALIOĞLU<sup>2</sup>, Muhammed Furkan GÜL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Software Engineering, Sivas

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Sivas

<sup>3</sup>Sivas University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Computer Engineering, Sivas

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3626-553X>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0008-7482-0964>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0007-0486-0525>

\*Sorumlu yazar: sibelarslan@cumhuriyet.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 13.05.2024

Kabul tarihi: 13.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Optimizasyon  
Metasezgisel algoritma  
Test fonksiyonları

### ÖZ

Optimizasyon problemlerinin karmaşıklığının artmasıyla birlikte yeni metasezgisel algoritmalar geliştirilmektedir. Bu algoritmalar farklı problemler üzerinde üstün performanslar sergileyerek başarılarını göstermektedir. Bu çalışmada; son zamanlarda önerilen dört metasezgisel algoritma olan Yapay Sinekkuşu Algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm, AHA), Afrika Akbaları Optimizasyon Algoritması (African Vultures Optimization Algorithm, AVOA), Kerevit Optimizasyon Algoritması (Crayfish Optimization Algorithm, COA) ve Deniz Yırtıcıları Optimizasyon Algoritması'nın (Marine Predators Optimization Algorithm, MPA) 26 test fonksiyonu üzerindeki performansları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda algoritmaların farklı fonksiyonlar üzerinde çok küçük farklarla birbirlerinden daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda karşılaştırma sonuçları t-test istatistiksel testi ile değerlendirilmiştir. AVOA, çeşitli test fonksiyonları için çözümlerin kalitesini değerlendirmede diğer yeni metasezgisellere göre daha iyi veya karşılaştırılabilir performans göstermiştir. Gelecek araştırmalarda AVOA'nın farklı problemler üzerinde kullanılması hedeflenmektedir.

## A Comparative Analysis of African Vultures Optimization Algorithm with Current Metaheuristics

### Research Article

#### Article History:

Received: 13.05.2024

Accepted: 13.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Optimization  
Metaheuristic algorithm  
Test functions

### ABSTRACT

With the increasing complexity of optimization problems, new metaheuristic algorithms are being developed. These algorithms show their success by exhibiting superior performances on different problems. In this paper, the performance of four recently proposed metaheuristic algorithms, namely Artificial Hummingbird Algorithm (AHA), African Vultures Optimization Algorithm (AVOA), Crayfish Optimization Algorithm (COA) and Marine Predators Optimization Algorithm (MPA) on 26 test functions are compared. As a result of the comparisons, it was observed that the algorithms outperformed each other with very small differences on different functions. At the same time, the comparison results were evaluated by t-test statistical test. AVOA has shown better or comparable performance to other recent metaheuristics in evaluating the quality of solutions for several test functions. It is aimed to use AVOA on different problems in future research.

**To Cite:** Arslan S., Zoralioğlu Y., Gül MF. A Comparative Analysis of African Vultures Optimization Algorithm with Current Metaheuristics. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 325-352.

## 1. Introduction

Over the past few years, the difficulty of optimization problems has increased with the advancement of modern technology. Moreover, many metaheuristic algorithms inspired by nature have been developed to solve many optimization problems (Zhoa et al., 2022; Azizi et al., 2023; Deng et al., 2023; Ghaedi et al., 2023; Zhu et al., 2023). These algorithms solve large-scale problems by returning near-optimal results. In addition, newly developed metaheuristic algorithms prove their success by providing great superiority over the popular ones (Arslan, 2023). Among the popular metaheuristic algorithms, Genetic Algorithm (GA) is based on the principle of survival of the fittest (Mirjalili, 2019). Another famous algorithm in swarm-based population is Particle Swarm Optimization (PSO) (Kennedy et al. 1995). Artificial Bee Colony (ABC) (Karaboga, 2010), Ant Colony Optimization (ACO) (Dorigo et al., 2006) and Simulated Annealing (SA) (Dowland et al., 2012) are other popular population-based algorithms. Evaluating the performance of both these popular algorithms and the newly developed metaheuristics among themselves allows us to find the most suitable algorithm for solving the problems. For this purpose, it is necessary to analyze the performance of newly developed metaheuristics. One of the goals of this paper is to observe the effectiveness of the newly developed Artificial Hummingbird Algorithm (AHA) (Zhao et al., 2022), African Vultures Optimization Algorithm (AVOA) (Abdollahadeh et al., 2021), Crayfish Optimization Algorithm (COA) (Jia et al., 2023) and Marine Predator Optimization Algorithm (MPA) (Famarzi et al., 2020). Another goal of this paper is to determine the most successful algorithm among the algorithms tested on 26 test functions to solve real-world problems. Other contributions of the paper are as follows:

- To the best of our knowledge, there is no comparison of these four new metaheuristic algorithms in the literature.
- 26 test functions were used to analyze their success.
- According to the information obtained from the experimental results, AVOA showed the best success.

In the rest of the paper, Section 2 gives detailed information about the algorithms and describes their pseudocode or flowcharts. Section 3 presents the test functions used and the parameters of the algorithms. Section 4 provides information about the experimental results, convergence graphs and t-test results. Section 5 provides conclusions and future work.

## 2. Algorithms

In this section, newly proposed metaheuristics are explained in detail.

### 2.1. Artificial Hummingbird Algorithm (AHA)

AHA is developed by Zhao et al. in 2022 inspired by the behavior of the hummingbird (Zhao et al., 2022). The metaheuristic modelled the flight skills, memory capacity and foraging strategies of hummingbirds. First, a hummingbird evaluates the characteristics of its food sources, including the



content of individual flowers, nectar quality, nectar refilling and the time of last visit. In AHA, each food source is assumed to have the same number and type of flowers. A food source is a solution vector and the nectar filling rate of the source indicates the fitness value of the function. A good fitness value is associated with a high nectar filling rate of the food source. Since each hummingbird is assigned to a specific food source, the hummingbird and the food source have the same position. The hummingbird can memorize the position and nectar filling rate of this particular food source and share it with other hummingbirds. The level of frequentation of each food source by different hummingbirds is recorded in a visit table. If this level of visit is high, that food is prioritized. Likewise, to obtain more nectar, the food with the highest nectar filling rate among the food sources with the same highest visitation level is preferred. A visit table is used to find the target food source and this table is updated at each iteration. Based on the behaviors described, there are guided foraging, territorial foraging and migration foraging phases.

### 2.1.1. Guided foraging

The tendency to visit the food source with the maximum nectar volume means that it has a high nectar filling rate and is not visited much. At this phase, the food sources with the highest level of visit are expected to be identified and then the one with the highest nectar filling rate is selected as the target food source. Once the target food source has been selected, the hummingbird can fly towards it to feed. Three flight skills are used and modelled during foraging in the AHA: omnidirectional, directional and axial flights. These flight patterns can be extended to a  $d$ -D domain. The mathematical model of axial flight is as given in Eq 1.

$$D^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = \text{randi}([1, d]) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad i = 1, \dots, d \quad (1)$$

The models for directional and omnidirectional flights are defined as in Eq 2-3 respectively.

$$D^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = P(j), j \in [1, k], P = \text{randperm}(k), k \in [2, [r_1 \cdot (d - 2)] + 1] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad i = 1, \dots, d \quad (2)$$

$$D^{(i)} = 1 \quad i = 1, \dots, d \quad (3)$$

where  $\text{randi}([1, d])$  generates a random number from the number range from 1 to  $d$ .  $\text{randperm}(k)$  produces a random integer permutation from the numbers from 1 to  $k$ .  $r_1$  a randomly generated number between  $[0, 1]$ . The mathematical model representing the guided foraging behaviour and candidate food source is given in Eq. 4-5.

$$v_i(t + 1) = x_{i,\text{tar}}(t) + a \cdot D \cdot (x_i(t) - x_{i,\text{tar}}(t)) \quad (4)$$

$$a \sim N(0, 1) \quad (5)$$

where  $x_i(t)$  represents the position of the  $i$ th food source at time  $t$ .  $x_{i,\text{tar}}(t)$  is the position of the target food source, and the  $i$ th bird is planning to visit this source.  $a$  is the guided factor and follows a normal distribution. The update of the position of the  $i$ th food source is modeled in Eq. 6.

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1) & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (6)$$

where  $f(\cdot)$  is the value of the fitness function. In this model, if the nectar filling rate of the candidate food source is better compared to the previous one, it indicates that the hummingbird abandons the previous food source and stays with the candidate food source in Eq. 4. According to the visit table, a hummingbird can find its desired target food source in each iteration. The visit table keeps track of how long each food source has been unvisited by the same hummingbird since the last time it was visited. A long absence indicates a high visit level. Therefore, each hummingbird wants to find the food source according to the high visit level. If more than one source has the same level, the one with the best nectar filling rate is selected. Each hummingbird in the population travels to the target food source using Eq. 4 to the target food source. When guided foraging occurs in each iteration, the visit levels for that hummingbird are increased by one. At the same time, the visit level of the visited target food source is initialized to zero. Once this step has been performed, the food source is not changed, unless a better nectar filling rate solution is available. Updating a food source where the hummingbird of interest resides means updating the visit level for the others. The visit level to be updated is expressed as the highest level of the other food sources increased by 1.

### 2.1.2. Territorial foraging

After visiting the target food source where the flower nectar is consumed, a new food source can be sought to visit other available food sources. Therefore, the hummingbird can easily move to a neighbouring region within its territory, where it can find a new food source as a candidate solution that may be better than the current solution. The mathematical model of the territorial search and candidate food source at this stage is given in Eq. 7-8.

$$v_i(t+1) = x_i(t) + b \cdot D \cdot (x_i(t)) \quad (7)$$

$$b \sim N(0,1) \quad (8)$$

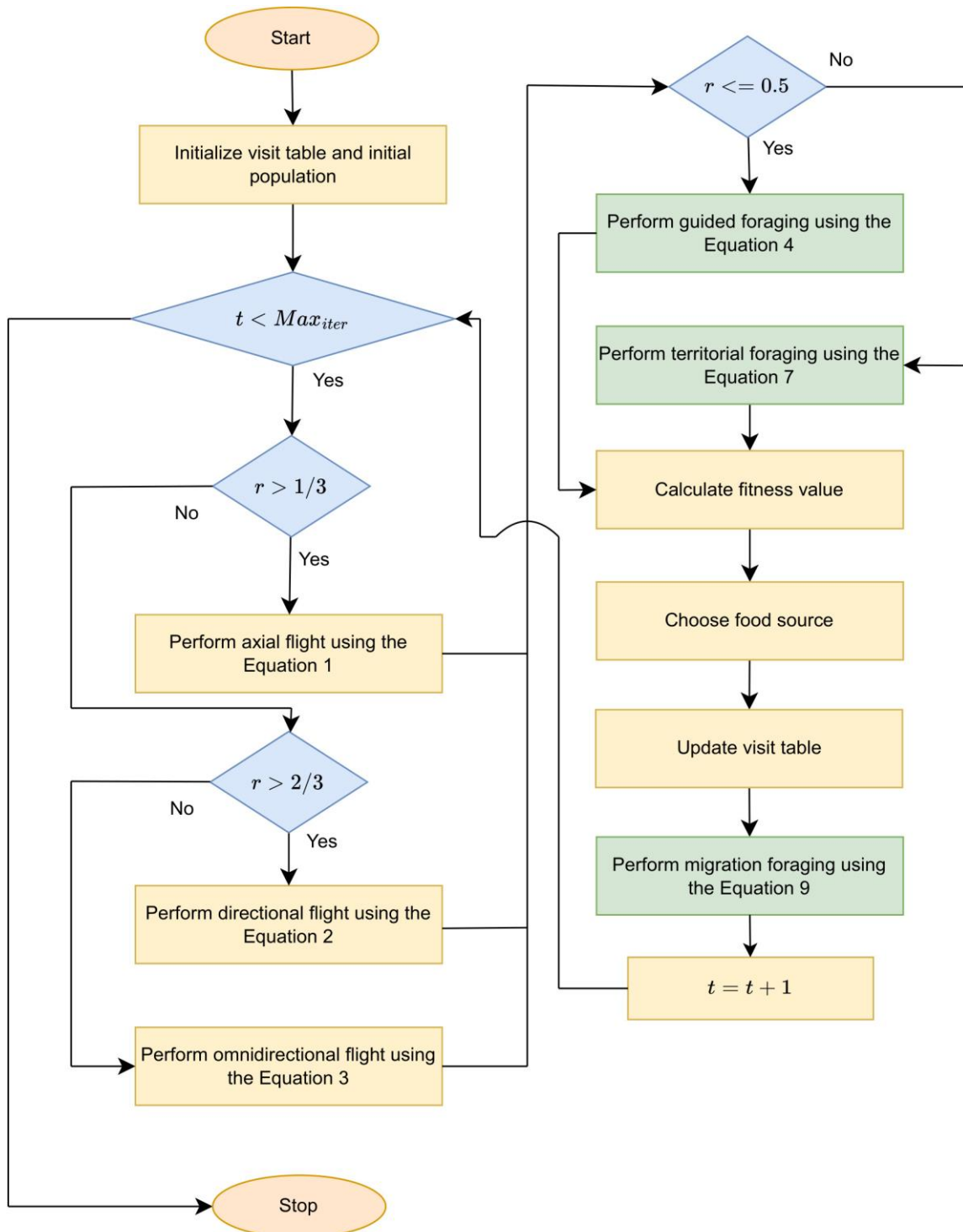
where  $b$  is the territorial factor and has a normal distribution. After this step, the visit table should be updated.

### 2.1.3. Migration foraging

In the event of food shortages in the area that the hummingbird usually visits, it migrates to another distant food source. A migration coefficient is defined in the AHA. If the number of iterations exceeds the predefined value of the migration coefficient, the hummingbird that settled on the food source exhibiting the lowest rate of nectar filling will migrate to a new food source. After the hummingbird leaves the food source, the visit table will be updated. The modelling of foraging from the source with the worst nectar filling rate towards the new randomly generated source is given in Eq. 9.

$$x_{wor}(t+1) = Low + r \cdot (Up - Low) \quad (9)$$

where  $x_{wor}$  is the ratio with the worst nectar filling in the population.  $Low$  and  $Up$  are the lower and upper bounds. The flowchart of AHA is given in Figure 1.



**Figure 1.** The flowchart of AHA (Hosseinzadeh et al., 2024)

## 2.2. African Vultures Optimization Algorithm (AVOA)

AVOA is a recent metaheuristic developed by Abdollahzadeh et al (Abdollahzadeh et al., 2021). Based on the foraging and location behavior of vultures. In this metaheuristic, each vulture represents a

solution, and the fitness value is calculated from all solutions. According to this fitness value, vultures are categorized into two basic groups to find food and survive as a group. In the first group, the vulture with the highest value is considered the first and best vulture of the group, and in the second group, the vulture with the second highest value is considered the first and best vulture of the group. The other vultures are used to move or replace these two best vultures. In AVOA, the worst solution is considered to be the weakest and hungry vulture, and they try to avoid this vulture and get closer to the best vulture. AVOA consists of four phases: identifying the best vulture in the group, calculating the hunger rate of vultures, search and exploitation.

### 2.2.1. Identifying the best vulture in the group

The initial population is generated, and the fitness values of all solutions are computed. The top-performing solution in the first group is considered the best, while the second-best solution is identified in the second group. The remaining solutions in both groups adjust their positions towards these top solutions. In each iteration, the shift is determined based on the computed fitness values.

### 2.2.2. Calculating the hunger rate of vultures

Vultures have the most energy when they are full and can fly long distances in search of food (Xue et al., 2018). However, when they are not full, they cannot fly for a long time in search of food because they do not have enough energy. To improve performance in solving complex problems, Eq. 10 is modelled.

$$t = h \times \left( \sin^w \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{\text{iter}}{\text{max}_{\text{iter}}} \right) + \cos \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{\text{iter}}{\text{max}_{\text{iter}}} \right) - 1 \right) \quad (10)$$

where  $h$  is obtained from random values between -2 and 2.  $\text{iter}$  and  $\text{max}_{\text{iter}}$  refer to the current and the maximum iteration, respectively. Hunger rates of vultures, which tend to decrease, are modelled in Eq. 11.

$$F = (2\text{rand}_1 + 1) \times z \times \left( 1 - \frac{\text{iter}}{\text{max}_{\text{iter}}} \right) + t \quad (11)$$

where  $z$  represents a randomly chosen number within the range of -1 to 1 and changes at each iteration.  $\text{rand}_1$  is a parameter that takes random values between 0 and 1. If  $z$  is less than 0, it indicates the vulture is hungry, whereas if it exceeds 0, it signifies the vulture is full. If the  $F$  value is greater than or equal to 1, vultures search for food in various locations to feed and the exploration phase in AVOA begins. If this value is less than 1, vultures forage in neighbouring solutions and the exploitation phase begins.

### 2.2.3. Exploration

In this phase, the vultures choose two strategies and search different areas using the parameter  $p_1$ . This parameter is evaluated before the search process and takes a value between 0 and 1. For the selection of strategies, Eq. 12 is used.

$$P_i(t+1) = \begin{cases} R(i) - |X \times R(i) - P(i)| \times F & \text{if } p_1 \geq rand_{p_1} \\ R(i) - F + rand_2 \times ((u_b - l_b) \times rand_3 + l_b) & \text{if } p_1 < rand_{p_1} \end{cases} \quad (12)$$

where  $R(i)$  represents one of the best vultures. The parameter  $X$  represents the distance it travelled to protect the food,  $rand_2$  and  $rand_3$  are random numbers between [0,1]. The current vector position, represented by  $P(i)$ , indicates the distance. The lower boundary of the search space is  $l_b$  and the upper boundary is  $u_b$ . As the value of  $rand_3$  gets closer to 1, the search for different space areas and diversity in AVOA increases. The parameter  $rand_{p_1}$  takes a random value between [0,1] to select one of the two strategies.

### 2.2.4. Exploitation

When the parameter  $F$ , i.e. the hunger rate, is less than 1, AVOA enters the exploitation. This phase is separated into two selections according to whether  $F$  is smaller or larger than 0.5. These two choices depend on the values of the randomly generated  $p_2$  and  $p_3$ . In the first choice, the vultures are full and have enough energy. This may lead them into conflicts over food acquisition. In the second selection, the behavior of the vultures makes the various vulture species aggressive in besieging and foraging on the food source. These behaviors depend on the parameter  $p_2$  and are modelled in Eq. 13.

$$P_i(t+1) = \begin{cases} |X \times R(i) - P(i)| \times & \\ \quad \text{if } p_2 \geq rand_{p_2} & \\ R(i) - R(i) \times \left( \frac{P(i)}{2\pi} \right) \begin{pmatrix} rand_5 \\ \times \cos(P(i)) \\ + rand_6 \times \sin(P(i)) \end{pmatrix} & \\ \quad \text{if } p_2 < rand_{p_2} & \end{cases} \quad (13)$$

In Eq. 13, parameters  $rand_4$ ,  $rand_5$  and  $rand_6$  take randomly generated values between 0 and 1. If the parameter  $F$  is less than 0.5, the second selection of this phase takes place. In this selection, a random value between 0 and 1 is generated for  $rand_{p_3}$ . If the parameter  $p_3$  is greater than or equal to  $rand_{p_3}$ , multiple vultures gather on the food source and competition occurs between them to get the food. In the other case, a siege war is fought between the vultures. The mathematical model of this selection is shown in Eq. 14.

$$P(i+1) = \begin{cases} \text{Eq. 16 if } p_3 \geq rand_{p_3} \\ \text{Eq. 17 if } p_3 < rand_{p_3} \end{cases} \quad (14)$$

The movement of the vultures to congregate on the food source they have found is described in Eq. 15 is expressed in Eq. 16.

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{BestVulture}_1(i) \\ &- \frac{\text{BestVulture}_1(i) \times P(i)}{\text{BestVulture}_1(i) - P(i)^2} \times F \\ A_2 &= \text{BestVulture}_2(i) \\ &- \frac{\text{BestVulture}_2(i) \times P(i)}{\text{BestVulture}_2(i) - P(i)^2} \times F \end{aligned} \quad (15)$$

where, in the current iteration,  $\text{BestVulture}_1(i)$  and  $\text{BestVulture}_2(i)$  are the best vultures.

$$P(i+1) = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (16)$$

When  $F < 0.5$ , the leader vultures of the groups are hungry and do not have enough energy to cope with the group members. In this case, the leader vultures move in different directions. Eq. 17 gives a model of the movement.

$$P(i+1) = R(i) - |R(i) - P(i)| \times F \times \text{LF}(d) \quad (17)$$

where  $d$  is the problem size,  $|R(i) - P(i)|$  is the distance of the vulture. To increase the efficiency of AVOA, Levy Flight (LF) (Yang, 2010; Yang, 2009) was also included. Modelling of this flight is as in Eq. 18.

$$\text{LF}(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}, \sigma \left( \frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin\left(\frac{\pi\rho}{2}\right)}{\Gamma(1 + \beta/2) \times \beta \times 2 \left(\frac{\beta-1}{2}\right)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (18)$$

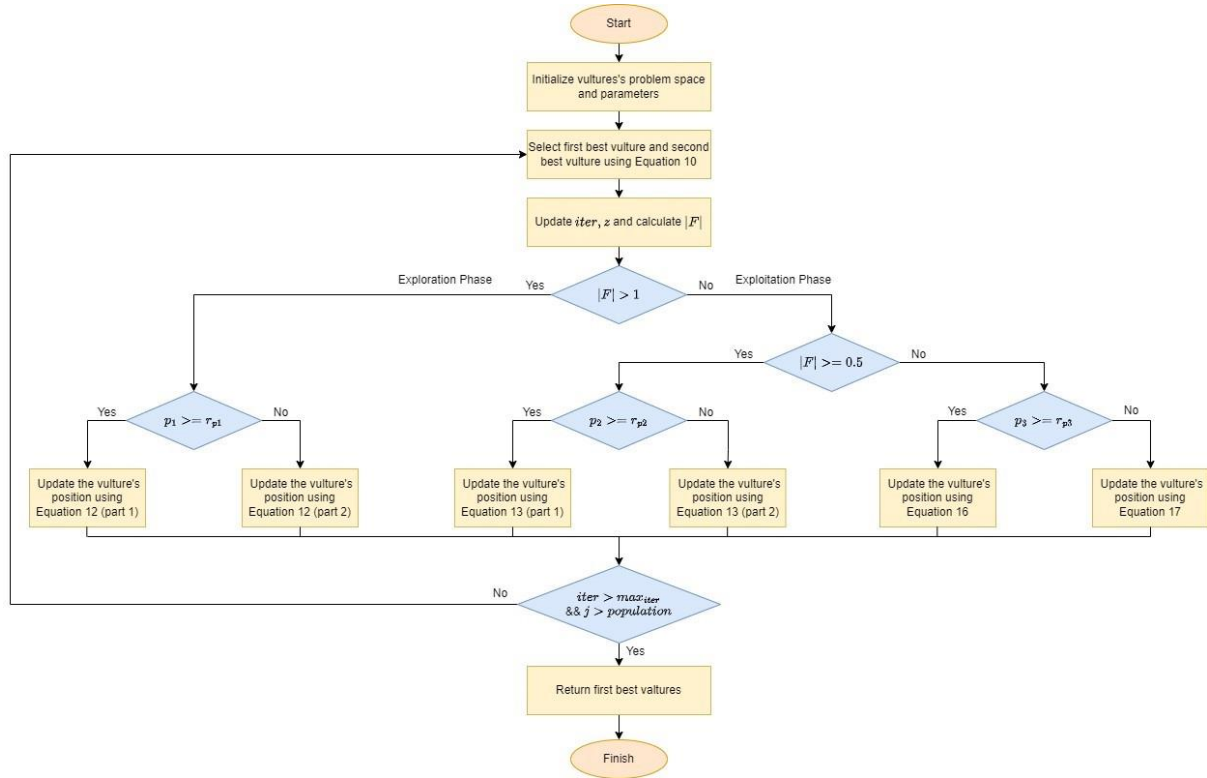
where  $u$  and  $v$  are random numbers generated between 0 and 1 and  $\beta$  is a constant value set at a default of 1.5. The flowchart of AVOA is given in Figure 2.

### 2.3. Crayfish Optimization Algorithm (COA)

COA is a proposed by Jia et al. in 2023, inspired by the behavior of crayfish (Jia et al., 2023). The metaheuristic was developed in three stages, based on the behaviors of summer holiday destination, competition and foraging. In the holiday destination phase, the crayfish find a cave for a holiday and settle down. When there is more than one crayfish, there is a competition for the found cave. This behavior is modelled as the competition phase. Foraging behavior is the stage in which the food is broken down according to the size of the food. The transition between these stages depends on the air temperature. The optimum air temperature range is 20-30°C and the amount of feeding of crayfish can be affected by temperature. The temperature of the crayfish's environment is defined in Eq. 19.

$$\text{temp} = \text{rand} \times 15 + 20 \quad (19)$$

where  $temp$  is the temperature of the environment in which the crayfish are found. The mathematical model of crayfish intake as a function of temperature is given in Eq. 20.



**Figure 2.** The flowchart of AVOA (Abdollahadeh et al., 2021)

### 2.3.2. Competition phase (Exploitation)

Exploitation is choosing the best among the existing solutions. A crayfish enters a competitive phase and performs exploitation in order not to give the existing cave it has found to another crayfish. When there is more than one crayfish interested in the cave, the temperature is more than 30°C and the random number is greater than or equal to 0.5. In this case, the crayfish compete for the cave. The mathematical model of this competition is given in Eq. 24.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t - X_{z,j}^t + X_{shade} \quad (24)$$

Crayfish in  $X_i$  update their position relative to another crayfish in  $X_z$ . This improves the exploration capability and extends the range of the COA. A random crayfish is represented by  $z$ .

### 2.3.3. Foraging Phase (Exploitation)

In the foraging phase COA develops the exploitation by approaching the optimum solution. In this exploitation, the temperature must be less than or equal to 30°C for the crayfish to feed. When they find food, they decide according to its size. If the food is small, they eat it directly, but if it is large, they shred it up and eat it with their second and third legs. The food size,  $Q$ , is given in Eq. 25.

$$Q = C_3 \times rand \times (fitness_i / fitness_{food}) \quad (25)$$

---

**Algorithm 1 COA**

---

1. Initialize parameters of COA
  2. Randomly generate an initial population
  3. Calculate the fitness value of the population to get  $X_G, X_L$
  4. **while** ( $iter < max_{iter}$ )
  5.     Defining temp by Eq. 19
  6.     **if** ( $temp > 30$ )
  7.         Define cave  $X_{shade}$  according to Eq. 21
  8.         **if** ( $rand < 0.5$ )
  9.             Crayfish conducts the summer resort stage according to Eq. 22
  10.         **else**
  11.             Crayfish compute for caves through Eq. 24
  12.         **end if**
  13.     **else**
  14.         The food size  $Q$  and food intake  $p$  are obtained by Eq. 20 and Eq. 25
  15.         **if** ( $Q > 2$ )
  16.             Crayfish shreds food by Eq. 26
  17.             Crayfish foraging according to Eq. 27
  18.         **else**
  19.             Crayfish foraging according to Eq. 28
  20.         **end if**
  21.     **end if**
  22.     Update fitness values,  $X_G, X_L$
  23.      $iter = iter + 1$
  24. **end while**
- 

The constant  $C_3$  represents the largest food and its defined value for the algorithm is 3.  $fitness_i$  denotes the fitness value of the  $i$ th crayfish, while  $fitness_{food}$  represents the fitness value of the food position. It is determined that the food is very large if  $Q > (C_3 + 1)/2$ . In this case, the crayfish will shred the food with its first leg. The mathematical model for this fragmentation is given in Eq. 26.

$$X_{food} = \exp\left(-\frac{1}{Q}\right) \times X_{food} \quad (26)$$

where  $X_{food}$  represents the optimal solution. When the food is cut into small pieces, it is taken into the mouth using the second and third legs. The search equation for the food eaten by the crayfish is given by Eq. 27. When  $Q \leq (C_3 + 1)/2$ , the crayfish moves towards the food and eats it with its first leg. This situation is modelled in Eq. 28. COA's pseudo code is given in Algorithm 1.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + X_{food} \times p \times (\cos(2 \times \pi \times rand) - \sin(2 \times \pi \times rand)) \quad (27)$$



$$X_{i,j}^{t+1} = (X_{i,j}^t - X_{\text{food}}) \times p + p \times \text{rand} \times X_{i,j}^t \quad (28)$$

## 2.4. Marine Predators Algorithm (MPA)

MPA is a new metaheuristic developed by Faramarzi et al. in 2020 inspired by the attack behavior of marine predators on their prey (Faramarzi et al., 2020). In the metaheuristic, predators use two basic motions, Brownian and Levy, when targeting their prey. In order to achieve a balance between these two motions, sea predators calculate a velocity ratio based on their current position relative to the prey. MPA initially generates solutions by randomly distributing them within the search space as defined in Eq. 29.

$$X_0 = X_{\min} + B(X_{\max} - X_{\min}) \quad (29)$$

where  $X_{\min}$  and  $X_{\max}$  are the minimum and maximum limits for the search space. The parameter  $B$  takes randomly generated values between 0 and 1. MPA consists of Elite and Prey matrices. The Elite matrix identifies the best hunter. Thus, the hunter ensures that the prey is searched and detected by using its location. This matrix is modelled in Eq. 30.

$$\text{Elite} = \begin{bmatrix} X_{1,1}^I & \cdots & X_{1,d}^I \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1}^I & \cdots & X_{n,d}^I \end{bmatrix} \quad (30)$$

where  $n$  and  $d$  are the population and problem size respectively.  $\overline{X}^I$  is defined as the best sea predator that forms the Elite matrix with  $n$  iterations. This matrix is updated as the predator may change because of each iteration.

In the MPA, the population consists of predators and prey. The main reason for this formation is that while the predator is looking for prey, it can also become prey for other predators. To update the positions of the predators, the Prey matrix given in Eq. 31 is used to update the positions of the predators.

$$\text{Prey} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & \cdots & X_{1,d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n,1} & \cdots & X_{n,d} \end{bmatrix} \quad (31)$$

where  $X_{i,j}$  is the  $j$ th dimension of the  $i$ th prey. MPA performs its steps according to three rates depending on the prey and predator speed.

### 2.4.1. First step

This step is used for high search ability when the step size or movement speed is large. This is the case when the predator moves faster than the prey. If the current iteration is less than one third of the maximum iteration, the position is updated according to Eq. 32. Also, the best strategy is for the hunter not to move at all. This rule is given mathematically below.

$$\text{if } \text{iter} < \frac{1}{3} \text{Max}_{\text{iter}} \text{ then} \quad (32)$$

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\text{Stepsize}}_i &= \vec{R}_B \otimes (\overrightarrow{\text{Elite}}_i - \vec{R}_B \otimes \overrightarrow{\text{Prey}}_i) \quad i = 1, 2, 3 \dots n \\ \overrightarrow{\text{Prey}}_i &= \overrightarrow{\text{Prey}}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{\text{stepsize}}_i\end{aligned}$$

where  $\otimes$  stands for multiplication on an element-by-element basis.  $R_B$  denotes Brownian motion and takes a random number vector.  $\vec{R}_B \otimes \overrightarrow{\text{Prey}}_i$  denotes the simulation of the motion of the prey. The parameter  $P$  is equal to 0.5 and  $R$  is a vector taking random values between 0 and 1.

#### 2.4.2. Second step

In this step, search and exploitation are of equal importance, and the prey and predator move at the same speed. Thus, search tends to turn into exploitation. Half of the individuals in the population are used for search and the other half for exploitation at this stage. The prey plays the role of exploitation and the predator the role of search. Prey adopt Lévy motion and predators adopt Brownian motion. The equations for this step are defined as follows.

$$\text{if } \frac{1}{3} * t_{max} < t_{current} < \frac{2}{3} * t_{max} \quad (33)$$

The number of iterations is between one-third and two-thirds of the maximum iteration. For the first half of the population the following equations are used.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\text{Stepsize}}_i &= \vec{R}_L \otimes (\overrightarrow{\text{Elite}}_i - \vec{R}_L \otimes \overrightarrow{\text{Prey}}_i) \quad i = 1, \dots, n/2 \\ \overrightarrow{\text{Prey}}_i &= \overrightarrow{\text{Prey}}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{\text{Stepsize}}_i\end{aligned} \quad (34)$$

where  $R_L$  is a random number vector and represents the Lévy motion. The movement of the prey is modelled by  $\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{\text{Prey}}_i$ . Stepsize are small steps that lead to better exploitation. For the rest of the population the following modelling is used.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\text{Stepsize}}_i &= \vec{R}_B \otimes (\vec{R}_B \otimes \overrightarrow{\text{Elite}}_i - \overrightarrow{\text{Prey}}_i) \quad i = n/2, \dots, n \\ \overrightarrow{\text{Prey}}_i &= \overrightarrow{\text{Elite}}_i + P \cdot CF \otimes \overrightarrow{\text{stepsize}}_i\end{aligned} \quad (35)$$

$$CF = \left(1 - \frac{iter}{Max_{iter}}\right)^{\left(2 \times \frac{iter}{Max_{iter}}\right)} \quad (36)$$

where  $CF$  is the control factor representing the movement of the predator. In order not to mathematically model the Brownian motion of the predator, the elite is multiplied by  $R_B$  and the prey position is updated according to the predator's motion.

#### 2.4.3. Third step

This step is when the speed of the predator is higher than that of the prey and corresponds to a high exploitation ability. When the number of iterations is higher than two thirds of the maximum iteration, the position is updated by the Lévy equation. Below are the equations used.

$$\text{if } iter > \frac{2}{3} Max_{iter} \text{ then} \quad (37)$$

$$\overrightarrow{\text{Stepsize}}_i = \vec{R}_L \otimes (\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{\text{Elite}}_i - \overrightarrow{\text{Prey}}_i) \quad i = 1, \dots, n$$

$$\overrightarrow{\text{Prey}}_i = \overrightarrow{\text{Elite}}_i + \text{P.CF} \otimes \overrightarrow{\text{Stepsize}}_i$$

In addition, two different environmental effects, fish aggregating devices (FADs) and eddy transformation, are used to better model marine predators in the MPA. This transformation is modelled in Eq. 38.

$$\overrightarrow{\text{Prey}}_i = \begin{cases} \overrightarrow{\text{Prey}}_i + \text{CF} \left[ \begin{array}{c} \vec{X}_{min} \\ +\vec{R} \otimes \left( \begin{array}{c} \vec{X}_{max} \\ -\vec{X}_{min} \end{array} \right) \end{array} \right] \otimes \vec{U} & \text{if } r \leq \text{FADs} \\ \overrightarrow{\text{Prey}}_i + [\text{FADs} (1 - r) + r] \begin{pmatrix} \overrightarrow{\text{Prey}}_{r1} \\ -\overrightarrow{\text{Prey}}_{r2} \end{pmatrix} & \text{if } r > \text{FADs} \end{cases} \quad (38)$$

FAD is equal to 0.2 and is expressed as a probabilistic effect.  $\vec{U}$  is a binary vector of sequences generated by generating randomly between [0,1]. If the generated number is less than 0.2, the sequence takes the value 0, otherwise it takes the value 1.  $r$  is a number that takes a random value between [0,1].  $\vec{X}_{min}$  and  $\vec{X}_{max}$  indicate the lower and upper limits of the dimensions. Finally,  $r1$  and  $r2$  represent the random indices of the prey matrix. MPA's pseudo code is presented Algorithm 2.

---

#### Algorithm 2 MPA

---

1. Initialise **Step**, **P**,  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$ .
  2. **while**  $t < t_{max}$  **do**
  3. Calculate  $f(\overrightarrow{\text{Prey}}_i)$  for each  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$
  4. Create the Elite matrix.
  5. Memorise it.
  6. Update CF according to Eq. 36
  7. **for each**  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$  **do**
  8.     **if**  $(t_{current} < \frac{1}{3} * t_{max})$  **then**
  9.         Position  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$  according to Eq. 32.
  10.     **else**
  11.         **if**  $(\frac{1}{3} * t_{max} < t_{current} < \frac{2}{3} * t_{max})$  **then**
  12.             **if**  $(i < \frac{1}{2} * n)$  **then**
  13.                 Position  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$  according to Eq. 34.
  14.             **else**
  15.                 Position  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$  according to Eq. 35.
  16.             **end if**
  17.     **else**
  18.         Position  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$  according to Eq. 37.
  19.     **end if**
  20. **end for**
  21. Calculate  $f(\overrightarrow{\text{Prey}}_i)$  for each  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$ .
  22. Update the position and fitness value of the best  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$ .
  23. Memorize the best  $\overrightarrow{\text{Prey}}_i$ .
  24. Apply the **FAD** effect according to Eq. 38.
  25. **end for**
  26.  $t_{current} ++$
  27. **end while**
-

The ability to recall the best places where the predator has been successful in searching for prey is related to the so-called environmental response, the so-called marine memory. In MPA, this ability is used to save memory. Once the effect of the FADs has been achieved and the location of the prey has been updated, the matrix is evaluated to increase the Elite. In the current iteration, after comparing the fitness value of each solution with the value from the previous iteration, the best one is selected. This greedy selection aims to improve the quality of the solution during each iteration. In addition, it helps hunters to remember the previous locations of the hunting areas with a successful search.

## 2.5. Detailed Comparison of Algorithms

The features of the algorithms are compared in detail and shown in Table 1. The algorithms have the differences listed in the table, which are due to their special features.

Table 1. Detailed comparisons of algorithms

Feature	AHA	AVOA	COA	MPA
Inspiration	Hummingbirds' flight skills and foraging strategies	African vultures' foraging and social behavior	Crayfish's summer resort, competition, and foraging behaviors	Foraging strategies of marine predators
Key Mechanisms	Three foraging strategies (guided, territorial, migration), visit table	Coefficient vector ( $F$ ), phase shift mechanism, rotational search	Temperature regulation, three behavioral stages	Lévy and Brownian movements, three optimization phases
Exploration Techniques	Guided foraging, migration foraging	Rotational search equation, phase shift for diverse random motions	Temperature-based behavior regulation	Lévy flights for global search
Exploitation Techniques	Territorial foraging, memory update mechanism	Utilization of the second-best solution, four exploitation mechanisms	Local search within territorial foraging	Brownian motions for local refinement
Memory Management	Visit table to track nectar sources and visit frequency	None	None	None
Adaptive Mechanisms	Adaptive step sizes, flight pattern adjustments	Adaptive coefficients	Adaptive behaviors based on temperature	Adaptive step sizes
Computational Complexity	Low	Low	Low	Low
Unique Features	Unique flight skills simulation (axial, diagonal, omnidirectional)	Phase shift mechanism to prevent local optima trapping	Multi-stage foraging mechanism, temperature regulation for phase control	Three distinct optimization phases, combination of Lévy and Brownian motion

### 3. Experimental Design

In this section, the test functions to be used in performance analysis and the parameters used in the algorithms are explained.

#### 3.1. Test functions

In this article, 26 test functions are used to evaluate the algorithms' performance.  $F_1$  to  $F_{13}$  are unimodal functions and are given in Table 2. Likewise, the rest are multimodal functions and are presented in Table 3.

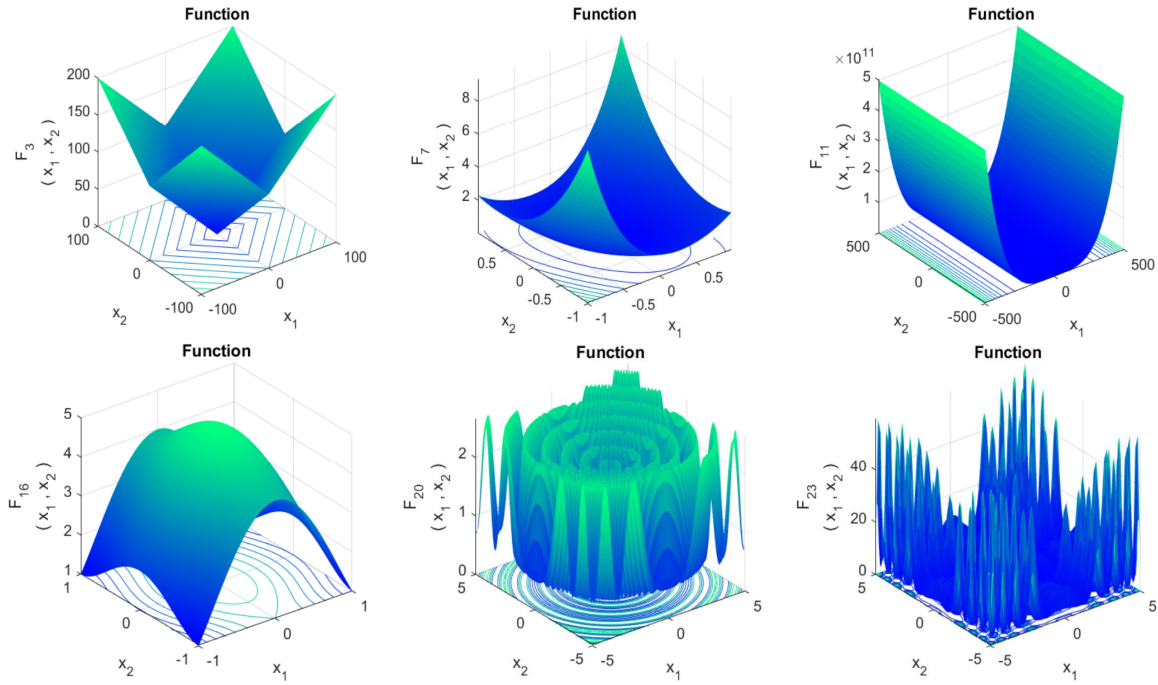
Table 2. Unimodal test functions

Unimodal function	Range	Dimension	$F_{min}$
$F_1$ - Sphere	[-100, 100]	50	0
$F_2$ - Powell Sum	[-1, 1]	50	0
$F_3$ - Schwefel's 2.20	[-100, 100]	50	0
$F_4$ - Schwefel's 2.21	[-100, 100]	50	0
$F_5$ - Step	[-100, 100]	50	0
$F_6$ - Quartic Noise	[-1.28, 1.28]	50	0
$F_7$ - Rosenbrock	[-30, 30]	50	0
$F_8$ - Brown	[-1, 4]	50	0
$F_9$ - Dixon and Price	[-10, 10]	50	0
$F_{10}$ - Powell Singular	[-4, 5]	50	0
$F_{11}$ - Zakharov	[-5, 10]	50	0
$F_{12}$ - Booth	[-10, 10]	2	0
$F_{13}$ - Brent	[-10, 10]	2	0

Table 3. Multimodal test functions

Multimodal function	Range	Dimension	$F_{min}$
$F_{14}$ - Schwefel's 2.26	[-500, 500]	50	0
$F_{15}$ - Rastrigin	[-5.12, 5.12]	50	0
$F_{16}$ - Qing	[-500, 500]	50	0
$F_{17}$ - Alpine N. 1	[-10, 10]	50	0
$F_{18}$ - Xin-She Yang	[-5, 5]	50	0
$F_{19}$ - Ackley	[-32, 32]	50	0
$F_{20}$ - Salomon	[-100, 100]	50	0
$F_{21}$ - Griewank	[-100, 100]	50	0
$F_{22}$ - Periodic	[-10, 10]	50	0.9
$F_{23}$ - Xin-She Yang N.2	[-2pi, 2pi]	50	0
$F_{24}$ - Adjiman	[-1, 2]	2	-2.02181
$F_{25}$ - Bird	[-2pi, 2pi]	2	-106.7645
$F_{26}$ - Egg crate	[-5, 5]	2	0

In the tables, the dimensions of  $F_{12}$  and  $F_{13}$  for unimodal functions and  $F_{25}$  and  $F_{26}$  for multimodal functions are taken as 2. For all other functions, the dimension value is set to 50. In addition,  $F_{min}$  is the minimum value that a function can reach, and the range is both the upper and lower bounds within the search space. In addition, plot graphs of some functions are shown in Figure 3.



**Figure 3.** Plot graphs of some test functions

### 3.2. Parameters

Each algorithm specific parameter is given in Table 4. The population size and the maximum iteration were taken the same for all of them. Descriptions of the parameters are also given in the table.

**Table 4.** Parameters of algorithms

Algorithm	Parameter	Value	Description
AHA	Migration coefficient	$2n$	Migration coefficient depending on population size.
	$p_1$	0.6	Exploration and exploitation are the parameters for the choice of strategy. It gives the probability parameters for selecting the first- and second-best culture. Parameter whether to terminate exploration or exploitation.
AVOA	$p_2$	0.4	
	$p_3$	0.6	
	$L_1$	0.8	
	$L_2$	0.2	
COA	$w$	2.5	It is used to control the intake of crayfish at different temperatures. Refers to the optimum temperature for crayfish. Explains the food factor parameter.
	$C_1$	0.2	
	$\sigma$	3	
	$\mu$	25	
MPA	$C_3$	3	It is the impact factor parameter. It is a constant parameter.
	FADs	0.2	
All Algorithms	$P$	0.5	
	Population size	50	
	Max. iterations	1000	

## 5. Simulation Results

In this paper, the algorithms run 30 times independently for comparison. The simulations were carried out on MATLAB R2022b platform on an i5-12450H machine with 2.5Ghz speed and 8 GB RAM. The simulation results of unimodal and multimodal functions are given in Table 5 and Table 6, respectively. The algorithms with the lowest average and best values are presented in bold.

Simulation results evaluations for unimodal functions are as follows:

- Considering the technical characteristics of functions and algorithms in general, the following conclusions can be drawn.  $F_1$  is a simple continuous function. It behaves the same in all dimensions. Therefore, it is easy to optimize and all functions except MPA obtained the optimum value. MPA generated results very close to the optimum, which may be due to the effect of Lévy and Brownian motions, local minima avoidance strategies and simulation of environmental effects.
- $F_2$  is a function that evaluates the contribution of each dimension separately. For an algorithm to be successful in this function, it needs to have adaptive parameter tuning and strong global search capabilities. Since all the algorithms we used in the comparison successfully optimize  $F_2$ , it can be said that they have these capabilities.
- In the functions where AHA could not achieve the optimum value, it performed very close to the other algorithms. For example,  $F_3$  shows a very small difference of approximately 5.23E-171 compared to the others except MPA.
- In  $F_3$  and  $F_4$  functions, AVOA and COA's global search capability and ability to avoid local minima in a large search area made it successful in this function.
- $F_5$  has a flat and stepped structure and divides the solution space with sharp changes. Therefore, it can be interpreted that the AHA that is successful in this function has the ability to sample the solution space well.
- $F_6$  is a high-order polynomial function with a random noise term added. This function tests how robust the algorithms are to random noise. It can be evaluated that COA is closer to the optimum value (1.44E-08) than other algorithms with a noise-resistant and stable optimization capability.
- $F_7$  has a narrow and oblique solution path that makes it difficult to reach the global optimum. This function tests the algorithms' ability to avoid local minima while reaching the global optimum. It can be said that AVOA and COA, which are successful in this function, are due to their high routing ability and strong local search capabilities.

**Table 5.** Simulation results for unimodal functions

Unimodal functions	Algorithms	AHA	AVOA	COA	MPA
$F_1$	Best	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	3.16E-48
	Worst	1.56E-292	0.00E+00	0.00E+00	4.36E-45
	Average	5.22E-294	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	7.47E-46
	Std	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.04E-45
$F_2$	Best	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	2.13E-133
	Worst	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.34E-118
	Average	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	2.16E-119
	Std	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.16E-118
$F_3$	Best	5.23E-171	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	2.22E-26
	Worst	1.58E-148	0.00E+00	0.00E+00	3.49E-24
	Average	5.41E-150	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	6.14E-25
	Std	2.88E-149	0.00E+00	0.00E+00	8.35E-25
$F_4$	Best	3.01E-151	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	1.76E-18
	Worst	4.03E-134	0.00E+00	0.00E+00	3.27E-17
	Average	1.35E-135	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	1.21E-17
	Std	7.36E-135	0.00E+00	0.00E+00	7.68E-18
$F_5$	Best	<b>0.00E+00</b>	4.95E-09	2.73E-04	1.18E-08
	Worst	0.00E+00	4.42E-08	9.78E-01	6.99E-08
	Average	<b>0.00E+00</b>	1.57E-08	2.10E-01	2.87E-08
	Std	0.00E+00	8.11E-09	2.70E-01	1.44E-08
$F_6$	Best	3.06E-06	2.78E-06	<b>1.44E-08</b>	2.03E-04
	Worst	2.11E-04	1.71E-04	1.02E-04	1.46E-03
	Average	8.18E-05	3.91E-05	<b>2.70E-05</b>	6.53E-04
	Std	5.44E-05	3.90E-05	2.90E-05	2.97E-04
$F_7$	Best	5.86E-286	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	1.10E-05
	Worst	8.36E-248	0.00E+00	0.00E+00	2.41E-04
	Average	2.80E-249	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	6.58E-05
	Std	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.95E-05
$F_8$	Best	<b>0.00E+00</b>	3.95E-27	6.34E-18	<b>0.00E+00</b>
	Worst	0.00E+00	1.38E-20	4.55E-12	0.00E+00
	Average	<b>0.00E+00</b>	1.07E-21	4.04E-13	<b>0.00E+00</b>
	Std	0.00E+00	2.98E-21	9.27E-13	0.00E+00
$F_9$	Best	4.50E+01	<b>9.13E-08</b>	4.39E+01	4.25E+01
	Worst	4.70E+01	1.45E-05	4.63E+01	4.47E+01
	Average	4.55E+01	<b>4.32E-06</b>	4.48E+01	4.33E+01
	Std	3.94E-01	4.41E-06	6.52E-01	5.29E-01



**Table 5.** Simulation results for unimodal functions (continued)

$F_{10}$	<b>Best</b>	0.00E+00	<b>0.00E+00</b>	0.00E+00	3.81E-50
	<b>Worst</b>	3.58E-301	0.00E+00	0.00E+00	7.12E-48
	<b>Average</b>	1.47E-302	<b>0.00E+00</b>	0.00E+00	1.55E-48
	<b>Std</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.90E-48
$F_{11}$	<b>Best</b>	6.67E-01	<b>4.48E-03</b>	6.67E-01	6.67E-01
	<b>Worst</b>	6.67E-01	5.30E-02	6.67E-01	6.67E-01
	<b>Average</b>	6.67E-01	<b>1.73E-02</b>	6.67E-01	6.67E-01
	<b>Std</b>	6.52E-17	1.01E-02	1.35E-07	3.43E-09
$F_{12}$	<b>Best</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	1.11E-48
	<b>Worst</b>	1.97E-292	0.00E+00	0.00E+00	4.46E-30
	<b>Average</b>	6.57E-294	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	1.49E-31
	<b>Std</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.14E-31
$F_{13}$	<b>Best</b>	<b>1.38E-87</b>	<b>1.38E-87</b>	<b>1.38E-87</b>	<b>1.38E-87</b>
	<b>Worst</b>	1.38E-87	1.38E-87	1.38E-87	1.38E-87
	<b>Average</b>	<b>1.38E-87</b>	<b>1.38E-87</b>	<b>1.38E-87</b>	<b>1.38E-87</b>
	<b>Std</b>	6.8E-103	6.8E-103	6.8E-103	6.8E-103

- The structure of  $F_8$  tests the performance of algorithms, especially in situations that require parameter adaptations. All of the algorithms used in the comparisons have achieved success in this function with their adaptive and flexible parameterization capabilities.
- Unlike the other functions,  $F_9$  has a significantly higher performance than the other algorithms of AVOA. This function has a large number of peaks with local minima. This means that AVOA has a large search capacity to reach the global optimum and the ability to avoid local minima.
- $F_{10}$  has a complex structure with linear and nonlinear components. All algorithms were seen to be successful in this function. Thus, it is considered that it captures the relationships in the non-linear structure well.
- $F_{11}$  has a complex and nonlinear structure and global optimization is difficult. AVOA, with its lower optimal value, accurately analyzes complex nonlinear relationships compared to the others.
- $F_{12}$  and  $F_{13}$  are functions with an easy structure to optimize. All algorithms were successful with these functions. In  $F_{13}$ , all algorithms had the same success by obtaining the value 1.38E-87.
- In seven functions ( $F_1, F_2, F_3, F_4, F_7, F_{10}$  and  $F_{12}$ ) AVOA and COA reached the optimum value.

- Similarly, AHA produced the optimum value in six functions ( $F_1, F_2, F_5, F_8, F_{10}$  and  $F_{12}$ ) In addition, MPA is another algorithm that reaches the optimum value in  $F_8$ .
- In general, AVOA and COA had better performance, while AHA produced results close to these two algorithms with very small differences. MPA was behind the other algorithms except  $F_8$  and  $F_{13}$ .

**Table 6.** Simulation results for multimodal functions

Multimodal functions	Algorithms	AHA	AVOA	COA	MPA
$F_{14}$	Best	7.62E+00	<b>1.27E-05</b>	9.67E+01	7.55E+01
	Worst	4.05E+01	4.72E+01	1.58E+02	1.32E+02
	Average	2.24E+01	<b>6.03E+00</b>	1.32E+02	1.01E+02
	Std	8.79E+00	1.20E+01	1.45E+01	1.38E+01
$F_{15}$	Best	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>
	Worst	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Average	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>
	Std	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
$F_{16}$	Best	8.91E-01	<b>1.89E-03</b>	9.70E+01	1.29E+00
	Worst	7.14E+00	1.14E+02	6.32E+03	4.08E+02
	Average	<b>3.64E+00</b>	5.49E+00	2.14E+03	6.19E+01
	Std	1.70E+00	2.11E+01	1.56E+03	1.06E+02
$F_{17}$	Best	7.63E-167	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	7.21E-30
	Worst	6.01E-152	0.00E+00	0.00E+00	1.90E-26
	Average	2.09E-153	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	4.57E-27
	Std	1.10E-152	0.00E+00	0.00E+00	5.13E-27

Simulation results evaluations for multimodal functions are as follows:

- As in  $F_9, F_{14}$  and  $F_{16}$  also have multiple local minima, making optimization difficult. The superiority of AVOA over other algorithms in these functions is due to its effective local minimum avoidance strategies.
- $F_{17}$  has a complex and fluctuating solution space that is difficult to optimize.  $F_{18}$  tests how algorithms perform in a large solution space.  $F_{19}$  tests their ability to efficiently explore the large solution space. All algorithms were successful in all three functions.
- For eight functions ( $F_{15}, F_{17}, F_{18}, F_{20}, F_{21}, F_{24}, F_{25}$  and  $F_{26}$ ) AVOA and COA produced optimum values.
- AHA has the same performance in all functions except  $F_{17}$  and  $F_{18}$ , where AVOA and COA reach the optimum value.

**Table 6.** Simulation results for multimodal functions (continued)

$F_{18}$	<b>Best</b>	5.09E-243	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	3.65E-39
	<b>Worst</b>	3.81E-223	1.85E-263	0.00E+00	1.13E-23
	<b>Average</b>	1.29E-224	6.16E-265	<b>0.00E+00</b>	3.82E-25
	<b>Std</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.06E-24
$F_{19}$	<b>Best</b>	<b>-4.44E-16</b>	<b>-4.44E-16</b>	<b>-4.44E-16</b>	3.11E-15
	<b>Worst</b>	-4.44E-16	-4.44E-16	-4.44E-16	3.11E-15
	<b>Average</b>	<b>-4.44E-16</b>	<b>-4.44E-16</b>	<b>-4.44E-16</b>	3.11E-15
	<b>Std</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
$F_{20}$	<b>Best</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	9.99E-02
	<b>Worst</b>	1.18E-147	0.00E+00	0.00E+00	2.00E-01
	<b>Average</b>	<b>4.11E-149</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>1.47E-01</b>
	<b>Std</b>	2.15E-148	0.00E+00	0.00E+00	5.07E-02
$F_{21}$	<b>Best</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>
	<b>Worst</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	<b>Average</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>
	<b>Std</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
$F_{22}$	<b>Best</b>	<b>9.00E-01</b>	<b>9.00E-01</b>	<b>9.00E-01</b>	<b>9.00E-01</b>
	<b>Worst</b>	9.00E-01	9.00E-01	9.00E-01	1.03E+00
	<b>Average</b>	<b>9.00E-01</b>	<b>9.00E-01</b>	<b>9.00E-01</b>	1.00E+00
	<b>Std</b>	4.52E-16	4.52E-16	4.52E-16	2.12E-02
$F_{23}$	<b>Best</b>	<b>1.21E-20</b>	<b>1.21E-20</b>	6.25E-20	<b>1.21E-20</b>
	<b>Worst</b>	3.23E-20	1.21E-20	4.72E-16	3.45E-20
	<b>Average</b>	1.35E-20	<b>1.21E-20</b>	3.39E-17	1.67E-20
	<b>Std</b>	5.09E-21	5.25E-27	9.22E-17	6.54E-21
$F_{24}$	<b>Best</b>	<b>-2.02E+00</b>	<b>-2.02E+00</b>	<b>-2.02E+00</b>	<b>-2.02E+00</b>
	<b>Worst</b>	-2.02E+00	-2.02E+00	-2.02E+00	-2.02E+00
	<b>Average</b>	<b>-2.02E+00</b>	<b>-2.02E+00</b>	<b>-2.02E+00</b>	<b>-2.02E+00</b>
	<b>Std</b>	1.36E-15	1.09E-15	1.36E-15	1.36E-15
$F_{25}$	<b>Best</b>	<b>-1.07E+02</b>	<b>-1.07E+02</b>	<b>-1.07E+02</b>	<b>-1.07E+02</b>
	<b>Worst</b>	-1.07E+02	-1.07E+02	-8.73E+01	-1.07E+02
	<b>Average</b>	<b>-1.07E+02</b>	<b>-1.07E+02</b>	<b>-1.06E+02</b>	<b>-1.07E+02</b>
	<b>Std</b>	3.09E-14	3.10E-14	3.55E+00	2.95E-14
$F_{26}$	<b>Best</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	1.17E-241
	<b>Worst</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.33E-192
	<b>Average</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	<b>0.00E+00</b>	4.85E-194
	<b>Std</b>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

- In  $F_{20}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$ ,  $F_{24}$ ,  $F_{25}$  and  $F_{26}$  functions that evaluate global search capabilities, all algorithms performed well by reaching similar objective function values.
- MPA has an optimum result in  $F_{15}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{24}$ .
- In  $F_{14}$ , no algorithm produced the minimum value, but AVOA had the best performance with the best value of 1.27E-05.
- The functions for which all algorithms produce the same value are  $F_{19}$  and  $F_{22}$ .
- Like the unimodal functions, AHA follows AVOA and COA with very small differences. At the same time, MPA was the most unsuccessful except for a few functions.
- In general, the algorithms outperformed each other with very small differences such as 7.63E-167 and 7.21E-30.

When all evaluations are taken into account, the rankings of the algorithms in terms of average and best values for all simulation results are given in Table 7.

**Table 7.** Rank ordering of algorithms

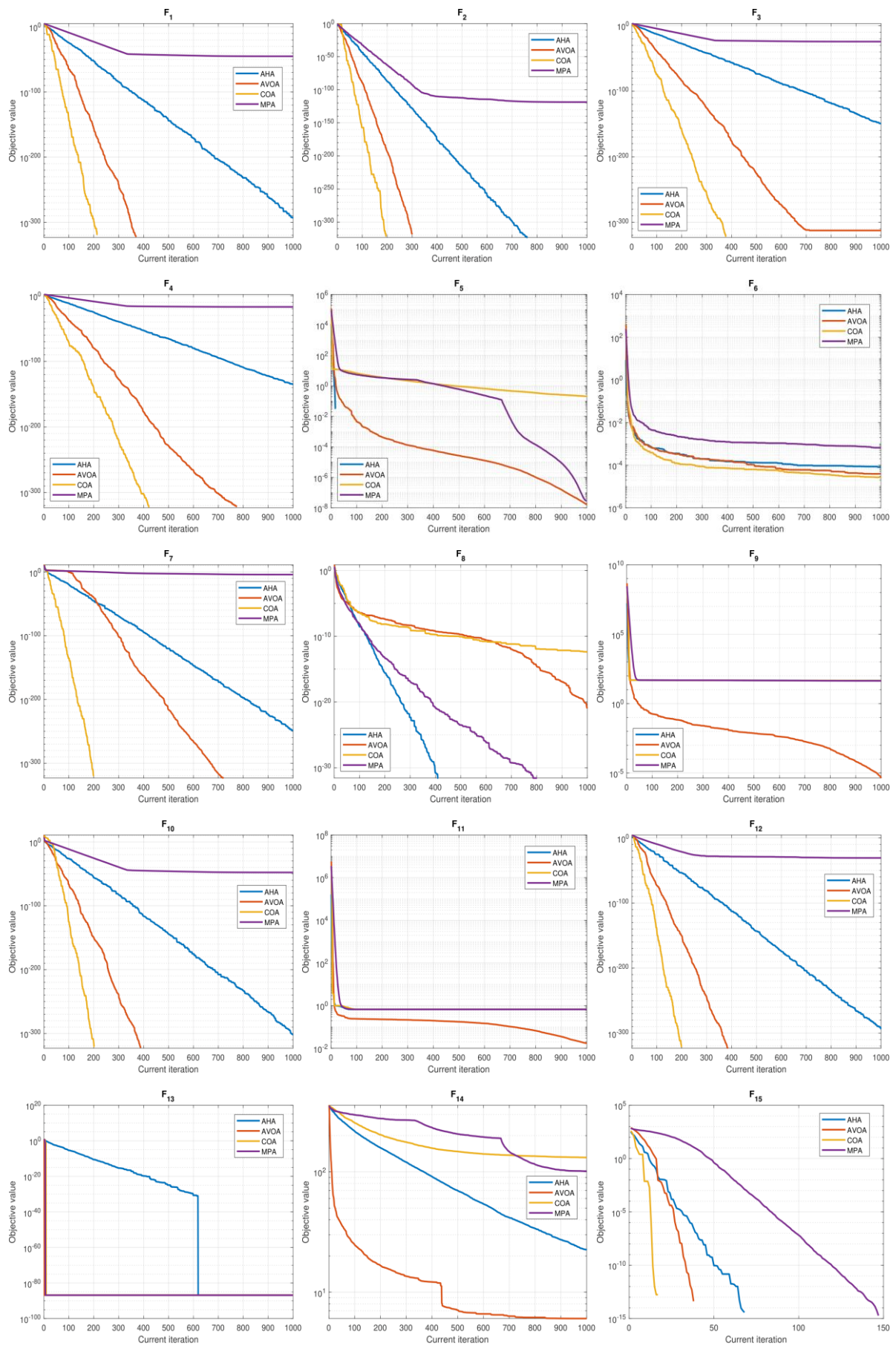
<b>Algorithms</b>	<b>Best</b>	<b>Average</b>
<b>AHA</b>	16	12
<b>AVOA</b>	<b>23</b>	<b>20</b>
<b>COA</b>	19	19
<b>MPA</b>	8	6

In the Table 7, the values of the most successful algorithms are bolded. AVOA was the most successful in terms of best and average values. AVOA is followed by COA, AHA, MPA respectively. AVOA outperformed its closest competitor COA by four points in the best values and one point in the average values.

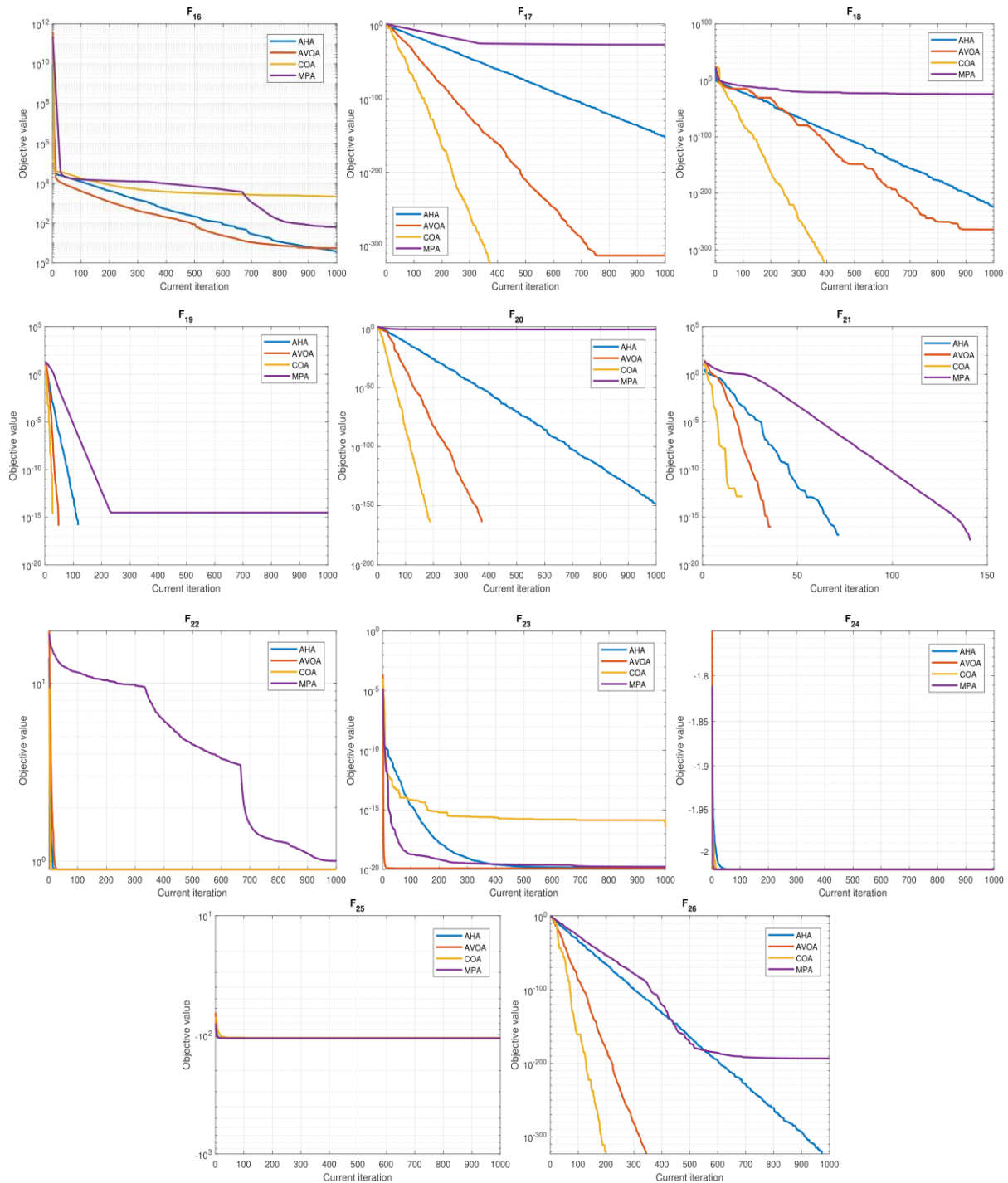
### 5.1. Convergence plots of test functions

A convergence plot is a type of graph often used to observe or evaluate the performance of an optimization algorithm (Yiğit et al., 2023). This graph is a visualization of how fast or effective an algorithm is in the optimization process when it tries to minimize the value of a target function. For this purpose, the convergence graphs of the averages of all runs of the algorithms on the test functions are given in Figure 5.

In the convergence plot of unimodal functions, COA was the fastest converging algorithm for most functions except for a few functions ( $F_5$ ,  $F_8$ ,  $F_9$  and  $F_{11}$ ). COA is followed by AVOA. At the same time, these two algorithms started to produce the same value after a certain number of iterations. In addition, AHA was the algorithm with the fastest convergence only in  $F_8$ , followed by MPA. Although  $F_{13}$  functions produced the same result, AHA reached this value later than the other algorithms.



**Figure 5.** Convergence plots of test functions



**Figure 5.** Convergence plots of test functions (continued)

When the convergence plots of the multidimensional functions are analysed, it is seen that COA converges faster in general. In  $F_{14}$ , although none of the algorithms produced the optimum value, AVQA converged the fastest. In  $F_{23}$ , contrary to the general results, COA is worse. Looking at the simulation results tables, it is observed that MPA generally performs poorly and is successful in some functions. This shows that MPA converges less than the others in the convergence plots.

## 5.2. t-test Results

The t-test is a hypothesis test used to assess statistical significance between two groups (Kim, 2015). This test is used to determine whether the difference between the means of the groups is indeed significant. In this subsection, a one-tailed t-test analysis of the simulation results was performed. The significance level in the analysis was set at 5%. An  $h$  value equal to 1 and  $p$  values less than 0.05 indicate that the algorithm on the right performs better and there is a significant difference. In addition, no value indicates that the two algorithms have the same performance on that function. The results are presented in Table 8 and Table 9 for unimodal and multimodal functions, respectively.

**Table 8.** Unimodal functions t-test results

	AVOA-COA		AVOA-AHA		AVOA-MPA		COA-AHA		COA-MPA		AHA-MPA	
	$h$	$p$	$h$	$p$	$h$	$p$	$h$	$p$	$h$	$p$	$h$	$p$
$F_1$	-	-	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	9.19E-05	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	9.19E-05	1.00E+00	9.19E-05
$F_2$	-	-	-	-	0.00E+00	1.57E-01	-	-	0.00E+00	1.57E-01	0.00E+00	1.57E-01
$F_3$	-	-	0.00E+00	1.56E-01	1.00E+00	1.87E-04	0.00E+00	1.56E-01	1.00E+00	1.87E-04	0.00E+00	1.87E-04
$F_4$	-	-	0.00E+00	1.62E-01	1.00E+00	8.73E-10	0.00E+00	1.62E-01	1.00E+00	8.73E-10	1.00E+00	8.73E-10
$F_5$	1.00E+00	9.92E-05	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.16E-04	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	4.27E-12
$F_6$	0.00E+00	9.15E-01	1.00E+00	1.26E-03	1.00E+00	3.75E-12	1.00E+00	4.14E-05	1.00E+00	8.71E-13	1.00E+00	1.45E-11
$F_7$	-	-	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	2.59E-08	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	2.59E-08	1.00E+00	2.59E-08
$F_8$	1.00E+00	1.19E-02	0.00E+00	9.71E-01	0.00E+00	9.71E-01	0.00E+00	9.88E-01	0.00E+00	9.88E-01	-	-
$F_9$	1.00E+00	2.46E-55	1.00E+00	6.96E-62	1.00E+00	1.49E-57	1.00E+00	1.14E-05	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
$F_{10}$	-	-	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	5.40E-05	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	5.40E-05	1.00E+00	5.40E-05
$F_{11}$	1.00E+00	1.48E-54	1.00E+00	1.48E-54	1.00E+00	1.48E-54	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	3.57E-14
$F_{12}$	-	-	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.63E-01	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.63E-01	0.00E+00	1.63E-01
$F_{13}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

According to Table 8, the evaluations are as follows:

COA significantly outperformed AVOA in  $F_5$ ,  $F_8$ ,  $F_9$  and  $F_{10}$  functions.

- In seven out of thirteen functions ( $F_1$ ,  $F_6$ ,  $F_7$ ,  $F_9$ ,  $F_{10}$ ,  $F_{11}$  and  $F_{12}$ ), AHA is less successful, and in nine functions ( $F_1$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_5$ ,  $F_6$ ,  $F_7$ ,  $F_9$ ,  $F_{10}$  and  $F_{11}$ ), MPA is less successful than AVOA.
- AHA compared to MPA in seven functions ( $F_1$ ,  $F_4$ ,  $F_5$ ,  $F_6$ ,  $F_7$ ,  $F_{10}$  and  $F_{11}$ ) showed that there was a significant difference.
- COA has achieved superiority in AHA ( $F_1$ ,  $F_6$ ,  $F_7$ ,  $F_9$ ,  $F_{10}$  and  $F_{12}$ ) and MPA ( $F_1$ ,  $F_4$ ,  $F_5$ ,  $F_6$ ,  $F_7$ ,  $F_{10}$  and  $F_{11}$ ) with six functions.
- Since all algorithms produced the same value in  $F_{13}$ , no significant differences were observed.

**Table 9.** Multimodal functions t-test results

	AVOA-COA		AVOA-AHA		AVOA-MPA		COA-AHA		COA-MPA		AHA-MPA	
	<i>h</i>	<i>p</i>	<i>h</i>	<i>p</i>	<i>h</i>	<i>p</i>	<i>h</i>	<i>p</i>	<i>h</i>	<i>p</i>	<i>h</i>	<i>p</i>
$F_{14}$	1.00E+00	1.01E-24	1.00E+00	2.58E-06	1.00E+00	5.12E-22	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	8.43E-23
$F_{15}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$F_{16}$	1.00E+00	1.56E-08	0.00E+00	6.82E-01	1.00E+00	3.71E-03	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	2.57E-03
$F_{17}$	-	-	0.00E+00	1.52E-01	1.00E+00	1.74E-05	0.00E+00	1.52E-01	1.00E+00	1.74E-05	1.00E+00	1.74E-05
$F_{18}$	0.00E+0	1.00E+0	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.59E-01	1.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.59E-01	0.00E+00	1.59E-01
$F_{19}$	-	-	-	-	1.00E+00	0.00E+0	-	-	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00
$F_{20}$	-	-	0.00E+00	1.52E-01	1.00E+00	4.24E-16	0.00E+00	1.52E-01	1.00E+00	4.24E-16	1.00E+00	4.24E-16
$F_{21}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$F_{22}$	-	-	-	-	1.00E+00	1.80E-22	-	-	1.00E+00	1.80E-22	1.00E+00	1.80E-22
$F_{23}$	1.00E+00	2.69E-02	0.00E+00	6.43E-02	1.00E+00	2.86E-04	0.00E+00	9.73E-01	0.00E+00	9.73E-01	1.00E+00	2.94E-02
$F_{24}$	0.00E+00	1.00E+0	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+0	-	-	-	-	-	-
$F_{25}$	0.00E+00	1.63E-01	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	4.28E-01	0.00E+0	8.37E-01	0.00E+00	8.37E-01	1.00E+00	2.62E-10
$F_{26}$	-	-	-	-	1.00E+00	0.00E+0	-	-	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00

According to Table 9, the evaluations are as follows:

- MPA was the algorithm that performed less well compared to the others, as in the case of unimodal functions.
- AVOA outperformed COA in  $F_{14}$ ,  $F_{16}$  and  $F_{23}$  functions.
- Similar to Table 7, AHA exhibits a more significant difference than MPA and has demonstrated superior performance in nine different test functions ( $F_{14}$ ,  $F_{16}$ ,  $F_{17}$ ,  $F_{19}$ ,  $F_{20}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{23}$ ,  $F_{25}$  and  $F_{26}$ ).

## 6. Conclusion

The development of many optimization algorithms provides different possibilities for solving problems. For this purpose, recently proposed AHA, AVOA, COA and MPA algorithms were compared for the first time and the best performance was analyzed. According to the analyses obtained from the simulation results, AVOA has the highest performance in 26 different test functions. Other newly proposed algorithms followed AVOA with very small differences. Moreover, each of them outperformed each other in some functions. The success or failure of algorithms on certain test functions compared to others can be explained by factors such as the exploration and exploitation balance of the algorithms, their working mechanisms, and the complexity and dimensionality of the test functions. The difficulty of a test function increases with the number of dimensions; therefore, the convergence of some methods is slower compared to others. For instance, algorithms with strong exploration capabilities can be successful in larger solution spaces and irregular functions, whereas algorithms effective at finding local optima can perform better on less complex functions. Additionally, the parameter settings of the



algorithms and their suitability to the problem structure can significantly affect performance. The combination of these factors explains why certain algorithms perform better or worse on specific test functions. After the simulations, statistical analysis was performed to determine whether there was a significant difference. The fact that the algorithms follow each other with very small differences shows that the appropriate one should be used for different problems. In future research, it is aimed to analyze the newly proposed metaheuristics in various test functions and to use them on different problems.

### **Statement of Conflict of Interest**

Authors have declared no conflict of interest.

### **Author's Contributions**

The contribution of the authors is equal.

### **References**

- Abdollahzadeh B., Gharehchopogh FS., Mirjalili S. African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Computers & Industrial Engineering* 2021; 158, 107408.
- Arslan S. Güncel metasezgisel algoritmalarının performansları üzerine karşılaştırılmalı bir çalışma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2023; 11(4): 1861-1884.
- Azizi M., Talatahari S., Gandomi AH. Fire hawk optimizer: A novel metaheuristic algorithm. *Artificial Intelligence Review* 2023; 56(1): 287-363.
- Deng L., Liu S. Snow ablation optimizer: A novel metaheuristic technique for numerical optimization and engineering design. *Expert Systems with Applications* 2023; 225, 120069.
- Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization. *IEEE computational intelligence magazine*, 2006; 1(4): 28-39.
- Dowsland KA., Thompson J. Simulated annealing. *Handbook of Natural Computing* 2012 1623-1655.
- Famarzi A., Heidarinejad M., Mirjalili S., Gandomi AH. Marine predators algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert Systems with Applications* 2020; 152, 113377.
- Ghaedi A., Bardsiri AK., Shahbazzadeh MJ. Cat hunting optimization algorithm: a novel optimization algorithm. *Evolutionary Intelligence* 2023; 16(2): 417-438.
- Hosseinzadeh M., Rahmani AM., Husari FM., Alsalami OM., Marzougui M., Nguyen GN., Lee SW. A survey of artificial hummingbird algorithm and its variants: statistical analysis, performance evaluation, and structural reviewing. *Archives of Computational Methods in Engineering* 2024; 1-42.
- Jia H., Rao H., Wen C., Mirjalili S. Crayfish optimization algorithm. *Artificial Intelligence Review* 2023; 56(Suppl 2): 1919-1979.
- Karaboga D. Artificial bee colony algorithm. *Scholarpedia* 2010; 5(3): 6915.

- Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. IEEE In Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks 1995; 4: 1942-1948.
- Kim TK. T test as a parametric statistic, Korean Journal of Anesthesiology 2015; 68(6): 540-546.
- Mirjalili S. Genetic algorithm. Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications 2019; 43-55.
- Mishra P., Singh U., Pandey CM., Mishra P., Pandey G. Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. Annals of Cardiac Anaesthesia 2019; 22(4): 407.
- Xue Y., Jia W., Zhao X., Pang W. An evolutionary computation based feature selection method for intrusion detection, Security and Communication Networks 2018.
- Yang XS. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. Nature inspired cooperative strategies for optimization. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2010; 65-74.
- Yang XS., Deb S. Cuckoo search via Lévy flights. IEEE World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC) 2009; 210-214.
- Yiğit H., Ürgün S., Mirjalili S. Comparison of recent metaheuristic optimization algorithms to solve the SHE optimization problem in MLI, Neural Computing and Applications 2023; 35(10): 7369-7388.
- Zhao S., Zhang T., Ma S., Chen M. Dandelion optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm for engineering applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2022; 114, 105075.
- Zhao W., Wang L., Mirjalili S. Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2022; 388, 114194.
- Zhu D., Wang L., Zhou C., Yan S., Xue J. Human memory optimization algorithm: A memory-inspired optimizer for global optimization problems. Expert Systems with Applications 2023; 237, 121597.

## MIG Kaynağı Yapabilen Robot Kolun Tasarımı ve Kinematik Analizi

Dilşad AKGÜMÜŞ GÖK<sup>1\*</sup>, Mehmet Furkan ÖZKAN<sup>2</sup>, Haydar Emre KARAMAN<sup>3</sup>, Mohammad Sami KHATTAB<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Istanbul Aydin University Graduate Education Institute Mechanical Engineering, 34320, İstanbul, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-3403-3815>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0002-8440-5138>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0001-2154-7959>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0009-0006-2303-0538>

\*Sorumlu yazar: dilsadagumus@aydin.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 03.07.2024

Kabul tarihi: 26.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Robot kol

MIG kaynağı

Kinematik analiz

### ÖZ

İnsansız imalat, modern endüstride büyük bir yer edinmiştir. İmalatın insansız olduğu her alanda başarısı ve uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Çeşitli araçlar donanımsal yönden zenginleştirilmiş ve imalat için görevlere uygun hale getirilmiştir. Teknolojinin hızlı gelişimi donanımsal olarak zenginleştirilen bu araçlar için daha fazla donanım kullanma şansı sunmaktadır. Bu donanımlarda en yoğun çalışmalar robot kollar üzerine yapılmaktadır. Bu makale imalat sektöründe, başta otomotiv ve savunma sanayi olmak üzere çeşitli uygulamalar için kullanılmak üzere metal inert gaz (MIG) kaynağı yapabilen robot kol tasarımı üzerine hazırlanmıştır. Çok farklı imalat alanlarında, sistemin altına ya da üstüne tasarımları dikkate alınarak monte edilebilecek bir MIG kaynak robot kolu tasarımı yapılmıştır. Tasarımda insansız kullanılan sistemlerin özellikleri dikkate alınmıştır. Kinematik model, genel dönüşüm, matris, tüm eklem ve birleştirmeleri hesaplanarak oluşturulmuştur. SOLIDWORKS programında tasarımı ve malzeme seçimi yapılan robot kolun, SOLIDWORKS ve ANSYS programlarının kullanımı ile belirli yükler altında deformasyon, hareket ve sapma analizleri yapılmıştır. Bir ve iki numaralı eklemler üzerine yapılan analizler sonucu robot kolun maruz kaldığı yüklerde istenilen kaynak görevlerini yapabileceği görülmüştür.

## Design and Kinematic Analysis of a Robotic Arm Capable of MIG Welding

### Research Article

#### Article History:

Received: 03.07.2024

Accepted: 26.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Robotic arm

MIG welding

Kinematic analysis

### ABSTRACT

The importance of unmanned production has grown significantly in modern industry. The success and applicability of manufacturing in unmanned areas have been proven. Various tools have been enriched in terms of hardware and adapted for manufacturing tasks. The rapid development of technology offers the chance to use more hardware for these hardware-enriched tools. The most intense studies in these hardware are conducted on robotic arms. This article has been prepared on the design of a robotic arm capable of metal inert gas (MIG) welding for various applications in the manufacturing sector, especially in the automotive and defense industries. A MIG welding robotic arm design that can be mounted under or over the system in very different manufacturing areas, considering the designs, has been made. The characteristics of unmanned systems used in the design have been taken into account. The kinematic model was created by calculating the general transformation, matrix, all joints, and assemblies. The robotic arm, designed in SOLIDWORKS and material selection made, was analyzed for deformation, motion, and deviation under certain loads using SOLIDWORKS and ANSYS programs. The analyses conducted on the first and second joints showed that

the robotic arm can perform the desired welding tasks under the loads it is subjected to.

---

**To Cite:** Gök DA., Özkan MF., Karaman HE., Khattab MS. Design and Kinematic Analysis of a Robotic Arm Capable of MIG Welding. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 353-374.

## **1. Introduction**

With the advancement of technology, robotic arms with very different hardware can now be used in many challenging tasks (Efe et al., 2021). Due to design simplicity and cost-effectiveness, their production and usage have become easier. Especially, in many areas where human health is at risk, the use of robotic arms is becoming increasingly widespread day by day. The increase in software and system developments for use in different challenging tasks enables robotic arms to be used in very complex jobs. They are used in various areas such as transportation (relocation) (Murat and Abdullah, 2023), firefighting and welding (Doruk et al., 2016), assembly (Karacan et al., 2022), and sorting (separation) (Demirhan and Sarıyıldız, 2021).

Robotic arms are used in many areas, especially in industry. They are preferred, because they reduce the workload and represent the difficult part in human-machine task sharing. Although there are multiple types, the basic tasks performed by robotic arms are very similar to each other. Each robotic arm carries its own unique features. Articulated robotic arms (Bernett et al., 2020), one of the most important types, are robotic arms with a high degree of freedom. These types of high-degree-of-freedom robotic arms are particularly widely used in the automotive industry.

Metal inert gas (MIG) welding is used in many sectors today. Compared to other welding methods, its main advantages include the ability to weld products quickly (Nurveren and Gündüz, 2018), the creation of high-strength products when the craftsmanship is done correctly (Köse and Tatlı, 2015), and most importantly, the ability to fill deep gaps quickly and effectively (Türker et al., 2017). With the benefits brought by its many advantages, high-strength products are produced in the craftsmanship part when the parameters are correctly inputted for the robotic arm to be produced.

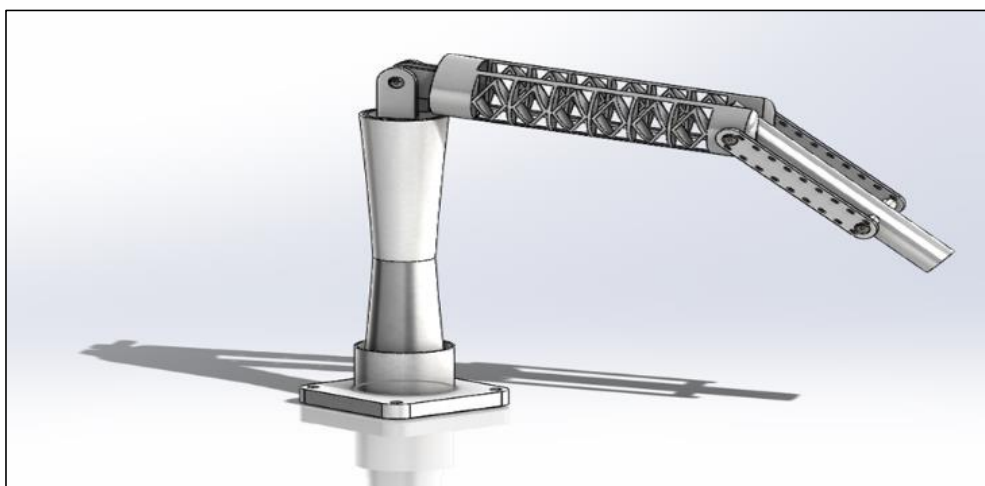
In this study, a design for a lightweight, portable MIG welding robotic arm that can be easily mounted in different positions and perform welding tasks, particularly for use in various applications including the automotive and defense industries, has been prepared using the SOLIDWORKS® program (Karaca et al., 2017). Towards this goal, initially, the system's mechanism, necessary power calculations, usage of the method, and motion scheme were established. The determined requirements were researched and their analyses were conducted using ANSYS® software (Tınkır and Sezgen, 2017). A geometric and kinematic model suitable for the industrial and factory environment in which the task will be carried out has been presented.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1. Material**

In this study, different materials were selected for the torch and body parts of the designed MIG welding robotic arm, considering the cost factor. The selection of materials was crucial, because the power of

the motor to be used depends on the resulting weight. Therefore, the materials were chosen with minimum weight and maximum efficiency in mind. Careful selection of the material for production is necessary. In material selection, aside from high performance, flexibility, machinability, and strength characteristics have been important guides for the engineers selecting the material. In the designed robotic arm, as shown in Figure 1, polylactic acid (PLA) materials obtained by the additive manufacturing method were used in the body and limbs.



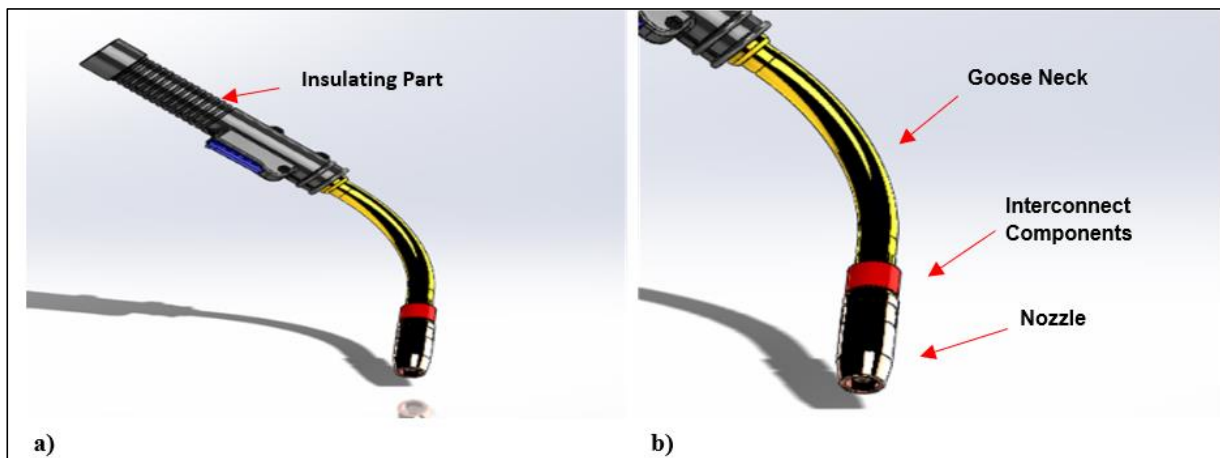
**Figure 1.** Robotic arm limb and body structure

**Table 1.** Mechanical and physical properties of PLA material (Farah et al., 2016)

Property	Value
Density	1.25 g/cm <sup>3</sup>
Melting temperature	150-160°C
Tensile strength	50-70 MPa
Elastic modulus (e-modulus)	3-4 GPa
Notched impact strength	2-16 kJ/m <sup>2</sup> (low impact resistance)
Maximum stress strength	50 MPa
Elongation (at break)	2-10%
Flexural strength	65-110 MPa
Water absorption (24 hours)	0.5 - 1.0%
Glass transition temperature	60-65°C
Thermal expansion coefficient	68 µm/m°C
Shore hardness	80-85D
Processability	Easy

The use of 3D printers has become easier in many sectors by combining materials with different properties using filaments produced through additive manufacturing methods. It is used primarily in the textile industry for the production of wearable gloves (Akgümüş Gök and Gudar, 2023), composite

material production (Pamuk et al., 2016), and more recently in the production of robotic arms (Çelebi et al., 2019). The choice of material for the robotic arm may vary depending on the task it will perform. Within the scope of this study, PLA materials that can be used in 3D printers were selected for the manufacturing of this robotic arm. In the design of the MIG welding robotic arm, the most important point in material selection is the choice of the torch material. The selection of torch material results in high-quality welding. When selecting the torch, a torch design was prepared, taking into account factors, such as the maximum power of the current generator, the diameter of the wire electrode to be used, the thickness of the material to be welded, the working time, ergonomics, and is represented in Figure 2 (Suarez et al., 2017). Apart from the general material of the torch being insulating, the mouthpiece where welding contact occurs is expected to be resistant to high temperatures and absorb the generated heat to prevent overheating and deformation of other parts of the arm. To achieve this, airflow gaps were left at various points on the torch to ensure continuous airflow.



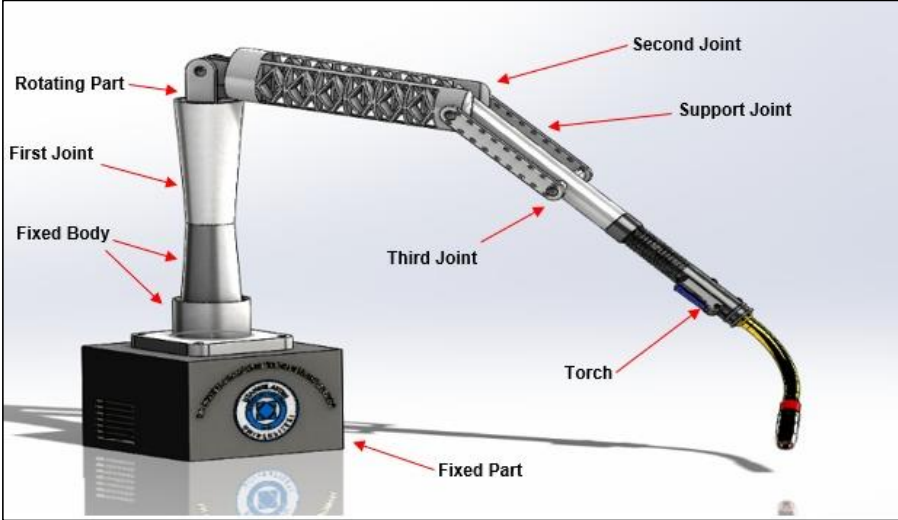
**Figure 2.** a) Insulating part of the torch, b) Conductive part of the torch

The upper part of the torch, which needs to have insulating properties, was selected to be made of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastic due to its cost-effectiveness. The yellow part referred to as the (Goose Neck) was determined to be made of brass, following traditional torch manufacturing methods. The most important factor in this selection is that since welding is done with electricity, conductivity needs to be good at a certain point. This part serves the purpose of absorbing the energy of the heated electrode. In the tip of the torch, the intermediate connecting part was made of brass, and the nozzle itself was made of copper material.

## 2.2. Design

Today, the designs of machines or machine components are done in digital environments using computer aided design (CAD) programs to facilitate manufacturing. SOLIDWORKS® is an internationally used program that allows design in various applications such as sheet metal, molds, profiles, and electronics. The design of the MIG welding robotic arm was done in the SOLIDWORKS® program. In the design,

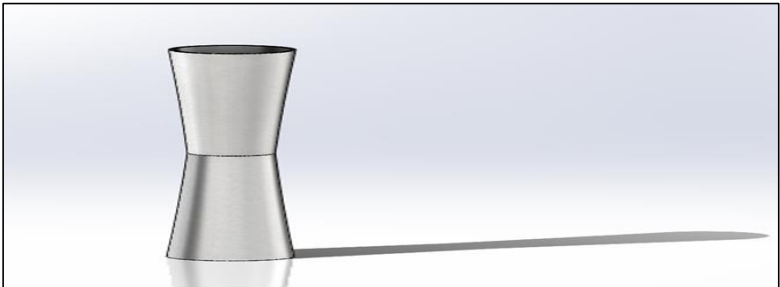
geometric voids were created, as shown in Figure 3, to achieve the desired weights without compromising strength. These geometric voids were created in a way that would not affect the strength and material fatigue (Ertürkmen and Noori, 2023).



**Figure 3.** Configuration created with the design program for the robotic arm

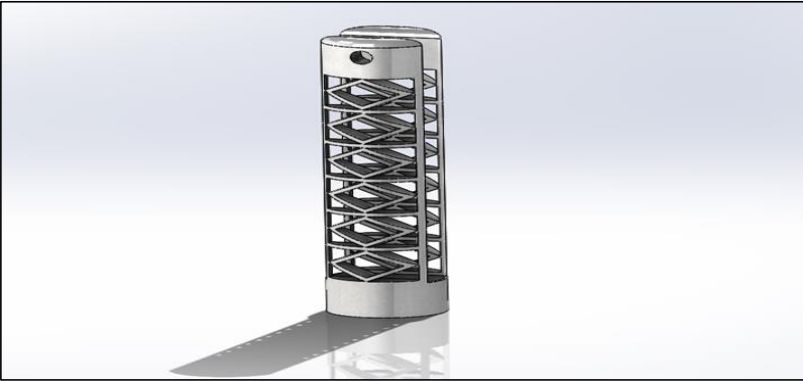
Due to the limited electronic and mechanical power of the system, this was taken into account during the design and the design was carried out accordingly. When considering its maximum load capacity, the length of the welding torch head was designed to be 22.11 cm. The maximum welding length that can be achieved is 45 cm. As a result of the dynamic analyses conducted, the number and type of motors to be used have been determined.

Serial robot types are also classified alphabetically based on the type of joint (limb) they have. Generally, there are two types of joints: rotary and prismatic joints. Rotary joints are symbolized by the letter "R" (Revolute), while prismatic joints are symbolized by the letter "P" (Prismatic). The MIG welding robotic arm was designed as an RRRR robot (Can and Stachel, 2014). In the design of the robotic arm, 3 joints, 2 rotation support parts, and 2 motion transmission support members were used. The design of these parts took into consideration the load, mobility, and durability that the robotic arm would be subjected to. The length of the first main joint is 30 cm, and it consists of a straight cylinder part that is symmetrically conical, as shown in Figure 4. The reason for this is to distribute the load less on the side with a larger surface area.



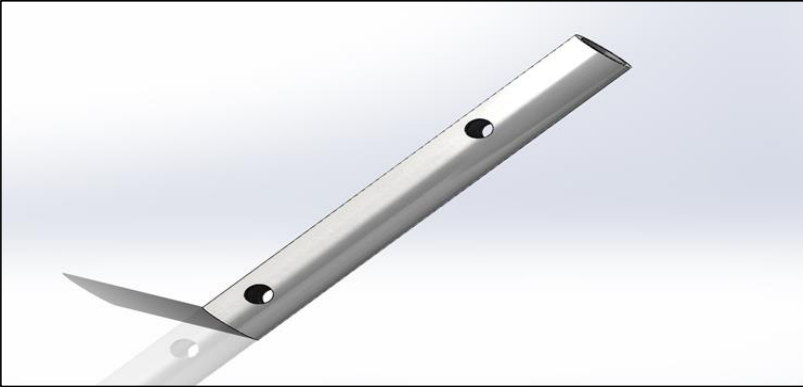
**Figure 4.** First joint

The length of the second joint in the design is 35 cm. As seen in Figure 5, rectangular voids of equal dimensions were left to improve maneuverability, speed, and weight.



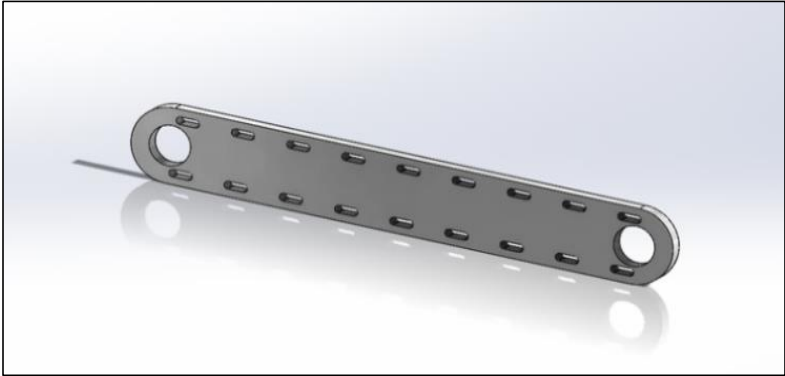
**Figure 5.** Second joint

The third and final joint, as seen in Figure 6, is a straight cylindrical part designed entirely according to the task's purpose. This part, which is 20 cm in length, is primarily responsible for ensuring that the welding wire coming from the spool reaches the nozzle smoothly.



**Figure 6.** Third joint

The length of the motion transmission support members is 10 cm, and their roles in the design are to support the correct transmission of motion, ensure more balanced movement of the load, and increase speed. As shown in Figure 7, the design includes slot voids at the top and bottom to enhance strength.

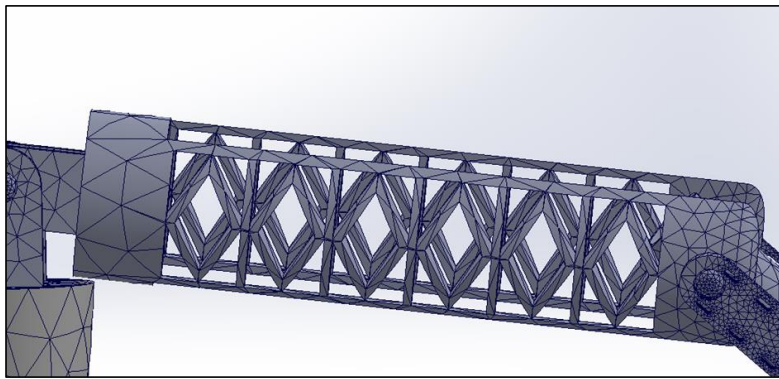


**Figure 7.** Motion transmission support member



### 2.3. Analysis

In this study, a comprehensive structural analysis was carried out to examine the performance and deformation behavior of the joints used in the design of the MIG welding robot arm. Analyzes were performed using both SOLIDWORKS® and ANSYS® programs to evaluate how the design responds under operating conditions. The mesh structure used in the analysis was optimized to accurately model the complex geometry of the robot arm. Three-dimensional solid elements were used in the analyses. Tetrahedral elements are preferred because these elements give better results in complex geometries. Different resolutions were used in different regions with element sizes ranging from 0.5 mm to 3 mm. Sensitivity has been increased by using smaller elements in critical load-bearing areas. More than 100,000 elements were used in total. The mesh used in this study was optimized in terms of quality and provided sufficient resolution for more accurate calculation of deformations and stresses. The number of meshes was created as 7000 in the first joint and 2500 in the second joint. Figure 8 shows the mesh structure of the second joint.



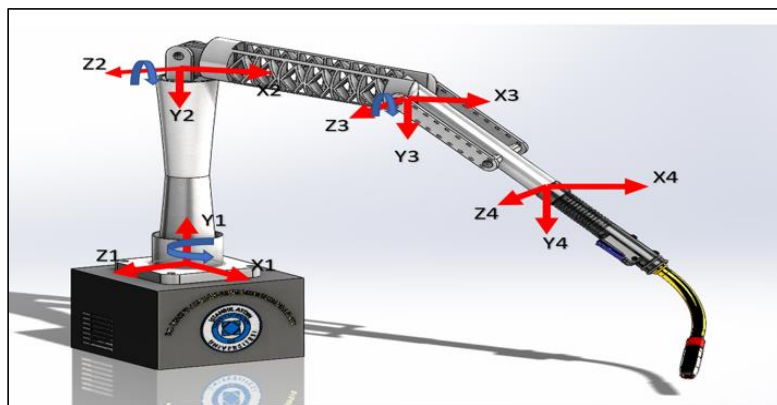
**Figure 8.** Mesh structure of second joint

The material model used in the analysis was chosen to accurately represent the materials used in prototype production. The robot arm and joints are produced using PLA material. For this reason, the mechanical properties of PLA material were used in the analysis (Table 1). In the analysis of the robot arm, loads and boundary conditions are carefully defined. Forces of different magnitudes were applied to evaluate the effect of loads on the joint. Each loading case is designed to simulate real operating conditions of the robot arm. Loads weighing 200 g, 300 g and 400 g were applied to the free end of the arm. These loads were chosen to simulate the maximum loads that the robot arm can carry. The points where the arm is fixed are defined as boundary conditions and it is assumed that these points do not move. The gravitational force is taken into account for realistic modeling of the robot arm. Static and dynamic analyzes were used in structural analysis. Loads were applied in a fixed condition and deformation, stress and deflections were calculated. This analysis was used to evaluate the maximum tensile strength and load carrying capacity of the arm. Using the ANSYS® Rigid Dynamics module, dynamic forces and deformations occurring during the movement of the arm were examined. This analysis tested the performance of the moving parts of the arm at different angles. As a result of the analyses, the deformation and tension behaviors of the robot arm were determined. The results obtained

in each loading scenario played an important role in evaluating how the robot arm performed under different operating conditions. Deformations and stresses observed especially in critical joints revealed the weak points of the design and data for future optimization studies are presented in the "Results" section.

### 3. Advanced Kinematic Modeling and Power Calculations

The Denavit-Hartenberg (DH) method was used for modeling all forward kinematics and mechanical connections of the designed system (Noguchi and Roshanianfard, 2017). Power-moment calculations were performed for the created MIG welding robotic arm. In the designed robotic arm, there are no translational mechanical movements in any joint, and all mechanical joints are rotational. In this case, the position vector in joint space,  $\mathbf{q}$ , is directly equivalent to a velocity vector,  $\mathbf{v}$ , meaning  $\mathbf{q} = [q_1 \dots q_n] = [v_1 \dots v_n] = \mathbf{v}$ . Mathematically, this relationship can be expressed briefly as  $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}\mathbf{q}$ , where  $\mathbf{q}$  is the motor position,  $\mathbf{H}$  is the matrix that transforms joint space to motor space. For the designed robotic arm, the  $\mathbf{H}$  matrix is a  $6 \times 5$  matrix, and the determinant of this matrix is greater than zero. Furthermore, to create a comprehensive expression, after the robotic arm is manufactured, tests need to be conducted based on the system's dynamics. System identification tests can be used to draw the entire kinematic and dynamic model of the robotic arm system. The direct kinematic expression of the robotic arm is given by the transformation matrix  $\mathbf{T}$  (Korkut and Yaşar, 2016).



**Figure 9.** Kinematic vectors of the robot arm

In order to perform forward and inverse kinematic analysis of a robotic arm, the axes must first be determined. In the design done in SOLIDWORKS® program, the axes and rotation directions of the robotic arm are shown as in Figure 9.

**Table 2.** Denavit-Hartenberg (DH) table

Frame	$\alpha_{(i-1)}$	$a_{(i-1)}$	$d_{(i-1)}$	$\theta_{(i-1)}$
0-1	0	0	0	$\theta_{(1)}$
1-2	0	$L_1$	0	$\theta_{(2)}$
2-3	0	$L_2$	0	$\theta_{(3)}$
3-4	0	$L_3$	0	$\theta_{(4)}$

After the axes were established, rotation and translation distances, angles, and lengths were determined using the Denavit-Hartenberg (DH) method. The transformation matrices  $\mathbf{T}$  were created by referencing the Table 2 generated with the Denavit-Hartenberg (DH) method.

In this study, a mesh was created using Solidworks Motion Study and ANSYS Rigid Dynamic module for analysis, and data about the designs was obtained by entering the necessary parameters. These data obtained largely show the prototype production and deformations that may occur in the system. As a result of these analyses, many data such as deviations, bending and maximum movement area in robot arm designs were obtained. In future studies, it is recommended to present the mathematical expressions of the kinematic model, dynamic matrices and transformation matrices in more detail. In addition, using the MATLAB program, forward kinematic and inverse kinematic analysis can be used to mathematically calculate the relative movements, positions, orientations, speeds and resulting inertia of the robot arm. Figure 10 shows the advanced kinematic analysis created using the MATLAB program of the study.

```
clear; clc; close;

link=1:1:7;
h_base= [0,1,0;
         0,1,0;
         1,0,0;
         0,0,1;
         1,0,0;
         1,0,0;
         1,0,0];
syms d1_d th2_d th3_d th4_d th5_d th6_d mx my mz xx yy zz
syms a1 k2 k3 k4 a5 a6 d1 d2 d3 d4 d5 d6 teta1 teta2 teta3 teta4 teta5 teta6 l1
syms d1_dd th2_dd th3_dd th4_dd th5_dd th6_dd

I=eye(3);

z=zeros(3,1);
w0=zeros(3,1);
v0=zeros(3,1);
wd0=zeros(3,1);
vd0=zeros(3,1);
f0=zeros(3,1);
sqew=@(x) [0 -x(3) x(2); x(3) -x(1) 0; x(2) -x(1) 0];
m=[mx,0,0;0,my,0;0,0,mz];
I_m=[xx,0,0;0,yy,0;0,0,zz];
```

```

h1=[0;1;0];
h11=[h1;z];
h2=[0;1;0];
h22=[h2;z];
h3=[1;0;0];
h33=[h3;z];
h4=[0;0;1];
h44=[z;h4];
h5=[1;0;0];
h55=[h5;z];
h6=[1;0;0];
h66=[z;h6];
h7=[1;0;0];
h77=[h7;z];

l1_v=h1*link(1);
l2_v=h2*link(2);
l3_v=h3*link(3);
l4_v=h4*link(4);
l5_v=h5*link(5);
l6_v=h6*link(6);
l7_v=h7*link(7);

phi1=[I,zeros(3);-sqew(l1_v),I];
phi2=[I,zeros(3);-sqew(l2_v),I];
phi3=[I,zeros(3);-sqew(l3_v),I];
phi4=[I,zeros(3);-sqew(l4_v),I];
phi5=[I,zeros(3);-sqew(l5_v),I];
phi6=[I,zeros(3);-sqew(l6_v),I];

V_vv1=phi1*zeros(6,1)+h11*d1_d;
V_vv2=phi2*zeros(6,1)+h22*th2_d;
V_vv3=phi3*zeros(6,1)+h33*th3_d;
V_vv4=phi4*zeros(6,1)+h44*th4_d;
V_vv5=phi5*zeros(6,1)+h55*th5_d;
V_vv6=phi6*zeros(6,1)+h66*th6_d;

w1=V_vv1(1:3,1);
w2=V_vv2(1:3,1);
w3=V_vv3(1:3,1);
w4=V_vv4(1:3,1);
w5=V_vv5(1:3,1);
w6=V_vv6(1:3,1);

v1=V_vv1(4:6,1);
v2=V_vv2(4:6,1);
v3=V_vv3(4:6,1);
v4=V_vv4(4:6,1);
v5=V_vv5(4:6,1);
v6=V_vv6(4:6,1);

A_vv1=phi1*zeros(6,1)+h11*d1_dd+[cross(w0,w1);cross(w0,cross(w0,l1_v))];
A_vv2=phi2*A_vv1+h22*th2_dd+[cross(w1,w2);cross(w1,cross(w1,l2_v))];
A_vv3=phi3*A_vv2+h33*th3_dd+[cross(w2,w3);cross(w2,cross(w2,l3_v))];
A_vv4=phi4*A_vv3+h44*th4_dd+[cross(w3,w4);cross(w3,cross(w3,l4_v))];
A_vv5=phi5*A_vv4+h55*th5_dd+[cross(w4,w5);cross(w4,cross(w4,l5_v))];
A_vv6=phi6*A_vv5+h66*th6_dd+[cross(w5,w6);cross(w5,cross(w5,l6_v))];

V_=[V_vv1;V_vv2;V_vv3;V_vv4;V_vv5;V_vv6];

```

```

A_=[A_vv1;A_vv2;A_vv3;A_vv4;A_vv5;A_vv6];

PHI=eye(18,18);

PHI(7:12,1:6)=phi2;
PHI(7:12,7:12)=phi2;
PHI(13:18,1:6)=phi2*phi3;

M1=[I_m,m*sqew(l1_v/2);-m*sqew(l1_v/2);I*m];
M2=[I_m,m*sqew(l2_v/2);-m*sqew(l2_v/2);I*m];
M3=[I_m,m*sqew(l3_v/2);-m*sqew(l3_v/2);I*m];
M4=[I_m,m*sqew(l4_v/2);-m*sqew(l4_v/2);I*m];
M5=[I_m,m*sqew(l5_v/2);-m*sqew(l5_v/2);I*m];
M6=[I_m,m*sqew(l6_v/2);-m*sqew(l6_v/2);I*m];

x1= [0 90 -90 0 -90 90];
a= [0 0 0 k3 k4 0 ];
d= [l1 (k2+d2) 0 0 0 d6];
t= [teta1 teta2 teta3 teta4 teta5 teta6];

for i=1:6
    if i== 1
        T1= [cosd(t(i)) -sind(t(i)) 0 a(i) ;
            cosd(x1(i))*sind(t(i)) cosd(x1(i))*cosd(t(i)) -sind(x1(i)) -sind(x1(i))*d(i) ;
            sind(t(i))*sind(x1(i)) cosd(t(i))*sind(x1(i)) cosd(x1(i)) cosd(x1(i))*d(i) ;
            0 0 0 1];
    elseif i== 2
        T2= [cosd(t(i)) -sind(t(i)) 0 a(i) ;
            cosd(x1(i))*sind(t(i)) cosd(x1(i))*cosd(t(i)) -sind(x1(i)) -sind(x1(i))*d(i) ;
            sind(t(i))*sind(x1(i)) cosd(t(i))*sind(x1(i)) cosd(x1(i)) cosd(x1(i))*d(i) ;
            0 0 0 1];
    elseif i==3
        T3= [cosd(t(i)) -sind(t(i)) 0 a(i) ;
            cosd(x1(i))*sind(t(i)) cosd(x1(i))*cosd(t(i)) -sind(x1(i)) -sind(x1(i))*d(i) ;
            sind(t(i))*sind(x1(i)) cosd(t(i))*sind(x1(i)) cosd(x1(i)) cosd(x1(i))*d(i) ;
            0 0 0 1];
    elseif i==4
        T4= [cosd(t(i)) -sind(t(i)) 0 a(i) ;
            cosd(x1(i))*sind(t(i)) cosd(x1(i))*cosd(t(i)) -sind(x1(i)) -sind(x1(i))*d(i) ;
            sind(t(i))*sind(x1(i)) cosd(t(i))*sind(x1(i)) cosd(x1(i)) cosd(x1(i))*d(i) ;
            0 0 0 1];
    elseif i==5
        T5= [cosd(t(i)) -sind(t(i)) 0 a(i) ;
            cosd(x1(i))*sind(t(i)) cosd(x1(i))*cosd(t(i)) -sind(x1(i)) -sind(x1(i))*d(i) ;
            sind(t(i))*sind(x1(i)) cosd(t(i))*sind(x1(i)) cosd(x1(i)) cosd(x1(i))*d(i) ;
            0 0 0 1];
    elseif i==6
        T6= [cosd(t(i)) -sind(t(i)) 0 a(i) ;
            cosd(x1(i))*sind(t(i)) cosd(x1(i))*cosd(t(i)) -sind(x1(i)) -sind(x1(i))*d(i) ;
            sind(t(i))*sind(x1(i)) cosd(t(i))*sind(x1(i)) cosd(x1(i)) cosd(x1(i))*d(i) ;
            0 0 0 1];
    end
end

```

**Figure 10.** Advanced kinematic analysis for robot arm designs

#### 4. Prototype Model

Before manufacturing a robotic arm, design analysis and calculations must be made. If no problems are observed after calculations, design and analysis, the manufacturing phase can be started and prototype

testing can be done. The parts of the designed MIG welding robotic arm produced by a 3D printer are shown in Figure 11.



**Figure 11.** Parts produced by a 3D printer

In the SOLIDWORKS® environment, it is planned to safely carry out the required load-carrying process by attaching MG996r high-torque servo motors (Figure 12) to the movable joints of the parts made.



**Figure 12.** MG996r servo motor

For the electronic software, an Arduino Mega board has been used. The software was written in the Arduino IDE environment by invoking Bluetooth and servo libraries, as shown in Figure 13.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>

Servo servo01;
Servo servo02;
Servo servo03;
Servo servo04;
Servo servo05;
Servo servo06;

SoftwareSerial Bluetooth(0, 1); // Arduino(RX, TX) - HC-05 Bluetooth (TX, RX)
```

```

int servo1Pos, servo2Pos, servo3Pos, servo4Pos, servo5Pos, servo6Pos;
int servo1PPos, servo2PPos, servo3PPos, servo4PPos, servo5PPos, servo6PPos;
int servo01SP[50], servo02SP[50], servo03SP[50], */servo04SP[50], servo05SP[50], servo06SP[50];
int speedDelay = 20;
int index = 0;
String dataIn = "";

void setup() {
  servo01.attach(8);
  servo02.attach(9);
  servo03.attach(10);
  servo04.attach(11);
  servo05.attach(12);
  servo06.attach(13);
  Bluetooth.begin(9600); // Baud Rate
  Bluetooth.setTimeout(1);
  delay(20);
  // Robot kol ilk pozisyon
  servo1PPos = 90;
  servo01.write(servo1PPos);
  servo2PPos = 150;
  servo02.write(servo2PPos);
  servo3PPos = 35;
  servo03.write(servo3PPos);
  servo4PPos = 140;
  servo04.write(servo4PPos);
  servo5PPos = 85;
  servo05.write(servo5PPos);
  servo6PPos = 80;
  servo06.write(servo6PPos);
}

```

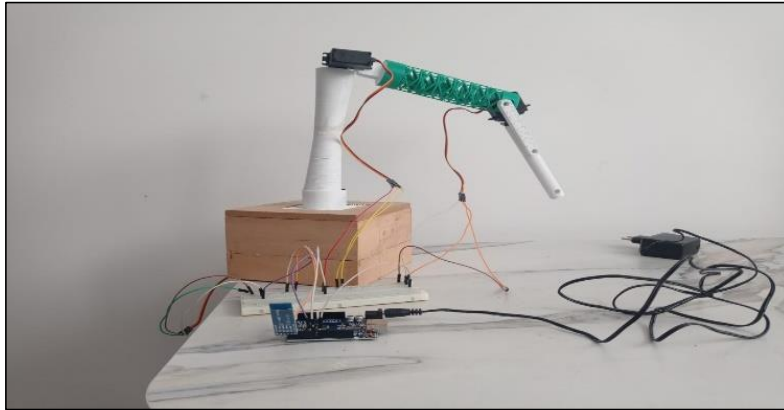
**Figure 13.** Software program used for the prototype

An android package kit (APK) application has been prepared for the system to be actively used. Since the Arduino reduces the incoming voltage to 2.5 volts, the "+" and "-" voltages in the motors have been integrated into a separate system. A motor driver was used to prevent frequency fluctuations in the motors and to stabilize the voltage supplied to the motors. The Arduino Mega and the motors are directly powered by 5V. All electronic and mechanical materials used for the prototype test are shown in Figure 14.



**Figure 14.** All materials used for the prototype test

The prototype prepared as a result of combining the electronic and mechanical connections of the product, which emerged with the necessary software and applications for the operation of the designed robotic arm, has been made suitable for trial runs as seen in Figure 15.



**Figure 15.** Created prototype model

MIG welding system is a heavy and complex system. In the system, the torch, connection cable, welding control box and the conductive metal attached to the torch constitute the main parts of the system. There is an on-off button on the welding torches for safety. The whole system is shown in Figure 16.



**Figure 16.** Main elements of the welding torch system

For active operation of the system, all activations of the electronic components were transferred to the electronic card circuit. The first code written for security purposes was written to direct the robot to a standard specific location. This starting position is shown in Figure 17.





**Figure 17.** Starting position of welding torch

By calculating the movement and maneuver area of the robot arm, a floor on which it could perform the operation was determined. The working principle is to follow the welding path on this ground and complete the welding task. For this purpose, the process steps were started from the starting position and followed the welding path in each welding region, and each step was recorded with the SAVE command. After all movements are recorded, the robot arm follows the previously recorded path over and over again with the RUN command in Figure 18.

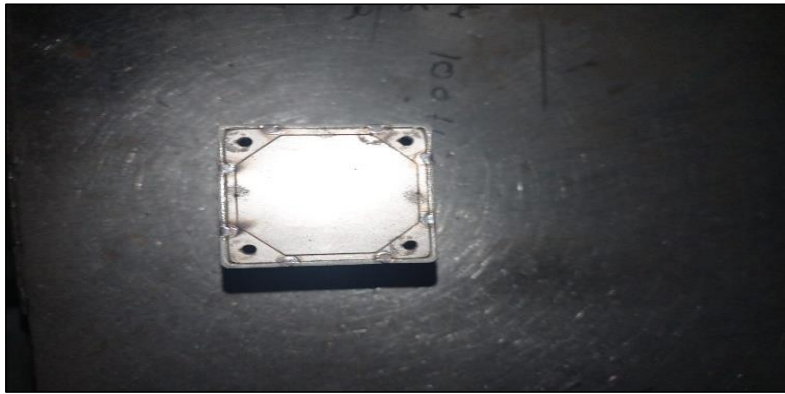


**Figure 18.** Robot arm while doing MIG welding

The welded parts made by the prototype model MIG welding robot during the trial runs are shown in Figure 19 before welding and Figure 20 after welding. For welding, the surface of the material must first be cleaned. And before the material is welded, it must be attached to the place to be welded with a spot and the surface flatness must be checked.



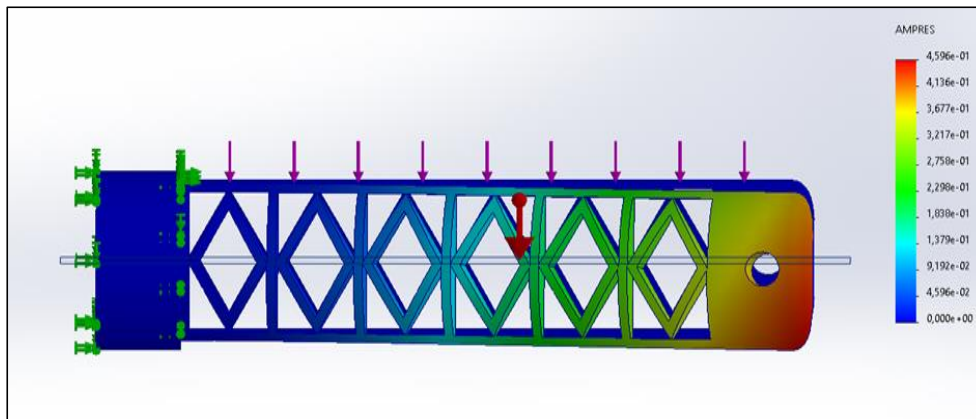
**Figure 19.** The part to be welded



**Figure 20.** Workpiece after welding

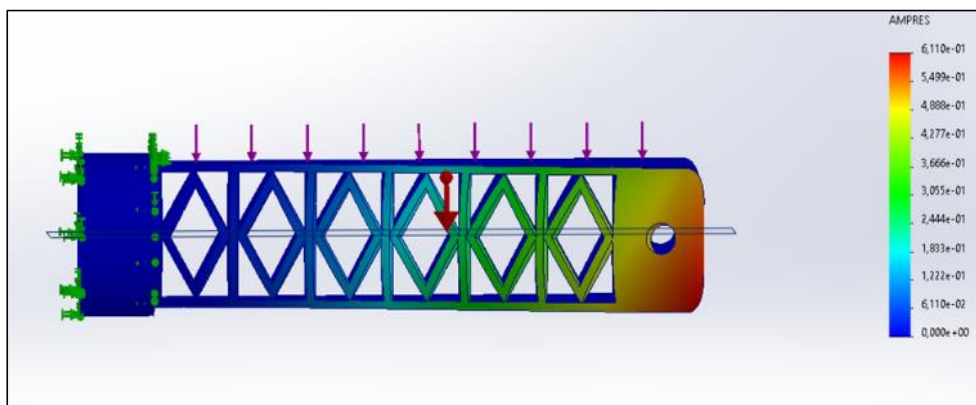
## 5. Analysis and Results

For the analysis of the designed robotic arm, the second joint was selected. The reason for selecting this joint is that it forms the connection point between the first and third joints in the design and is the limb with the most important function in this respect. Since this joint plays a critical role in the movement and load-carrying capacity of the robot arm, it directly affects the overall performance and precision during welding operations. Therefore, the stiffness of this joint significantly affects the efficiency and precision of the robot arm. SOLIDWORKS® program were used to analyze the deformation images and deviation graphs resulting from the application of loads of different magnitudes on the meshed joint. In SOLIDWORKS®, the direction of gravity was determined, and a fixed fixture was set. The material was chosen as PLA. Deformation images and bends were observed by applying a force equal to the weight of the torque at the free end and two loads greater than its own value proportionally. Initially, the deformations and deviations caused by three different loads of 200 g, 300 g, and 400 g, in addition to the standard torque (based on dimensions and materials) and the weight of the arm, were examined.



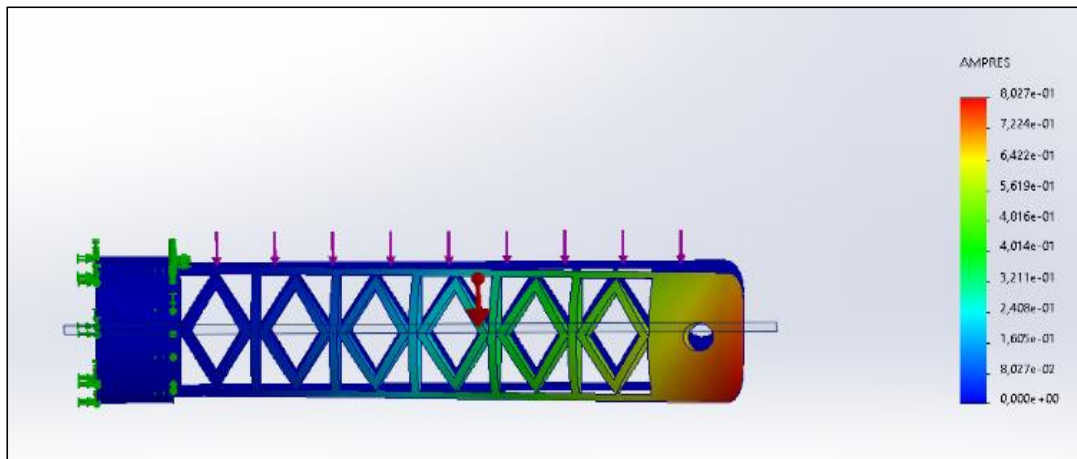
**Figure 21.** Deformation graph and bending results from the first load

As shown in Figure 21, in the first load (200 g) analysis, it was observed that the deviation (deformation) at the minimum applied load was a maximum of 4.596 mm. The deformation in the material occurred outward and downward from the center of the joint. This low level of deformation indicates that the robotic arm can operate under small loads without significant degradation. However, even this level of loads can cause material fatigue over long periods of use, which can affect the durability of the arm in the long term.



**Figure 22.** Deformation graph and bending results from the second load

As shown in Figure 22, in the analysis of the second load (300 g), it was observed that the deviation (deformation) at the minimum applied load was a maximum of 6.110 mm. The deformation in the material occurred outward and downward from the center of the joint. This increased deflection indicates that the joint exhibits flexibility at higher loads and may negatively affect the accuracy of welding operations. Although this level of deformation is still within acceptable limits, optimizing joint strength will be important to minimize loss of sensitivity. This result suggests that although PLA material is suitable for 3D printing, it may show limitations when approaching the load limits under the operating conditions of the robot arm. For situations where higher load capacities are required, strengthening the material or using alternative materials may be considered in future designs.

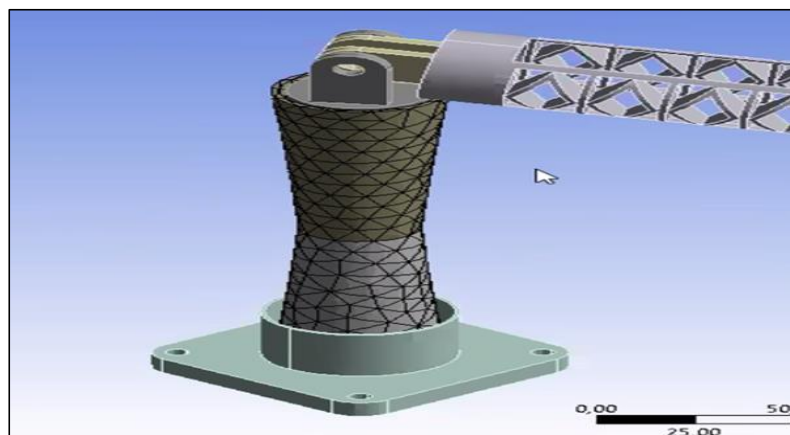


**Figure 23.** Deformation graph and bending results from the third load

As shown in Figure 23, in the analysis of the third load (400 g), it was observed that the deviation (deformation) at the minimum applied load was a maximum of 8.027 mm. The deformation in the material occurred outward and downward from the center of the joint. This degree of deformation indicates that the arm may have difficulty maintaining its sensitivity in welding operations at this load level. The increased deformation also indicates that the PLA material is approaching its limits for this design.

These analyzes show that the robot arm can function under heavier loads, but the precision of welding operations may be compromised. Optimizing the load-carrying capacity and reinforcing it in future designs is recommended to ensure both precision and reliability under maximum operating conditions. Materials with higher strength-to-weight ratio, such as carbon fiber composites, or the use of metal-based 3D printing may contribute to solving the problems observed in these tests.

For the comparison and evaluation of the results, as seen in Figure 24, a mesh was applied to first joint in the ANSYS® program, and the system's maximum bending and deformation graphs were generated.



**Figure 24.** Creating ANSYS® mesh

After the meshing process, the deformation (deviation) and load analysis results on first joint of the MIG welding robotic arm, which underwent motion simulation at specified angles, are shown in Figures 25 and 26.

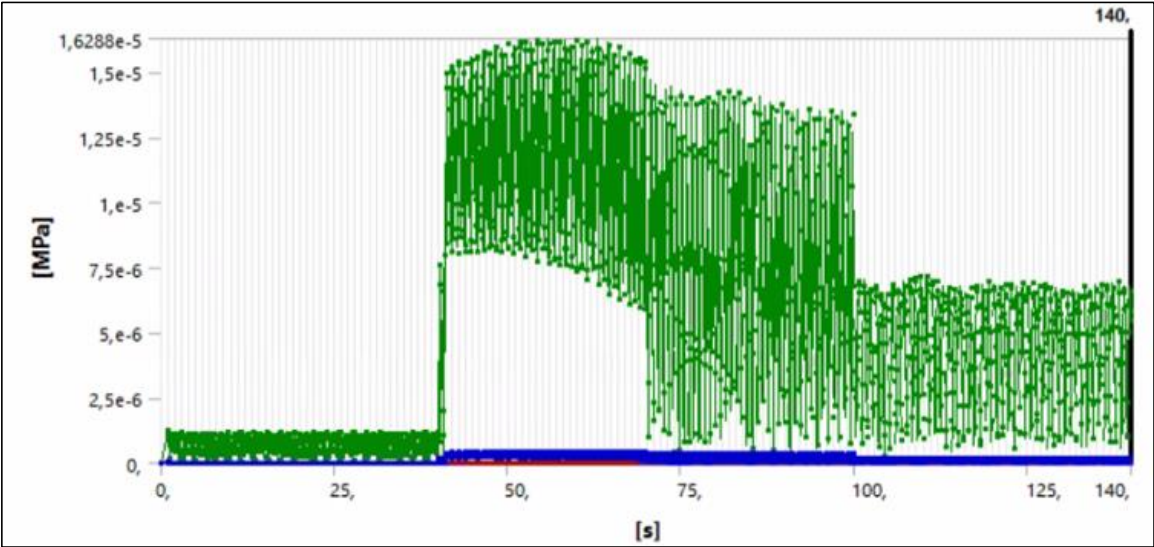


Figure 25. Maximum stress graph

As seen in Figure 25, the maximum stress experienced by the second and third joints between 0° and 90° is shown in the graph. These stress concentrations highlight critical points where material fatigue or failure may occur during long-term use.

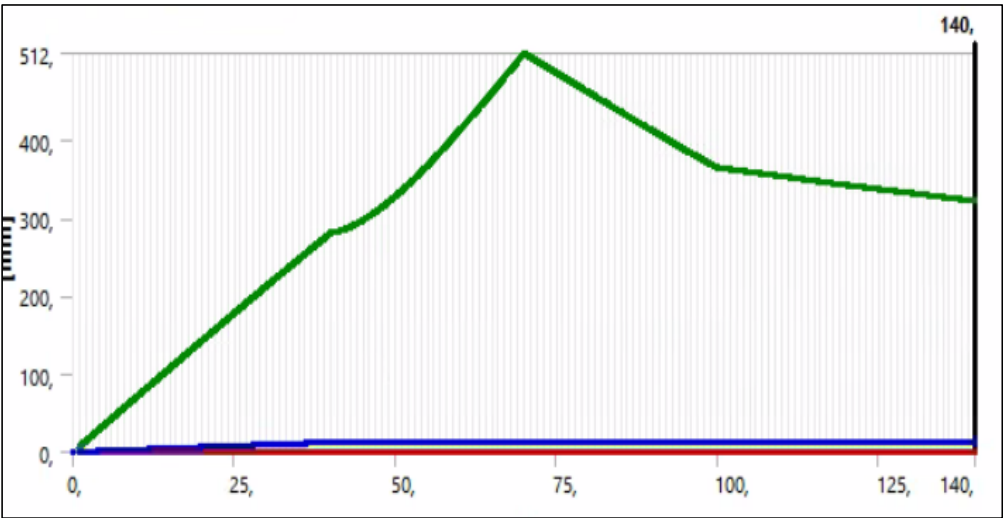


Figure 26. Maximum deviation graph

As seen in Figure 26, the total deviation that occurred in first limb was calculated as 344 mm. This deviation and the calculated total movement time of 140 seconds demonstrate the dynamic behavior of the arm during operation. Deflection indicates the accumulation of stress in the joint throughout the movement cycle and highlights the need for design strengthening or advanced material selection to reduce these effects.

## 6. Conclusions

In this study, a lightweight and portable robot arm capable of MIG welding was designed and analyzed for use in the automotive and defense sectors. The design of the robot arm was carried out using the SOLIDWORKS® program and the material selection was made taking into account weight, strength and cost efficiency. While PLA material was preferred for the body and joints of the arm due to its mechanical properties suitable for the 3D printing process, ABS and brass were used in the components of the welding torch to ensure heat resistance and conductivity.

Kinematic modeling of the robot arm was carried out with the Denavit-Hartenberg (DH) method and kinematic and dynamic analyzes were performed to optimize its functionality. SOLIDWORKS® and ANSYS® softwares were used together to simulate the mechanical behavior of the arm under different load conditions. After designing in the SOLIDWORKS® program, the analyses conducted on the second limb showed a deviation of 4.596 mm for a 200 g material under a 2 N load, 6.110 mm deviation for a 300 g material under a 3 N load, and 8.027 mm deviation for a 400 g material under a 4 N load. Analysis results showed that the arm performed well at moderate loads, but significant deformation and stresses occurred in critical joints at higher loads. These findings reveal that the current design is suitable for light duty, but optimization in material selection and joint reinforcement is required for applications requiring heavy loads. In the analyses conducted in the ANSYS® program for the first limb of the designed MIG welding robotic arm, the maximum deviation experienced by the first limb during a motion simulation at different angles for 140 seconds was calculated to be 344 mm. This situation can be considered as an issue that can be rectified by having the robotic arm first indicate the welding coordinates and then perform the welding. In the same analysis, the maximum stress occurring was calculated as  $1.6288e-5$  MPa, which is a very small value, indicating that the system can operate healthily for a long period.

As a result, the designed MIG welding robot arm offers a promising solution for tasks requiring mobility and flexibility, especially in environments where human intervention is risky. However, future studies should focus on alternative materials such as carbon fiber composites or metal-based 3D printing to increase the load-bearing capacity and deformation resistance of the arm. Additionally, it would be beneficial to develop kinematic and dynamic models with more detailed mathematical expressions to increase the sensitivity of the robot arm and its adaptability to industrial-scale applications.

## References

- Akgümüş Gök D., Gudar B. Computational analysis wearable glove produced with FDM technology. Proceedings of the International Conference on Science, Engineering Management and Information Technology (SEMIT) 2023; 134, Ankara.
- Bakırcı M., Demiray A. Pre-production design of a robotic arm mounted on an unmanned aerial vehicle (UAV). Computational Intelligence, Data Analytics and Applications 2023; 1-8.



- Barnett J., Duke M., Au CK., Lim SH. Work distribution of multiple Cartesian robot arms for kiwifruit harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture* 2020; 169(105202): 1-9.
- Can E., Stachel H. A planar parallel 3-RRR robot with synchronously driven cranks. *Mechanism and Machine Theory* 2014; 79: 25-42.
- Çelebi A., Korkmaz A., Yılmaz T., Tosun H. Design and production of 6 axis robot arm by 3D printer. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 2019; 3(3): 269-278.
- Doruk E., Pakdil M., Çam G., Durgun İ., Kumru UC. Otomotiv sektöründe direnç nokta kaynağı uygulamaları. *Mühendis ve Makina* 2016; 57(673): 2-6.
- Efe E., Özcan M., Haklı H. Building and cost analysis of an industrial automation system using industrial robots and PLC integration. *European Journal of Science and Technology* 2021; 28: 1-10.
- Ertürkmen E., Noori AR. Free vibration analysis of curved castellated beams with different geometric web openings by the finite element method. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology* 2023; 13(4): 1019-1032.
- Farah S., Anderson DG., Langer R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews* 2016; 107: 367-392.
- Karaca F., Akmeşe F., Ünal E. Kinetic and kinematic analysis of the lower extremity stand to sit. *International Journal of Innovative Engineering Applications* 2021; 5(1): 32-35.
- Karacan AN., Şahin Hİ., Özmen M. Multi-objective assembly line balancing with human-robot collaboration. *Adıyaman University Journal of Engineering Sciences* 2022; 16: 10-36.
- Korkut I., Yaşar SA. Design and kinematic analysis of a RRPR robot arm. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)* 2016; 3(6): 491-492.
- Köse C., Tatlı Z. The effect of welding speed on the mechanical and microstructure properties of robotic GMAW welded 5754 aluminium alloy. *NWSA-Technological Applied Sciences* 2015; 2-4.
- Roshanianfard A., Noguchi N. Kinematics analysis and simulation of a 5DOF articulated robotic arm applied to heavy products harvesting. *Journal of Agricultural Sciences* 2017; 24(2018): 91-104.
- Nurveren K., Gündüz BB. Investigation of microstructure and mechanical properties of 6082 aluminium alloy after MIG welding. *Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences* 2018; 7(2): 909-916.
- Pamuk G., Kemiklioğlu U., Sayman O., Özdemir O. Low velocity impact response of biodegradable PLA composites reinforced by reclaimed cotton preforms. *Textile and Apparel* 2016; 26(3): 321-324.
- Sarıyıldız SÖ., Demirhan A. Categorizing objects with image processing techniques and robot arm. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering* 2021; 26(2): 547-554.
- Suarez A., Soria PR., Heredia G., Arrue BC., Ollero A. Anthropomorphic, conformable and lightweight dual arm system for air manipulation. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* 2017; 992-997. IEEE, Canada.

Tınkır M., Sezgen HÇ. Linear static analysis of hydraulic cylinder via finite element method. Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences 2017; 6(1): 3-5.

Türker M., Tosun M. Modern welding technologies used in the aerospace industry. Proceedings of the X. Welding Technology National Congress and Exhibition 2017; 123-130.



## Modifiye-InceptionResNetV2 Mimarisi Kullanarak Domates Yaprak Koşullarının Etkili Tespiti

Pınar USKANER HEPSAĞ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, Adana, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-9923-7782>

\*Sorumlu yazar: [puskaner@atu.edu.tr](mailto:puskaner@atu.edu.tr)

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 26.02.2024  
Kabul tarihi: 04.08.2024  
Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Domates yaprak teşhisi  
Evrişimli Sinir Ağı (CNN)  
Derin Öğrenme (DL)  
InceptionResNetV2  
Modifiye-InceptionResNetV2

### ÖZ

Domates yapraklarını etkileyen hastalıkların zamanında tespit edilmesi ve tedavi edilmesi, bitki üretkenliğini, operasyonel verimliliği ve genel kaliteyi artırmak için esastır. Domates bitkileri çeşitli hastalıklara oldukça duyarlıdır ve çiftçilerin bu hastalıkları yanlış teşhis etmeleri, yetersiz tedavi stratejilerine yol açarak hem bitkilere hem de tarım ekosistemine zarar verebilir. Domates mahsullerinin kalitesinin sağlanması, zamanında ve doğru teşhise büyük ölçüde bağlıdır. Günümüzde derin öğrenme teknikleri, domates bitkilerinde hastalıkları sınıflandırmak gibi çeşitli uygulamalarda önemli başarılar göstermiştir. Bu çalışma, Modifiye-InceptionResNetV2 modeli adlı bir derin öğrenme mimarisi kullanarak domates yaprak koşullarını daha hassas bir şekilde tespit etmek için bir yaklaşım sunmaktadır; bu model, InceptionResNetV2 transfer öğrenme modeline dayanmaktadır. Önerilen mimari, temel model içindeki sınıflandırma bloğunu güçlendirmeye odaklanarak domates yapraklarının durumunu daha doğru bir şekilde tanımlama performansı elde etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, sınıflandırma doğruluğunu artırmak için çeşitli ön işleme adımları ve artırma teknikleri kullanılmaktadır. Bilinen bir kamu veritabanı olan on sınıflı bir veri seti kullanılarak yapılan deneysel analiz, sırasıyla etkileyici eğitim, doğrulama ve test doğruluk oranlarına ulaşmaktadır: %99,74, %99,79 ve %99,20. Önerilen model, çiftçiler için önemli bir araç olarak hizmet edebilir; domates hastalıklarının etkili bir şekilde tespit edilmesine ve önlenmesine yardımcı olarak bitki hastalıklarının hızlı ve basit erken teşhisini sağlar. Deneysel sonuçlar, domates yaprak hastalığı sınıflandırmasında önceki çalışmalara üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

## Efficient Detection of Tomato Leaf Conditions using Modified-InceptionResNetV2 Architecture

### Research Article

#### Article History:

Received: 26.02.2024  
Accepted: 04.08.2024  
Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Tomato Leaf Diagnosis  
Convolutional Neural  
Network(CNN)  
Deep Learning (DL)  
InceptionResNetV2  
Modified-InceptionResNetV2

### ABSTRACT

Timely identification and treatment of diseases affecting tomato leaves are essential for enhancing plant productivity, operational efficiency, and overall quality. Tomato plants are highly vulnerable to a diverse range of diseases, and farmers' misdiagnosing of these ailments can lead to insufficient treatment strategies, causing harm to both the plants and the agroecosystem. Ensuring the quality of tomato crops relies significantly on prompt and accurate diagnoses. In contemporary times, deep learning techniques have demonstrated remarkable success across various applications, including classifying diseases in tomato plants. This study presents an approach for detecting tomato leaf conditions more precisely using a deep-learning architecture, namely the Modified-InceptionResNetV2 model, based on the InceptionResNetV2 transfer learning model. Our proposed architecture focuses on strengthening the classification block within the base model to achieve more accurate performance in identifying the condition of tomato leaves. Additionally, several preprocessing steps and augmentation techniques are employed to improve classification accuracy. Experimental analysis using a well-known, publicly available ten-class dataset achieves impressive training, validation, and testing accuracy rates of 99.74%, 99.79%, and 99.20%, respectively. The proposed model could

serve as a vital tool for farmers, aiding in the efficient detection and prevention of tomato diseases and enabling rapid and simple early detection of plant diseases. Experimental results showcase its superiority over previous studies in tomato leaf disease classification.

---

**To Cite:** Uskaner Hepsag P. Efficient Detection of Tomato Leaf Conditions using Modified-InceptionResNetV2 Architecture. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 375-392.

## 1. Introduction

Plants are crucial in sustaining human life by providing nourishment and shielding from harmful rays. They are indispensable for terrestrial ecosystems and safeguarding the ozone layer, which protects against UV radiation. The tomato, known for its nutritional richness, is extensively cultivated and consumed globally (Erika et al., 2020). Each year, approximately 160 million tons of tomatoes are consumed worldwide, making them a vital source of income for farming households and contributing significantly to poverty alleviation efforts (Bhandari et al., 2023). Tomato cultivation and production significantly influence the agricultural economy because nutrient richness positions them as highly esteemed crops globally (Trivedi et al., 2021). Tomatoes, renowned for their nutritional value, boast medicinal characteristics that offer protection against health-related problems, including high blood pressure, gum bleeding, and hepatitis. The surge in tomato demand has primarily stemmed from their medicinal and culinary uses. Small-scale farmers, contributing over 80% of agricultural output, encounter significant crop losses, with diseases and pests causing nearly half of the damage (Bhandari et al., 2023). It is crucial to recognize and comprehend parasite insects and illnesses that affect field crops in order to limit the detrimental impacts they have on tomato farming. Consequently, diagnostic research pertaining to field agricultural diseases is of the utmost relevance.

Plant diseases have been detected using machine-learning techniques since their inception (Reza et al., 2017; Panchal et al., 2019; Deepa et al., 2021). For plant health conditions identification, Chakraborty et al. (2021) employed an image-segmentation technique to isolate disease lesions from the leaves of apples. They then utilized support vector machines (SVM) to accurately identify the disease, taking into account the color and striping features of the lesions. Qin et al. (2016) developed a classification model to identify alfalfa leaf diseases utilizing a naïve Bayes approach combined with linear discriminant analysis. They extracted various features, including color, shape, and stripes, from lesions on the leaves. Chuanqi Xie and Yong He(2016) used an analysis of the textural features of tomato images to obtain an early detection accuracy of 88.46% for tomato blight. Rahman et al. (2023) describe a strategy of image processing based on autonomous detection and provide treatments for tomato leaf diseases. The suggested technique calculates 13 distinct statistical characteristics from tomato leaves using the grey-level co-occurrence matrix method. The acquired characteristics are sorted into various illnesses using the support vector machine (SVM). The results of the experiment indicate that the proposed method provides accurate annotations: one hundred percent for healthy leaves, ninety-five percent for early-blight conditions, ninety percent for septoria-leaf spots, and eighty-five percent for late-blight conditions. Despite the existence of numerous machine learning algorithms, image preprocessing and

feature extraction, both intricate processes, are typically required prior to image recognition. However, convolutional neural networks (CNN) can bypass these steps by automatically identifying images and extracting discriminant features.

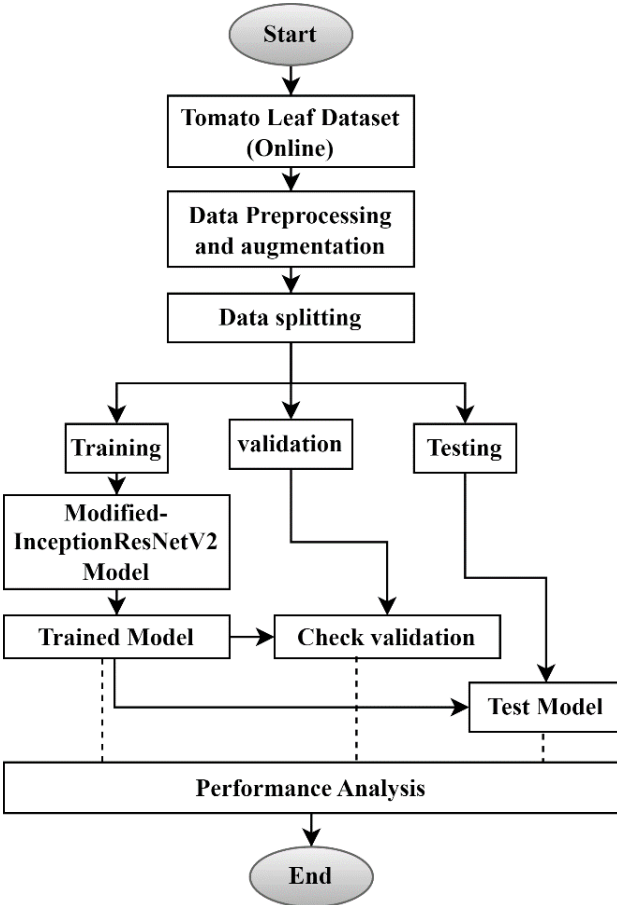
These days, deep learning techniques, especially CNNs, have made important strides in computer vision, automatically identifying and extracting distinctive characteristics while reducing reliance on manually crafted features, thereby enhancing classification accuracy. For instance, Zhong et al.(2021) utilized convolutional techniques to tune the parameters of dual-channel neural networks VGG16 and ResNet for the detection of maize leaf diseases, achieving a classification performance of 93.33%. However, this method requires further enhancements for better identification rates, high-resolution images, and complex model parameters. Paul et al. (2023a) suggested a lightweight custom CNN model and used TL-based models (VGG16 and VGG19)in order to detect tomato leaf conditions. The suggested model, leveraging data augmentation approaches, outperformed all other models in terms of accuracy and recall, achieving a remarkable 95.00%. Gulzar et al. (2023) developed an enhanced model using MobileNetV2, achieving 99% accuracy across 40 distinct fruits. Bouni et al. (2023) presented a deep CNN) and transfer learning that was used to identify tomato leaf disease. DenseNet, VGG-16, AlexNet, and ResNet make up CNN's backbone. The comparative performance of these networks is evaluated employing the Adam and RmsProp optimization techniques, revealing that the DenseNet pretrained model, when utilizing the RmsProp optimizer, yields the most notable performance, achieving an exceptional accuracy of 99.90%. Aggarwal et al. (2023) introduced a stacked ensemble technique to enhance F1 scores, which involved aggregating predictions from three pre-trained models: ResNet152, VGG16, and DenseNet169. Their findings suggest that assembling multiple weak CNNs outperforms single models in terms of prediction accuracy. Another study employing CNN and transfer learning successfully classified 14 common seeds (Gulzar et al., 2020), showcasing the advancements in deep learning technology. Agarwal et al. (2020) suggested a CNN architecture to classify tomato leaf illnesses. Adam and the SGD optimizer have been used to implement the suggested CNN model. The outcomes demonstrate that, when used with the SGD optimizer, the CNN model obtains an accuracy of 0.9966) and a loss value of 0.0044. Zhang et al. (2023) introduced M-AORANet, which accurately identifies tomato leaf diseases by extracting fine multi-scale attributes and locating lesions on tomato leaves, achieving a recognition accuracy of 96.47% from 7493 photos. Sun et al. (2017) improved the AlexNet architecture by minimizing convolutional kernel size and parameters, while Deng et al. (2023) presented a CNN architecture for detecting the tomato leaf conditions utilizing an online dataset and additional images from the country's fields. The proposed model effectively identifies and categorizes diseases found on tomato leaves, achieving an accuracy exceeding 99% in both the training and test datasets. These diverse strategies offer valuable insights for further research and development.

This study presents a tomato leaf disease detection approach employing a novel deep learning architecture, namely Modified-InceptionResNetV2. Exploiting the architecture of pre-trained models, we load the weights of the pre-trained model to use it for feature extraction. Afterward, the results of

the model are combined to aid in identifying and categorizing leaf pictures. To enhance the effectiveness of our approach, we incorporate various preprocessing phases and augmentation techniques. These steps contribute to improved experimental outcomes, enabling the precise detection of tomato leaf conditions. The following sections of this paper are structured as outlined below: In Section 2, we detail our overall methodology, encompassing a thorough discussion of data description, preprocessing with augmentation techniques, and the proposed model architecture. Section 3 delves into a comprehensive analysis of the experimental results, accompanied by an in-depth discussion. Finally, Section 4 summarizes the key findings and delineates future plans.

**2. Methodology**

A tomato leaf condition detection approach is presented in this study. Firstly, a well-known publicly available tomato leaf dataset (comprising ten classes) is collected for analysis. Next, data preprocessing and augmentation techniques are implemented, aiding in enhancing diversity and robustness. The entire dataset is then split into three subsets to train the model, validate its performance, and test its effectiveness on unseen data with the proposed architecture. Finally, various performance evaluation metrics are calculated to compare overall performance and assess the effectiveness of our proposed model. The overall working procedure of the proposed approach is illustrated in Figure 1.



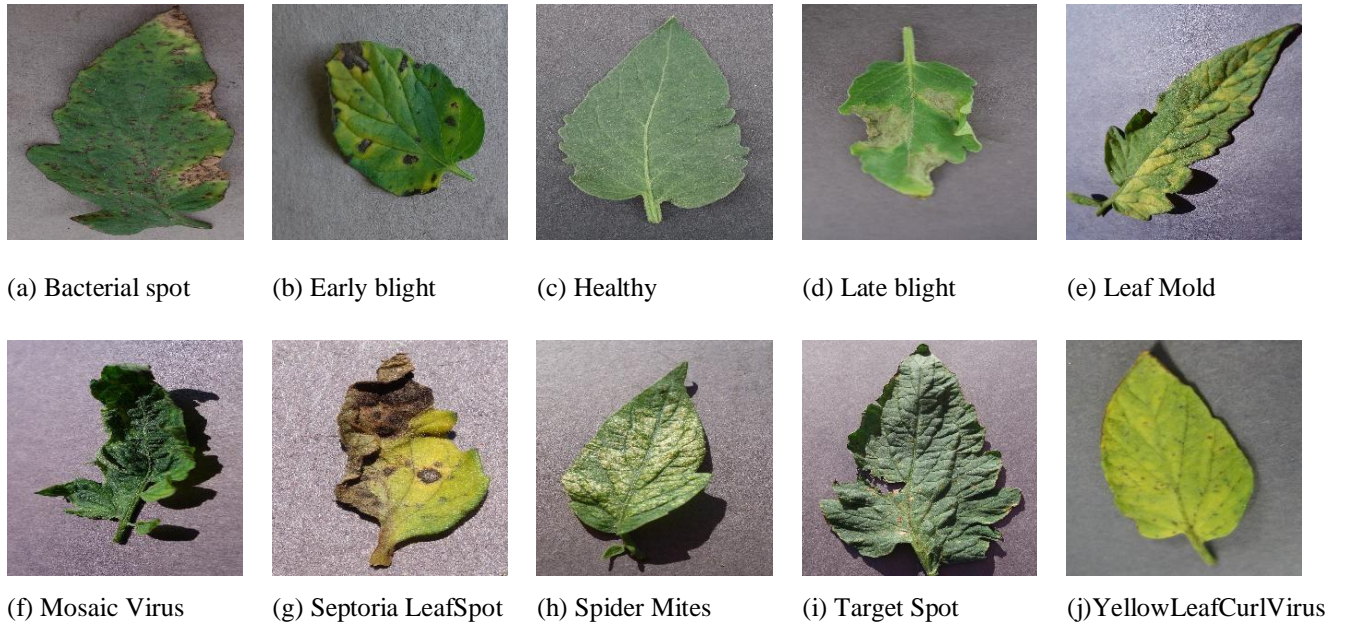
**Figure 1.** The working flow of the tomato leaf condition detection approach.

### *2.1. Data Description*

In this experimental analysis, we leveraged the Kaggle dataset (Tomato leaf disease detection by Kaustubh, 2024), a widely acknowledged and extensively utilized public resource renowned for its comprehensive collection of 11,000 images. These meticulously curated and evenly distributed images span a diverse array of tomato leaf disease manifestations, encompassing ten distinct categories. Each category comprises precisely 1,100 images, ensuring a balanced representation across the dataset. The inclusion of such a vast and diverse set of images provides researchers and practitioners with a rich source of data to explore and analyze the complexities of tomato plant health. To provide visual context, representative images from each class are depicted in Figure 2, offering insights into the visual characteristics associated with different disease states.

### *2.2. Data Preprocessing and Augmentation*

After the dataset acquisition, a meticulous data preprocessing pipeline is implemented to optimize the performance of both the InceptionResNetV2 and modified InceptionResNetV2 models in the task of tomato leaf disease detection. The dataset is initially split into three subsets: a training set (9,000 images), a validation set (1,000 images), and an unseen testing set (1,000 images). This partitioning strategy facilitates effective model training, validation, and evaluation of previously unseen data. To ensure a consistent input format for the models, all images are resized to dimensions of 224x224 pixels, with three color channels (RGB). Pixel values undergo normalization via the preprocessing function from TensorFlow's Keras applications, specifically the Xception model. This step is pivotal for facilitating effective learning by rescaling pixel values to fall within the range of -1 to +1. Augmentation techniques, such as horizontal and vertical flips, brightness adjustments, 90-degree rotations, and zooming, are applied using the ImageDataGenerator class from TensorFlow to enhance the diversity and robustness of the training set. These techniques introduce variability into the training data, promoting model generalization. The training set generator is configured to produce batches of images and corresponding categorical labels during the training phase. The validation set generator is also set up to facilitate model evaluation during the validation phase. Careful consideration is given to determining the number of steps per epoch during training and validation based on the size of the respective datasets and the batch size. This configuration ensures that the models iterate through the entire dataset during each epoch, contributing to comprehensive learning and evaluation.



**Figure 2.** Visualization of each class of tomato leaf images (random selection)

### 2.3. Proposed Model Description

In this experimental analysis, a pretrained Inception-ResNet-v2 model (Szegedy et al., 2016) is employed, which serves as a fusion of the Inception and ResNet architectures. This model is considered a pinnacle in deep neural network design, undergoes modifications for performance improvement, and its application is explored in the crucial task of tomato leaf image classification. The inceptionResNetv2 architecture is composed of 164 deep residual layers. The overarching structure is composed of multiple blocks, encompassing Input, Stem, ten instances of InceptionResNet\_A, Reduction\_A, 20 instances of InceptionResNet\_B, Reduction\_B, 10 instances of InceptionResNet\_C, Average Pooling layers, Dropout layers, and SoftMax layer. It's important to highlight that the Inception-ResNet blocks incorporate a range of scale factors, enabling the adjustment of outputs within distinct ranges for each block. The network is designed to take RGB images with dimensions of 224 (height) x 224 (width) x 3 (depth) as input. With its numerous blocks and carefully designed layers, this comprehensive architecture is tailored for tomato leaf image classification, showcasing the model's versatility and effectiveness in complex visual recognition tasks. This adaptability is embedded in its architecture, with key components outlined as follows:

**Inception Blocks:** The Inception block is the core building block of the model, utilizing parallel convolutional operations to capture features at different scales. The outcome of the section is attained through the integration of results from each concurrent branch. The output of an Inception block can be represented as follows:

$$\text{Inception Block (Output)} = \text{Branch (1), Branch(2), \dots, Branch (n)} \quad (1)$$

Residual Connections: Residual connections facilitate the flow of information through skip connections, addressing the vanishing gradient problem and aiding the training process of deep neural networks. The residual connection can be formulated as follows:

$$\text{Residual (Output)} = \text{Input} + \text{Convolution( Input)} \quad (2)$$

Stem Architecture: The stem architecture efficiently processes input images, typically utilizing convolutional and pooling layers for low-level feature extraction. The stem architecture output can be expressed as:

$$\text{Stem (Output)} = \text{Convolution( Input)} \quad (3)$$

Fully Connected Layers: These layers process flatten feature maps to produce final predictions. The representation of the output from the fully connected layer is as follows:

$$\text{Output} = \text{Fully Connected (Flatten(Feature Maps))} \quad (4)$$

Training Dynamics: The model is trained using backpropagation and gradient descent, with the addition of residual connections aiding the training of deep networks. The gradient update equation can be expressed as:

$$\text{Weights} \leftarrow \text{Weights} - \alpha \cdot \frac{\partial \text{Loss}}{\partial \text{Weights}} \quad (5)$$

Model Parameters: Inception-ResNet-v2 achieves parameter efficiency by judiciously combining inception blocks and residual connections. The total number of parameters in the model can be computed as:

$$\text{Total Parameters} = \sum_{\text{layers}} \text{Parameters in Layer} \quad (6)$$

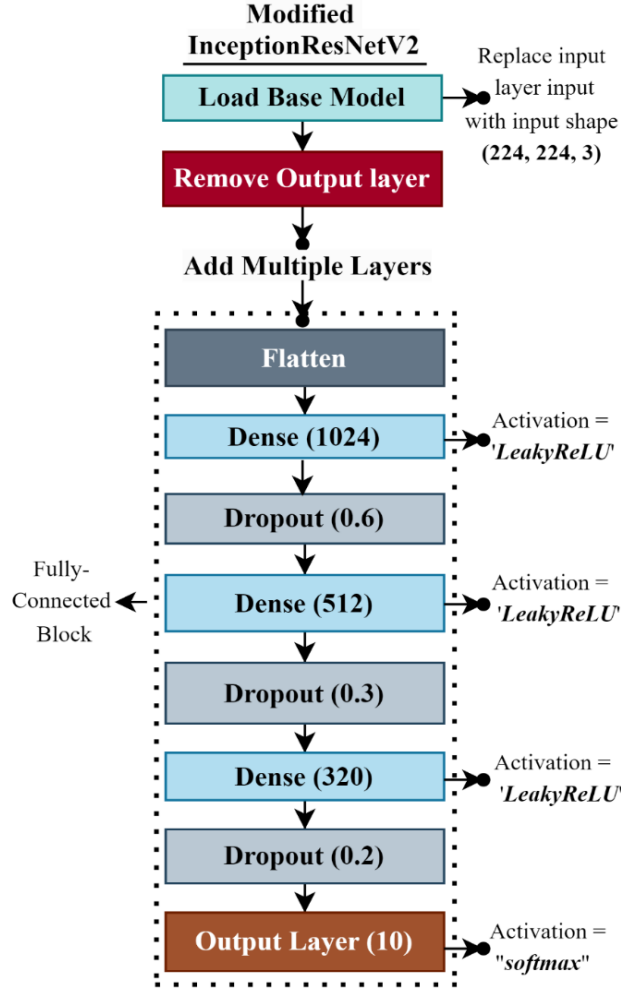
This study modifies the pre-trained Inception-ResNet-V2 model to enhance its performance for more precise tomato leaf disease detection. The illustration of the modified InceptionResNetV2 model is shown in Figure 3. Initially, the InceptionResNetV2 model with ImageNet pretrained weights is

employed, excluding the final fully connected layer and setting the layers of the base model to trainable. Feature extraction is performed up to the last convolutional layer, a critical point in the hierarchy of the InceptionResNetV2 architecture.

The extracted features are then flattened, creating a one-dimensional array of values—essential for preparing the feature maps for further processing in the subsequent dense layers. Three dense layers with LeakyReLU activation functions (1024, 512, and 320 units) are introduced to enhance the classification block. LeakyReLU's small negative slope during the negative part of the activation prevents the issue of "dead neurons" and facilitates the learning of intricate patterns and features. This hierarchical structure enables the model to capture representations at different levels of abstraction. Dropout layers (with rates of 0.6, 0.3, and 0.2, respectively) are strategically placed after each dense layer. Dropout is a regularization technique that helps to prevent overfitting problems during training by introducing redundancy.

By randomly deactivating a portion of neurons in each iteration, dropout compels the network to depend on alternative pathways, thereby averting excessive reliance on specific features. This, in turn, promotes improved generalization, reduces overfitting, and enhances the robustness of the learned features. The final dense layer, equipped with SoftMax activation, produces output probabilities for the classification into 10 classes corresponding to different tomato leaf categories. The model is compiled using categorical crossentropy loss, which is suitable for multi-class classification tasks. With a learning rate set to 0.0001, the Adam optimizer facilitates efficient weight updates during training. The metric used for model evaluation is accuracy, measuring the model's ability to classify instances across all classes correctly.





**Figure 3.** The architecture of the proposed modified InceptionResNetV2 model.

#### 2.4. Performance Evaluation

In this investigation, accuracy (ACC), precision (P), recall (R), and F1 score are selected as evaluation metrics to gauge the efficacy of deep learning algorithms comprehensively (Paul et al., 2023b). Assessment indexes, including false negative rate (FN), false positive rate (FP), true negative rate (TN), and true positive rate (TP), are employed to construct these metrics. The derivation of these indicators is outlined as follows:

$$ACC = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (7)$$

$$P = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (8)$$

$$R = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (9)$$

$$F1 = \frac{2 * (P * R)}{(P + R)} \quad (10)$$

### 2.5. Computing Environment

This experiment investigates tomato leaf disease identification through a deep learning approach, with implementation conducted on the Kaggle platform. Kaggle provides a standardized computing environment (GPU: Tesla P100-PCIE-16GB, RAM: 32GB), fostering collaborative research and reproducibility. This analysis utilizes a variety of libraries, including TensorFlow for numerical computation and machine learning, Keras for building the architecture of neural networks, NumPy for calculating mathematical operations and data analysis, Matplotlib for managing graphs, and additional libraries related to experimentation.

## 3. Result and Discussion

The experimental outcomes of tomato leaf disease detection using the proposed deep learning method are presented in this section, highlighting the model's robustness and adaptability in addressing diverse conditions. For this purpose, a novel deep learning architecture (modified InceptionResNetV2) is proposed and constructed based on the pretrained InceptionResNetV2 model. Initially, the tomato leaf dataset is divided into three subsets: the training set (consisting of 9000 images) for model training, the validation set (comprising 1000 images) for assessing the model's validity, and the testing set (with 1000 images) for evaluating the model's effectiveness. The implementation details for both models are consistently maintained to ensure a fair comparison, involving the utilization of identical hyperparameters, adherence to the same training procedures, and evaluation based on standardized metrics. Finally, the performance of the proposed model is compared with that of some recently popular models mentioned in the literature. Various evaluation metrics, including accuracy, precision, recall, and F1-score, are calculated to assess the model's performance.

In evaluating the testing performance of the InceptionResNetV2 model across a diverse range of plant disease classes, Table 1 provides a comprehensive analysis of precision, recall, and F1-score metrics, accompanied by corresponding support values. Notably, disease classes such as 'healthy' showcase exemplary accuracy metrics, boasting a precision of 0.9798, a recall of 0.9700, and an F1-Score of 0.9749. Similarly, 'mosaic virus' and 'Yellow Leaf Curl Viru' demonstrate robust performance, exhibiting high precision values (0.9773 and 0.9681, respectively) along with balanced recall and F1-scores, underscoring the model's efficacy in accurately identifying these diseases. However, a meticulous examination unveils areas that warrant improvement. While achieving a commendable recall of 0.9200, the 'Early blight' class presents a lower precision of 0.7188 and an F1-Score of 0.8070. This indicates a propensity for the model to generate false positives in identifying 'Early blight,' highlighting

the need for refinement to enhance precision. Additionally, providing insight into the overall performance of the InceptionResNetV2 model, the training accuracy stands at 0.9223, while the validation accuracy is 0.8875. The model exhibits a commendable final testing accuracy of 0.8970.

**Table 1.** Testing performance of the InceptionResNetV2 model.

Disease	Precision	Recall	F1-Score
Bacterial spot	0.9158	0.8700	0.8923
Early blight	0.7188	0.9200	0.8070
Late blight	0.9318	0.8200	0.8723
Leaf Mold	0.7833	0.9400	0.8545
Septoria leaf spot	0.8681	0.7900	0.8272
Spider mites	0.8448	0.9800	0.9074
Target Spot	0.9259	0.7500	0.8287
YellowLeafCurl Virus	0.9681	0.9100	0.9381
Mosaic virus	0.9773	0.8600	0.9149
Healthy	0.9798	0.9700	0.9749
<b>Average</b>	<b>0.8914</b>	<b>0.881</b>	<b>0.8817</b>

Table 2 presents the testing performance metrics of our enhanced InceptionResNetV2 model across diverse plant disease classes, emphasizing exceptional precision, recall, and F1-score values, complemented by corresponding support values.

**Table 2.** Testing performance of the modifiedInceptionResNetV2 model.

Disease	Precision	Recall	F1-Score
Bacterial spot	1.0000	0.9800	0.9899
Early blight	0.9897	0.9600	0.9746
Late blight	0.9706	0.9900	0.9802
Leaf Mold	0.9901	1.0000	0.9950
Septoria leaf spot	0.9901	1.0000	0.9950
Spider mites	1.0000	1.0000	1.0000
Target Spot	1.0000	0.9900	0.9950
YellowLeafCurl Virus	0.9804	1.0000	0.9901
Mosaic virus	1.0000	1.0000	1.0000
Healthy	1.0000	1.0000	1.0000
<b>Average</b>	<b>0.9921</b>	<b>0.992</b>	<b>0.9920</b>

The model demonstrates exceptional accuracy, particularly in categories like 'Spider mites,' 'Two-spotted mites,' 'mosaic virus,' and 'healthy.' Precision, recall, and F1-score all attain a perfect value of 1.0000 in these classes, showcasing the model's precise identification of these diseases with no misclassifications. Even in challenging scenarios like 'Bacterial spot' and 'Yellow Leaf Curl Virus,' the model maintains high precision values of 1.0000 and 0.9804, respectively, showcasing its robust performance in accurate disease identification, particularly when precision is crucial. A comparative analysis between the modified InceptionResNetV2 model (Table 2) and the baseline model (Table 1) reveals consistent outperformance across all disease classes regarding precision, recall, and F1-score. This improvement underscores the success of the introduced modifications, resulting in heightened accuracy and reliability in plant disease identification. Examining the comprehensive performance metrics of the modified InceptionResNetV2 model unveils notable outcomes: the training accuracy achieves an impressive 99.74%, the validation accuracy holds steady at 99.79%, and the testing accuracy reaches 99.20%. Comparing these values to the baseline model's performance (final training accuracy: 92.23%, final validation accuracy: 88.75%, final testing accuracy: 89.70%), there is a substantial improvement across the board. The training accuracy shows an increase of approximately 7.51%, the validation accuracy increases by around 11.04%, and the testing accuracy improves by about 9.21%. These percentage improvements underscore the significant advancements in enhancing the model's performance through the proposed modifications. In conclusion, the presented results highlight the success of the modifications made to the InceptionResNetV2 model, leading to superior performance compared to the baseline and establishing the modified model as a robust and reliable choice for plant disease identification.

Figure 4 illustrates the performance analysis and visualization of the InceptionResNetV2 model during the training and validation phases. This model is trained with a batch size of 64 for 50 epochs, employing the categorical crossentropy loss function and being optimized with Adam (learning rate: 0.0001). This figure provides insights into the model's dynamic behaviour across epochs, presenting key metrics and trends contributing to a nuanced understanding of its training and validation performance. Figure 5 illustrates the performance analysis and visualization of the modified InceptionResNetV2 model during both the training and validation phases. Employing the same hyperparameters, this curve showcases the model's ability to achieve superior performance compared to the base model.

### *3.1. Confusion Matrix*

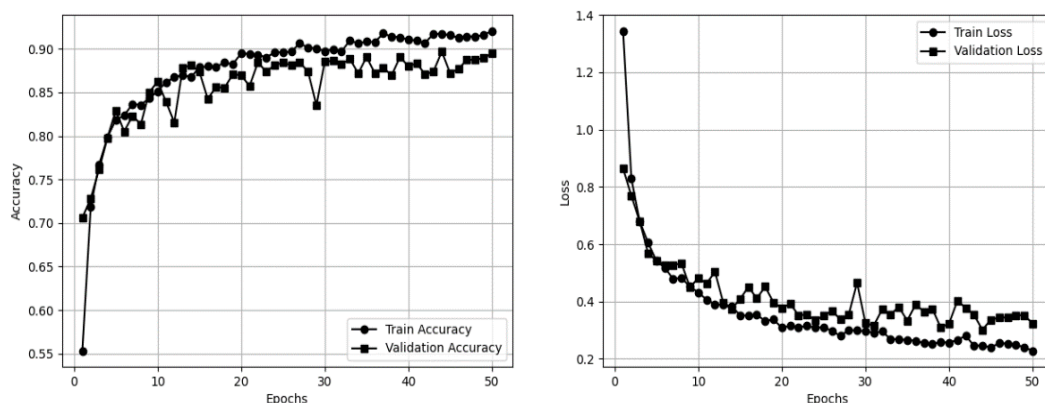
Figures 6 and 7 present the confusion matrices obtained while evaluating the InceptionResNetV2 and the proposed modified-InceptionResNetV2 models. The confusion matrix's diagonal entries show the instances when the model accurately predicted the class (true positives and true negatives). On the other hand, the off-diagonal elements correspond to misclassifications, indicating cases where the model's predictions did not align with the actual classes (false positives and false negatives). The confusion matrix is computed for both models using an unseen testing set. In the confusion matrix presented in

Figure 6, it is clear that 881 images are accurately predicted, while the InceptionResNetV2 model misclassifies a total of 119 images. Conversely, modifying the InceptionResNetV2 model shown in Figure 7 achieves successful predictions for 992 out of 1000 testing images, with only 8 misclassified. This comparison highlights the enhanced performance of the modified-InceptionResNetV2 model, demonstrating a significant reduction in misclassifications compared to the original InceptionResNetV2. The modified model's ability to accurately predict a higher proportion of testing images positions it as a noteworthy improvement, suggesting a cutting-edge performance in plant disease identification.

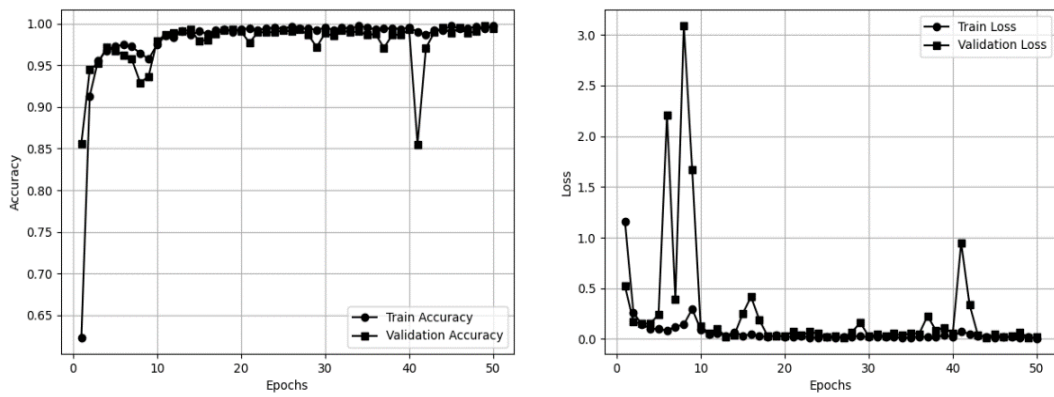
### 3.2. Comparative Analysis

After analyzing the performance of the proposed approach, we also compare it with some recent related studies to assess the effectiveness and applicability of our proposed architecture, as shown in Table 3. Most of the studies on tomato leaf disease detection achieve impressive performance. In the studies conducted by (Deng et al., 2023) and (Tang et al., 2023), the MC-UNet and PLPNet models were employed, achieving accuracy rates of 91.32% and 94.5%, respectively. Kumar et al. (Kumar et al., 2023) focused on classifying tomato leaf diseases, introducing an approach that utilized the CMNV2 method and achieved an impressive accuracy of 99.28%. Notably, their study was limited to images from two distinct classes. In study (Saeed et al., 2023), the Inception ResNet V2 model was applied, resulting in an accuracy of 99.22%, but the analysis was confined to three classes.

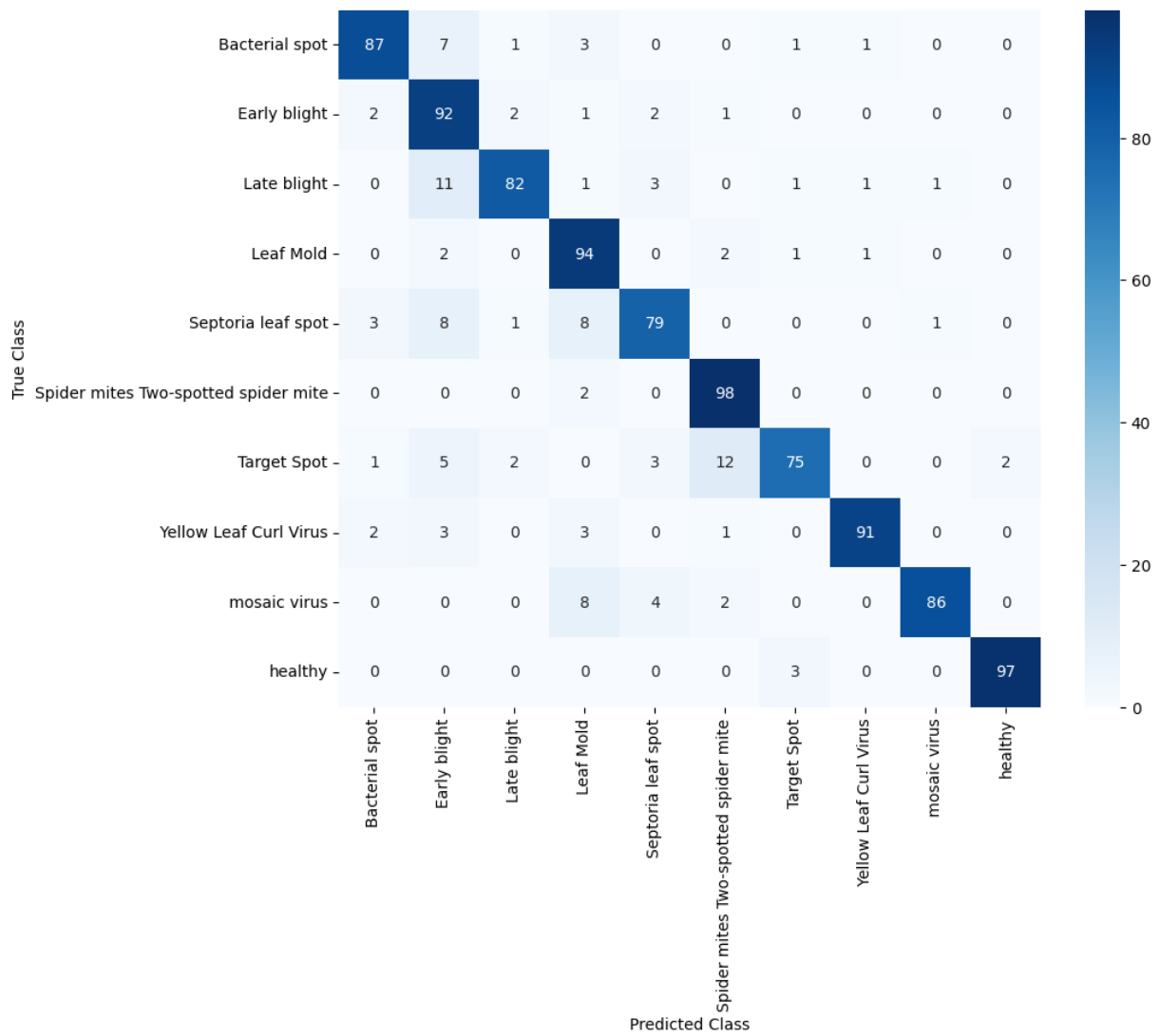
On the other hand, in this experimental analysis, we utilize a dataset containing ten classes of tomato leaves to identify the crops' conditions precisely. Here, we introduce an architecture, Modified-InceptionResNetV2, which plays a key role in achieving state-of-the-art performance compared to the recent related studies mentioned in this literature.



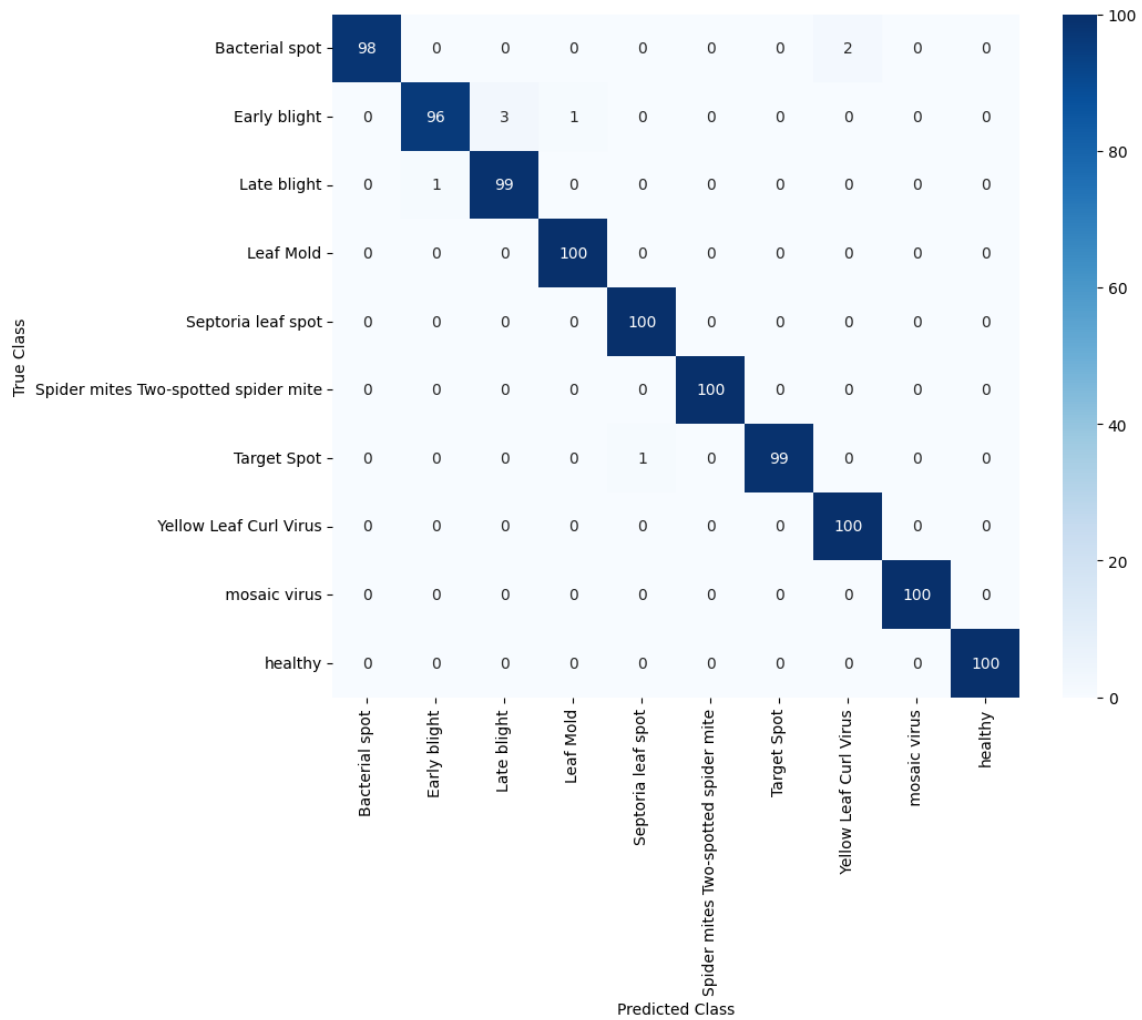
**Figure 4.** Performance analysis and visualization of the InceptionResNetV2 model during the training and validation phases.



**Figure 5.** Performance analysis and visualization of the modified-InceptionResNetV2 model during the training and validation phases.



**Figure 6.** Confusion Matrix for InceptionResNetV2 Model.



**Figure 7.** Confusion Matrix for the Proposed Architecture (Modified-InceptionResNetV2).

**Table 3.** Performance comparison of our proposed method with some recent studies.

References	Dataset	Class	Image contains	Model	Accuracy
(Parvez et al., 2023)	PlantVillage	3	6926	CNN	0.9839
(Hossain et al., 2023)	Kaggle	10	20000	MaxViT	97%
(Huang et al., 2023)	PlantVillage	8	1654	FC-SNDPN	Training:99.83 Testing: 97.59
(Deng et al., 2023)	PlantVillage	4	6,372	MC-UNet	91.32%
(Tang et al., 2023)	Self-built	5	13,597	PLPNet	94.5%
(Kumar et al., 2023)	Kaggle	2	6980	CMNV2	<b>99.28%</b>

(Peng et al., 2023)	Own Collected	5	1256	DIMPCNET	94.44%
(Saeed et al., 2023)	PlantVillage	3	5225	Inception ResNet V2	99.22%
Proposed Method	Kaggle	10	11000	Modified-InceptionResNetV2	Training: 99.74% Validation: 99.79% Testing: 99.20%

---

#### 4. Conclusion

This study focuses on the precise classification of ten different types of tomato leaf diseases using deep learning techniques and evaluates its effectiveness compared to recent similar studies. This research investigates the application of InceptionResNetV2, modifying the model to propose Modified-InceptionResNetV2 for enhanced performance in classifying a ten-class tomato leaf condition Kaggle dataset. Besides, data preprocessing and augmentation techniques are applied to improve model robustness. Both models are trained and tested under the same hyperparameters and environment for fair comparison. Experimental results demonstrate the superior performance of the proposed method, with accuracies of 99.74% in training, 99.79% in validation, and 99.20% in testing. The classification report for each class of images, incorporating precision, recall, and F1-score metrics, confirms the high performance of the proposed model. These findings suggest the potential of the proposed approach as an automated tool for early detection of tomato leaf diseases, thereby enhancing production yields. Furthermore, the study hints at broader applications beyond tomato diseases, indicating possibilities for integrating additional methodologies such as segmentation, feature extraction, ranking-oriented classification, and object detection to achieve even better results.

#### Statement of Conflict of Interest

There is no conflict.

#### Author's Contributions

The author confirms sole responsibility for the following: study conception and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

#### References

- Agarwal M., Singh A., Arjaria S., Sinha A., Gupta S. ToLeD: Tomato leaf disease detection using convolution neural network. *Procedia Computer Science* 2020; 167: 293-301.
- Aggarwal S., Gupta S., Gupta D., Gulzar Y., Juneja S., Alwan AA., Nauman A. An artificial intelligence-based stacked ensemble approach for prediction of protein subcellular localization in confocal microscopy images. *Sustainability* 2023; 15(2): 1695.



- Bhandari M., Shahi TB., Neupane A., Walsh KB. Botanicx-ai: Identification of tomato leaf diseases using an explanation-driven deep-learning model. *Journal of Imaging* 2023; 9(2): 53.
- Bouni M., Hssina B., Douzi K., Douzi S. Impact of pretrained deep neural networks for tomato leaf disease prediction. *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2023; 2023(1): 5051005.
- Chakraborty S., Paul S., Rahat-uz-zaman M. Prediction of apple leaf diseases using multiclass support vector machine. 2021 2Nd international conference on robotics, electrical and signal processing techniques (ICREST), 05-07 January 2021, pp. 147-151, DHAKA, Bangladesh.
- Deepa Rashmi N., Shetty C. A machine learning technique for identification of plant diseases in leaves. 2021 6th international conference on inventive computation technologies (ICICT), 20-22 January 2021, pp. 481-484, Coimbatore, India.
- Deng Y., Xi H., Zhou G., Chen A., Wang Y., Li L., Hu Y. An effective image-based tomato leaf disease segmentation method using MC-UNet. *Plant Phenomics* 2023; 5: 0049.
- Erika C., Griebel S., Naumann M., Pawelzik E. Biodiversity in tomatoes: Is it reflected in nutrient density and nutritional yields under organic outdoor production?. *Frontiers in Plant Science* 2020; 11: 589692.
- Gulzar Y. Fruit image classification model based on MobileNetV2 with deep transfer learning technique. *Sustainability* 2023; 15(3): 1906.
- Gulzar Y., Hamid Y., Soomro AB., Alwan AA., Journax L. A convolution neural network-based seed classification system. *Symmetry* 2020; 12(12): 2018.
- Hossain S., Reza MT., Chakrabarty A., Jung YJ. Aggregating different scales of attention on feature variants for tomato leaf disease diagnosis from image data: A transformer driven study. *Sensors* 2023; 23(7): 3751.
- Huang X., Chen A., Zhou G., Zhang X., Wang J., Peng N., Yan N., Jiang C. Tomato leaf disease detection system based on FC-SNDPN. *Multimedia Tools and Applications* 2023; 82(2): 2121-2144.
- Kumar BA., Bansal M., Sharma R. Caffe-mobilenetv2 based tomato leaf disease detection. 2023 3rd International conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP), 18-20 March 2023, pp. 1-6, VIJAYAWADA, India.
- Panchal P., Raman VC., Mantri S. Plant diseases detection and classification using machine learning models. 2019 4th international conference on computational systems and information technology for sustainable solution (CSITSS), 20-21 December 2019, pp. 1-6, Bengaluru, India.
- Parvez S., Uddin MA., Islam M., Bharman P., Talukder MA. Tomato leaf disease detection using convolutional neural network. 2018 Eleventh International Conference on Contemporary Computing (IC3), 02-04 August 2018, pp. 1-5, Noida, India.
- Paul SG., Biswas AA., Saha A., Zulfikar MS., Ritu NA., Zahan I., Rahman M., Islam MA. A real-time application-based convolutional neural network approach for tomato leaf disease classification. *Array* 2023; 19: 100313.

- Peng D., Li W., Zhao H., Zhou G., Cai C. Recognition of tomato leaf diseases based on DIMPCNET. *Agronomy* 2023; 13(7): 1812.
- Qin F., Liu D., Sun B., Ruan B., Ma Z., Wang H. Identification of alfalfa leaf diseases using image recognition technology. *PloS One* 2016; 11(12): e0168274.
- Rahman SU., Alam F., Ahmad N., Arshad S. Image processing based system for the detection, identification and treatment of tomato leaf diseases. *Multimedia Tools and Applications* 2023; 82(6): 9431-9445.
- Reza ZN., Nuzhat F., Mahsa NA., Ali H. Detecting jute plant disease using image processing and machine learning. 2016 3rd international conference on electrical engineering and information communication technology (ICEEICT). 22-24 September 2016, pp. 1-6, Dhaka, Bangladesh.
- Saeed A., Aziz AAA., Mossad A., Abdelhamid MA., Alkhaled AY., Mayhoub M. Smart detection of tomato leaf diseases using transfer learning-based convolutional neural networks. *Agriculture* 2023; 13(1): 139.
- Sun J., Wenjun T., Hanping M., Xiaohong W., Yong C., Long W. Recognition of multiple plant leaf diseases based on improved convolutional neural network. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2017; 33(19): 209-215.
- Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning. *AAAI'17: Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*, February 4 - 9, 2017, pp. 4278-4284, San Francisco California USA.
- Tang Z., He X., Zhou G., Chen A., Wang Y., Li L., Hu Y. A precise image-based tomato leaf disease detection approach using PLPNet. *Plant Phenomics* 2023; 5: 0042.
- Tomato leaf disease detection by Kaustubh. <https://www.Kaggle.Com/Datasets/Kaustubhb999/Tomato>. Retrieved February 23, 2024, from <https://www.kaggle.com/datasets/kaustubhb999/tomatoleaf>
- Trivedi NK., Gautam V., Anand A., Aljahdali HM., Villar SG., Anand D., Goyal N., Kadry S. Early detection and classification of tomato leaf disease using high-performance deep neural network. *Sensors* 2021; 21(23): 7987.
- Wu Y. Identification of maize leaf diseases based on convolutional neural network. 2020 5th International Seminar on Computer Technology, Mechanical and Electrical Engineering (ISCME 2020), 30 October-1 November 2020, Shenyang, China.
- Xie C., He Y. Spectrum and image texture features analysis for early blight disease detection on eggplant leaves. *Sensors* 2016; 16(5): 676.
- Zhang Y., Huang S., Zhou G., Hu Y., Li L. Identification of tomato leaf diseases based on multi-channel automatic orientation recurrent attention network. *Computers and Electronics in Agriculture* 2023; 205: 107605.

## A Preliminary Study on Gonadal Development in the European Eel (*Anguilla anguilla*, Linnaeus, 1758) within the Gediz Delta, Izmir Bay (Aegean Sea, Türkiye)

Burcu TAYLAN<sup>1\*</sup>, Ertan TAŞKAVAK<sup>2</sup>, Şule GÜRKAN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Ege University, Faculty of Fisheries, Izmir, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-9311-5189>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-3175-6540>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-4365-4920>

\*Corresponding author: burcu.taylan@ege.edu.tr

### Research Article

#### Article History:

Received: 15.07.2024

Accepted: 07.10.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

European eel

*Anguilla Anguilla*

Gonad maturation

Gediz Delta

### ABSTRACT

*Anguilla anguilla*, a catadromous species, is believed to undergo significant morphological and physiological changes in the final stage of its freshwater life. These changes are closely associated with gonad development and enable adaptation for long migration. This study examined 89 eels from the Gediz Delta, caught by commercial fishermen between 2020-2021. The eels' total lengths and weights were measured in the laboratory before they were dissected to examine gonad development. The total length and weight values of the specimens ranged from 19.2-72.5 cm (average: 46.77 cm) and 10.1-1002.4 g (average: 254.69 g) respectively. The ratio of female to male eels was 1:1.28. The chi-square test revealed no significant difference between female and male individuals ( $\chi^2$  calculation: 0.625 <  $\chi^2$  table: 3.841). The Gonadosomatic Index (GSI) value of the species was found to be between 0.22-0.47, peaking in the fall (0.47). Upon histological examination of the females' ovaries, two phases were identified - immature and maturing. Oocytes in the ovary consisted of pre-vitellogenic and early vitellogenic phases. The pre-vitellogenic phase featured a large nucleus situated in the centre of dense cytoplasm. The diameter of oocytes in this stage was measured between 90-200  $\mu$ m. The early vitellogenic stage was characterized by larger oocytes located primarily in the peripheral zone of the ovarian stroma, containing a high amount of adipose tissue. The oocytes in this stage had a diameter ranging from 210-280  $\mu$ m.

## Gediz Deltası, İzmir Körfezi (Ege Denizi, Türkiye)'ndeki Avrupa Yılan Balığının (*Anguilla anguilla*, Linnaeus, 1758) Gonad Gelişimi Üzerine Bir Ön Çalışma

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 15.07.2024

Kabul tarihi: 07.10.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar kelimeler:

Avrupa yılan balığı

*Anguilla anguilla*

Gonadların olgunlaşması

Gediz Deltası

### ÖZ

Katadrom bir tür olan *Anguilla anguilla*'nın tatlı sudaki yaşamlarının son aşamasında uzun bir göçe uyum sağlamak adına morfolojik ve fizyolojik olarak birçok değişime uğradığı, bu değişikliklerin de gonad gelişimi ile yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu amaçla Gediz Deltası'nda dağılım gösteren yılan balığı popülasyonunda gonad gelişimini incelemek amacıyla 2020-2021 yılları arasında ticari balıkçılardan 89 adet ölü yılan balığı alınarak incelenmiştir. Laboratuvarında total boy ve ağırlıkları ölçülen balıklar disekte edilmiştir. Örneklerin total boy ve ağırlık değerleri sırasıyla; 19,2-72,5 (ort: 46,77) cm, 10,1-1002,4 (ort: 254,69) g'dır. Dişi:erkek oranı 1:1,28 olarak saptanmış olup ki kare testi sonucu dişi ve erkek bireyler arasında belirgin bir fark tespit edilmemiştir ( $\chi^2_{\text{hesap}0.625} < \chi^2_{\text{tablo}3.841}$ ). Türün GSI değerinin 0,22-0,47 arasında olduğu ve maksimum değere sonbaharda (0,47) ulaştığı saptanmıştır. Dişilere ait ovaryumlar histolojik olarak incelendiğinde olgunlaşmamış ve olgunlaşmakta

olmak üzere 2 safha tespit edilmiş olup ovaryum içerisindeki oositlerin pre-vitellogenik safha ve erken vitellogenik safhalardan oluştuğu gözlenmiştir. Pre-vitellogenik safhadaki oositlerde yoğun sitoplazma ile merkezde konumlanmış büyük bir çekirdek saptanmıştır. Bu safhadaki oositlerde çap; 90-200 µm olarak tespit edilmiştir. Erken vitellogenik evre, periferik bölgede bulunan daha büyük oositler ve yüksek miktarda yağ dokusu ile karakterize edilmiştir. Bu safhadaki oositlerde çap; 210-280 µm olarak tespit edilmiştir.

---

**To Cite:** Taylan B., Taşkavak E., Gürkan Ş. A Preliminary Study on Gonadal Development in the European Eel (*Anguilla anguilla*, Linnaeus, 1758) within the Gediz Delta, Izmir Bay (Aegean Sea, Türkiye. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1):393-403.

## 1. Introduction

The family Anguillidae, part of the order Anguilliformes, encompasses 20 species across two genera worldwide (Fricke et al., 2020). It hides under rocks or in muddy areas during the day and emerges to feed at twilight, exhibiting increased activity at night (Reshetnikov, 2003; Froese and Pauly, 2005). This species inhabits areas from the Atlantic coast from Scandinavia to Morocco and extends to the Baltic, Black, and Mediterranean Seas, as well as the rivers of the North Atlantic, Baltic, and Mediterranean seas (Deelder, 1984; Rochard and Elie, 1994).

The European eel, *A. anguilla*, is categorized as "critically endangered (CR)" by the International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2023). To protect this species, several conservation action plans have been implemented. In 2007, the European Union (EU) introduced a management plan for the eel's recovery (EU, 1100/2007). By 2010, the trade of glass eels outside the EU was prohibited, and a 3-month fishing ban within the EU has been enforced since 2018 (Gentile et al., 2022).

Numerous studies have focused on eels. Vincent and Maes (2005) examined the life cycle, evolution, and reproduction of the European eel. The breeding performance of eels was evaluated by Guarniero et al. (2020) and Capoccioni et al. (2014). Di Biase et al. (2016) compared the eels' reproductive performance in natural and controlled environments. The reproductive biology of eels living on the southern coast of Brittany, France, was investigated by Sbaihi et al. (2001). Dębowska et al. (2016) gauged the fecundity of the European Eel in Polish waters. Denis et al. (2022) studied the growth and abundance of European eels in small estuarine habitats in the English Channel. Lastly, Macnamara et al. (2014) identified the reproductive potential of Silver European eels migrating from Lake Vistonis in the North Aegean Sea.

Freshwater eels of the Anguillidae family are characterized as facultative catadromous. Adults spawn in the ocean, and their larvae journey to coastal and inland waters for growth before returning to the ocean to spawn (Schmidt, 1922). The hatchlings, referred to as leptocephalus, drift as plankton for approximately 7-11 months, though this stage can extend up to 3 years (Maitland, 1977).

The leptocephalus transitions into the "glass eel" stage before reaching coastal waters, resulting in a shorter, more cylindrical body shape (Sinha and Jones, 1975). As they gain pigmentation and transform into the elver stage, they move into freshwaters and become known as "yellow eels" (Sinha and Jones, 1975).

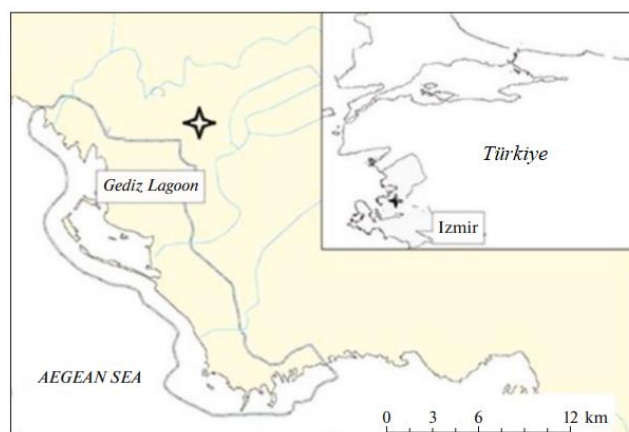
After migrating to either brackish or fresh waters, eels feed and grow before returning to the sea to breed (males 6-12 years; females 9-20 years). Eels that migrate from freshwater to the sea for maturation are referred to as "silver" eels (Sinha and Jones, 1975). During their migration to the sea for reproduction, eels undergo significant morphological and physiological changes. These transformations are thought to be closely linked to gonad development (Pankhurst, 1982; Fontaine et al., 1995; Waring, 1963; Rohr et al., 2001). Boëtius and Boëtius (1985) believe eels to build up substantial amounts of lipid in their bodies for long-distance migration. Optimal environmental conditions promote this lipid accumulation, which is vital for gonad development, helping eels achieve sexual maturity and ensuring a successful migration (Svedäng and Wickström, 1997).

Eel maturity can be determined through several methods, including color, eye index, length, weight (Pankhurst, 1982; Durif et al., 2005), and the gonadosomatic index (GSI) measurement, which we used in our study (Devlaming et al., 1982). This technique distinguishes between mature and immature eels. However, the relationship between morphological changes and gonad development is still not fully understood, and the maturation degree can be defined using both morphological and histological analyses.

In this study, the changes in the gonads of the eel (*Anguilla anguilla*) population distribution in the Gediz Delta were investigated in order to adapt to migration. This research is the first study conducted to determine the reproductive characteristics of this species in Turkey.

## 2. Materials and Methods

In this study, 45 yellow eels, 44 the pre-silver were obtained seasonally from a local fisherman in Izmir Bay between 2020 and 2021 (Figure 1). The eel samples were brought to the laboratory and stored in containers with a 10% formalin solution. The length and weight of the yellow eels brought to the laboratory were first measured. In the next stage, the fish were dissected, their sexes were determined, and the gonad development stages were determined according to the methodology of Holden and Raitt (1974) (Table 1).



**Figure 1.** Sampling area of European eel, *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758) samples

**Table 1.** A five-point maturity scale for partial spawners (Holden and Raitt, 1974).

Stage	State	Description
I	Immature	Ovary and testis about 1/3rd length of body cavity. Ovaries pinkish, translucent; testis whitish. Ova not visible to naked eye.
II	Maturing virgin and recovering spent	Ovary and testis about 1/2 length of body cavity. Ovary pinkish, translucent; testis whitish, more or less symmetrical. Ova not visible to naked eye.
III	Ripening	Ovary and testis is about 2/3rds length of body cavity. Ovary pinkish-yellow colour with granular appearance, testis whitish to creamy. No trans- parent or translucent ova visible.
IV	Ripe	Ovary and testis from 2/3rds to full length of body cavity. Ovary orange-pink in colour with conspicuous superficial blood vessels. Large transparent, ripe ova visible. Testis whitish- creamy, soft.
V	Spent	Ovary and testis shrunken to about 1/2 length of body cavity. Walls loose. Ovary may contain remnants of disintegrating opaque and ripe ova, darkened or translucent. Testis bloodshot and flabby.

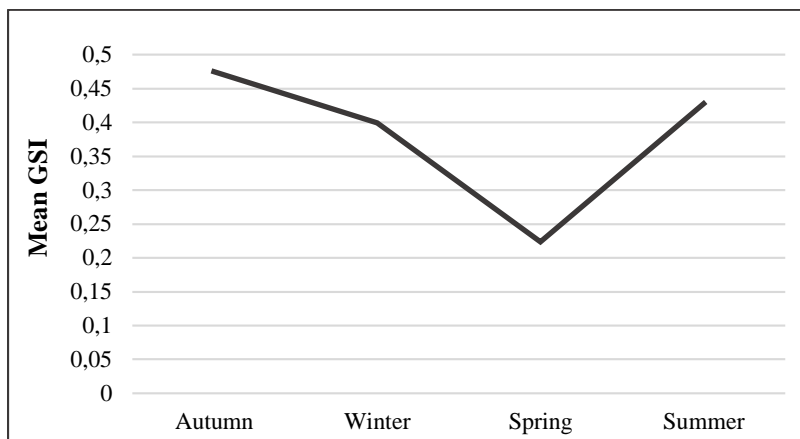
The gonadosomatic index values were calculated using the  $GSI = [gw/(W-gw)] * 100$  formula (Barber and Blake, 2006) to identify the breeding season of the species. However, the precise breeding period could not be fully determined due to the lack of specimens that completed vitellogenesis during the full breeding period. Consequently, only general observations could be made.

For the histological demonstration of gonad development, 40 ovary samples from four seasons were used. These samples, which went through an alcohol series, were embedded in paraffin, and 7  $\mu$ m thick sections were extracted (Dufour et al., 1988). The samples were then stained using the hematoxylin-eosin staining method and photographed with Olympus SZ60. Oocyte diameters were measured using a micrometre.

### 3. Results

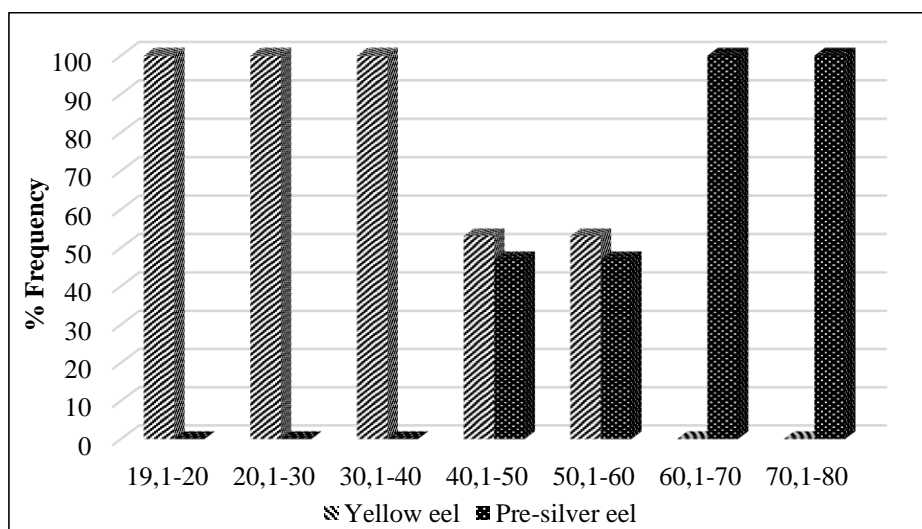
In the study, a total of 89 eel samples were evaluated. The total length and weight values were between 19.2-72.5 cm (average: 46.77) and 10.1-1002.4 g (average: 254.69) respectively. Out of the obtained specimens, 35 were female (39.33%), 45 were male (50.56%), and 9 were indeterminate (10.11%). Among the 80 individuals whose sex was identified, there were 35 females and 45 males, resulting in a female-to-male ratio of 1:1.28. The chi-square test results showed no statistically significant difference between male and female specimens ( $\chi^2$  calculated 0.625 <  $\chi^2$  table 3.841).

The gonadosomatic index value of the species was examined and it was found that the GSI value ranged from 0.22 to 0.47, peaking in the fall (0.47) (Figure 2). However, as no individual in the full reproductive period, having completed vitellogenesis, was found, the reproductive period of the species could not be determined based on the gonadosomatic index values.



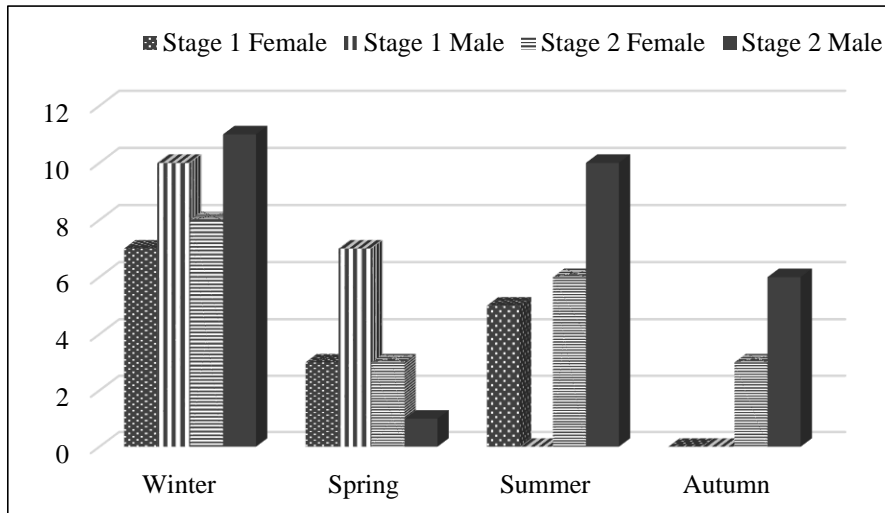
**Figure 2.** Gonadosomatic index values (GSI) for *Anguilla anguilla*

Upon examining the colors of 89 individuals grouped by size, it was found that 45 were yellow eels, while 44 were in the pre-silver stage. The size of yellow eels ranged from 19.2-45 cm, whereas pre-silver eels measured between 45.2-72.5 cm (Figure 3).



**Figure 3.** Size distribution in yellow and pre-silver eels

The distribution of gonad stages in female and male individuals was also examined according to seasons (Figure 4).



**Figure 4.** Distribution of gonad stages of female and male eels according to seasons

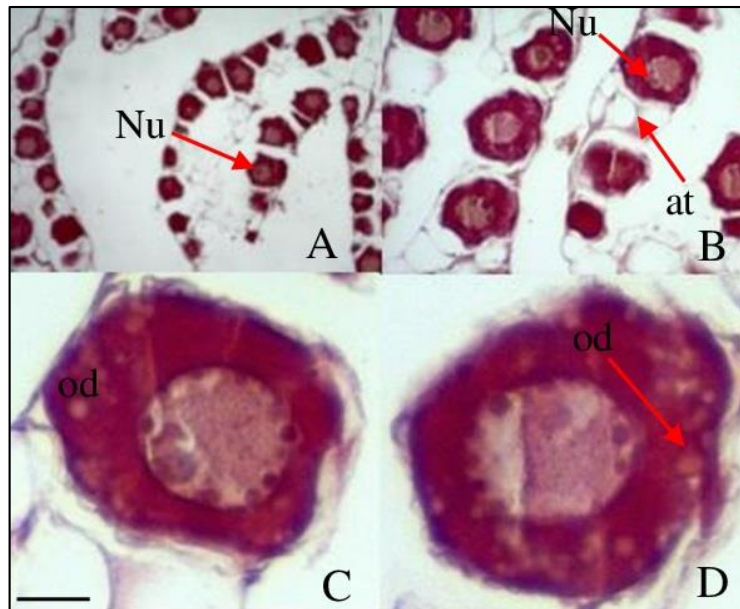
The specimens obtained from fishermen included deceased eels, hence, for various reasons, the gonads of 9 eels couldn't be determined. A morphological examination revealed a fringed structure forming in the females' ovaries as their size increased (Figure 5).



**Figure 5.** Morphological structure of the ovary

Upon examining the ovaries of females histologically, two phases were detected: immature and mature. In this study was determined that the oocytes in the ovary were in the pre-vitellogenic and early vitellogenic phases. In the pre-vitellogenic phase, the one-nucleoli stage, a large nucleus with dense cytoplasm in the center, was detected. This stage was characterized by only one nucleolus inside the germinal vesicle and the absence of lipid droplets. The total length and ovary weights of individuals in this phase range from 29.1-44 cm and 0.05-0.6 g respectively, with a GSI value of <math><0.40</math>. The diameter of the oocytes in this phase was 90-200  $\mu\text{m}$  (Figure 6A).





**Figure 6.** Histological structure Follicles of Female Gonad (Ovaries) of European eel *Anguilla anguilla*  
 A: One-nucleoli stage; B: Multiple nucleoli stage; C-D: Perinucleolar stage. Nucleoli (Nu). Oil droplet (od). Adipose tissue (at). Scale bar: 20  $\mu$ m.

The early vitellogenic stage was distinguished by larger oocytes, primarily located in the outer zone of the ovarian stroma, surrounded by a significant amount of fatty tissue, which sometimes constitutes more than 50% of the stroma (Figure 6B). The Perinucleolar stage, also known as the Multiple nucleoli stage, is also found in this phase. It was characterized by the presence of the first lipid droplets and an increase in oocyte diameter (Figure 6 C-D). The total length and ovary weights of individuals in this phase range from 45-72.5 cm and 0.62-16.53 g respectively, with ovaries covering half the body cavity. An increase in the width of the ovaries and a pleated appearance is observed (Figure 5). The GSI value in these individuals is  $>0.40$ . Many irregularly distributed nucleoli within the germinal vesicle are observed. The phase is characterized by larger oocytes containing lipid vesicles in their cytoplasm (Figure 6D) and an increased density of fat cells. The diameter of the detected oocytes is 210-280  $\mu$ m.

#### 4. Discussion

In their study, Sbaihi et al. (2001) researched the reproductive biology of *Conger conger* and *Anguilla anguilla* species on the southern coasts of Brittany, France. Sbaihi et al. (2001) were detected that the gonadosomatic index (GSI) value ranged from 0.06 to 2.08. In our study was determined a similar GSI value range of 0.22 to 0.47, although it did not encounter any individuals who had fully completed vitellogenesis. Additionally, this study was observed fat vesicles in the cytoplasm at the early vitellogenic stage. This observation aligns with the findings from studies conducted by Dufour et al. (1988) and Colombo and Grandi (1997). Ohta et al. (1997) also noted the potential for fat droplets inside

the oocytes at the beginning of vitellogenesis in the silver phase of *A. anguilla* and *A. japonica* species, which further supports our study.

In a recent study, Gentile et al. (2022) explored the gonad development of eels in the North Adriatic lagoons, concluding that the eels were mature silver eels ready to migrate. Our study, which examined oocyte development in the ovaries up to the pre-silver stage, bears significant resemblance to their findings. Both studies identified oocyte maturation, a stage considered pre-migration in eels. Evidence of the species' readiness for reproductive migration includes both the morphological silver colour and the increase in oocyte diameter and lipid content, as observed in histological studies (Durif et al., 2005). Thus, histological studies play a crucial role. The lipid increase detected in the silver eels in our study further confirms that they are preparing for migration.

The *A. anguilla* species has seen significant declines in its populations in recent years. This alarming reduction can be attributed to a variety of factors including overfishing, loss of natural habitats, the presence of parasites, pollution and diseases (Feunteun, 2002; Dekker, 2003), as well as changes in the oceanic environment that affect the growth and migration patterns of the eels' larvae (Knights, 2003; Friedland et al., 2007). Problems created by humans are also a significant factor in this decline (Lobón-Cervía, 1999; Dekker, 2003; Allen et al., 2006). Despite the pressing issue of declining populations, and despite the International Union for Conservation of Nature (IUCN) categorizing the *A. anguilla* species as "critically endangered CR", there is an apparent dearth of reproductive studies on these species. This lack of information is one of the major hindrances to conserving and managing these species effectively. Achieving a detailed and comprehensive understanding of the reproductive behaviours of these catadromous species is not just important, but crucial, for the creation of strategies aimed at preserving their populations and managing their habitats. This research carried out the gonad development of *A. anguilla* in the Gediz Delta, marking the first study of its kind in our country. It is thought that this research will form the basis for eel studies to be carried out in Turkey in the following years and will also contribute to sustainable population plans.

## **5. Conclusion**

The species *Anguilla anguilla*, which is a catadromous species, is classified as "critically endangered (CR)" according to the International Union for Conservation of Nature (IUCN), and its sustainability is of great importance. There are very few studies on the reproductive biology of this species. This study, which is unique in our country, will form the basis for future studies.

## **Conflict of interest**

No conflict of interest has been declared by the authors.

## Authorship contributions

The contribution of the authors is equal.

## References

- Allen M., Rosell R., Evans D. Predicting catches for the Lough Neagh (Northern Ireland) eel fishery based on stock inputs, effort and environmental variables. *Fisheries Management and Ecology* 2006; 13: 251-260.
- Barber BJ., Blake NJ. Reproductive physiology. In *Developments in Aquaculture and Fisheries Science* 2006; 35: 357-416.
- Boëtius I., Boëtius J. Lipid and protein content in *Anguilla anguilla* during growth and starvation. *Dana* 1985; 4: 1-17.
- Capoccioni F., Costa C., Canali E., Aguzzi J., Antonucci F., Ragonese J., Bianchini ML. The potential reproductive contribution of Mediterranean migrating eels to the *Anguilla anguilla* stock. *Scientific Reports* 2014; 4: 71-88.
- Colombo G., Grandi G. Histological study of the development and sex differentiation of the gonad in the European eel. *Journal of Fish Biology* 1997; 48: 493-512.
- Dębowska M., Nowosad J., Targońska K., Żarski D., Biłas M., Łuczyńska J., Kucharczyk D. Fecundity of migrating European eel (*Anguilla anguilla*) from Polish waters. *Italian Journal of Animal Science* 2016; 14, 3898.
- Dekker W. Did lack of spawners cause the collapse of the European eel, *Anguilla anguilla*? *Fisheries Management and Ecology* 2003; 10: 365-376.
- Deelder CL. Synopsis of biological data on the eel, *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758). *FAO Fish Finder-Synopses* 1984; 80: 73.
- Denis J., Mahé K., Amara R. Abundance and growth of the European Eels (*Anguilla anguilla* Linnaeus, 1758) in small estuarine habitats from the Eastern English Channel. *Fishes* 2022; 7, 213.
- Devlaming V., Grossman G., Chapman F. On the use of the gonosomatic index. *Comparative Biochemistry Physiology Part A* 1982; 73: 31-39.
- Di Biase A., Casalini A., Emmanuele P., Mandelli M., Lokman PM., Mordenti O. Controlled reproduction in *Anguilla anguilla* (L.): comparison between spontaneous spawning and stripping-insemination approaches. *Aquaculture Research* 2016; 47: 3052-3060.
- Dufour S., Lopez E., Le Menn F., Le Belle N., Baloche S., Fontaine YA. Stimulation of gonadotropin release and of ovarian development, by the administration of a gonadoliberin agonist and of dopamine antagonists, in female silver eel pretreated with estradiol. *General and Comparative Endocrinology* 1988; 70: 20-30.
- Durif C., Dufour S., Elie P. The silvering process of *Anguilla anguilla*: A new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. *Journal of Fish Biology* 2005; 66: 1025-1043.

- EU 1100/2007. European Commission ([https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/ocean/marine-biodiversity/eel\\_en#:~:text=Adoption%20of%20the%20EU%20Eel,other%20non%2Dfishery%20conservation%20efforts](https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/ocean/marine-biodiversity/eel_en#:~:text=Adoption%20of%20the%20EU%20Eel,other%20non%2Dfishery%20conservation%20efforts), available: 20.01.2024)
- Feunteun E. Management and restoration of European eel population (*Anguilla anguilla*): an impossible bargain. *Ecological Engineering* 2002; 18: 575–591.
- Fontaine Y., Pizam M., Le Moal C. Rambourg, A. Silvering and gill “mitochondria-rich” cells in the eel, *Anguilla anguilla*. *Cell Tissue Research* 1995; 281: 465–471.
- Friedland KD., Miller MJ., Knights B. Oceanic changes in the Sargasso Sea and declines in recruitment of the European eel. *ICES Journal of Marine Science* 2007; 64: 519–530.
- Fricke R., Eschmeyer W., Fong JD. Eschmeyer’s Catalog of Fishes 2020, (available: 27.01.2023)
- Gentile L., Casalini A., Emmanuele P., Brusa R., Zaccaroni A., Mordenti O. Gonadal development in European eel populations of North Adriatic Lagoons at Different Silvering Stages. *Applied Sciences* 2022; 12, 2820.
- Guarniero I., Carianib A., Ferrari A., Sullioti V., Emmanuele P., Casalini A., Tinti F., Mordenti O. Sexual behaviour and reproductive performance of the endangered European eel *Anguilla anguilla* (Linnaeus, 1758) based on direct observations and paternity assignment in semi-natural conditions. *Aquaculture Reports* 2020; 16, 100258.
- Holden MJ., Raitt DFS. *Manuel of fisheries science. Part 2-Methods of resource investigation and their application*. Rome: Food and Agriculture Organisation of the United Nations 1974.
- IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species 2023, (available: 20.12.2023)
- Knights B. A review of the possible impacts of long-term oceanic and climate changes and fishing mortality on recruitment of anguillid eels of the Northern Hemisphere. *Science of the Total Environment* 2003; 310: 237-244.
- Macnamara R., Koutrakis ET., Sapounidis A., Lachouvaris D., Arapoglou F., Panora D., McCarthy KT. Reproductive potential of silver European eels (*Anguilla anguilla*) migrating from Vistonis Lake (Northern Aegean Sea, Greece). *Mediterranean Marine Science* 2014; 15(3): 539-544.
- Maitland PS. *Freshwater fishes of Britain and Europe*. The hamlyn publishing group ltd., London, UK. 1977; 256.
- Ohta H., Kagawa H., Tanaka H., Okuzawa K., Inuma N., Hirose K. Artificial induction of maturation and fertilization in the Japanese eel, *Anguilla japonica*. *Fish Physiology and Biochemistry* 1997; 17: 163-169.
- Pankhurst N. Relation of visual changes to the onset of sexual maturation in the European eel *Anguilla anguilla* (L.). *Journal of Fish Biology* 1982; 21: 127-140.
- Reshetnikov YS. *Atlas of Russian freshwater fishes*. 2003; 1-2. Moscow, Nauka.
- Froese R., Pauly. D. FishBase. World Wide Web electronic publication 2005, [www.fishbase.org](http://www.fishbase.org).
- Rochard E., Elie P. La macrofaune aquatique de l'estuaire de la Gironde. Contribution au livre blanc de l'Agence de l'Eau Adour Garonne. p.1-56. In J.-L. Mauvais and J.-F. Guillaud (eds.) *État des*

- connaissances sur l'estuaire de la Gironde. Agence de l'Eau Adour-Garonne, Éditions Bergeret, Bordeaux, France 1994; 115.
- Rohr DH., Lokman PM., Davie PS., Young G. 11-Ketotestosterone induces silvering-related changes in immature female short-finned eels, *Anguilla Australis*. *Comparative Biochemistry Physiology Part A* 2001; 130: 701-714.
- Sbaihi M., Fouchereau-Peron M., Meunier F., Elie P., Mayers I., Burzawa-Gerard E., Vidal B., Dufour S. Reproductive biology of the conger eel from the south coast of Brittany, France and comparison with the European eel. *Journal of Fish Biology* 2001; 59: 302-318.
- Sbaihi M., Fouchereau-Peron M., Meunier F., Elie P., Mayer I., Burzawa-Gerard E., Vidal B., Dufour S. Reproductive biology of the conger eel from the south coast of Brittany, France and comparison with the European eel. *Journal of Fish Biology* 2001; 59: 302-318.
- Schmidt J. The breeding places of the eel. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 1922; 211: 179-208.
- Sinha VRP., Jones JW. *The European freshwater Eel*. Liverpool University press, United Kingdom 1975; 146.
- Svedäng H., Wickström H. Low fat contents in female silver eels: Indications of insufficient energetic stores for migration and gonadal development. *Journal of Fish Biology* 1997; 50: 475-486.
- Vincent JT., Maes AEG. The European eel (*Anguilla anguilla*, Linnaeus), its life cycle, evolution and reproduction: a literature review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 2005; 15: 367-398.
- Waring H. *Color Change Mechanisms of Cold-Blooded Vertebrates*; Academic Press: New York, NY, USA 1963; 266.

## Garnem (*P. persica x P. dulcis*) Anacı Üzerine Aşılana Farklı Nektarin ve Şeftali Çeşitlerinde Aşı Başarısı ve Erken Dönem Gelişim Özellikleri

Kerem MERTOĞLU<sup>1</sup>, İlknur ESKİMEZ<sup>2\*</sup>, Mehmet POLAT<sup>3</sup>, Abdullah KANKAYA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Uşak Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 64000, Uşak

<sup>2</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 32260, Isparta

<sup>3</sup> Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, 32260, Isparta

<sup>4</sup> Elma Tarım ve Tarım Aletleri Gıda Nakliyat Turizm Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti., 32260, Isparta

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-0490-9073>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-4443-505X>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-2415-4229>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0003-4134-593X>

\*Sorumlu yazar: ilknureskimez01@gmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 12.08.2024

Kabul tarihi: 27.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Anaç

Aşı uyumu

Büyüme

Garnem

Şeftali-nektarin

### ÖZ

Türkiye, tarımsal üretim ve çeşitliliği bakımından önemli konuma sahip olmasına rağmen, ticareti yönüyle henüz potansiyelini yansıtmamaktadır. Arzu edilen seviyeye ulaşmak, üretim süreçlerinde standardizasyonun sağlanması ile mümkündür. Bu bağlamda, bahçe tesisi öncesi doğru anaç/kalem kombinasyonu, meyve yetiştiriciliğinde son derece önemlidir. Bu çalışmada, Garnem anacı ile farklı şeftali (Artemis, Samantha, Astoria) ve Patagonia nektarin çeşitleri arasındaki yakınlık ve kalemlerin erken dönem gelişim performansları araştırılmıştır. Ayrıca anaç çapının aşı başarısı üzerine olan etkisine de yer verilmiştir. Aşı tutum oranları, %54,02 (Astoria) ve %74,06 (Artemis) arasında değişim gösterirken, yüksek aşı tutum oranı için anacın minimum 4,50 mm çapa sahip olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Aşı noktası gelişimi ve kalem parametreleri bakımından Samantha çeşidi öne çıkmasına rağmen, tüm çeşitler, erken gelişim açısından yüksek performans sergilemiştir. Sonuç olarak, incelenen tüm çeşitler ile Garnem arasında hem aşı tutumu hem de kalemin gelişimi yönüyle herhangi bir problem gözlemlenmemiştir.

## Grafting Success and Early Development Characteristics of Different Nectarine and Peach Varieties Grafted onto Garnem (*P. persica x P. dulcis*) Rootstock

### Research Article

#### Article History:

Received: 12.08.2024

Accepted: 27.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Rootstock

Grafting compatibility

Growth

Garnem

Peach-nectarine

### ABSTRACT

Turkey's position regarding agricultural production and diversity is significant, although it does not fully reflect its trading potential. Reaching the desired level is possible by ensuring standardization in production processes. In this context, the correct rootstock/scion combination before orchard establishment is extremely important in fruit growing. This study was conducted to investigate the affinity and scions' early growth performance between several peach (Artemis, Samantha, Astoria) and Patagonia nectarine cultivars when grafted on Garnem rootstock. Furthermore, the impact of rootstock diameter on the success of grafting is also included. Grafting success varied from 54.02% (Astoria) to 74.06% (Artemis) and rootstock needed to have a minimum diameter of 4.50 mm to get high grafting success. Although Samantha stood out in terms of grafting point development and scion parameters, all varieties performed significant early development performance. Consequently, there were no discrepancies with affinity and scion growth between the varieties investigated and Garnem.

**To Cite:** Mertoğlu K., Eskimez İ., Polat M., Kankaya A. Garnem (*P. persica x P. dulcis*) Anacı Üzerine Aşıl原因an Farklı Nektarin ve Şeftali Çeşitlerinde Aşı Başarısı ve Erken Dönem Gelişim Özellikleri. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 404-413.

## 1. Giriş

Şeftali ve nektarin, farklı ekolojik koşullara uyum sağlayabilen önemli sert çekirdekli meyve türleri arasında yer almaktadır. Her iki yarım kürenin, 25-45 aralığındaki enlem dereceleri, yetiştiricilik açısından en uygun alanlar olmasına rağmen, sahip olduğu çeşit zenginliği sayesinde, sıcak iklime sahip yörelerin yüksek rakımlarında dahi yetiştirilebilmektedir (Reig ve ark., 2015).

Şeftali ve nektarin tatlı ve sulu meyve yapısına sahip olmasının yanı sıra aynı zamanda besin maddeleri açısından da oldukça zengindir (Meena ve ark., 2021). Bu sebeple, işlenmiş ürün eldesinde ham madde olarak yaygın şekilde sanayiye gönderilmektedir. Taze tüketim ve katma değer kazandırmak maksadı ile talebinde meydana gelen artış, ülkemiz üretim rakamlarına da yansımış olup, 2000 yılında, 430 000 ton düzeyinde olan üretim miktarı 2022 yılında, 1 milyon tonun üzerine çıkmıştır (FAO, 2024). Potansiyel üretici konumunda olunan bu ürün grubunda, üretimin %20'sinden fazlası sadece taze olarak ihraç edilerek, ülke ekonomisine önemli katkı sağlamaktadır (FAO, 2024).

Standardizasyonu yakalamaya yakın türlerden olan şeftali-nektarin grubunda, yeni bahçelerin kurulumu, modern teknolojik gelişmeler ve sürdürülebilirlik prensipleri ışığında gerçekleştirilmelidir (Grigorieva ve ark., 2023). İlkbahar geç donlarının neden olduğu üretim dalgalanmalarını minimize etmek amacıyla, bölgenin iklim koşullarına ve pazar taleplerine uygun çeşitlerin (kıyı bölgeleri için erken olgunlaşan çeşitler, iç bölgeler için geç olgunlaşan çeşitler) seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu aşamada, araştırmacılar ve fidan üreticileri için en önemli görev, çiftçiler tarafından yeterince bilinmeyen anaç konusunun doğru ve etkili şekilde kullanımını sağlamaktır. Bilindiği üzere anaç, kaleme; gelişim, fenolojik durum, stres koşullarına dayanım, verim ve kalite yönleriyle etki etmektedir (Vahdati ve ark., 2021; Lesmes-Vesga ve ark., 2022). Bu sebeplere istinaden, benzer ekolojilerde yetiştirilen ve tüm ekolojik faktörlerin kümülatif şekilde düşünüldüğü anaç tercihi için, ıslah çalışmaları ve pazarlama stratejileri yürütülmelidir (Linghong ve ark., 2015; Bayav ve Çetinbaş, 2021).

Son yıllarda, ekonomik, yıl boyu üretim ve hızlı şekilde üretim materyali sağlanması amacıyla anaçlar, yaygın olarak doku kültürü yöntemiyle üretilmektedir. İletim demetlerinin ulaşmadığı, meristematik dokuların kullanıldığı bu yöntemde, hastalıktan arı anaç eldesi mümkün olmaktadır. Ancak, erken evrede aşılama yapılan bu yöntemde, aşı başarısı bakımından doğru anaç çapı oldukça kritik öneme sahiptir. Bitkilerde aşı başarısını etkileyen faktörler; genetik, çevresel ve biyolojik etmenler olarak kategorize edilebilir (Eskimez ve ark., 2020; Rasool ve ark., 2020; Kapazoglou ve ark., 2021). Bunlar arasında anaç-kalem uyumsuzluğunun, öncelikli olarak tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, Garnem anacı ile farklı şeftali (Artemis, Samantha, Astoria) ve Patagonia nektarin çeşitleri arasındaki afinite araştırılmıştır. Ayrıca anaç çapının aşı başarısındaki etkileri de incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Bitkisel Materyal

Bu araştırma, Isparta ili, Atabey ilçesinde yer alan bir ticari firmada gerçekleştirilmiştir. Bitkisel materyal olarak; Garnem anacı, üç farklı şeftali (Artemis, Samantha, Astoria) ve Patagonia nektarin çeşitleri kullanılmıştır (Tablo 1).

**Tablo 1.** Çalışmada incelenen kombinasyonlara ait gözlemler

Kombinasyon	Aşı tarihi	Gözlerin patlama zamanı
Garnem x Artemis	20.07.2020	05.08.2020
Garnem x Samantha	19.07.2020	02.08.2020
Garnem x Astoria	29.07.2020	15.08.2020
Garnem x Patagonia	10.08.2020	23.08.2020

Garnem (*P. persica x P. dulcis*) İspanya'da Garfi bademi ve Nemared şeftalisi arasındaki melezlemeyle elde edilmiş bir anaçtır. Özellikle badem yetiştiriciliği için geliştirilmiş olmasına rağmen, şeftali, nektarin ve belirli erik ve kayısı çeşitleriyle de uyumlu bir şekilde yetiştirilebilmektedir. Garnem, kırmızı yaprakları, orta derecede kuvvetli yapısı ve kolay klonal çoğaltımıyla bilinmektedir (Minas ve ark., 2023). Son yıllarda kök-ur nematodlarına karşı direnci yüksek olması ve özellikle kireçli topraklara uyum sağlaması ile yaygın şekilde anaç olarak kullanılmaktadır (Felipe, 2009; Ekinci ve ark., 2024). Artemis çeşidi, sarı etli ve erken olgunlaşan, oldukça verimli ve dayanıklı bir yapıya sahiptir. Buna karşın, Samantha çeşidi beyaz etli ve yassı şekilli olup, erken olgunlaşma özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Patagonia nektarin çeşidi basık şekli, çok erkenci olması ve uzun süre pazarda kalabilme yeteneğiyle, Astoria çeşidi ise sarı etli, tatlı ve aromatik bir lezzete sahip olup, aynı zamanda çok erkenci olması ile tanınmaktadır. Çalışmada kullanılan çeşitlerin meyvelerine ait görseller Şekil 1'de sunulmuştur.



Samantha



Patagonia





Artemis

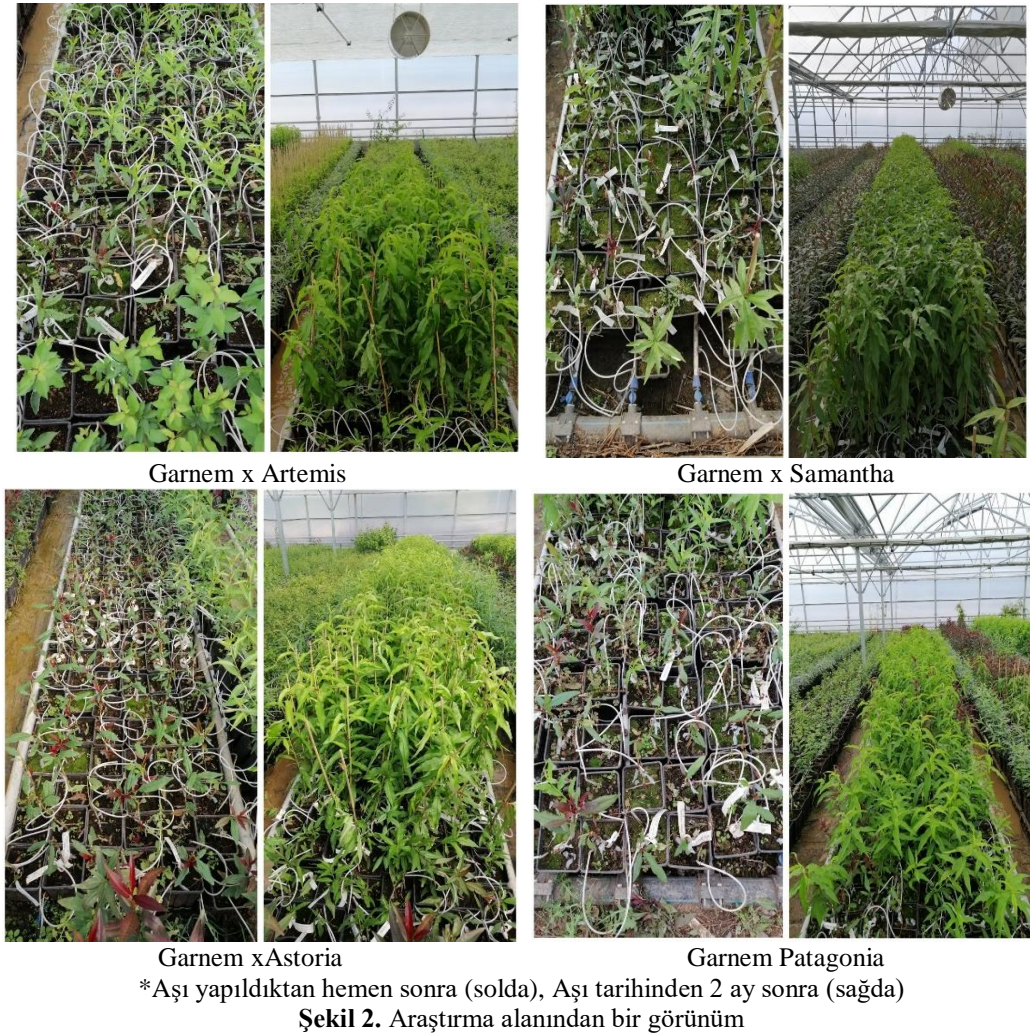


Astoria

Şekil 1. Çalışmada kullanılan çeşitlerin, meyvelerinden bir görünüm (Anonim, 2024)

## 2.2. Yöntem

Çalışmada kullanılan anaçlar, doku kültürü yöntemiyle üretilmiştir. Dış ortama alıştırma işleminden sonra tam otomasyona sahip seraya alınan bitkilerde kültürel işlemler rutin şekilde gerçekleştirilmiştir. Serada, sulama sistemleri ve havalandırmalar kullanılarak sıcaklık ve nem sırasıyla 28 °C ve %70 seviyelerinde muhafaza edilmiştir. Aşılama öncesi, anaçlar üzerinde aşının yapılacağı noktalar belirlenmiş ve bu noktaların doğu-batı ve kuzey-güney yönlerinden fidan çapı mm cinsinden kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Her bir anaç için bu iki değer aritmetik ortalaması alınarak nihai çap değerleri belirlenmiştir (Askari-Khorasgani ve ark., 2019). Aşılama işlemi, yongalı göz aşısı olarak yapılmıştır. Aşılama işleminin ardından, aşısı noktası sıkıca aşısı bantıyla sarılmıştır. Aşısı yapıldıktan sonra 10 gün aralıklarla iki kez tepe vurumu yapılmış ve ikinci tepe vurumunun ardından aşısı bantları çıkarılmıştır. Bu aşamadan sonra günlük gözlemler alınarak aşısı tutan ve tutmayan fidanlar ayrılmıştır. Aşısı başarısı, gözlerin canlı ve yeşil olması ile sağlıklı bir şekilde büyümesi gibi kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Aşılama işlemini takip eden 60. gün, aşısı noktasına ait çap aynı yöntemle yeniden ölçülerek aşısı sonrası bitki çapı (mm) belirlenmiştir. Aynı gün, aşısı yerinden itibaren kalemin bitki boyu (cm) ve aşısı noktasının 5 cm üzerinden kaleme ait çap değerleri de elde edilmiştir. Tutan aşısıların toplam aşısı sayısına oranı alınarak 100 ile çarpılmasıyla, aşısı tutma oranı (%), hesaplanmıştır (Basile ve ark., 2003; Kankaya ve ark., 2021). Çalışmada incelenen kombinasyonların aşılama ve gözlerin sürmesine ilişkin bilgiler Şekil 2’de verilmiştir.



\*Aşı yapıldıktan hemen sonra (solda), Aşı tarihinden 2 ay sonra (sağda)  
**Şekil 2.** Araştırma alanından bir görünüm

Çalışma 4 tekerrürlü ve her tekerrürde 25 bitki olacak şekilde Tesadüf Parselleri Deneme Deseni'ne göre planlanmıştır. İncelenen veriler, Minitab-21 paket programı ile, tek yönlü varyans analizine tabi tutulmuştur. Ortaya çıkan farklılıkların karşılaştırılmasında Tukey Çoklu Karşılaştırma Testi'nden faydalanılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Modern meyve yetiştiriciliğinin, sürdürülebilir ve ekonomik şekilde devam ettirilebilmesi, doğru anaç tercihi ile mümkündür. Bu bağlamda bahçe tesisi öncesi, afinite problemi olmayan, doğru anaç/kalem tercihi son derece önemlidir. Çalışmada incelenen kombinasyonlara ait, aşı tutma oranı ile tutum üzerine anaç çapının etkilerine ilişkin bulgular Tablo 2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Aşı tutma oranı bakımından çeşitler kıyaslandığında; en yüksek tutum oranı %74,06 ile "Garnem x Artemis" kombinasyonundan elde edilirken, en düşük tutum oranları ise %56,01 ile "Garnem x Samantha" ve %54,02 ile "Garnem x Astoria" çeşitlerinde gözlemlenmiştir. "Garnem x Patagonia" (%65,21) ise istatistiksel olarak orta grupta yer almıştır. Aşılamadan sonra, kallus dokusu ve aşı köprüsünün oluşumu birçok faktörün kümülatif etkisi altındadır. Çevresel koşullar, anaç ve kalemin

gelişim durumları ve aşı yapanın el becerisi, aşılama tipi ve zamanı, aşılama başarısını etkileyen önemli faktörler olarak, literatürde geniş şekilde ele alınmıştır (Bayram ve ark., 2014; Balta ve Şen, 2023). Bununla birlikte, anaç ile kalem arasındaki botanik akrabalık derecesi, aşılama başarısının belirleyici unsuru olarak öne çıkmaktadır. Akrabalık derecesi, bitkiler arasında, uyumu ve gelişimi yönlendirerek, aşılama sürecinin verimliliğini ve başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu bulgu, şeftali gibi meyve türlerinde yapılan çeşitli çalışmalarla desteklenmektedir. Scorza ve Sherman (2005) tarafından yapılan bir araştırmada, anaç ve kalem arasındaki genetik yakınlığın, ağaçların gelişimi üzerine pozitif etki gösterdiğini ve aşılama başarısını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Benzer şekilde, Layne ve Bassi (2008) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, bu yakın akrabalığın, meyve kalitesi ve ağaç performansı üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamaktadır. Çalışma bulguları, mevcut literatürle paralellik göstermekte olup, botanik akrabalık derecesinin dikkate alınmasının da aşılama başarısını ve sağlıklı gelişimi artırmada önemli bir strateji olduğunu vurgulamak gerekmektedir.

**Tablo 2.** Anaç çapının aşı tutma başarısı üzerine etkileri

Kombinasyon	Bitki sayısı (adet)	Anaç çapı (mm)	Aşı tutma oranı (%)
Garnem x Artemis	Tutan	74	4,73±0,62 <sup>ÖD</sup>
	Tutmayan	26	4,71±0,69 <sup>ÖD</sup>
Garnem x Samantha	Tutan	56	5,51±0,41 <sup>ÖD</sup>
	Tutmayan	44	5,47±0,51 <sup>ÖD</sup>
Garnem x Astoria	Tutan	54	4,58±0,56 <sup>a</sup>
	Tutmayan	46	4,33±0,46 <sup>b</sup>
Garnem x Patagonia	Tutan	60	4,51±0,63 <sup>a</sup>
	Tutmayan	32	3,96±0,52 <sup>b</sup>

\*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (p<0.05)  
ÖD.: Önemli değil.

Aşı tutum oranı üzerine, anaç çapının etkisi incelendiğinde, kritik eşiğin 4,50 mm civarları olduğu gözlemlenmiştir. Anaç çapının, bu değer üzerine çıktığı; ‘‘Garnem x Artemis’’ ve ‘‘Garnem x Samantha’’ kombinasyonlarında, aşı tutumu gözlenen ve gözlenmeyen gruplar arasında istatistiksel olarak bir fark tespit edilmemiştir. Buna karşın istatistiksel farklılığın gözlemlendiği Garnem x Astoria ve Garnem x Patagonia kombinasyonlarında aşı tutumu gösteren anaçların ortalama çapları sırası ile 4,58 mm ve 4,51 mm iken, aşı tutumunun olmadığı gruplarda bu değerler sırası ile 4,33 mm ve 3,96 mm düzeylerine kadar düşüş göstermiştir (Tablo 2). Aşılama, kalem ve anaçın kambiyum dokularının birleşmesi son derece önemlidir. Kambiyum dokularının birleştiği bu bölgede, kallus dokusu oluşumu ve nişasta birikimi ile ilk bağlantılar sağlanır. Bu süreç, anaçtan kaleme doğru floem ve ksilemden oluşan, vasküler iletim demetlerinin oluşumunu sağlar, böylece su ile besin maddeleri aşı noktasına taşınır ve gözlerin sürmesini teşvik eder. Anaç çapının büyük olması, kalın ve çok katmanlı kambiyum tabakası oluşumuna imkân tanır, bu da aşılama başarı şansını artırır (Wang ve ark., 2017). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, anaç çapının artmasının aşı başarısı üzerine olumlu bir etki yaptığı tespit edilmiş olup (Öztürk ve ark., 2011; Kankaya ve ark., 2021), yapılan çalışmalar sonucunda 4,5 mm

ve üzeri anaç çapının aşı başarısı üzerinde olumlu bir etki sağladığı bildirilmiştir (Bostan ve İslam, 1998; Öylek ve ark., 2013).

Fizyolojik açıdan, daha geniş çaplı anaçların daha yüksek aşı tutma başarısına sahip olmasının birkaç nedeni bulunmaktadır. Öncelikle, geniş çaplı anaçlar daha büyük bir kambiyum tabakasına sahip olup, bu durum aşılama sonrası kallus oluşumu ve vasküler bağlanmanın daha hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır (Öztürk., 2021). Ayrıca, geniş çaplı anaçlar daha fazla su ve besin maddesi ileme kapasitesine sahip olduğu için aşı bitkinin daha iyi beslenmesine ve büyümesine katkıda bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, geniş çaplı anaçlar çevresel streslere karşı daha dayanıklı olmasından kaynaklı bu da aşı tutma oranını artırdığı çeşitli literatürle de desteklenmiştir (Mng'omba ve ark., 2012; Mng'omba ve ark., 2013). Bu bulgular doğrultusunda, anaç seçiminde çapın dikkate alınması gerektiği, daha geniş çaplı anaçların tercih edilmesinin aşı tutma başarısını fizyolojik olarak olumlu yönde etkileyebileceği söylenebilir.

Aşılama işleminden iki ay sonra, aşı noktalarına ve gelişim gösteren çeşitlerin en ve boy değerlerine ilişkin bulgular Tablo 3'te verilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda, genel olarak bu parametrelerin birbirleri ile pozitif ilişkili olduğu söylenebilir. Aşı noktasında, en yüksek genişlemeyi gösteren (%47,57) Samantha, sürgün eni (5,61 mm) ve boyu (71,49 mm) özellikleriyle de öne çıkmıştır. Ancak bilindiği üzere, bazı türler hatta tür içi çeşitler, diğerlerinden farklı şekilde monopodial veya simpodial gelişime eğilimlidirler. Bu sebeple, dallanma ve dal uzunluklarına ilişkin varyasyonlar gözlemlenebilmektedir (Kohler, 2023; Joven, 2023). Nektarin çeşidi olan, Patagonia, aşı noktası en az artış gösteren olmasına rağmen (%4,71), sürgün eni (4,15 mm) ve boyu (63,29 mm) yönüyle az da olsa diğer iki şeftali çeşidinden daha yüksek değerler göstermiştir.

**Tablo 3.** Garnem üzerine aşı farklı anaçların bazı parametreler bakımından incelenmesi

Çeşit	Aşı öncesi bitki çapı (mm)	Aşı noktası bitki çapı (mm)	% Artış	Aşı sonrası (mm)	Boy (cm)
Patagonia	5,51±0,41 <sup>a</sup>	5,77±0,67 <sup>b</sup>	4,71	4,15±0,88 <sup>b</sup>	63,29±13,71 <sup>b</sup>
Samantha	4,73±0,62 <sup>b</sup>	6,98±0,84 <sup>a</sup>	47,57	5,61±1,00 <sup>a</sup>	71,49±8,37 <sup>a</sup>
Astoria	4,58±0,56 <sup>b</sup>	5,36±0,69 <sup>c</sup>	17,03	3,78±0,91 <sup>b</sup>	68,96±16,7 <sup>ab</sup>
Artemis	4,51±0,62 <sup>b</sup>	6,10±0,93 <sup>b</sup>	35,25	4,13±1,14 <sup>b</sup>	55,78±14,86 <sup>c</sup>

\*Aynı sütunda farklı harflerle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar istatistiksel olarak önemlidir (p<0.05)

Çalışmadan elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, Samantha çeşidi aşı öncesi ve sonrası gövde çapı ve bitki boyu bakımından diğer kombinasyonlara göre daha yüksek bir artış miktarı göstermiştir. Bu sonuçlar, çeşitli türlerin aşılama gösterdiği performans farklarını ortaya koymakta ve bu durumun çeşitlerin genetik yapılarındaki farklılıklardan kaynaklanabileceğini düşündürmektedir. Çünkü, her çeşit, kendine özgü genetik özelliklere sahiptir ve bu özellikler, aşı tutma yeteneği ile aşılamanın başarısı üzerinde doğrudan etkilidir. Çeşitlerin genetik yapıları, onların fizyolojik özelliklerini belirler; bu nedenle, bazı çeşitler aşılama sonrası daha hızlı kallus dokusu oluşturabilirken, diğerleri bu süreci daha yavaş tamamlayabilir (Song ve ark., 2015; Wang ve ark., 2017). Ayrıca, bitki bünyesinde bulunan büyümeyi düzenleyici maddeler olan oksin ve sitokinin miktarları da

aşılamanın başarısını etkileyen önemli faktörler arasında yer alır. Bu hormonların dengesi, aşılamanın ardından bitkilerin sağlıklı bir şekilde birleşmesini ve büyümesini sağlamaktadır (Habibi ve ark., 2022).

#### **4. Sonuç ve Öneriler**

Türkiye, tarımsal üretim çeşitliliği açısından önemli bir rol oynamasına rağmen, ticareti yönüyle henüz potansiyelini yansıtmamaktadır. Arzu edilen seviyeye ulaşmak, üretim süreçlerinde standardizasyonun sağlanması ile mümkündür. Bu bağlamda, bahçe tesisi öncesi doğru anaç/kalem kombinasyonu, meyve yetiştiriciliğinde son derece önemlidir.

Çalışmada incelenen kombinasyonlar arasında; aşı tutma oranı, aşı noktası gibi parametreler bakımından Samantha çeşidi öne çıkmıştır. Ayrıca incelenen tüm şeftali (Artemis, Samantha, Astoria) ve nektarin (Patagonia) çeşitlerinin, Garnem anacı ile herhangi bir afinite problemi olmadığı ve erken dönem gelişim parametrelerinin iyi olduğu kanaatine varılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, daha fazla çeşidin kullanılması ve aşılanan çeşitlerin aşı tutumundan sonra gelişim özelliklerinin takip edilmesi, daha doğru tercihlerin yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Bitki boyu, aşı noktası çapı ve aşı sonrası çap bakımından Samantha çeşidi öne çıkmaktadır. Samantha çeşidinin bu kriterler doğrultusunda sağladığı performansa göre, bitki gelişimi açısından ön planda olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, bitki üretim tekniklerinin optimize edilmesi ve anaç çeşit kombinasyonlarının özelliklerinin detaylı bir şekilde ortaya konması önem arz etmektedir.

#### **Teşekkür**

Çalışmada adı geçen doktora öğrencisi İlknur ESKİMEZ, 100/2000 Sürdürülebilir Tarım (Yenilikçi-İyi Tarım Uygulamaları) alanında doktora eğitimine devam etmektedir ve aynı zamanda TÜBİTAK bursiyeridir. Öğrencimize maddi desteğini esirgemeyen iki kuruma da sonsuz teşekkür ederiz.

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamıştır.

#### **Kaynakça**

Anonim. <https://elmatarim.com.tr/urunler/> Erişim Tarihi: 22/07/2024

Askari-Khorasgani O., Jafarpour M., Hadad MM., Pessarakli M. Fruit yield and quality characteristics of “Shahmiveh” pear cultivar grafted on six rootstocks. *Journal of Plant Nutrition* 2019; 42(4): 323-332.

Balta F., Şen SM. Fındıkta (*Corylus avellana* L.) aşı kaynaşmasının anatomik ve histolojik gelişimi. *Akademik Ziraat Dergisi* 2023; 12(Özel Sayı): 11-28.



- Basile B., Marsal J., Solari LI., Tyree MT., Bryla DR., DeJong TM. Hydraulic conductance of peach trees grafted on rootstocks with differing size-controlling potentials. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 2003; 78(6): 768-774.
- Bayav A., Çetinbaş M. Peach production and foreign trade of Turkey: current situation, forecasting and analysis of competitiveness. *Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi* 2021; 31(2): 212-225.
- Bayram S., Tekintaş F., Aşkın M. Avokadoda aşı sonrası erken dönemde anaç ve kalem uyuşması üzerine anatomik ve histolojik araştırmalar. *Derim* 2014; 31(2): 63-78.
- Bostan SZ., İslam A. Kayısıda bir ve iki yaşlı çöğür anaçlarının fidan gelişimine olan etkileri. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 1998; 22(3): 291-293.
- Ekinci H., Saskin N., Ak BE., Dogan BD. Effects of different healing agents on acclimatization success of in vitro rooted Garnem (*Prunus dulcis* × *Prunus persica*) rootstock. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant* 2024; 60(1): 1-9.
- Eskimez İ., Mertoğlu K., Polat M., Korkmaz N. Farklı uygulamaların M9 anacının gelişimi üzerine etkileri. *Ziraat Fakültesi Dergisi* 2020; 15(1): 72-79.
- FAO. Food and Agriculture Organization <https://www.fao.org/markets-and-trade/publications/en/?category=104999//> Erişim Tarihi: 16/09/2024
- Felipe AJ. Felinem, Garnem, and Monegro almond × peach hybrid rootstocks. *HortScience* 2009; 44(1): 196-197.
- Grigorieva E., Livenets A., Stelmakh E. Adaptation of agriculture to climate change: a scoping review. *Climate* 2023; 11(10): 202.
- Habibi F., Liu T., Folta K., Sarkhosh A. Physiological, biochemical, and molecular aspects of grafting in fruit trees. *Horticulture Research* 2022; 9: 1-18.
- Joven ÁM. Dynamics of Almond (*Prunus amygdalus* (L.) Batsch, syn *P. dulcis* (Mill.)) tree architecture and scion/rootstock interaction. Doctoral dissertation, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (Spain) 2023, 268.
- Kankaya A., Polat M., Eskimez İ., Mertoğlu K. Şeftali fidan üretiminde aşı başarısı bakımından anaç çapı ve kalem dinlenmesinin etkileri: Artemis–Garnem örneği. *Ziraat Fakültesi Dergisi* 2021; 16(2): 150-153.
- Kapazoglou A., Tani E., Avramidou EV., Abraham EM., Gerakari M., Megariti S., Doulis AG. Epigenetic changes and transcriptional reprogramming upon woody plant grafting for crop sustainability in a changing environment. *Frontiers in Plant Science* 2021; 11: 613004.
- Kohler AR. Where do I grow from here the genetic control of branch orientation in prunus. *Michigan State University* 2023; 154.
- Layne D., Bassi D. *The peach: botany, production and uses* 2008; Centre for Agriculture and Biosciences International (CABI).

- Lesmes-Vesga RA., Cano LM., Ritenour MA., Sarkhosh A., Chaparro JX., Rossi L. Rootstocks for commercial peach production in the southeastern United States: Current research, challenges, and opportunities. *Horticulturae* 2022; 8(7): 602.
- Linghong H., Yongmei R., Yongqing M. Evaluating the peach export competitiveness of hebei province based on analytic hierarchy process. *Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* 2015; 466-469
- Meena NK., Choudhary K., Negi N., Meena VS., Gupta V. Nutritional composition of stone fruits. *Production Technology of Stone Fruits* 2021; 227-251.
- Minas IS., Moreno MÁ., Anthony BM., Pieper JR., Reighard G. Peach rootstock development and performance. In *Peach* 2023; 54-91.
- Mng'omba SA., Sileshi GW., Jamnadass R., Akinnifesi FK., Mhango J. Scion and stock diameter size effect on growth and fruit production of *Sclerocarya birrea* (Marula) trees. *Journal of Horticulture and Forestry* 2012; 4(9): 153-160.
- Mng'omba SA., du Toit ES. Effect of diagonal cut surface length on graft success and growth of *Mangifera indica*, *Persia americana*, and *Prunus persica*. *HortScience* 2013; 48(4): 481-484.
- Öylek HŞ., Aslan A., Demirtaş MN., Avcı S. Farklı çaplara sahip zerdali çöğürlerinin aşı başarısı ve fidan gelişimine etkisi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi* 2013; (2): 103-107.
- Öztürk A. The effects of different rootstocks on the graft success and stion development of some pear cultivars. *International Journal of Fruit Science* 2021; 21(1): 932-944.
- Öztürk B., Özcan M., Öztürk A. Farklı anaç çapları ve aşılama zamanının kivi fidanı üretiminde aşı başarısı ve fidan büyümesi üzerine etkileri. *Tarım Bilimleri Dergisi* 2011; 17(4): 261-268.
- Rasool A., Mansoor S., Bhat KM., Hassan GI., Baba TR., Alyemeni MN., Ahmad P. Mechanisms underlying graft union formation and rootstock scion interaction in horticultural plants. *Frontiers in Plant Science* 2020; 11, 590847.
- Reig G., Alegre S., Gatius F., Iglesias, I. Adaptability of peach cultivars [*Prunus persica* (L.) Batsch] to the climatic conditions of the Ebro Valley, with special focus on fruit quality 2015; *Scientia Horticulturae*, 190(1): 149-160.
- Scorza R. Theory and practice of genetically manipulating peach tree architecture. *NY Fruit Q*, 2005; 13(4): 27-31.
- Song GQ., Walworth AE., Loescher WH. Grafting of genetically engineered plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 2015; 140(3): 203-213.
- Vahdati K., Sarikhani S., Arab MM., Leslie CA., Dandekar AM., Aletà N., Mehlenbacher SA. Advances in rootstock breeding of nut trees: objectives and strategies. *Plants* 2021; 10(11): 2234.
- Wang J., Jiang L., Wu R. Plant grafting: how genetic exchange promotes vascular reconnection. *New Phytologist* 2017; 214(1): 56-65.

## Güneş Enerji Santrali Gerçek Üretim Verileri ile Benzetim Programlarından Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması

Derya DİP<sup>1</sup>, Engin Ufuk ERGÜL<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Anabilim Dalı, 05100, Amasya

<sup>2</sup>Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 05100, Amasya

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0002-0071-4436>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-0100-5199>

\*Sorumlu yazar: engin.ergul@amasya.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 03.06.2024

Kabul tarihi: 07.09.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Yenilenebilir enerji

Güneş enerji santrali

Pvsol

Pvsyst

Pvgis

Pvwatts

### ÖZ

Dünyada her geçen gün artan enerji talebinin karşılanması noktasında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı hızla artmaktadır. Fosil yakıtların çevreye olumsuz etkileri, yakın gelecekte azalacak ve tükenecek olması vb. nedenlerden dolayı temiz elektrik üretim sistemlerinin kullanımına yönelik farkındalık artmıştır. Türkiye birçok ülkeye göre güneş enerjisi potansiyeli bakımından oldukça iyi konumdadır. Bu konuda artan bilinç ve yenilenebilir enerji yatırımlarının devlet destekleri kapsamında olması bu alanda yapılan yatırımlar için avantaj sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisinden elektrik üretimi için fotovoltaik (FV) sistemler kullanılmaktadır. FV sistemlerin çıktılarına yaklaşık olarak erişebilme noktasında benzetim programları sıklıkla kullanılmaktadır. Her geçen gün gelişen bu programlar sayesinde tesislere ait fizibilite raporları alınabilmekte ve farklı sistem tasarımlarıyla birlikte nihai sonuca varılabilmektedir. Bu çalışmada, Amasya İl'inde yer alan bir güneş enerjisi santrali üretim verileri ile PVSOL, PVSYST, PVGIS ve PVWATTS benzetim programlarında elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Gerçek üretim değerine en yakın sonuç PVSOL programı ile en uzak sonuç ise PVSYST programı ile elde edilmiştir. Fotovoltaik benzetim programlarının, zamanla azalan hata oranlarıyla birlikte gelecekteki çalışmalar için altyapı olacağı düşünülmektedir.

## Comparison of Real Solar Power Plant Production Data and The Data Obtained from Simulation Programs

### Research Article

#### Article History:

Received: 03.06.2024

Accepted: 07.09.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Renewable energy

Solar power plant

Pvsol

Pvsyst

Pvgis

Pvwatts

### ABSTRACT

The share of renewable energy sources is increasing rapidly at the point of meeting the increasing energy demand in the world. Awareness of the use of clean electricity generation systems has increased due to the negative effects of fossil fuels on the environment, their decrease and depletion in future, etc. Türkiye is in a very good position in terms of solar energy potential compared to many countries. Increasing awareness on this issue and the fact that renewable energy investments are within the scope of government supports provided an advantage for investments made in this field. Photovoltaic (FV) systems are used for electricity generation from solar energy, which is one of the renewable energy sources. Simulation programs are frequently used to reach the outputs of photovoltaic systems. Thanks to this programs, feasibility reports of the facilities can be obtained, and the result can be reached with different system designs. In this study, the production data of a solar power plant in Amasya was compared with the data obtained in PVSOL, PVSYST, PVGIS and PVWATTS simulation programs. The closest result to the actual production value was obtained with the PVSOL, the farthest result was obtained with the PVSYST. Photovoltaic simulation programs are thought to be the infrastructure for future studies with decreasing error rates over time.

**To Cite:** Dip D., Ergül EU. Güneş Enerji Santrali Gerçek Üretim Verileri ile Benzetim Programlarından Elde Edilen Verilerin Karşılaştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 414-431.



## 1. Giriş

Enerji, günümüzde vazgeçilmez yaşam kaynaklarından bir tanesi konumundadır. Bununla birlikte enerji, ülkelerin gerek sosyal gerekse ekonomik kalkınması açısından önemli girdileri arasında yer almaktadır. Enerji kullanım alanlarının yaygınlaşması fosil kaynaklara olan ihtiyacı artırmıştır (Tugal, 2014). Artan talebin aksine fosil kaynakların sınırlı olması alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasına yol açmıştır. Sonunda tükenecek olan sınırlı kaynaklar olan fosil yakıtların aksine, yenilenebilir enerji kaynakları bol miktarda bulunur ve sürekli olarak yenilenebilir. Fosil yakıtların sebep olduğu sera gazı emisyonu, küresel ısınma gibi çevreye verdiği zararlar da ele alındığında, ilerleyen zamanlarda daha da artmak üzere çevre ve insanlar üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği aşikârdır. Dünya sera gazı emisyonlarını azaltmanın ve iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmenin yollarını ararken, yenilenebilir enerji giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir.

Elektrik enerjisi ihtiyacının büyük bir bölümü termal veya hidroelektrik enerji üretim santrallerinden elde edilmektedir. Buralarda üretilen elektrik enerjisinin olumsuz etkileri mevcuttur. Bu olumsuz etkilerden olan hava kirliliği ve çevresel olumsuzluklarla ilgili endişenin artmasıyla birlikte, elektrik üretimi için fotovoltaik (FV) sistemler gibi yenilenebilir enerji teknolojileri üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır (Akcan ve ark., 2020). Güneş enerjisinin devamlı olması, doğaya negatif etkilerinin hemen hemen hiç olmaması ve yakıt maliyetinin bulunmaması bu enerji türünü diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı bir noktada tutmaktadır (Ceylan, 2017).

Güneş enerji potansiyeli yüksek olan Türkiye için, FV sistemler kritik öneme sahiptir. FV panellerin monokristal, polikristal, ince film gibi çeşitleri mevcuttur. FV enerji sistemlerinin performansı üzerinde, coğrafi konum ve güneş alma miktarının yanı sıra FV panelin özellikleri de etkilidir (Akcan ve ark., 2020).

Gelişen ve değişen teknolojiyle beraber hâlihazırda FV sistemlerinin tahmini performans uygulamaları hakkında veri elde edebilmek için gerekli analizler, dijital ortamda farklı benzetim programlarıyla oluşturulabilmektedir. Bu programlar FV sistemlerin enerji üretim değerlerindeki verimliliğinin ne olacağını ve çalışma tutumunu araştırma konusunda önemli bir fayda sağlamaktadır. Güneş enerjisi benzetim programları ile birçok farklı sistem tasarımı geliştirilebilir. Benzetim programları vasıtasıyla yapılan üç boyutlu sistem tasarımı ile güneş panellerine düşen gölgelenmeler gerçek ortam ile aynı anda izlenebilir. Programların sağladığı imkânlarla FV sistem tasarımcıları, kurulumun gerçekleştirileceği coğrafi bölgeye, ihtiyaç olan enerji miktarına göre uygun seçimler yaparak en doğru sonuca ulaşabilir (Ceylan, 2017).

Elektrik üretimini sağlayacak sistemlere olan talep, her geçen gün artmaktadır. Bu artışa karşılık verebilmek için, yenilenebilir enerji tabanlı FV sistemler öne çıkmaktadır. Kurulacak olan tesislere özel olarak maliyet analizinin yapılabilmesi, üretim değerlerinin tahmin edilebilmesinin yanı sıra tasarımcının, mühendisin veya yatırımcının profesyonel model oluşturmasında benzetim programları kilit noktadadır.

Yetgin (2022), hâlihazırda bulunan bir tesisin çatısına kurulmuş olan ve 2020 yılının Ağustos ayından itibaren üretim verileri kaydedilen güneş enerji santralının (GES) gerçek değerlerini ve sistemin özelliklerini PVSYST (Meteonorm veri tabanı ile) benzetim programına işleyerek sonuç elde etmiştir. Benzetim neticesinde sistemin üretim verileri, kayıp verileri ve sistemin performans parametrelerini elde etmiştir. Performans parametreleri analizi için IEC 61724 standardını temel almıştır. Çalışma neticesinde, gerçek değerler ile benzetim değerlerinin yıllık olarak üretim sonuçları değerlendirmeye alındığında değerler arasında yakın sonuçlar olduğunu gözlemlemiştir. Gerçek üretim verileri ile program çıktıları arasındaki farklılıkların hangi etmenlerden kaynaklanabileceğini belirlemek için "one at a time" kullanılmıştır ve çevresel etmenlerden dolayı farklılıklar oluştuğu belirtilmiştir (Yetgin, 2022).

Arslan (2022), Uşak ve Kayseri illerinde bulunan 3 farklı fotovoltaik santralin gerçek üretim verileri ile benzetim programları kullanılarak elde edilen üretim verilerini karşılaştırmıştır. Araştırmacı Uşak ve Kayseri ilinde kurulu güçleri 862 kWp-1148 kWp arasında olan arazi ve çatı tipi güneş enerji santrallerini tercih ederek analiz gerçekleştirmiştir. Her üç santral için PVSOL (Meteonorm veri tabanı ile), PVSYST (Meteonorm, Nasa, PVGIS veri tabanları ile) ve PVGIS (Era5 ve Sarah veri tabanları ile) programlarından veriler üretmiş ve üretim sonuçlarını karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda ortalama %3,83'lük hata oranıyla PVSYST (Meteonorm veri tabanı ile) programı kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları gerçeğe en yakın sonucu vermiştir (Arslan, 2022).

Acar (2022) Edirne ili için güneşten enerji üretme kapasitesi ve Edirne'de yapılması planlanan güneş enerji santralının analizi yapılmıştır. Bu analizler, PVGIS ve PVSYST 6.70 benzetim programları kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda Edirne'de kurulması planlanan güneş enerji santralının yatırım maliyetini kısa zamanda karşılayacağı belirtilmiştir (Acar, 2022).

Yalılı (2021) Van ili Edremit ilçesinde bulunan lisanslı ve şebekeye bağlı 1 MW gücündeki GES için finansal analiz ve üretim verileri üzerine bir çalışma gerçekleştirerek yatırımın ileride kârlı olup olmadığını irdelemiştir. Enerji üretim verilerinin elde edilmesinde PVGIS programını kullanmıştır. Yatırımın öz sermaye kullanılarak ya da bu alandaki özel kredilerin kullanılması durumuna göre analizler ve yorumlar yapmıştır. Bahsi geçen santral yatırımının öz sermaye ile gerçekleştirilmesi durumunda makul olabileceği, yatırımda kredi kullanılması durumunda ise olumsuz bir yatırım olacağı neticesine ulaşılmıştır (Yalılı, 2021).

Öztürk (2021) Aksaray ilinde yatırım gerçekleştiren Beştepe Enerji'nin tedarikçi firmaların kendilerine sunmuş olduğu fizibilite raporları ve PVSYST programından elde edilen fizibilite sonuçları kıyaslamıştır. Sonuçlara göre PVSYST programının üretim verilerinin gerçek üretim verilerinden %3,74 daha fazla olduğu görülmüştür (Öztürk, 2021).

Kılıcı (2020) Kayseri şehrinde; panellerin tek ve çift yüzü olmasına göre ve sistemin sabit, açısı değiştirilebilen tek eksenli güneş takip sistemi şeklinde olmalarına göre farklı sistem tasarımları yapmıştır. Bu tasarımlara ait üretim analizi yapmıştır. Her bir sistemin kurulu gücü eşit ve 1,189.76 kWp'tir. 5 farklı şekilde tasarlanan sistemlerin üretim analizleri PVSYST programı aracılığı ile

yapılmıştır. Hareketli ve çift yüzeyli panel ile yapılan sistem 2391.6 MWh enerji üreterek en yüksek enerji üretimine sahiptir. Sabit sistemler kendi arasında incelendiğinde; sabit çift yüzeyli panelin olduğu sistem, tek yüzeyli sisteme oranla %6 daha fazla enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Hareketli sistemler incelendiğinde; çift yüzeyli panel %4 oranında daha fazla enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Sabit sistem ile hareketli sistemler karşılaştırıldığında ortalama %13 ile %15 arasında hareketli sistemin daha fazla enerji ürettiği sonucuna varılmıştır (Kılıcı, 2020).

Aksangör (2019) Ankara’da bulunan bir kampüse ait bazı binaların elektrik ihtiyacının GES ile karşılanması durumunda tasarlanacak sistemden elde edilecek enerji miktarını ve sistemin performansını benzetim programında hesaplanmasını hedeflemiştir. Çalışmada PVSYST benzetim programı tercih edilmiştir. Meteorolojik veriler, programın sunduğu Meteororm 7.2 veri tabanından çekilmiştir. Sistemin kurulu gücü 604,8 kWh'tir. Çalışma sonucunda Aksangör, sistemin performans oranını %84,1 olarak belirtmiştir (Aksangör, 2019).

Türkyılmaz (2023) Bursa ilinin, Nilüfer ilçesi, Kayapa Organize Sanayi Bölgesinde, bulunan 1220 m<sup>2</sup>'lik çatı alanına sahip bir fabrikanın aylık fatura üzerinden bir yıllık gerçek tüketim verilerine dayanarak hesaplanan 126.176 kWh/yıl enerji ihtiyacını karşılamak adına, çatı tipi şebekeye bağlı güneş enerjisi santral sistemi tasarımı yapmıştır. Tasarlanan santralin yazılımlar arası sonuçlarını karşılaştırmak adına, PVSOL, PVSYST, EzDesinger, HelioScope ve PVGIS olmak üzere beş farklı yazılımı kullanarak incelenmiş ve programlar arası farklar ortaya koyulmuştur. (Türkyılmaz, 2023).

Kınalı (2019) Konya ve Karaman illerinde bulunan güneş enerji santrallerinin gerçek tasarım modellerini ve üretim verilerini, bu alanda kullanılan benzetim programları ile karşılaştırılarak yazılımların performansını irdelemiştir. Çalışmada PVSYST, PVSOL ve PVGIS benzetim programları ile analiz yapmıştır. Konya ve Karaman illerinde 250 kW ile 1 MW arasında değişen kurulu güçlere sahip arazi tipli üç GES’in ölçülen değerleri kıyaslanmıştır. Tüm sahalar için en doğru sonucun sırasıyla PVSOL, PVGIS ve PVSYST yazılımlarının verdiği ve PVGIS yazılımının ERA5 veri tabanı ile yapılan benzetim hariç tüm yazılımların %5 hata oranının altında bir analiz gerçekleştirdiği belirtilmiştir (Kınalı, 2019).

Mohammadi ve Gezegin (2022), Afganistan’da kurulu 5 MW'lık bir güneş enerjisi santralının tasarımı ve benzetimi incelenmişlerdir. Sistem tasarımında PVSYST, PVGIS ve HOMER yazılımlarını kullanmışlardır ve bu yazılımların ürettiği sonuçları karşılaştırmışlardır. HOMER ve PVGIS kullanılarak üretilen yıllık enerjinin sırasıyla yaklaşık 11698 MWh ve 10673 MWh, PVSYST'ten elde edilen sonucu ise yılda 11938 MWh'tir. Benzetimler sonucunda yıllık üretilen güç sonuçları, PVSYST sonuçlarına göre karşılaştırıldığında, PVGIS'in %10,6, HOMER'in ise %2 daha düşük olduğu sonucuna ulaşmışlardır. PVSYST ile HOMER arasında yaklaşık %2'lik bir fark oluştuğunu belirtmişlerdir.

Beyoğlu ve Demirtaş (2024) güneş enerjisi santralının proje sürecinde öngörülen enerji üretim tahmini için bir model ve program tasarlanmıştır. Tasarlanan modeli ile Balıkesir'de bulunan 54 kWh'lik güneş enerjisi santralının enerji üretim değerleri tahmin edilmiştir. Geliştirilen program verileri ile PVGIS'ten elde edilen enerji üretim sonuçları karşılaştırılmıştır. Geliştirilen program, 2016-2020 yılları için toplam

enerji üretimini %1,5 farkla; PVGIS programı ise %5,3 farkla hesaplamıştır. Karşılaştırma sonucunda, geliştirilen programın aynı meteoroloji verileri kullanıldığında PVGIS programından daha gerçekçi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada, Amasya İl'inde kurulu olan bir güneş enerji santrali (GES) üretim verileri ile benzetim programları aracılığıyla elde edilen verilerin karşılaştırılarak analizleri yapılmış ve bunun sonucunda elde edilen verilerin doğruluk oranları değerlendirilmiş, aynı zamanda benzetim programlarının da kendi aralarında karşılaştırılması yapılarak sapmalara neden olan etmenler irdelenmiştir. Bu çalışmanın gelecekte yapılması planlanan bilimsel çalışmalara ve uygulama çalışmalarına önemli bir kaynak oluşturacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Amasya İlinin Güneş Enerji Potansiyeli

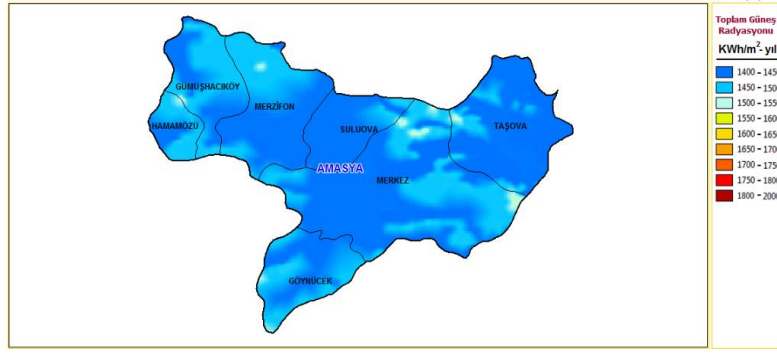
Amasya; Orta Karadeniz'in iç kısımlarında 34° 57' 06"- 36° 31' 53" Doğu Boylamları ile 41° 04' 54"- 40° 16' 16" Kuzey Enlemleri arasında bulunur. Amasya ili, kışın soğuk hava akımlarının etkisinde olsa da yükseltisinin fazla olmaması ve şehri denize kapatan kuzeydeki dağlık sahanın çok yüksek olmaması gibi nedenlerden dolayı kar yağışlarının az olduğu, kışın sıcaklığın çok fazla azalmadığı ve yaz sıcaklıklarının nispeten yüksek olduğu bir şehirdir (Yılmaz, 2020).

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) alınan verilere göre Amasya ili iklim sınıflandırmaları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Amasya ilinin iklim sınıflandırması (MGM, 2023)

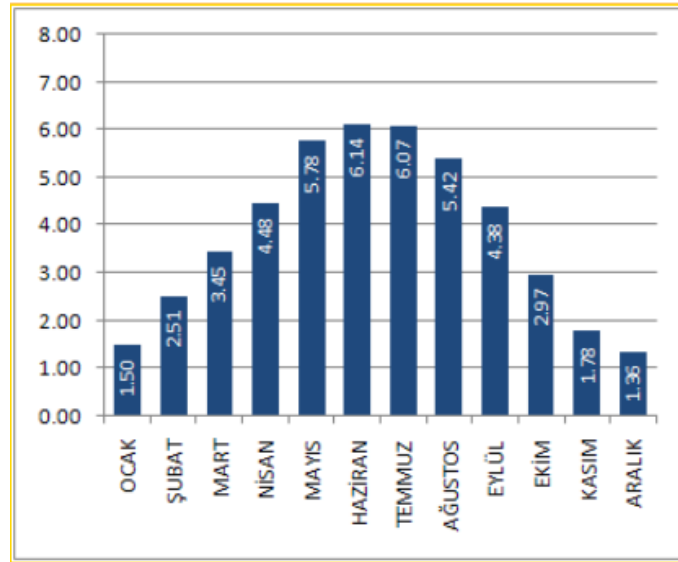
İklim Sınıflandırması	İklim Tipi
Aydeniz	Yarı Kurak
Erinç	Yarı Nemli
DeMartonne	Yarı Kurak-Nemli Arası
Trewartha	Kışları Serin-Yazları Sıcak
Thornthwaite	Yarı Kurak-Az Nemli

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre Amasya ili güneş enerji potansiyeli Şekil 1'de verilmiştir. Diğer bölgelere kıyasla Karadeniz Bölgesi'nin güneş enerji potansiyeli düşüktür. Amasya'da güneş radyasyonu ortalamasının yaklaşık 1400-1550 kWh/m<sup>2</sup>-yıl değerleri arasında olduğu görülmektedir. Bu değer Türkiye'nin ortalama yıllık toplam ışınım şiddetinden düşüktür (Kan Kaynar, 2020; Alaçam, 2022).



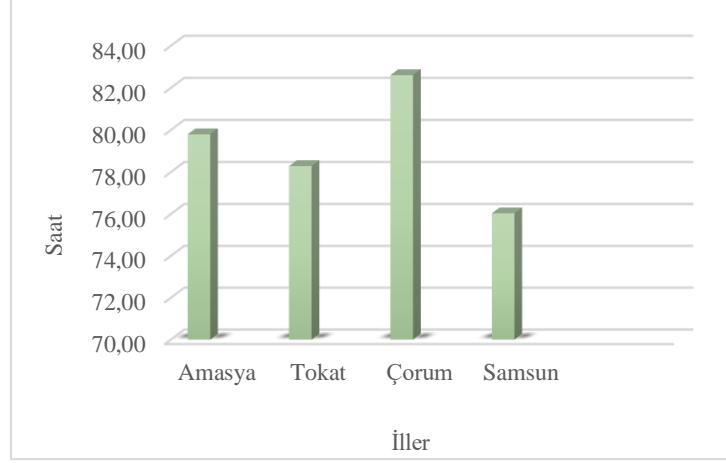
Şekil 1. Amasya ili güneş enerji potansiyeli atlası (GEPA, 2023)

Güneşlenme süresi yanında diğer bir önemli etmen güneş ışınlarının geliş açısıdır. Çünkü güneş ışınlarının dik veya eğik gelmesi radyasyon (ışım) miktarı üzerinde etkilidir. Güneşin geliş açısının dik veya dike yakın gelmesi radyasyon miktarını artırıcı, daha düşük açıyla gelmesi ise azaltıcı etki yapmaktadır. Yaklaşık 41° kuzey enleminde yer alan Amasya'da güneş ışınlarının ufuk düzlemi üzerindeki maksimum yükseltisi 21 Haziran tarihinde 72°48' ya, minimum yükseltisi ise 21 Aralık tarihinde 25°54' ya ulaşmaktadır. Buna göre Amasya'ya yazın güneşin gelme açısı daha fazla olduğu için, bu dönemde güneş radyasyonunu daha fazla almaktadır (Yılmaz, 2020). Şekil 2'de Amasya ili global radyasyon değerleri verilmektedir. Buna göre yaz aylarında radyasyon değerinin fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Amasya global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) (GEPA, 2023)

Amasya ilinin çevresindeki illere göre yıllık ortalama güneşlenme süreleri Şekil 3'te verilmiştir. Çorum ilinin çevredeki diğer illere göre daha yüksek güneşlenme süresine sahip olduğu ve bu süreye yakın diğer ilin ise Amasya olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Karadeniz Bölgesi'ndeki bazı illerin yıllık ortalama toplam güneşlenme süreleri (GEPA, 2023)

2023 yılı için GEPA'dan alınan verilere göre Amasya'nın merkez ve ilçelerine ait ışınım şiddetleri Tablo 2'de verilmiştir. Amasya il merkezi için yıllık ortalama ışınım şiddeti 3,83 kWh/m<sup>2</sup>-gün olarak görülmektedir. Merkez ve ilçelerde en fazla ışınım şiddeti Haziran ayında görülmektedir.

**Tablo 2.** Amasya ili ve ilçelerinin global radyasyon değerleri (GEPA, 2023)

AY	Merkez (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	Gümüşhacıköy (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	Göynücek (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	Hamamözü (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	Merzifon (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	Suluova (kWh/m <sup>2</sup> -gün)	Taşova (kWh/m <sup>2</sup> -gün)
Ocak	1,46	1,53	1,56	1,58	1,60	1,58	1,53
Şubat	2,51	2,41	2,43	2,60	2,57	2,47	2,41
Mart	3,47	3,39	3,52	3,49	3,43	3,42	3,39
Nisan	4,51	4,46	4,53	4,51	4,46	4,44	4,44
Mayıs	5,79	5,81	5,79	5,87	5,81	5,73	5,71
Haziran	6,14	6,15	6,16	6,19	6,15	6,11	6,08
Temmuz	6,08	6,14	6,07	6,20	6,14	6,01	5,99
Ağustos	5,43	5,41	5,46	5,46	5,41	5,38	5,38
Eylül	4,40	4,38	4,43	4,44	4,38	4,34	4,29
Ekim	2,99	2,94	3,09	2,98	2,94	2,94	2,93
Kasım	1,79	1,79	1,82	1,80	1,79	1,79	1,75
Aralık	1,37	1,34	1,41	1,36	1,34	1,34	1,33
<b>Ortalama (kWh/m<sup>2</sup>-gün)</b>	<b>3,83</b>	<b>3,81</b>	<b>3,86</b>	<b>3,87</b>	<b>3,84</b>	<b>3,80</b>	<b>3,77</b>

## 2.2. Benzetim Programları

Kurulması planlanan veya kurulmuş yenilenebilir enerji santralleri için ilk olarak irdelenen konulardan bir tanesi santral konumuna göre elde edilecek yıllık veya aylık bazdaki üretim verilerinin ne olacağıdır. Bu verilerin hesaplanmasında benzetim programları sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca bu programlar, FV santrallerin finansman aşamasında geri dönüş hesaplarının yapılmasında ve donanım geliştiriciler tarafından yeni malzemelerin çıktılarını almak için de kullanılmaktadır. Santral için birkaç farklı senaryo denenip raporlar neticesinde gerek yatırımcı tarafında gerekse uygulama aşaması için yol haritası oluşturulmaktadır.

Benzetim programlarına bütünleşik hava bilgileri genelde meteorolojik servislerden alınmaktadır. Santral bölgesi verilerinin otomatik olarak sistemde kayıtlı olmaması durumunda gerekli eklemeler yapılmalıdır. Santral yakınında gölgelenmeye sebep olabilecek ağaç, bina vs. çevresel faktörlerin programa yansıtılması çıktıları etkileyecektir. Programların doğruluk oranları ile ilgili iyileştirme çalışmaları sürekli devam etmekte ve gerekli güncellemeler yapılmaktadır. Bu noktada doğru verilerin elde edilmesinde programın kullanıcı deneyimi de çok önemlidir. Santral özelinde elde edilen raporlar sayesinde önemli bilgiler edinilmekte ve bu programlar yatırımcıya yön verme noktasında önem arz etmektedir.

Güneş enerji sistemlerinin analizi, benzetimi ve enerji hesabı Homer, PVSOL, PVSYST, Helioscope, PVWATTS, Polysun, RetScreen, PVDesign, PVGIS, BlueSol gibi programlar yardımı ile yapılabilir. Bu çalışmada; PVSOL, PVSYST, PVGIS ve PVWATTS programları kullanılarak elde edilen üretim verileri ve gerçek üretim verileri arasında karşılaştırma yapılmıştır.

### 2.2.1. PVSOL

Valentin Software benzetim yazılımları 1998 yılında PVSOL yazılımını piyasaya sürmüştür ([www.valentin-software.com](http://www.valentin-software.com)). PVSOL, FV sistemler üzerinde üç boyutlu tasarım yapılmasını sağlayan bir yazılım programıdır. Gölge benzetimleriyle beraber, hâlihazırda var olan çatı üzerine veya arazi üzerine kurulum yapmamızı sağlar ve farklı tasarım seçenekleriyle (yatay yerleşim, dikey yerleşim, gölgeleme vb.) kıyaslama imkânı sunar. Birkaç modüllü küçük çatı sistemlerinden ticari çatılar, orta ölçekli sistemlerden büyük güneş santrallerine kadar tüm FV tasarımlarında kullanılır.

PVSOL yazılımı ile;

- Küçük evsel çatı sistemlerinde üç boyutlu depolamalı, depolamasız ya da hibrit tasarım yapılabilir,
- Doğrudan ilgili endüstriyel çatının kendisi üzerine yerleşim yapılabilir ve gölgeleme benzetimi yapılabilir,
- Mahsuplaşmalı ya da sulama arazilerinde zemin üzerine yerleşim imkânı sunar,
- İlgili konuma gitmeden sistem üzerinden çatıya ön yerleşim yapabilme imkânı sunar,
- Yapılan yerleşim ile beraber kullanılacak ürünlerin listesi ve ürün adedi çıkarılabilir,
- Üç boyutlu gölgeleme ile kazanç tahmininde yüksek doğruluk sağlar,
- Çatı yerleşimi yapılırken çatıda veya yerleşim alanı çevresinde gölgelemeye sebep olacak noktalar sistemde üç boyutlu olarak eklenebilir ve bu gölgelemeden dolayı oluşacak üretim düşüşü incelenebilir.

### 2.2.2. PVSYST

PVSYST programı, İsviçre Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız FV sistemler, sulama sistemleri ve DC şebekeler gibi fotovoltaiik sistem projelerinin gerçekleştirilebildiği bir programdır (<https://www.pvsyst.com>). PVSYST; kullanıcıların detaylı

hesaplama yapmalarına ve farklı parametrelerin kullanılmasına olanak sağlar. PVSYST programında ilerlerken çalışma yapılacak çatıya dair bilinmesi gereken bilgiler şu şekildedir: enlem/boylam değeri, çatının eğimi, binanın azimut değeri. Hava durumunu çeken birkaç farklı seçenek sunulmaktadır. Bunlar Meteonom 8.0., NASA-SSE, PVGIS TMY, Soiest TMY, Solar'dır (<https://www.pvsyst.com>).

### 2.2.3.PVGIS

PVGIS Avrupa Komisyonu'nun Ortak Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen ve Avrupa'da ve ötesinde belirli bir yerin güneş enerjisi potansiyeli hakkında bilgi sağlayan ücretsiz çevrimiçi bir programdır. Belirli bir konum için aylık ve yıllık ortalamalar ile iklim verileri dâhil olmak üzere güneş radyasyonu ve fotovoltaik performans verilerine ulaşılabilir (<https://pvgis.com/>).

### 2.2.4.PVWATTS

PVWATTS, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından geliştirilen ve kullanıcıların FV sistemlerinin elektrik üretim potansiyelini tahmin etmelerini sağlayan bir yazılım aracıdır. Ön güneş enerjisi değerlendirmeleri, sistem tasarımı ve performans modellemesi için güneş enerjisi endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (<https://pvwatts.nrel.gov/>).

PVWATTS, bir FV sisteminin güneş enerjisi çıkışını tahmin etmek için konum, hava durumu verileri, sistem boyutu, eğim açısı, azimut açısı ve diğer parametreler gibi çeşitli faktörleri dikkate alır. Dünyanın dört bir yanındaki binlerce meteoroloji istasyonundan ölçülen veriler kullanılarak kalibre edilen, uydudan türetilen güneş radyasyonu verilerine dayanan bir matematiksel model kullanır.

### 2.3.Örnek GES'e Ait Genel Bilgiler

Çalışma kapsamında incelenen santralde 396 adet 385 Watt yerli üretim Viensol markalı FV panel, 3 adet 50 kW çıkış gücüne sahip ABB (FVS – 50-TL-SX2) marka evirici bulunmaktadır. Santralin üstten görüntüsü Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Örnek GES



### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Gerçek Üretim Verileri

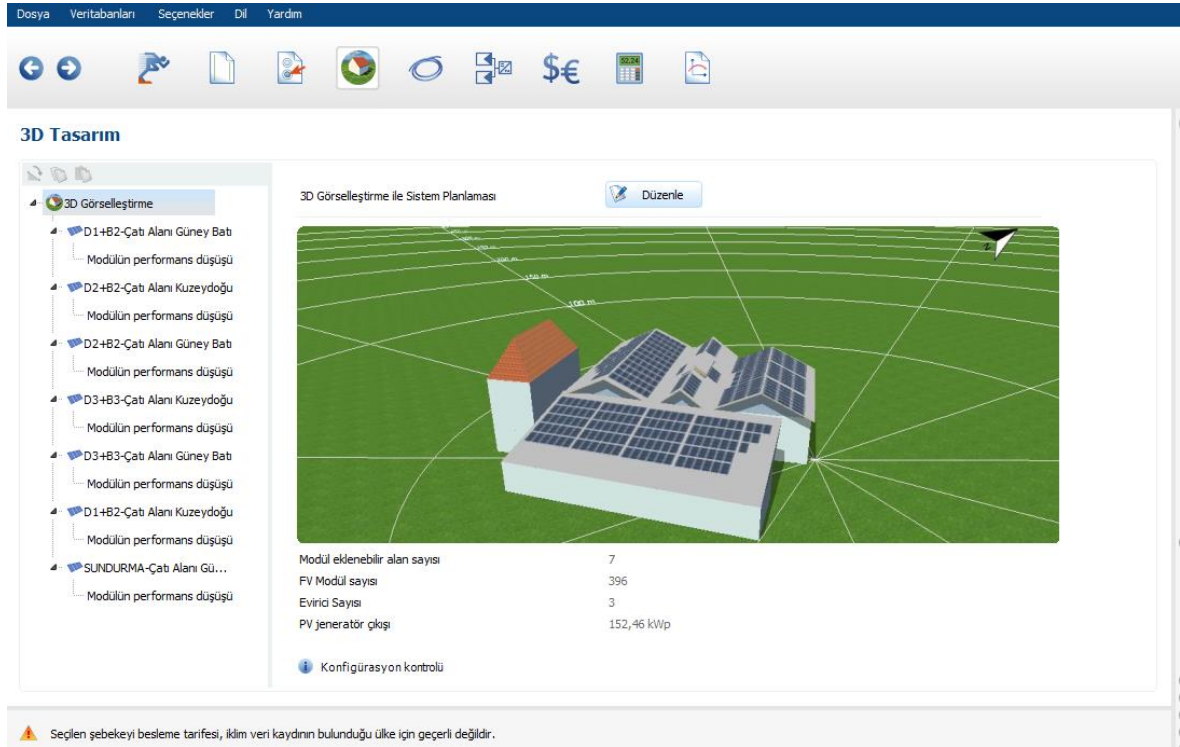
Santrale ait gerçek üretim verilerine Auro Vision (<https://www.auroravision.net/>) uygulaması üzerinden ulaşılmıştır. Bu programda santralin bugüne kadar toplam üretim, günlük, haftalık, aylık ve yıllık üretim verilerine ulaşılabilir. Uygulama üzerinden santralin günlük üretim verileri alınarak, aylık toplam üretilen elektrik değerleri belirlenmiştir. Tesisin toplam yıllık üretimi Tablo 3'te görüldüğü üzere 151 289 kWh'tir.

**Tablo 3.** Gerçek üretim verileri

<b>Aylar</b>	<b>Aylık Toplam Üretim (kWh)</b>
Ocak	3363
Şubat	2701
Mart	11769
Nisan	16232
Mayıs	19014
Haziran	19322
Temmuz	21149
Ağustos	20816
Eylül	16215
Ekim	10537
Kasım	5908
Aralık	4263
<b>Yıllık Toplam Üretim</b>	<b>151289</b>

#### 3.2. PVSOL Programından Elde Edilen Veriler

PVSOL programının deneme sürümü kullanılmıştır. Santrale ilişkin bilgiler programa girilmiş, sistem üç boyutlu olarak tasarlanmış ve panel yerleşimleri gerçekte olduğu gibi yapılmış, panel sistemde olmadığı için veri tabanına kaydedilmiş ve evirici girişleri ayarlanarak program işlem adımları takip edilmiş ve üretim raporu elde edilmiştir. Santrale ait PVSOL programında yapılan çizim Şekil 5'te verilmiştir. Çizim gerçek santral yerleşimine göre birebir yapılmış ve santralin hemen yanında bulunan bina gölgeleme faktörüne sebep olacağından çizime eklenmiştir.



**Şekil 5.** PVSOL programında yapılan GES tasarımı

Tablo 4'te PVSOL programından elde edilen aylık ve toplam yıllık üretim miktarı değerleri verilmektedir. Yıllık üretim 164852 kWh olarak elde edilmiştir. Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları en yüksek üretimin görüldüğü aylardır. Bu aylar içerisinde en yüksek üretim Temmuz ayında gerçekleşirken, tüm aylar içerisinde en düşük üretim Aralık ayında gerçekleşmiştir.

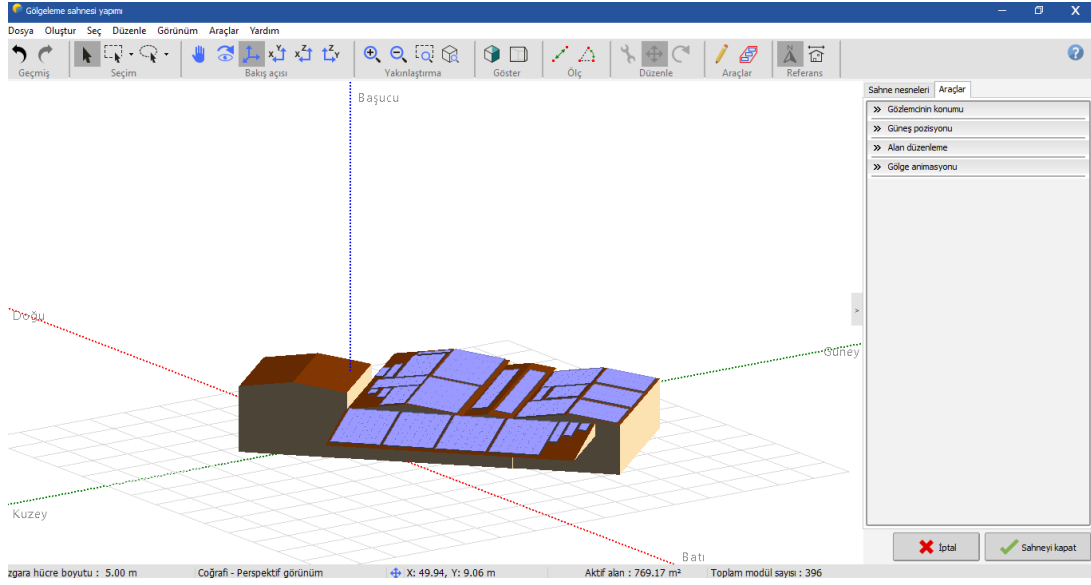
**Tablo 4.** PVSOL programından elde edilen üretim verileri

Aylar	Aylık Toplam Üretim (kWh)
Ocak	5844
Şubat	7870
Mart	12241
Nisan	15711
Mayıs	19942
Haziran	21916
Temmuz	22540
Ağustos	20585
Eylül	16033
Ekim	10799
Kasım	6397
Aralık	4972
<b>Yıllık Toplam Üretim</b>	<b>164852</b>

### 3.3. PVSYSYST Programından Elde Edilen Veriler

PVSYSYST programının deneme sürümü kullanılmıştır. Santrale ilişkin veriler girildikten sonra, meteorolojik veriler için Meteonorm 8.1 veri tabanı tercih edilmiştir. Eğim ve azimut değerleri girilmiş, panel ve eviriciler seçilmiştir. Kullanılan panel programda kayıtlı olmadığı için sisteme eklenmiştir. Gölgelemeler de girildikten sonra, sistem tasarımı yapılarak benzetim başlatılmıştır. Tesisin bitişğinde

bulunan binanın gölge faktörü olması nedeniyle PVSYST yakın gölgelemeler bölümünde tasarım gerçekleştirilmiştir. Santrale ait PVSYST programında yapılan çizim Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. PVSYST gölgelemeler kısmında yapılan tasarım

Tablo 5’te PVSYST programından elde edilen aylık ve toplam yıllık üretim miktarı değerleri verilmektedir. PVSYST programına göre yıllık toplam üretim 181119 kWh olarak görülmektedir. PVSYST programında en yüksek üretim Haziran, en düşük üretim Aralık ayında gerçekleşmiştir.

Tablo 5. PVSYST programından elde edilen üretim verileri

Aylar	Aylık Toplam Üretim (kWh)
Ocak	6158
Şubat	8430
Mart	13427
Nisan	18121
Mayıs	23299
Haziran	25547
Temmuz	23970
Ağustos	22105
Eylül	17019
Ekim	11027
Kasım	6581
Aralık	5435
<b>Yıllık Toplam Üretim</b>	<b>181119</b>

### 3.4. PVGIS Programından Elde Edilen Veriler

PVGIS programı çevrimiçi ve ücretsiz bir programdır. Santrale ilişkin bilgiler girildikten sonra, üç farklı güneş radyasyonu veri tabanı içerisinde yapılan çalışmalar sonucunda daha doğru sonuçlar elde edildiği için PVGIS-SARAH seçilmiştir. Tesiste kullanılan panel silisyum yapıda olduğundan silisyum seçimi yapılmıştır. Sistem gücü kWp olarak girilmiştir. Çatı tipi tesis seçimi yapılmıştır. Eğim ve bina azimut değeri girilerek rapor elde edilmiştir.

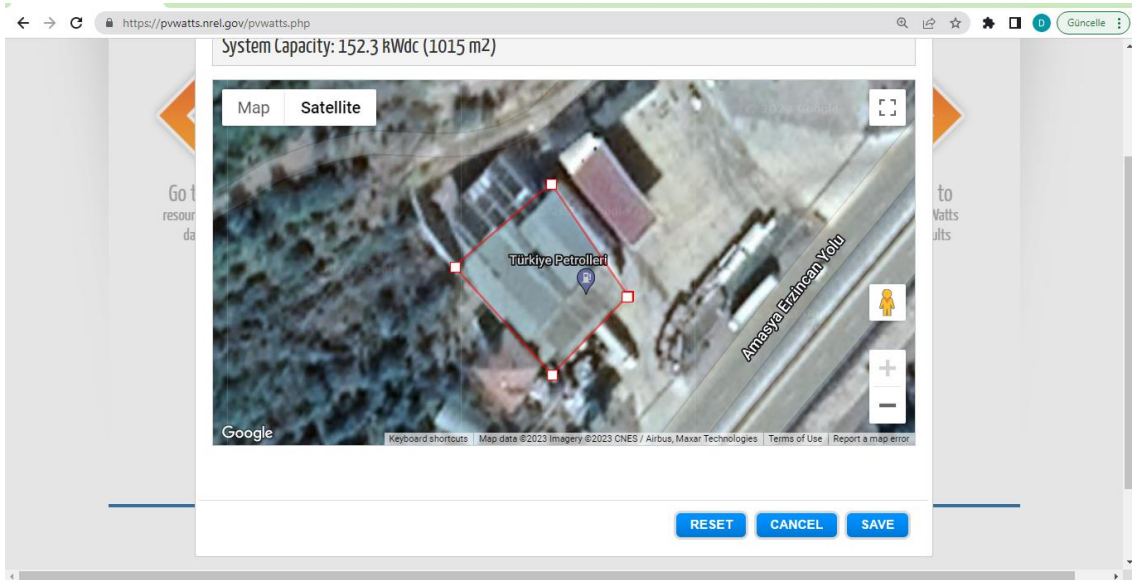
Tablo 6’da PVGIS programından elde edilen aylık ve toplam yıllık üretim miktarı değerleri verilmektedir. PVGIS programında yıllık toplam üretim 168294 kWh olarak elde edilmiştir. En yüksek üretim miktarına Temmuz ayında ulaşılmıştır. En düşük üretim Aralık ayında gerçekleşmiştir.

**Tablo 6.** PVGIS programından elde edilen üretim verileri

Aylar	Aylık Toplam Üretim (kWh)
Ocak	5431
Şubat	7579
Mart	12092
Nisan	16879
Mayıs	19652
Haziran	21850
Temmuz	22795
Ağustos	21616
Eylül	16808
Ekim	11035
Kasım	7323
Aralık	5234
<b>Yıllık Toplam Üretim</b>	<b>168294</b>

### 3.5. PVWATTS Programından Elde Edilen Veriler

PVWATTS ücretsiz çevrimiçi bir programdır. Santrale ilişkin veriler girildikten sonra, sırasıyla DC güç, modül tipi, panel montaj tipi, sistem kaybı, eğim ve azimut açıları girilmiştir. Bu program basit anlamda çizim olanağı da vermektedir. Şekil 7’de görüldüğü üzere tesise ait çatı sınırları çizilmiş ve sonuç raporu elde edilmiştir.



**Şekil 7.** PVWATTS programı çizim bölümü

Tablo 7’de PVWATTS programından elde edilen üretim verileri verilmiştir. Temmuz ayında en yüksek, Aralık ayında en düşük üretim verisine ulaşılmıştır. Yıllık toplam üretim ise 168614 kWh’tır.

**Tablo 7. PVWATTS programından elde edilen üretim verileri**

<b>Aylar</b>	<b>Aylık Toplam Üretim (kWh)</b>
Ocak	5544
Şubat	8338
Mart	12209
Nisan	15157
Mayıs	19529
Haziran	22475
Temmuz	24897
Ağustos	22184
Eylül	17179
Ekim	10714
Kasım	6168
Aralık	4220
<b>Yıllık Toplam Üretim</b>	<b>168614</b>

### 3.6. Genel Değerlendirme

Benzetim programlarında elde edilen tüm üretim verileri ve santralin gerçek üretim verileri Tablo 8’de verilmektedir.

**Tablo 8. Benzetim ve gerçek üretim verileri (12 Aylık)**

<b>Aylar</b>	<b>PVSOL</b>	<b>PVSYST</b>	<b>PVGIS</b>	<b>PVWATTS</b>	<b>Gerçek Üretim Değerleri</b>
Ocak	5844	6158	5431	5544	3363
Şubat	7870	8430	7579	8338	2701
Mart	12241	13427	12092	12209	11769
Nisan	15711	18121	16879	15157	16232
Mayıs	19942	23299	19652	19529	19014
Haziran	21916	25547	21850	22475	19322
Temmuz	22540	23970	22795	24897	21149
Ağustos	20585	22105	21616	22184	20816
Eylül	16033	17019	16808	17179	16215
Ekim	10799	11027	11035	10714	10537
Kasım	6397	6581	7323	6168	5908
Aralık	4972	5435	5234	4220	4263
<b>Toplam (kWh)</b>	<b>164852</b>	<b>181119</b>	<b>168294</b>	<b>168614</b>	<b>151289</b>

Tablo 8’e bakıldığında yıllık toplam üretimde gerçek değere en yakın değeri PVSOL programı vermiştir. En uzak değeri ise PVSYST programı vermiştir. Çevrimiçi olarak kullanılan PVGIS ve PVWATTS programlarının yıllık toplam üretimde birbirine çok yakın değerler verdiği ve PVSOL programından sonra gerçek üretim değerine en yakın sonuçların bu programlardan elde edildiği tespit edilmiştir. Tüm programlar değerlendirildiğinde en iyiden en kötüye doğru olan sıralama şöyledir: PVSOL, PVGIS, PVWATTS ve PVSYST.

Tablo 8’deki değerler aylara göre değerlendirildiğinde ise gerçek üretim değerlerine en yakın değerler; Ocak, Şubat, Mart ve Haziran aylarında PVGIS; Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında PVSOL; Nisan, Mayıs, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında ise PVWATTS programı tarafından elde edilmiştir.

Benzetim programlarından elde edilen üretim değerlerinin gerçek üretim değerlerine olan yaklaşımlarını değerlendirmek amacıyla Tablo 9 oluşturulmuştur. Tablo 9’da program verilerinin gerçek değerlerden farkları yüzdesel olarak verilmektedir.

**Tablo 9.** Program verileri ile gerçek üretim verileri arasındaki farklar (%)

Aylar	PVSOL	PVSYST	PVGIS	PVWATTS
Ocak	73,77	83,11	61,49	64,85
Şubat	191,37	212,11	180,60	208,70
Mart	4,01	14,09	2,74	3,74
Nisan	-3,21	11,64	3,99	-6,62
Mayıs	4,88	22,54	3,36	2,71
Haziran	13,43	32,22	13,08	16,32
Temmuz	6,58	13,34	7,78	17,72
Ağustos	-1,11	6,19	3,84	6,57
Eylül	-1,12	4,96	3,66	5,95
Ekim	2,49	4,65	4,73	1,68
Kasım	8,28	11,39	23,95	4,40
Aralık	16,63	27,49	22,78	-1,01
<b>Toplam (kWh)</b>	8,96	19,72	11,24	11,45

Tablo 9 değerlendirildiğinde; PVSOL programının gerçek üretim verilerine en yakın değerleri verdiği görülmektedir. Özellikle Ağustos, Eylül ve Ekim aylarında PVSOL ile elde edilen yakınsama fazladır. Programların bazı aylarda %1 civarında gerçek değerlere yakın değerler ürettiği de görülmektedir. Ocak ve Şubat aylarında ise santralde meydana gelen evirici arızasının etkisi görülmektedir. Bu veriler ışığında evirici arızası vb. arızalar olmadığı durumlarda santralde üretilebilecek gerçek değere yakın sonuçlar da bu programlar tarafından belirlenerek, gelecek projeksiyonu belirlenebilir.

Ocak ve Şubat aylarında benzetim programlarının birbirine yakın değerler vermesine rağmen; gerçek üretim değerlerinin bu değerlere göre düşük olmasının nedeni; santralde meydana gelen evirici arızasıdır. Yıllık olarak bir değerlendirme yapıldığı için bu arızalar da dahil edilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır. Santrale ait 2023 yılı verileri bulunduğundan değerlendirme bu verilere göre yapılmıştır. Santrallerde bu ve benzeri hataların olması normaldir. Gerçek üretim verileri ile benzetim programlarından elde edilen veriler arasındaki farklar; iklimsel verilerindeki değişiklikler, panellerdeki kirlenme miktarlarının bilinmemesi, panellerin çalışma sıcaklığının artması, santralde gerçekleşebilecek arızalar, kablo kayıpları, gölgeleme faktörleri veya eviricilerden kaynaklı vb. nedenlerle olabilmektedir. Bu programların geliştirilmesi ile bu etkiler dikkate alınarak ve program içerisine gömülerek gerçek üretim değerlerine daha yakın sonuçların elde edilmesi mümkün olabilecektir.

Evirici arızasının olduğu Ocak ve Şubat ayı verileri çıkarılarak 10 aylık bir değerlendirme yapıldığında elde edilen değerler Tablo 10’da verilmiştir.

**Tablo 10.** Benzetim ve gerçek üretim verileri (10 Aylık)

	PVSOL	PVSYST	PVGIS	PVWATTS	Gerçek Üretim Değerleri
<b>Toplam (kWh)</b>	151136	166531	155284	154732	145225

Tablo 10'da yer alan 10 aylık toplam üretim değerleri dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında; santralin gerçek üretim verilerine en yakın değeri PVSOL programı vermektedir. Tüm programlar değerlendirildiğinde en iyiden en kötüye doğru olan sıralama şöyledir: PVSOL, PVWATTS, PVGIS ve PVSYST. Bu durumda programlar tarafından gerçek üretim verilerine olan yakınsama değeri; PVSOL için %4,07; PVWATTS için %6.55; PVGIS için %6,93 ve PVSYST için %14,67 olmaktadır. Buna göre santralde meydana gelen arıza vb. durumlar dikkate alınmadığında programların gerçek üretim verilerine yakınsamaların daha da iyi olacağı görülmektedir.

#### **4. Sonuç**

Bu çalışma kapsamında Amasya ilinde kurulu olan 15246 kWp gücündeki çatı tip GES için gerçek üretim verileri ile benzetim programlarından elde edilen verilerin karşılaştırılması üzerine bir araştırma yapılmıştır. Gerçek yıllık toplam üretim miktarı 151289 kWh iken bu sonuca en yakın değer 164852 kWh olarak PVSOL programında elde edilmiştir. Çalışma sırasında kullanılan PVSOL programında bina çizimi yapılmış, paneller gerçekte olduğu gibi yerleştirilmiş, kullanılan evirici bilgileri girilmiş ve sonuç elde edilmiştir.

Çalışmada toplamda dört farklı programda çalışılmış, program seçimlerinde sistem tasarımı sağlayan iki program ve tasarım yapmadan sonuç üreten iki program olarak kategoriye ayrılmıştır. Basit ve hızlı şekilde enerji ihtiyacına göre çevrimiçi programlara başvurulabilir. Çevrimiçi programların da makul sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sisteme yakın ve daha doğru sonuca ulaşmak istenildiğinde ise tasarım imkânı ve panel, evirici, kablo, gölgeleme bilgilerinin ve kayıp faktörlerinin eklenebildiği programlara başvurulmalıdır.

Benzetim programları ile gerçek üretim değerleri arasında tam olarak örtüşme sağlanamasa da yaklaşık değerlere ulaşılmaktadır. Üretim verilerindeki farklılıklar programsal altyapıların birbirinden farklı olmasının yanı sıra, bölgenin iklimsel verilerindeki değişimler, panellerdeki kirlenme miktarlarının bilinmemesi, panellerin çalışma sıcaklığının artması, santralde gerçekleşebilecek arızalar, kablo veya eviricilerden kaynaklı ya da gölgeleme gibi birçok etmene bağlı olabilmektedir.

En doğru sonuca ulaşabilme noktasında tesis özelinde belirlenecek parametreler nihayetinde farklı senaryolar denenebilir ve optimum üretim verilerinin elde edildiği seçenek hayata geçirilebilir.

#### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder. Bu araştırma Derya DİP'in, Dr. Öğr. Üyesi Engin Ufuk ERGÜL danışmanlığında yazılan Yüksek Lisans Tezi'nin bir kısmından hazırlanmıştır.

#### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamıştır.

## Kaynakça

- Acar M. Edirne ili güneş enerji potansiyelinin araştırılması ve örnek bir güneş enerji santrali analizi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:66, Edirne, Türkiye, 2022.
- Akcan E., Kuncan M., Minaz MR. PVsyst yazılımı ile 30 kW şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin modellenmesi ve simülasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2020; (18): 248-261.
- Aksangör NN. Ankara şartlarında bir fotovoltaik sistemin PVsyst programı yardımı ile performans analizi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:96, Ankara, Türkiye, 2019.
- Alaçam B. 10 kW'lık çatı tipi fotovoltaik bir sistemin modellenmesi ve gerçek üretim verileri ile karşılaştırılması. Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:118, Amasya, Türkiye, 2022.
- Amasya Valiliği. Amasya coğrafi konumu. URL: <http://www.amasya.gov.tr/cografik-konum>. Son Erişim Tarihi 14.03.2022
- Arslan M. Güneş enerji santrallerinin simülasyon ile üretim verilerinin karşılaştırılması ve analizi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:240, Konya, Türkiye, 2022.
- Beyoğlu MF., Demirtaş M. Design of system model and program for estimation of annual PV energy production: A comparative study. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 26(1): 53-72.
- Ceylan O. Fotovoltaik programlarının simülasyon sonuçlarının doğruluğunun incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:82, Isparta, Türkiye, 2017.
- Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, GEPA. <https://gepa.enerji.gov.tr>, Erişim Tarihi: 21.04.2023.
- Kan Kaynar N. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli. Bilge International Journal of Science and Technology Research 2020; 4(2): 48-54.
- Kınalı MY. Güneş enerjisi simülasyon programlarının gerçek verilerle doğruluk analizi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:216, Konya, Türkiye, 2019.
- Kılıcı O. Değişken özellikli fotovoltaik güneş enerji santrallerinin mevcut verilerle PVSYST programında üretim ve performans analizi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:84, Konya, Türkiye, 2020.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). Amasya iklim sınıflandırması. URL: <https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=AMASYA>. Son Erişim Tarihi 14.03.2023



- Mohammadi SAD., Gezeğin C. Design and simulation of grid-connected solar PV system using PVSYST, PVGIS and HOMER software. International Journal of Pioneering Technology and Engineering 2022; 1(01): 36-41.
- Öztürk H. Bir güneş enerji santralının üretim ile simülasyon değerlerinin karşılaştırılması ve kayıp analizi: Beştepe enerji örneği. Hasan Kalyoncu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:103, Gaziantep, Türkiye, 2021.
- PVGIS. <https://pvgis.com/>. Erişim Tarihi: 30.01.2023.
- PVsyst Program Interface. <https://www.pvsyst.com>. Erişim Tarihi: 22.01.2023.
- PVWatts. <https://pvwatts.nrel.gov/>. Erişim Tarihi: 15.01.2023.
- Tugal N. Enerji talebi ve enerji talebini belirleyen faktörler: Türkiye uygulaması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:117, Afyonkarahisar, Türkiye, 2014.
- Türkyılmaz A. Çatı uygulamalı bir güneş enerji santralının farklı yazılımlarda optimizasyon çalışması; Bursa örneği. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:167, Kütahya, Türkiye, 2023.
- Valentin Software. <https://valentin-software.com/en/products/custom-software/>. Erişim Tarihi: 20.01.2023.
- Yetgin F. Binaya entegre fotovoltaik (PV) sistemlerin simülasyon ve gerçek üretim verilerinin karşılaştırılması. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:116, Konya, Türkiye, 2022.
- Yalılı M. Lisanslı fotovoltaik güneş enerji santrali yatırımının finansal analizi: Van ili örneği. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi 2021; 10(3): 1055-1074.
- Yılmaz Y. Amasya Şehri'nin iklim yapısı ve özellikleri. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2020; 24 (Aralık Özel Sayı): 167-186.

## X-Bant Haberleşme Sistemlerine Yönelik Küçültülmüş GaN Temelli Eşit Bölen Wilkinson Güç Bölücü

Burak DÖKMETAŞ<sup>1\*</sup>, Mert KARAHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kafkas Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, 36000, Kars

<sup>2</sup>Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, Elektronik ve Haberleşme Müh. Bölümü, 06420, Ankara

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5900-6691>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-2884-9623>

\*Sorumlu yazar: burakd@kafkas.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 10.06.2024

Kabul tarihi: 18.10.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Güç bölücüler  
Wilkinson güç bölücü  
X-bant  
Haberleşme  
Mikrodalga  
RF uygulamaları

### ÖZ

Bu çalışmada, X-bant uygulamaları için ultra kompakt monolitik mikrodalga entegre Wilkinson güç bölücü devresi tasarlanmıştır. Tasarımın boyutunu küçültmek amacıyla minyatürleştirme tekniği kullanılmış ve önerilen tekniğin verileri simülasyon programı ile analiz edilmiştir. Önerilen Wilkinson güç bölücü, galyum nitür (GaN) entegre pasif cihaz teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre X bandında (8-12 GHz), giriş ve çıkış (I/O) yansıma katsayılarının -14 dB'den daha iyi olduğu görülmüştür. Aynı frekans aralığında iletim katsayısı ise -4,7 dB'nin üzerinde ölçülmüştür. Çalışmada 10 dB'lik kesirli bant genişliği %47,6 olarak hesaplanmıştır. Monolitik toplu elemanlar ile  $\pi$  tipi minyatürleştirme tekniği uygulanarak Wilkinson güç bölücünün boyutu 776  $\mu\text{m}$  x 2240  $\mu\text{m}$ 'ye düşürülmüştür. Bu çalışmada önerilen yöntemle, güç bölücü devresi elektriksel performansında herhangi bir bozulma olmadan boyut olarak kompakt hale getirilmiştir.

## Miniaturized GaN-Based Wilkinson Power Divider for X-Band Communication Systems

### Research Article

#### Article History:

Received: 10.06.2024

Accepted: 18.10.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Power dividers  
Wilkinson power divider  
X-band  
Communication  
Microwave  
RF applications

### ABSTRACT

In this study, an ultra-compact monolithic microwave-integrated Wilkinson power divider circuit was designed for X-band applications. To reduce the size of the design, a miniaturization technique was used, and the data from the proposed technique were analyzed using a simulation program. The proposed Wilkinson power divider was manufactured using gallium nitride (GaN) integrated passive device technology. According to the obtained measurement results, it was observed that the input and output (I/O) reflection coefficients in the X-band (8–12 GHz) were better than -14 dB. In the same frequency range, the transmission coefficient was measured to be above -4.7 dB. In this study, the fractional bandwidth of 10 dB was calculated as 47.6%. By applying the  $\pi$ -type miniaturization technique with monolithic lumped elements, the size of the Wilkinson power divider was reduced to 776  $\mu\text{m}$  x 2240  $\mu\text{m}$ . Using the method proposed in this study, the power divider circuit was made compact without any deterioration in its electrical performance.

**To Cite:** Dökmetaş B., Karahan M. X-Bant Haberleşme Sistemlerine Yönelik Küçültülmüş GaN Temelli Eşit Bölen Wilkinson Güç Bölücü. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 432-444.

### 1. Giriş

Güç bölücü devreleri, mikrodalga uygulamalarının önemli bir bileşenidir. Wilkinson güç bölücü, en genel haliyle bir giriş sinyalini eşit genlikte iki çıkış sinyaline bölmek için kullanılan bir tür pasif mikrodalga devresidir (Wu ve ark., 2006; Kosç ve ark., 2013). Güç bölünmesi, belirli bir

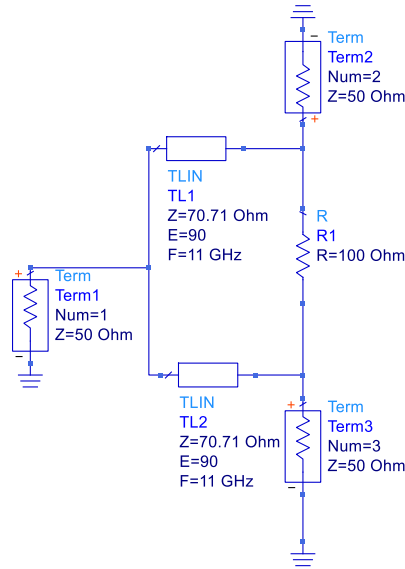
konfigürasyonda düzenlenmiş dirençler ve iletim hatlarını içeren ağ yapısını kullanılarak oluşturulur. Bu devreler yaygın olarak sinyal bölmenin veya birleştirmenin gerekli olduğu yükselteçler, karıştırıcılar ve osilatörler gibi çeşitli mikrodalga devrelerinde kullanılırlar. Wilkinson güç bölücüler genellikle düşük ekleme kaybına sahiptirler ve bu sayede iletilen sinyalde minimum zayıflamaya neden olurlar (Dökmetaş, 2021; Arıcan, 2023). Fiziksel devre yapısı olarak basit bir tasarıma sahiptirler ve bu basitlik, bu tip devrelerin üretimini uygun maliyetli hale getirerek RF ve mikrodalga devrelerine entegre edilmesini kolaylaştırır. Wilkinson güç bölücünün en önemli avantajlarından birisi de geniş bant performansı ve çıkış portları arasında sağladığı mükemmel izolasyondur (Karahana ve ark., 2014). Bu avantajlarına karşılık, geleneksel Wilkinson güç bölücü devrelerinin boyutu, özellikle Ku-bandının altındaki düşük frekans spektrumunda oldukça büyümektedir. Bu durum göz önüne alındığında yüksek frekanslarda çalışabilecek, kompakt ve düşük maliyetli güç bölücü devrelerinin geliştirilmesi ihtiyaç haline gelmiştir. Literatürde çeyrek dalga boyundaki iletim hatlarının ve dolayısıyla Wilkinson güç bölücülerinin boyutunu azaltmak için çeşitli teknikler önerilmiştir. Bunları bazıları kapasitif ve endüktif yükleme (Hettak, 2005), yavaş dalga (slow wave) etkisi (Kuo ve ark., 2011), (Yun ve ark., 2006), taban iletkeni kusurlu yapı (DGS) tekniği (Kaixue ve ark., 2011) ve asimetrik şant saplamalı menderes hat uyarlaması (meander line) (Liang ve ark., 2012) olarak sıralayabiliriz.

Literatürde önerilen tekniklerde genellikle çok katmanlı (Printed Circuit Board) PCB yapılar kullanılmıştır. Bununla birlikte Wilkinson güç bölücü devrelerde Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu (EDDK) teknolojisinin kullanılması bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. EDDK teknolojisi, aynı alt tabaka üzerindeki diğer EDDK tabanlı bileşenlerle kolay entegrasyona olanak tanımaktadır. Bu entegrasyon yeteneği, özellikle alanın kısıtlı olduğu uygulamalarda daha kompakt tasarımlara yol açmaktadır (Arıcan ve ark., 2022). EDDK teknolojisine sahip Wilkinson güç bölücü devrelerinde, merkez iletken ve toprak düzlemine ait iletkenler aynı düzlem üzerinde yer almaktadır; dolayısıyla geçiş delikleri yoktur. Böylece kayıplar düşer ve geniş bant özellikleri elde edilir (Arıcan, 2021; Okan, 2021). Bu avantajlarından dolayı EDDK teknolojisi, düşük maliyetli ve kompakt Wilkinson güç bölücü devresi geliştirmede büyük ilgi görmektedir. Buna ek olarak son yıllarda çeşitli Galyum Nitrür'ün (GaN) yarıiletken teknolojisinde kullanımı artmaktadır. Galyum Nitrür teknolojisi, kompakt ve hafif cihazların üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu da boyut ve ağırlığın kritik faktörler olduğu sistemler için avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada, modern haberleşme sistemleri için galyum nitrür entegreli pasif cihaz üretim prosesi kullanılarak ultra kompakt eş düzlemli dalga kılavuzu Wilkinson güç bölücü geliştirildi. Önerilen güç bölücü devresinde,  $\lambda/4$  iletim hatları yerine toplu elemanlar ve  $\pi$ -tipi minyatürleştirme tekniği kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan minyatürleştirme tekniğinin geçerliliği, elektromanyetik (EM) simülasyon programı ve üretimden elde edilen ölçüm sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Önerilen güç bölücü  $776 \mu\text{m} \times 2240 \mu\text{m}$  gibi oldukça kompakt bir boyuta sahiptir. Tasarımdaki giriş ve çıkış terminallerinin aynı olduğu ve genişliğinin aynı kabul edildiği durum için önerilen devrenin geleneksel güç bölücüye göre %72,3 oranında daha küçük bir boyuta sahip olduğu görülmüştür. Tasarım tüm X-bant çalışma frekans aralığını kapsamaktadır.

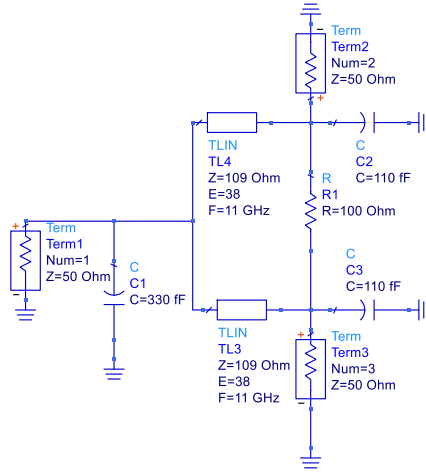
## 2. Materyal ve Metot

Geleneksel Wilkinson güç bölücü, devrenin girişine uygulanan RF işaretini 2 adet çıkış terminaline birbirleri arasında faz farkı olmaksızın eşit genlikte bölmek için kullanılan bir devre tasarım yapısıdır. Klasik Wilkinson güç bölücü tasarımı iki adet  $\sqrt{2}Z_0$  empedans değerine sahip  $\lambda/4$  elektriksel uzunluğa sahip iletim hatlarının birleştirilmesiyle meydana gelmektedir. Ayrıca çıkış terminaleri arasındaki izolasyonu sağlamak amacıyla  $2Z_0$  değerinde direnç kullanılmaktadır. Şekil 1’de klasik Wilkinson güç bölücü blok şeması gösterilmiştir.



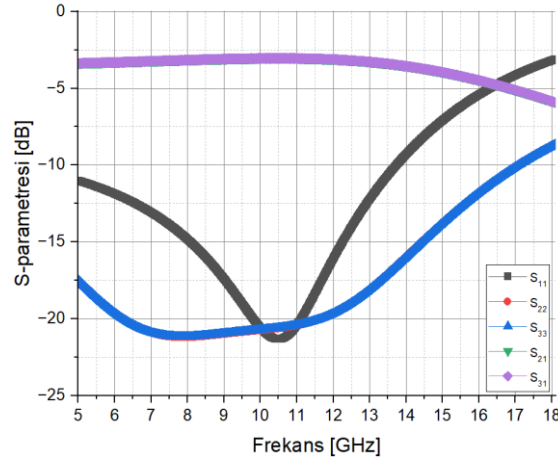
Şekil 1. Klasik Wilkinson güç bölücü blok şeması

Klasik Wilkinson güç bölücü tasarımında kullanılan  $\lambda/4$  elektriksel uzunluğu, düşük frekans uygulamalarında dalga boyunun büyümesine bağlı olarak artmaktadır. Tasarlanan güç bölücü devrelerinin olabildiğince küçültülerek az yer kaplaması amacıyla farklı eşlenik devre tasarım yapıları geliştirilmiştir. Bu eşlenik devre tasarımlarından en yaygın olarak kullanılan  $\pi$ -tipi eşlenik devre topolojisidir. Bu eşlenik devre yapısı belirli çalışma frekans aralığında, şant kapasitörler ve seri bobin kullanılarak oluşturulur. Buna göre klasik Wilkinson güç bölücü tasarımı,  $\pi$ -tipi eşlenik devre tasarım topolojisi kullanılarak tekrardan tasarlanmıştır. Önerilen Wilkinson güç bölücü eşlenik devre blok şeması Şekil 2’de gösterilmektedir. Buna göre klasik güç bölücü tasarımında kullanılan  $\lambda/4$  elektriksel uzunluğa sahip iletim hatları sırasıyla 330 fF değerindeki şant kapasitör, 109  $\Omega$  karakteristik empedans ve  $38^\circ$  elektriksel uzunluğa sahip iletim hattı ve 110 fF değerine sahip şant kapasitörün yer aldığı eşlenik devre ile yer değiştirmiştir.



Şekil 2. Klasik Wilkinson güç bölücü eşlenik blok şeması

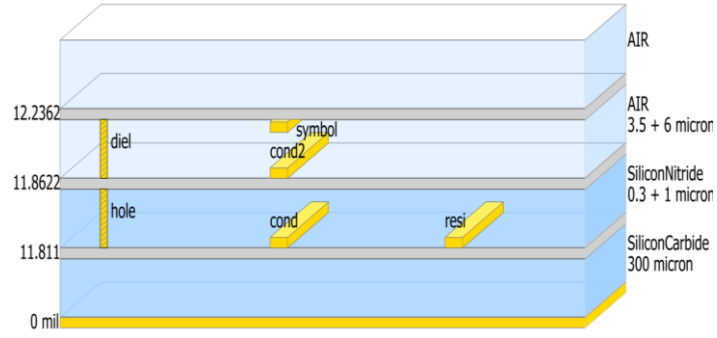
Önerilen Wilkinson güç bölücünün blok şema simülasyon sonuçlarına göre 8-12 GHz çalışma frekans bandında giriş ( $S_{11}$ ) ve çıkış ( $S_{22}$  &  $S_{33}$ ) yansımaya katsayılarının sırasıyla -15 dB ve -20 dB'den iyi olduğu görülmüştür. Tasarımın araya girme kaybı değerleri ( $S_{21}$  &  $S_{31}$ ) 3,2 dB' den daha iyi elde edilmiştir. Wilkinson güç bölücü eşlenik blok şemasının S-parametresi simülasyonu Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Eşlenik güç bölücü devrenin S-parametre sonuçları

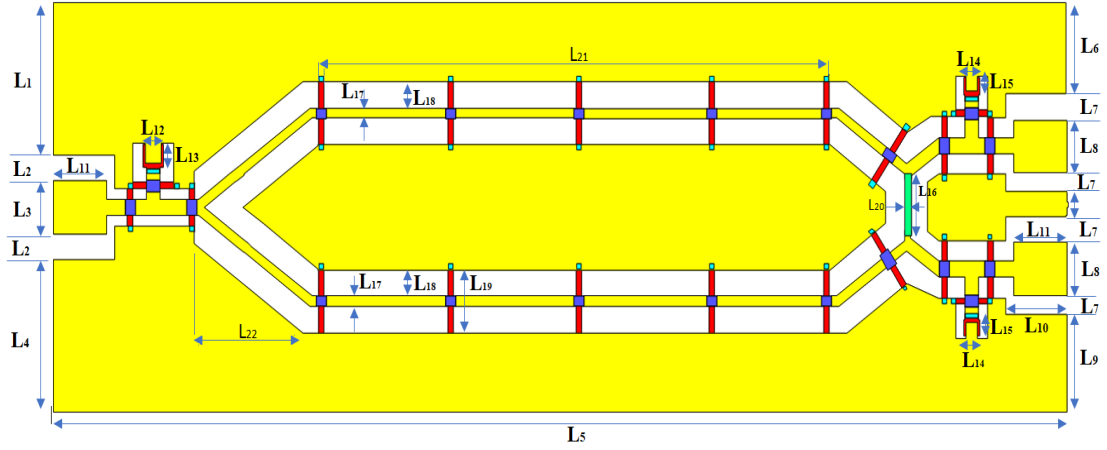
Blok şema tasarımı tamamlandıktan sonra önerilen güç bölücü devrenin entegre devre serim tasarımı gerçekleştirilmiştir. Entegre devre tasarımı ticari olarak kullanılabilen ADS Momentum yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Wilkinson güç bölücü serim tasarımında 9,6 değerinde dielektrik sabitine sahip 300  $\mu\text{m}$  kalınlığında Silikon Karbür (SiC) alt tabaka üzerine büyütülen Galyum Nitrid (GaN) teknolojisi kullanılmıştır. Tasarımda eş düzlemlı dalga kılavuzu teknolojisi kullanılmıştır. EDDK teknolojisi mikroşerit teknolojisinde kullanılan yüksek maliyetli, üretimi ve tekrarlanabilmesi zor olan delik açma ve delik içi kaplama süreçlerine ihtiyaç duymamaktadır. Önerilen Wilkinson güç bölücü tasarımında sırasıyla 1'inci metal, 2'nci metal, direnç ve hava köprüsü metal tabakaları kullanılmıştır. Bu metal tabakalar Şekil 4'de gösterildiği üzere sırasıyla cond2, cond, resi ve symbol tabakaları ile ifade

edilmiştir. Ek olarak 1'inci metal ile 2'nci metal ve 1'inci metal ile direnç metal bağlantıları hole tabakası olarak tanımlanmıştır. Ayrıca 1'inci metal ile hava köprüsü arasındaki bağlantı ise diel tabakası olarak Şekil 4' de gösterilmiştir. Önerilen devre tasarımında RF sinyal iletim hatları ve toprak yüzeyleri 1'inci metal ile sağlanırken, toprak yüzeylerinin birleştirilmesi 2'nci metal aracılığıyla alt tabakadan sağlanmıştır. Buna ek olarak, eş düzlemde kesişen iletim hatlarının, hava köprüsü tabakası vasıtasıyla birbirleri üzerinden geçebilmeleri sağlanmıştır. Önerilen güç bölücü tasarımında kullanılan izolasyon direncini sağlamak amacıyla NiCr metali kullanılmıştır. Devre tasarımında kullanılan 1'inci metal 3 µm ve 2'nci metal ile NiCr metaller ise 1 µm kalınlığındadır. Şekil 4'te GaN entegre devre alttaşı bilgileri gösterilmiştir.



Şekil 4. GaN entegre devre alttaşı bilgisi

Önerilen devre tasarımında yer alan şant kapasitörler metal-yalıtkan-metal yapısı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu yapıda alt katmanda bulunan 2'nci metal ve üst katmanda bulunan 1'inci metal yapılarının arasında yaklaşık olarak 300 nm kalınlığa sahip Silikon Nitrür (SiN) tabakası kullanılmıştır. Ek olarak, çıkış terminalleri arasında yer alan 100 Ω değerine sahip izolasyon direnci ise direnç metali kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Devre serimi tasarımında kullanılan EDDK teknolojisinden kaynaklı olarak tasarımın üst yüzeyinde birbirinden bağımsız halde yer alan toprak alanları, 2'nci metal vasıtasıyla birleştirilerek toprak alanlarında bütünlük sağlanmıştır. Bunun yanı sıra, üretimi yapılan devrenin RF sonda istasyonunda ölçülebilmesi amacıyla 100 µm eninde ve 120 µm boyunda giriş ve çıkış terminalleri tasarıma eklenmiştir. Şekil 5'te önerilen güç bölücü devresinin 2-boyutlu serim görüntüsü ve Tablo 1'de ise boyut bilgileri verilmiştir.



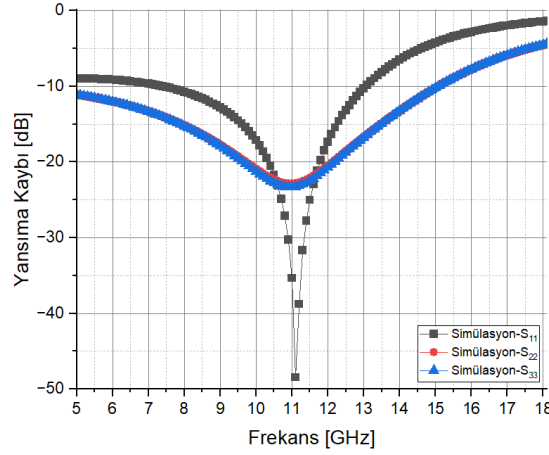
Şekil 5. Önerilen güç bölücü devre serimi

Tablo 1. Önerilen güç bölücü devrenin serim boyut bilgileri

Parametre	Değer [ $\mu\text{m}$ ]
L <sub>1</sub>	288
L <sub>2</sub>	50
L <sub>3</sub>	100
L <sub>4</sub>	288
L <sub>5</sub>	2240
L <sub>6</sub>	172
L <sub>7</sub>	50
L <sub>8</sub>	100
L <sub>9</sub>	172
L <sub>10</sub>	135
L <sub>11</sub>	120
L <sub>12</sub>	44
L <sub>13</sub>	42
L <sub>14</sub>	32
L <sub>15</sub>	34
L <sub>16</sub>	98
L <sub>17</sub>	19
L <sub>18</sub>	50
L <sub>19</sub>	119
L <sub>20</sub>	15
L <sub>21</sub>	1144
L <sub>22</sub>	242

### 3. Bulgular ve Tartışma

Devre serimi tamamlanan güç bölücü tasarımının elektromanyetik benzetimleri ve optimizasyonları ADS Momentum yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da giriş ve çıkış yansıma kaybının EM simülasyon sonuçları verilmiştir. Elde edilen S-parametresi benzetim sonuçlarına göre X-bant aralığında  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ve  $S_{33}$  değerleri sırasıyla -10 dB ve -15 dB' den daha iyi elde edilmiştir.



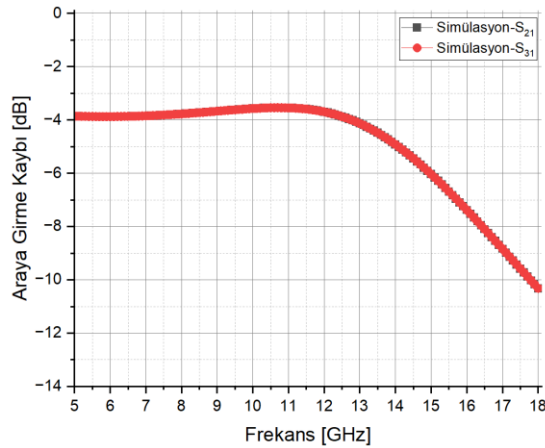
Şekil 6. S<sub>11</sub>, S<sub>22</sub> ve S<sub>33</sub> ifadelerinin EM simülasyon sonuçları

Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen güç bölücünün kesirli bant genişliği (FBW-fractional bandwidth) Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır. Buna göre önerilen güç bölücü tasarımının S<sub>11</sub> değerinin -10 dB seviyesini 8-13 GHz frekans bant aralığından sağladığı benzetim sonuçlarında elde edilerek FBW değerinin % 47,6 olarak hesaplanmıştır.

$$FBW = 2 \cdot \frac{f_Y - f_D}{f_Y + f_D} \cdot 100 [\%] ; \quad (1)$$

burada  $f_Y$  yüksek frekans ve  $f_D$  düşük frekans limit değerleridir.

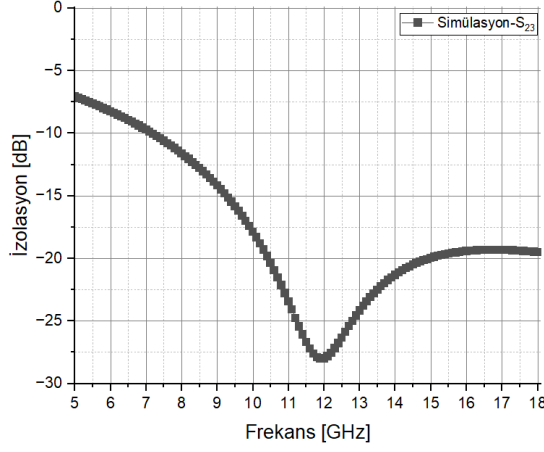
Şekil 7’de araya girme kaybı EM simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde 8-12 GHz frekans bandı içerisinde araya girme kaybının 4 dB’den az olduğu görülmektedir. Aynı çalışma bandı içerisinde kazanç dalgalanmasının 0,4 dB’den az olduğu yine simülasyon sonuçlarından elde edilmiştir



Şekil 7. Araya girme kaybı (S<sub>21</sub> & S<sub>31</sub>) EM simülasyon sonuçları

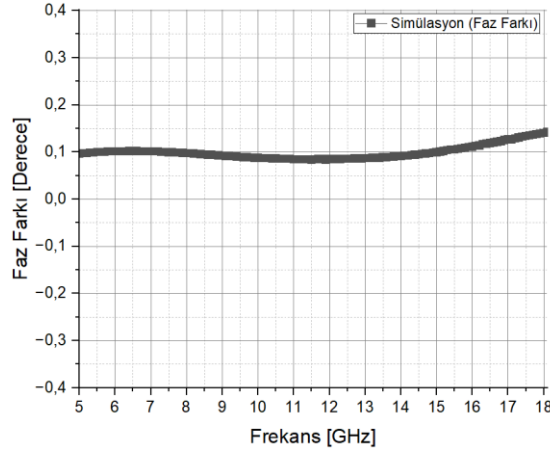
Şekil 8’de simülasyon sonucu elde edilen çıkış terminalleri arasındaki izolasyon verilmiştir. Önerilen 2-kollu güç bölücü tasarımının çıkış terminalleri arasındaki izolasyonu (S<sub>23</sub>), 8-12 GHz frekans aralığında -12 dB’ nin altında elde edilmiştir.





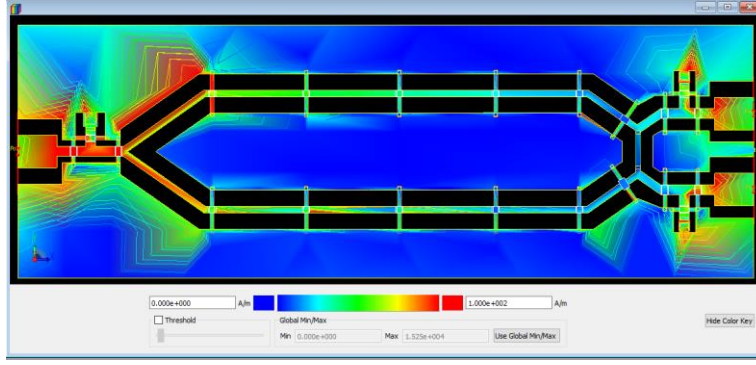
Şekil 8. İzolasyon ( $S_{23}$ ) EM simülasyon sonuçları

Şekil 9'da çıkış terminalleri arasındaki faz farkı simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Önerilen güç bölücü tasarımının çıkış terminalleri arasındaki faz farkının yaklaşık olarak  $0,1^\circ$  olduğu simülasyon sonuçlarında elde edilmiştir.



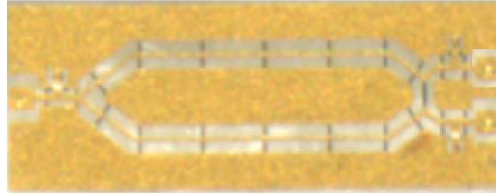
Şekil 9. Çıkış terminalleri arasındaki faz farkı simülasyonu sonucu

Şekil 10'da 2-kollu güç bölücü tasarımının geçirme bandındaki (11 GHz) akım dağılımı gösterilmiştir. Elde edilen akım dağılım grafiklerine göre geçirme bandı içerisinde giriş terminaline uygulanan sinyalin minimum kayıpla ve eşit bir şekilde çıkış terminallerine iletiildiği görülmüştür. Tasarımı küçültmek için kullanılan  $\pi$ -tipi eşlenik devre topolojisinde kullanılan Metal-İzolatör-Metal (MIM) kapasitörlerin etrafında akım yoğunluğunun diğer bölgelere nazaran yüksek olduğu görülmüştür. Ek olarak, çıkış terminalinden geri yansıyan RF işaretin  $100\Omega$  değerindeki izolasyon direnci üzerinde harcandığı görülmüştür.



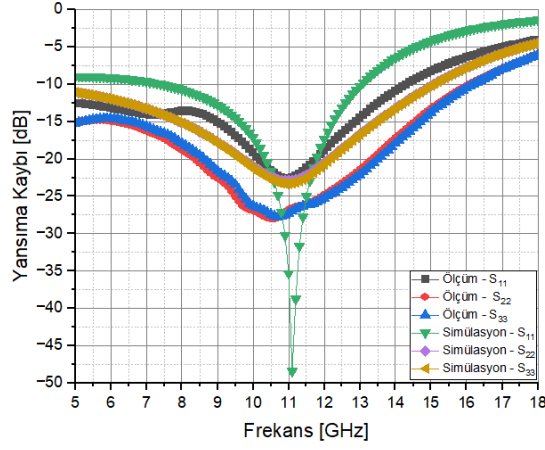
Şekil 10. Geçirme bandındaki (11 GHz) akım dağılımı

Elde edilen simülasyon sonuçları doğrultusunda önerilen tasarımın üretilmesine karar verilmiştir. Üretilen tasarımın ölçüm sonuçları RF sonda istasyonunda yapılmıştır. Şekil 11’de üretilmiş olan tasarımın görseli verilmiştir. S-parametresi ölçümleri Agilent Technologies firmasının N5222A model numaralı (10 MHz-26.5 GHz) devre çözümleyicisi (network analyzer) ve Cascade firmasının MPS150 RF-sonda istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. S-parametresi ölçümlerinde 3 adet Infinity I40-A-GSG-150 RF sondalar kullanılmıştır. Ölçüm düzeneğinin referans noktaları RF sondaların uçları olacak şekilde alttaş üzerinde 3-portlu kısa, açık, yük ve içinden (SOLT: Short, Open, Load, Through) kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



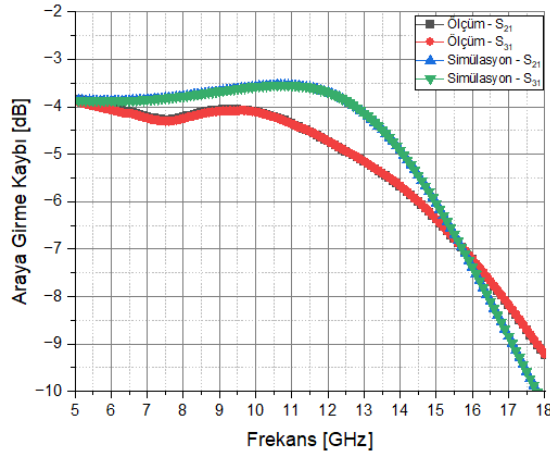
Şekil 11. Üretimi tamamlanan güç bölücü fotoğrafı

Şekil 12’de giriş ve çıkış yansıma kaybı ölçüm ve EM simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Üretimi tamamlanan güç bölücü devresinin X-bandında ki  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ve  $S_{33}$  ifadelerinin sırasıyla -14 dB ve -18 dB’den iyi olduğu görülmüştür. Simülasyon ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında, giriş ve çıkış yansıma kayıplarının birbirlerine benzer tepkiler verdiği görülmüştür. Ancak simüle edilen ve ölçülen giriş yansıma kaybı incelendiğinde, simüle edilen  $S_{11}$  parametresi 11 GHz merkez frekansında -50 dB seviyelerine ulaşırken, ölçümde bu değer -23 dB seviyelerinde kaldığı görülmüştür. Buna karşılık  $S_{11}$  ölçüm sonuçlarından, simülasyon sonuçlarına kıyasla daha geniş bir çalışma frekans bandı elde edilmiştir. Şekil 12’ye göre ölçüm ve simülasyon sonuçlarından elde edilen çıkış yansıma kayıpları ( $S_{22}$  ve  $S_{33}$ ) benzer davranışlar göstermiştir.



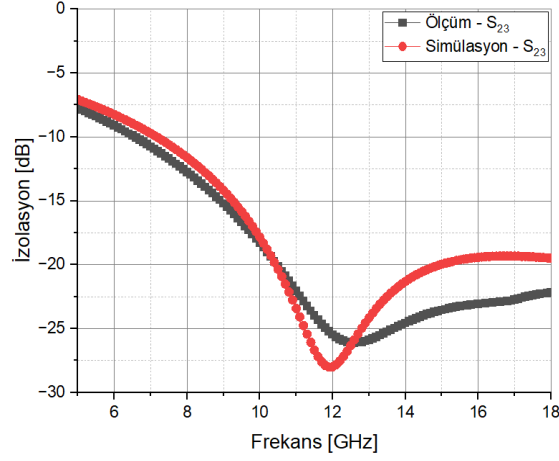
Şekil 12.  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  ve  $S_{33}$  değerlerinin ölçüm ve EM simülasyon sonuçları

Şekil 13’de araya girme kaybı ölçüm ve EM simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Üretimi tamamlanan güç bölücü yapısının 8-12 GHz çalışma frekans bandı içerisinde araya girme kaybının 4.7 dB’den iyi olduğu görülmektedir. Ek olarak, çalışma frekans bandı içerisinde kazanç dalgalanmasının 0.65 dB’den az olduğu tespit edilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde çalışma frekans bandı içerisinde ölçüm ve simülasyon sonuçları arasında yaklaşık olarak 0.7 dB kadar fark olduğu görülmektedir.



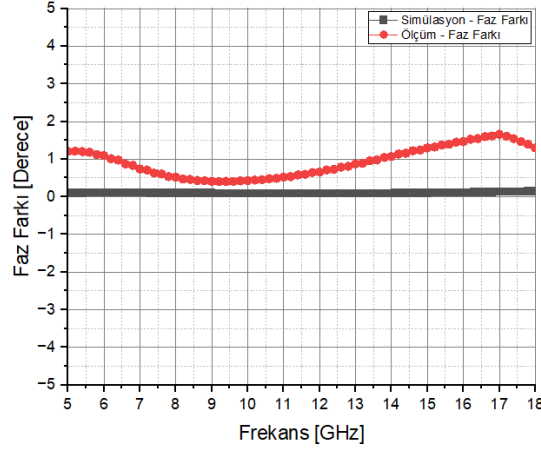
Şekil 13. Araya Girme Kaybı ( $S_{21}$  &  $S_{31}$ ) Ölçüm ve EM Simülasyon Sonuçları

Şekil 14’te çıkış terminalleri arasındaki izolasyonun ölçüm ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Üretimi tamamlanan güç bölücü yapısının 8-12 GHz çalışma frekans bandı içerisinde çıkış terminalleri arasındaki izolasyonun ölçüm sonuçlarında -12 dB’den iyi olduğu görülmüştür. Yüksek frekansa doğru gittikçe çıkış terminalleri arasındaki izolasyon değerinin ölçüm sonuçlarının simülasyon sonuçlarına göre yaklaşık olarak 2-3 dB kadar iyi olduğu görülmüştür.



Şekil 14. Çıkış terminalleri arasındaki izolasyon ölçüm ve EM simülasyon sonuçları

Şekil 15'te çıkış terminalleri arasındaki faz farkının ölçüm ve simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Üretimi tamamlanan güç bölücü yapısının 8-12 GHz çalışma frekans bandı içerisinde çıkış terminalleri arasındaki faz farkının ölçüm sonuçlarında  $0,6^\circ$ 'den az olduğu görülmüştür. Çıkış değerleri arasındaki faz farkı simülasyon sonuçlarında ise  $0,1^\circ$  seviyelerinde elde edilmiştir.



Şekil 15. Çıkış terminalleri arasındaki faz farkı ölçüm ve EM simülasyon sonuçları

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, galyum nitrid teknolojisinde EDDK kullanılarak geliştirilen ultra kompakt bir Wilkinson güç bölücü devresi sunulmuştur. Önerilen güç bölücü devresinde kullanılan çip alanını azaltmak için toplu elemanlı  $\pi$  tipi minyatürleştirme tekniği kullanılmıştır. Önerilen güç bölücünün hatları, MIM kapasitörler ve spiral indüktörler kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımın toplam boyutu  $776 \mu\text{m} \times 2240 \mu\text{m}$ 'dir. Geleneksel Wilkinson güç bölücülere göre %72,3'lük yüzey alanında küçültme sağlanmıştır ve kesirli bant genişliği %47,6'dır. Çalışma neticesinde teorik ve deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen minyatürleştirme tekniği ile elektriksel performansta herhangi bir bozulma olmadan güç bölücü devresinin boyutlarının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Önerilen Wilkinson güç bölücü devresi, basit ve düşük maliyetli

yapısıyla, X-bant uygulamalarında kullanılmak üzere monolitik mikrodalga entegre devrelerine ve hibrit modüllere kolaylıkla entegre edilebilir.

### **Teşekkür**

Çalışmanın uygulama aşamasında mesleki deneyimleriyle yardımlarını esirgemeyen ASELSAN Inc. Mühendisi Dr. Galip Orkun ARICAN'a teşekkür ederiz.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye benzer oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### **Kaynakça**

- Arıcan GO. Design and fabrication of compact Wilkinson power divider on gallium nitride coplanar technology. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 12(1): 113-118.
- Arıcan GO., Sen O., Turhan-Sayan G. A novel miniaturized X-band coplanar waveguide branch-line coupler using T-and  $\pi$ -type equivalent transmission lines. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering 2022; 37(2).
- Arıcan GO. A compact 2-way multisection power divider for broadband operations. Journal of Scientific Reports-C 2021; 2: 1-10.
- Dökmetaş B. S-bant mikroşerit wilkinson güç bölücü tasarımı. Journal of Scientific Reports-B 2021; 004: 8-18.
- Hettak K., Morin GA., Stubbs MG. Compact MMIC CPW and asymmetric CPS branch-line couplers and Wilkinson dividers using shunt and series stub loading. IEEE Trans. Microw. Theory Tech 2005; 53: 1624-1635.
- Kaixue M., Shouxian L., Yang M., Lim K., Kiat SY. A 60 GHz defected ground power divider using SiGe BiCMOS technology. Proc. Int. SoC Design Conference 2011; 1-4.
- Karahan M., Kurt E., Sahinkaya DS. Design of multisection 1×8 ultra-wideband Wilkinson power divider. USNC-URSI Radio Science Meeting 2014; 99.
- Kość A., Di Maria A., Limbach M., Horn R., Reigber A. A 5 way lumped-elements Wilkinson power divider. 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2013; 357-360.
- Kuo CY., Chen AYK., Lee CM., Luo CH. Miniature 60 GHz slow-wave CPW branch-line coupler using 90 nm digital CMOS process. Electron. Letters 2011; 47: 924-925.
- Liang WF., Hong W., Chen JX. A Q-band compact Wilkinson power divider using asymmetrical shunt-stub in 90 nm CMOS technology. Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. 2012; 974-976.

- Okan T. A Wideband conductor backed coplanar waveguide fed implantable antenna operable in different tissues for biotelemetry applications. *Radioengineering* 2023; 30(2): 335-431.
- Wu L., Sun Z., Yilmaz H., Berroth M. A dual-frequency wilkinson power divider. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2006; 54(1): 278-284.
- Yun Y., Lee KS., Kim CR., Kim KM., Jung JW. Basic RF characteristics of the microstrip line employing periodically perforated ground metal and its application to highly miniaturized on-chip passive components on GaAs MMIC. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2006; 54(10): 3805–3817.

## Makine ve Teçhizatı Hariç Fabrikasyon Metal Ürünleri İmalatı Sektöründe Fine-Kinney ile Risk Analizi: Bir Alüminyum Cephe Giydirme Firması Örneği

Zeynep ÖZMEN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksek Okulu, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 81850, Düzce

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5271-1344>

\*Sorumlu yazar: zeynepozmen3426@gmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 17.04.2024

Kabul tarihi: 23.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Alüminyum cephe giydirme firması

Fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektörü

Fine-Kinney

Risk nalizi

İş sağlığı ve güvenliği

### ÖZ

Bu makalede, Beykoz'da fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektörünün alt kolu olan bir alüminyum cephe giydirme firması üzerine bulunan bir şirkete ilişkin ayrıntılı bir risk değerlendirmesi sunulmaktadır. Çalışma, Fine-Kinney yöntemini kullanarak, şirketin faaliyetleriyle ilişkili tehlikeleri puanlamakta ve değerlendirmektedir. Metodoloji, risklerin olasılık, sıklık ve şiddetlerine göre değerlendirildiği kapsamlı bir tehlike tanımlama sürecini içermektedir. Bu değerlendirme, çok sayıda ve çeşitli tehlikelerin bulunduğu bir ortamda etkili risk yönetimi için gerekli olan risklerin önceliklendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Açıkta kalan kablolardan kaynaklanan elektrik riskleri, yetersiz yükseklik güvenlik önlemlerinden kaynaklanan düşme riskleri ve elektrik panolarının yakınında düzensiz depolamadan kaynaklanan yangın riskleri dahil olmak üzere toplam 21 spesifik risk kaynağı tespit edilmiştir. Bu riskler tolerans gösterilemez ve acil düzeltilmesi gereken risklerdir. Temel bulgular, düşmeleri önlemek için daha iyi depolama uygulamalarına ve yangın risklerini etkin bir şekilde yönetmek için uygun yangın söndürme ekipmanının kurulmasına duyulan ihtiyaç gibi acil müdahale için kritik alanları vurgulamaktadır. Belirlenen her bir risk için tavsiyelerde bulunulmuş ve bu risklerin azaltılmasına yönelik spesifik düzeltici faaliyetler özetlenmiştir. Bu düzeltici faaliyetlerin sonunda riskler kabul edilebilir risk seviyesine indirilmiştir. Çalışma, benzer alanlarda faaliyet gösteren işletmelere risk yönetimi konusunda açık ve uygulanabilir bir yol haritası sunarak literatüre önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

## Risk Analysis with Fine-Kinney in the Fabricated Metal Products Manufacturing Sector, Excluding Machinery and Equipment: The Case of an Aluminium Facade Cladding Company

### Research Article

#### Article History:

Received: 17.04.2024

Accepted: 23.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Aluminium facade cladding company

Fabricated metal products manufacturing sector

Fine-Kinney

Occupational health and safety

Risk nalysis

### ABSTRACT

This article presents a detailed risk assessment of a company located in Beykoz that specializes in the aluminum facade cladding sector, a sub-branch of the fabricated metal products manufacturing industry. The study evaluates and scores the hazards associated with the company's activities using the Fine-Kinney methodology. The methodology includes a comprehensive hazard identification process where risks are assessed based on their probability, frequency, and severity. This evaluation facilitates the prioritization of risks, which is essential for effective risk management in an environment with numerous and diverse hazards. A total of 21 specific risk sources were identified, ranging from electrical hazards due to exposed cables to fall hazards due to inadequate height safety measures, and fire hazards due to disorganized storage near electrical cabinets. These risks are intolerable and require immediate action. Key findings highlight critical areas for immediate action, such as the need for better storage practices to prevent falls and the installation of appropriate firefighting equipment to effectively

manage fire risks. Recommendations were made for each identified risk, and specific corrective actions to mitigate these risks are summarized. Following these corrective actions, the risks were reduced to acceptable levels. The study aims to contribute significantly to the literature by providing a clear and applicable roadmap for risk management in organizations operating in similar sectors.

**To Cite:** Özmen Z. Makine ve Teçhizatı Hariç Fabrikasyon Metal Ürünleri İmalatı Sektöründe Fine-Kinney ile Risk Analizi: Bir Alüminyum Cephe Giydirmeye Firması Örneği. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(1): 445-462.

## 1. Giriş

Fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektörü, metal levha, boru, profil ve çubuk gibi metal malzemelerin kesilmesi, bükülmesi, kaynaklanması, delinmesi ve montajlanması gibi işlemlerle çeşitli metal ürünlerin üretimini kapsamaktadır. Bu ürünler genellikle inşaat, otomotiv, makine imalatı, endüstriyel ekipmanlar, elektrik panoları, mobilya ve dekorasyon gibi alanlarda kullanılmaktadır (Jayendran, 2000). Örnek ürünler arasında metal konstrüksiyonlar, endüstriyel makine parçaları, metal levha işleme ürünleri, kaynaklı ve montajlı ürünler, endüstriyel boru ve profil imatları bulunmaktadır (Zinigrad ve Borodianskiy, 2020). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2022 yılında fabrikasyon ve metal ürünleri imalatı sektöründeki girişimler, tüm iş kollarındaki girişimlerin yaklaşık %1,78'ini, imalat iş kollarındaki girişimlerin ise yaklaşık %14,49'unu oluşturmaktadır (Tablo 1). Ayrıca yine 2022 yılı verilerine göre fabrikasyon ve metal ürünleri imalatı sektöründeki çalışanlar, tüm iş kollarındaki çalışan sayısının yaklaşık %2,42'sini oluştururken, tüm imalat iş kollarındaki çalışan sayısının ise yaklaşık %8,99'unu oluşturmaktadır.

**Tablo 1.** Sektörlere göre girişim ve çalışan sayıları

Yıl	Girişim			Çalışan		
	Tüm iş kolları	İmalat sektörü	Fabrikasyon ve metal ürünleri imalatı sektörü	Tüm iş kolları	İmalat sektörü	Fabrikasyon ve metal ürünleri imalatı sektörü
2017	3100412	391024	62369	16013635	4018741	394158
2018	3160396	395816	62386	16156782	4115608	388652
2019	3228421	403018	62 273	15656571	4084281	370215
2020	3304054	409495	62204	15953915	4308982	388789
2021	3578877	444101	65687	17495511	4713664	429750
2022	3784760	465755	67481	18648027	5017701	451002

**Kaynak:** TÜİK, 2024.

Üretim süreçlerinin tehlike potansiyeli yüksek olması nedeniyle, bu sektör özellikle iş sağlığı ve güvenliği açısından dikkatle yönetilmesi gereken bir alan olarak öne çıkmaktadır (Mariscal ve ark., 2019). 2022 yılı iş kazası istatistiklerine göre 4a kapsamında 588828 sigortalı iş kazası geçirmiştir (SGK, 2022). Bu kazalarda 1517 sigortalı hayatını kaybetmiştir. 'NACE' (Avrupa Topluluğu'nda Ekonomik Faaliyetlerin İstatistik Sınıflaması) kodu sınıflandırmasına göre, 2022 yılında en çok iş kazası bina inşaatı ve fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektörlerinde yaşanırken, ölümlü iş kazaları en çok bina inşaatı ve kara taşımacılığı sektörlerinde gerçekleşmiştir (Tablo 2 ve Tablo 3). Sosyal güvenlik kurumu (SGK), iş kazası istatistiklerini NACE kodu sınıflandırmasına göre yayınlamaktadır.



NACE kodu, altı haneli bir kod olup iş yerlerinin tehlike sınıflarını belirlemekte kullanılmaktadır. 2005 yılında başlatılan Avrupa Birliği uyum çalışmaları çerçevesinde, iş yerleri faaliyet gösterdikleri sektörlere göre NACE sistemi ile sınıflandırılmaya başlanmıştır. İşyerlerinin üretim faaliyetlerine göre 99 ana başlık ve bunlara bağlı alt başlıklar bulunmaktadır (ÇSGB, 2012).

**Tablo 2.** Türkiye’de 2022 yılında en çok iş kazası yaşanan sektörler ve kaza sayıları

Faaliyet Konusu	Kaza Sayısı
Bina inşaatı	35636
Fabrikasyon metal ürünleri imalatı	33770
Yiyecek ve içecek hizmet faaliyetleri	32607
Gıda ürünlerinin imalatı	31609
Tekstil ürünlerinin imalatı	30294

Kaynak: (SGK, 2022).

**Tablo 3.** Türkiye’de 2022 yılında en çok ölümlü iş kazası yaşanan sektörler ve kaza sayıları

Faaliyet Konusu	Ölümlü Kaza Sayısı
Bina inşaatı	248
Kara taşımacılığı ve boru hattı taşımacılığı	224
Kömür ve linyit çıkarılması	54
Toptan ticaret	52
(Motorlu kara taşıtları ve motosikletler hariç)	
Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı	46

Kaynak: (SGK, 2022).

Tablo 4’te gösterildiği üzere, son beş yıl içinde (2017-2022) Türkiye’de iş kazaları genel olarak azalma göstermiş olsa da, fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründeki iş kazalarının sayısında dikkat çekici bir artış gözlenmiştir. 2017 yılında bu sektörde 23627 iş kazası yaşanırken, bu sayı 2022 yılında 33770’e yükselmiştir. Aynı dönemde, fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründeki girişim sayısı 62369’dan 67481’a, çalışan sayısı ise 394158’den 451002’ye çıkmıştır (Tablo 1). Bu veriler, sektördeki girişim ve istihdamın artışı ve buna paralel olarak iş kazalarındaki artışı göstermektedir.

**Tablo 4.** 2017-2022 Yılları arasında makine ve teçhizat hariç fabrikasyon metal imalatı sektöründe iş kazaları ve ölümlü iş kazaları sayıları

Yıl	İş kazası		Ölüm	
	Tüm iş kolları	Fabrikasyon ve metal ürünleri imalatı sektörü	Tüm iş kolları	Fabrikasyon ve metal ürünleri imalatı sektörü
2017	359653	23627	1633	36
2018	430985	25716	1541	48
2019	422463	24085	1147	31
2020	384262	22746	1231	20
2021	511084	30599	1382	36
2022	588823	33770	1517	34

Kaynak: (SGK, 2022).

Fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektörü, yüksek risk içeren işlemleri (kesme, bükme, kaynak, delme ve montaj gibi) barındırması nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği açısından özellikle önem

taşımaktadır. Bu bağlamda, Fine-Kinney risk analizi yöntemi, sektördeki tehlikeleri sistemli bir şekilde değerlendirerek, iş kazalarını önleme ve çalışma koşullarını iyileştirme açısından kritik bir araç olarak öne çıkmaktadır (Seyfioğlu ve Doba Kadem, 2022). Çeşitli sektörlerde yapılan çalışmalar ( Gul ve ark., 2018; Baç ve Ekmekçi, 2021; Seyfioğlu ve Doba Kadem, 2022), bu yöntemin uygulamalarını ve etkinliklerini detaylandırarak bu çalışma için temel bir referans sağlamaktadır. Ayrıca, Doğan ve arkadaşları (2022) ile Özbakır (2024) tarafından yapılan çalışmalar, risk değerlendirme süreçlerine modern teknolojik araçların (bulanık mantık, Bayes teknikleri ve kümeleme algoritmaları) entegrasyonunu araştırarak, geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşmayı ve daha etkin sonuçlar elde etmeyi hedeflemektedir. Fine-Kinney yöntemi, potansiyel tehlikeleri, bu tehlikelere maruz kalma sıklığını ve olası sonuçlarını nicel olarak değerlendirmekte ve böylece risklerin sistematik bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır ( Gul ve ark., 2018; Baç ve Ekmekçi, 2021).

Bu makale, Türkiye'deki bir alüminyum cephe giydirme firmasında Fine-Kinney yöntemi kullanılarak yapılan risk değerlendirmesini ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, bu yöntemin fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründe nasıl uygulanabileceğini ve sağlayabileceği faydaları ortaya koymayı amaçlamaktadır. Literatür taraması sırasında bu sektörde yapılmış benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır, bu da mevcut çalışmanın alandaki boşluğu doldurduğunu ve diğer çalışmalardan farkını net bir şekilde ortaya koyduğunu göstermektedir. Makale, giriş kısmından sonra literatür taraması ve teorik çerçeveyi incelerken, risk değerlendirme yöntemlerine ve özellikle Fine-Kinney metodunun teorik temellerine odaklanmaktadır. Bu kapsamda, ikinci bölümde, bir alüminyum cephe giydirme firmasında yapılan risk değerlendirmesinin metodolojisi, uygulama süreci ve elde edilen sonuçlar analiz edilmektedir. Makale, bulgular ve tartışma bölümü ile devam ederek; burada elde edilen veriler ışığında risk yönetimi stratejileri ve iş güvenliği uygulamaları değerlendirilmektedir. Son olarak, sonuç ve öneriler bölümünde, çalışmanın bulgularına dayanarak sektörde risk yönetiminin nasıl iyileştirilebileceği ve iş kazalarının nasıl azaltılabileceği üzerine öneriler sunulmaktadır. Bu yapısal çerçeve, makalenin konusunu kapsamlı bir şekilde ele almayı ve sektörel sorunlara pratik çözümler önermeyi amaçlamaktadır. Makalede, yöntemin uygulanmasıyla elde edilen bulgular, çözüm önerileri ve araştırmanın sınırlılıkları detaylı bir şekilde sunulmuştur.

## **2. Materyal ve Metot**

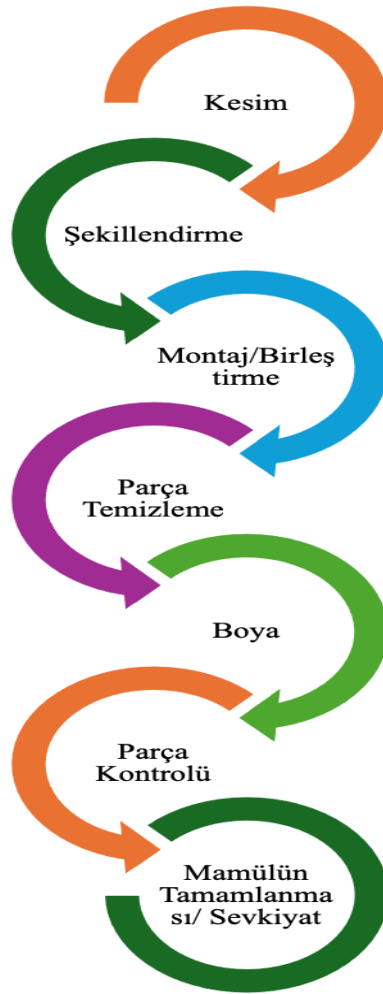
### *2.1. İşyerine Ait Genel Bilgiler*

Bu risk değerlendirmesi; 150 kişinin çalıştığı, 25,12,10 Nace kodlu ve tehlikeli sınıfta yer alan İstanbul ili Beykoz ilçesinde faaliyet gösteren bir alüminyum cephe giydirme firmasında gerçekleştirilmiştir. Risk değerlendirmesi 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun 4. ve 10. maddelerine ve 29 Aralık 2012 tarihli 28512 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği hükümlerine göre yapılmıştır.

Amacı; tüm faaliyetlerde, yapılan işin içeriğinden veya kullanılan araç, gereç, donanım, makina, uygulanan çalışma usulleri, personel nitelikleri ve faaliyetler esnasında ortaya çıkabilecek risk ve tehlikelerin olumsuz etkilerini proses sürecinde tespit ederek ortadan kaldırılması, bu sayede çalışanların, işletme varlıklarını koruyarak iş kazalarının ve meslek hastalıklarının minimum seviyeye indirilmesinin sağlanmasıdır.

## 2.2. Üretim Akışı, Yapılan İşler ve Kullanılan İş Ekipmanları ve Kimyasal Maddeler

İş yerine gelen ham metal levhalar, lazer ve plazma kesim tezgahları kullanılarak istenen boyutlarda parçalara ayrılmaktadır. Daha sonra, pres, abkant ve torna gibi tezgahlar yardımıyla bu parçalar şekillendirilmektedir. Şekillendirme işleminden sonra, parçalar kaynak ile bir araya getirilmektedir. Birleştirilen parçalar, taşlama ve kumlama işlemleriyle temizlenir ve ardından boyama işlemine tabi tutulmaktadır. Tüm kalite kontrol ve son incelemelerden geçirildikten sonra, nihai ürün sevkiyat için hazır hale gelmektedir. Şekil 1'de, fabrikasyon metal ürünlerin imalatına örnek bir üretim akış şeması gösterilmektedir.



**Şekil 1.** Fabrikasyon metal ürünlerin imalatına örnek üretim akış şeması  
**Kaynak:** (ÇSGB, 2017).

**Tablo 5.** İşyerinde kullanılan başlıca iş ekipmanları listesi

No	Ekipman türü	No	Ekipman türü
1	Torna/ Freze	13	Forkliftler
2	Matkap	14	Zımpara Tezgâhları
3	CNC Tezgâhları	15	Kumlama Ekipmanları
4	Plazma Kesim-Lazer Kesim	16	Daire Testere, Şerit Testere vb.
5	Kaynak, Punta Kaynak, Robotlu Kaynak vb.	17	Rendeleme Tezgâhları
6	Hidrolik, Pnömatik, Ekzantrik vb. Presler	18	Delme Tezgâhları (Punch)
7	Abkant Presler	19	Rulo Açma Makineleri
8	Vinç/Tavan Vinçler	20	Hava Tabancaları
9	Ceraskallar	21	Giyotin Makas vb. Makas Makineleri
10	Transpaletler	22	Taşlama tezgâhları
11	Konveyör Bant Sistemleri vb	23	Jeneratörler
12	Basınçlı Tüpler	24	Kompresörler

**Tablo 6.** İşyerinde kullanılan başlıca kimyasal maddelerin listesi

No	Kimyasal Türü	No	Kimyasal Türü
1	Endüstriyel Yağlar	5	Boya (Toz, solvent, elektrostatik vb.)
2	Metal İşleme Sıvıları	6	Tiner, Vernik
3	Zımpara, Kumlama ve Parlatmada Kullanılan Aşındırıcılar	7	Yapıştırıcılar
4	Sınai Gazlar (LPG, LNG, O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> vb.)	8	Benzin vb.

Tablo 5 ve Tablo 6'da işyerinde kullanılan başlıca iş ekipmanları ve kimyasal maddeler listelenmiştir. Bu iki tablo, işyerinde güvenli ve verimli bir çalışma ortamı sağlamak için gerekli olan ekipman ve kimyasalların yönetimini ve denetimini kolaylaştırmayı amaçlamaktadır. Tablo 5'te, işyerinde kullanılan çeşitli iş ekipmanları yer almaktadır. İşyerindeki üretim süreçlerinin etkin ve güvenli bir şekilde yürütülmesi için bu ekipmanların doğru kullanımı önemlidir. Örneğin, torna ve frezeler metal işleme ve şekillendirme işlemlerinde kullanılırken, matkaplar delik açma işlemlerinde kullanılmaktadır. CNC tezgâhları, bilgisayar kontrollü hassas kesim ve şekillendirme sağlarken, plazma ve lazer kesim tezgâhları metal levhaların kesiminde kullanılmaktadır. Kaynak, punta kaynak ve robotlu kaynak gibi ekipmanlar metal parçaların birleştirilmesi için kullanılırken, hidrolik, pnömatik ve ekzantrik presler şekillendirme ve kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Abkant presler metal levhaların bükülmesinde, vinç ve tavan vinçleri ağır yüklerin taşınmasında kullanılmaktadır. Ayrıca, ceraskallar kaldırma ve taşıma işlemlerinde, transpaletler paletli yüklerin taşınmasında kullanılmaktadır. Konveyör bant sistemleri malzeme taşımada otomasyon sağlarken, basınçlı tüpler gazların depolanması ve kullanımı için kullanılmaktadır. Forkliftler ağır yüklerin taşınmasında,

zımpara tezgâhları yüzey pürüzlülüğünün giderilmesinde, kumlama ekipmanları ise yüzey temizleme işlemlerinde kullanılmaktadır (ÇSGB, 2017).

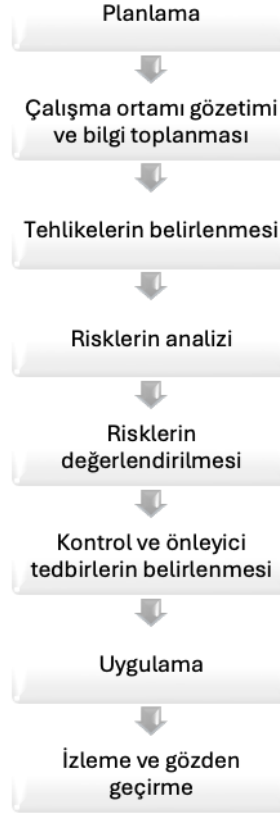
Tablo 6'da, işyerinde kullanılan başlıca kimyasal maddeler listelenmiştir. Endüstriyel yağlar, metal işleme sıvıları, zımpara ve kumlama işlemlerinde kullanılan aşındırıcılar gibi kimyasallar işyerinde çeşitli üretim ve bakım süreçlerinde önemli rol oynamaktadır. Sınai gazlar (LPG, LNG, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> vb.) çeşitli üretim ve destek süreçlerinde kullanılırken, boyalar (toz, solvent, elektrostatik vb.) ve tiner, vernik gibi maddeler yüzey kaplama ve boyama işlemlerinde kullanılmaktadır. Yapıştırıcılar ve benzin gibi kimyasallar ise montaj ve enerji ihtiyaçları için kullanılmaktadır (ÇSGB, 2017). Bu kimyasalların doğru bir şekilde depolanması ve kullanılması, işyerindeki güvenliği sağlamak açısından kritik öneme sahiptir.

### *2.3. Risk Analizi ve Fine-Kinney Metodu*

#### *2.3.1. Risk Analizi*

Risk değerlendirmesi, işyerlerinde potansiyel tehlikelerin tanımlanması, risklerin belirlenmesi, analiz edilmesi ve kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması gibi süreçlerden oluşmaktadır. Bu süreç, işyerinin tasarım veya kuruluş aşamasından itibaren başlar ve tehlikelerin tanımlanmasıyla devam etmektedir. Tehlike tanımlama sürecinde, işyerinin fiziksel yapısı, yürütülen faaliyetler, kullanılan maddeler ve üretim teknikleri gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmaktadır (Grassi ve ark., 2009). Ayrıca, çalışanların deneyimleri ve düşünceleri de bu süreçte önemli bir yer tutmaktadır. Belirlenen tehlikeler, işyerinde yürütülen farklı işler ve bunların birbiriyle olan etkileşimleri dikkate alınarak risklerin sıklığı ve potansiyel zararları belirlenmektedir (Erickson, 1996).

Riskler belirlendikten sonra, analiz süreci gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte, işyerinin özellikleri, tehlikelerin nitelikleri ve işyerinin sınırları gibi faktörler göz önünde bulundurularak riskler değerlendirilmektedir. Risk kontrol adımları, planlama, riskleri azaltma ve kontrol tedbirlerinin uygulanması aşamalarını içermektedir (Şekil 2). Bu adımlar, riskin tamamen ortadan kaldırılması veya kabul edilebilir seviyelere indirilmesi için tasarlanmaktadır. Kontrol tedbirleri belirlenirken, toplu korunma önlemlerine öncelik verilmekte ve yeni risklerin oluşmamasına dikkat edilmektedir. Risk değerlendirmesi süreci, düzenli olarak izlenmekte, gözden geçirilmekte ve gerekli durumlarda yenilenmektedir (Champion, 2000).



**Şekil 2.** Risk kontrol adımları

Şekil 2, işyerinde risk yönetimi sürecinde izlenmesi gereken temel adımları özetlemektedir. İlk adım, işyerinde mevcut olan potansiyel tehlikelerin tanımlanmasıdır. Ardından, belirlenen tehlikelerin olasılık ve şiddeti değerlendirilerek risk analizi yapılmaktadır. Üçüncü adımda, risklerin azaltılması veya ortadan kaldırılması için uygun kontrol önlemleri belirlenmektedir. Bu önlemler, dördüncü adımda işyerinde uygulanmaktadır. Son olarak, uygulanan kontrol önlemlerinin etkinliği izlenir ve gerektiğinde gözden geçirilerek sürekli bir iyileştirme döngüsü sağlanmaktadır (Yazgan, 2015).

### 2.3.2. Fine-Kinney Metodu

Fine-Kinney metodu, esasen sayısal bir risk değerlendirme aracıdır ve risk hesaplamaları, bir kazanın sonuçları, maruziyet sıklığı ve meydana gelme olasılığı olmak üzere üç temel parametre üzerinden yapılmaktadır. Hesaplama, bu değerlerin çarpımı ile risk skorunu elde ederek risklerin önceliklendirilmesini ve yönetim stratejilerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşımla, risklerin sayısal olarak değerlendirilmesi, yöneticilere etkili karar verme süreçlerinde rehberlik etmektedir (Gül ve ark., 2018).

Bununla birlikte, Fine-Kinney metodu, belirsizlikleri daha iyi yönetmek amacıyla bulanık mantık gibi nitel unsurlarla da genişletilmiştir. Bu hibrit yaklaşımlar, hem nicel hem de nitel yöntemleri birleştirerek daha kapsamlı ve esnek bir risk değerlendirmesi sunmaktadır. Bu tür adaptasyonlar, çok kriterli karar verme (MCDM) yöntemleri ile birleştirilerek risk parametrelerinin önem derecelerini

daha doğru bir şekilde belirlemeyi ve risklerin önceliklendirilmesini sağlamaktadır (Gül ve ark., 2018; Wang ve ark., 2018).

Fine-Kinney yöntemi, öncelikle tehlike tanımlama aşaması ile başlar. Bu aşamada, işletme içindeki tüm potansiyel tehlikeler sistematik bir şekilde saptanır. Ardından, her bir tehlike için olasılık, maruz kalma sıklığı ve sonuçların şiddeti değerlendirilir. Bu değerlendirmeler, her bir risk için sayısal bir değer (risk skoru) oluşturulmasını sağlar, bu da yönetim ekibine riskleri somut bir şekilde gösterir (Tümay Ateş, 2023).

Fine-Kinney yönteminin en büyük avantajlarından biri, risk değerlendirme sürecini niceliksel bir temele oturtması ve risklerin önceliklendirilmesini objektif kriterlere dayandırmasıdır. Bu yöntem, özellikle karmaşık iş süreçleri ve çok sayıda potansiyel risk içeren işletmeler için idealdir. Ayrıca, Fine-Kinney, riskleri ayrıntılı bir şekilde sınıflandırarak, risk azaltma önlemlerinin etkin bir şekilde planlanmasını ve uygulanmasını sağlar (Dogan ve ark., 2022).

Diğer yaygın risk değerlendirme metodolojileri olan HAZOP (Tehlike ve Operasyonel Çalışma Analizi) veya FMEA (Arıza Modu ve Etkileri Analizi) ile karşılaştırıldığında, Fine-Kinney daha hızlı ve daha az kaynak gerektiren bir yöntem olarak öne çıkar. HAZOP ve FMEA, daha detaylı ve zaman alıcı süreçler gerektirirken, Fine-Kinney metodunun uygulanması daha az uzmanlık gerektirir ve daha hızlı sonuçlar üretir (Gul ve ark., 2018)

Bu avantajlar, Fine-Kinney yönteminin, çeşitli sektörlerde ve özellikle metal sektörü gibi yüksek risk içeren alanlarda tercih edilmesinin ana nedenlerindedir. Yöntemin adaptasyon kabiliyeti ve uygulama esnekliği, onu uluslararası alanda da popüler bir seçim haline getirmiştir (Tümay Ateş, 2023).

Fine-Kinney metodu, üç risk faktörü çarpılarak risk puanının elde edilmesiyle oluşur. Bunlar olasılık, şiddet ve frekanstır. Riskin gerçekleşme olasılığı, işyerinde gerçekleştirilen faaliyetlere ilişkin, analizlerde belirlenen risklerin mevcut yapı ve olanaklar dahilinde gerçekleşme olasılığını belirtir. Riskin şiddeti, İşyerinde gerçekleştirilen faaliyetlere ilişkin, analizlerde belirlenen risklerin gerçekleşmesi durumunda ortaya çıkması beklenen zarar veya hasarın derecesini belirtir. Riskin frekansı, işin yapılma sıklığı değil, işi yaparken tehlikeye maruz kalma sıklığıdır (Tablo 7).

İşyerinde gerçekleştirilen faaliyetlere ilişkin, analizlerde belirlenen risklere ait olasılık, frekans ve şiddet değerleri saptanarak, risk derecesi belirlenir. Derecelendirme tablosundaki skala göz önüne alınarak risk değeri yorumlanır (Tablo 8). Buradaki sonuçlara göre bir öncelik sıralaması yapılır ve bu öncelik sırasına göre riskten korunma yöntemlerine başvurulur. Eğer risk kabul edilebilir risk değerinin altındaysa kontrol ve izleme sürecine alınır. Kabul edilebilir risk seviyesi üzerindeyse riskten korunma yöntemleri belirlenerek faaliyetler planlanır.

**Tablo 7.** Fine-Kinney yöntemi etki- zarar sonuç ölçeği (olasılık, şiddet ve frekans değerleri)

Olasılık değeri	Olasılık (zararın gerçekleşmesi olasılığı)	Şiddet Değeri	Şiddet (İnsan ve/veya Çevre Üzerine Yaratacağı Tahmini Zarar)	Frekans Değeri	Frekans (Tehlikeye Zaman İçinde Maruz Kalma Tekrarı)
10	Beklenir, kesin	100	Birden Fazla Ölümlü Kaza/Çevresel Felaket	10	Hemen Hemen Sürekli (Bir Saatte Birkaç Defa)
6	Yüksek, oldukça mümkün	40	Öldürücü Kaza/ Ciddi Çevresel Zarar	6	Sık (Günde Bir Veya Birkaç Defa)
3	Olası	15	Kalıcı Hasar/ Yaralanma, İş Kaybı/ Çevresel Engel Oluşturma, Yakın Çevreden Şikayet	3	Ara Sıra (Haftada Bir Veya Birkaç Defa)
1	Mümkün, fakat düşük	7	Önemli Hasar/ Yaralanma, Dış İlk Yardım İhtiyacı/ Arazi Sınırları Dışında Çevresel Zarar	2	Sık Değil (Ayda Bir Veya Birkaç Defa)
0,5	Beklenmez fakat mümkün	3	Küçük Hasar/ Yaralanma, Dahili İlk Yardım/ Arazi İçinde Sınırlı Çevresel Zarar	1	Seyrek (Yılda Birkaç Defa)
0,2	Beklenmez	1	Ucuz Atlatma/ Çevresel Zarar Yok	0,5	Çok Seyrek (Yılda Bir Veya Daha Seyrek)

**Tablo 8.** Risk derecelendirme tablosu

Risk Değeri	Risk Değerlendirme Sonucu
<b>R&gt;400</b>	Tolerans Gösterilemez Risk (Çok Yüksek Risk) (Hemen Gerekli Önlemler Alınmalı veya İşin Durdurulması, Tesisin, Binanın Kapatılması Vb. Düşünülmelidir)
<b>200&lt;R≤400</b>	Yüksek Risk (Esaslı Risk) (En Kısa Dönemde İyileştirilmelidir "Bir Hafta İçerisinde")
<b>70&lt;R≤200</b>	Önemli Risk (Kısa Dönemde İyileştirilmelidir "İki Hafta İçerisinde")
<b>20&lt;R≤70</b>	Kesin Risk (Olası Risk) (Gözetim Altında Uygulanmalıdır)
<b>R≤20</b>	Kabul Edilebilir Risk (Önemsiz Risk) (Önlem Öncelikli Değildir)

Son olarak, risk değerlendirme raporu hazırlanır. Bu rapor, işyerinin bilgileri, tehlike kaynakları, tespit edilen riskler, risk analizi sonuçları ve alınan kontrol tedbirleri gibi bilgileri içermelidir. Ayrıca, risk



değerlendirmesi yapılırken kullanılan yöntemler ve öncelik sırası gibi detaylar da raporda yer alır. Risk değerlendirmesi belgeleri, işyerinde saklanır ve tehlikeli sınıfta yer alan bir işyeri olduğu için 2 yılda bir yenilenir (ÇSGB, 2014). Bu süreç, işyerinin güvenliğini artırmak ve çalışma ortamını iyileştirmek için kritik öneme sahiptir.

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Bu risk değerlendirmesi, Beykoz'da yer alan bir alüminyum cephe giydirme firmasına ait kapalı depolama alanlarını, işyeri bina eklentilerini (koğuşlar, tuvaletler, banyolar, yemekhaneler, ofisler, soyunma odaları vb.), ziyaretçileri ve çalışma alanının çevresini kapsamaktadır.

**Tablo 9.** Risk değerlendirme tablosu

No	Faaliyet	Tehlike	Mevcut Durum	Risk	Oasılık	Frekans	Şiddet	Risk puanı	Önem derecesi	Gerekli düzenleyici ve önleyici faaliyet	Sorumlu	Zaman	Nihai derecelendirme			
													Olasılık	Frekans	Şiddet	Risk puanı
1	Depo	Malzemeler dağınık şekilde elektrik panosunun yanında Karbondioksitli yangın tüpü yok	Malzemelere takılıp düşülebilir Yangın çıkınca söndürmek için geç kalmabilir	Düşme Yaralanma Yangın	3	3	15	135	3. derece	Malzemeler düzenli bir şekilde toplanmalı. Elektrik panosunun yanına yangın tüpü konulmalı	Depo görevlisi	İki hafta içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	15	7,5
2	Üretim	Elektrik kablo hatlarının üstü açık şekilde.	Kablolarda dağınık ve üstleri açık	Elektrik çarpması	6	2	40	480	1. derece	Elektrik kablolarının üstü kapatılmalı ve kablo hatları için kapak kullanılmalı	İşveren	Hemen gerekli önlemler alınmalı	1	0,5	40	20
3	İnşaat	Kule vinç malzemeleri kaldırırken malzemeler düşebilir	Malzemeler gelişigüzel bağlanmış, hatlar gevşek ve düzensizlik mevcut	Malzemeler düşebilir	3	2	7	42	4. derece	Düzenli bir şekilde hizaya getirilmeli ve hatlar daha sıkı olmalı	Operatör	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	7	3,5
4	İnşaat	Bez sapanlarda yastıklama yok, malzemeler düşer	Yastıklama yapılmamış, hatlar gerdirilmemiş	Malzemeler düşer, yaralanma olabilir	3	2	7	42	4. derece	Bez sapanlar yastıklama yapılmalı, hatlar gerdirilmeli	Bağlayan çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	7	3,5
5	Daire içi	Tahta sehpa yıpranmış, çalışma sırasında kırılabilir ve parçalara ayrılabilir	Mobil iskele yerine tahta sehpa kullanılmakta	Düşme, yaralanma	3	3	15	135	3. derece	Mobil iskeleler kullanılmalı	İşveren	İki hafta içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	15	7,5
6	İnşaat	Yüksekte çalışma yapılmakta, paraşüt tipi emniyet kemeri yok	Çalışan yüksekte çalışmakta, uygunsuz iskele kullanılmakta, paraşüt tipi emniyet kemeri takılmamakta	Düşme, yaralanma, sakat kalma	6	6	40	1440	1. derece	Mobil iskeleler kullanılmalı, paraşüt tipi emniyet kemeri kullanılmalı	İşveren	Hemen gerekli önlemler alınmalı	0,5	1	40	20

7	Genel	Merdivenlerin korkuliksuz ve engelleyici malzemelerle dolu olması	Merdiven korkulukları yok ve merdivende engelleyici malzeme bulunmakta	Yaralanma, düşme	3	2	7	42	4. derece	Merdiven kollukları takılmali, engelleyici malzemeler kaldırmalı	İşveren	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	7	3,5
8	Bozdum kan	Sağlam olmayan iskelede çalışmak	Mobil iskelelerin çapraz bağlantıları yok, çalışan emniyet kemeri takmamakta	Düşme, yaralanma, sakat kalma, ölüm	3	3	40	360	2. derece	Mobil iskelelerin periyodik bakımı yapılmalı, iskelelerin çapraz bağlantıları takılmali, çalışan tekrar iş eğitimine girmeli	İşveren	Bir hafta içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	40	20
9	Genel	Geçiş zamanlarında malzemenin üstüne düşme	Malzemeler geçiş yollarının tam önünde durmakta	Düşme	3	2	7	42	4. derece	Malzemeler kaldırmalı	Malzeme sahibi	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	7	3,5
10	İnşaat	İspiral makinanın koruyucusu yok, kesici taş çıkabilir	Kesici makinaya koruyucu takılmamış ve rastgele yere bırakılmış	Uzuv kaybı, yaralanma	6	2	15	180	3. derece	Koruyucu takılmali makinaya ve iş bittikten sonra rastgele bırakılmamalı	İşveren	İki hafta içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	15	7,5
11	Üretim	İşyerinde sigara ve tütün ürünlerinin kullanılması	Üretim yerinde sigara ve tütün ürünleri kullanılmaktadır	Zehirlenme ve yangın	3	2	7	42	4. derece	İşletme içerisinde sigara ve tütün ürünleri içilmesi yasaklanmalı, ikaz ve uyarı levhaları asılmalı	İşveren ve çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	7	3,5
12	Üretim	Çalışma alanında malzemelerin dağınık şekilde bulunması	Çalışma alanında malzemelerin dağınık şekilde bulunmaktadır	Düşme ve yaralanma	4	2	7	56	4. derece	Kullanılmayan malzemelerin istifi için depo alanı oluşturulmalı ve depo alanı düzenli olmalı	Çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	1	1	7	7
13	Üretim	Çalışma alanının dar ve kalabalık olması	İşyerinde çalışma alanının yeterli olmayışı	Düşme ve yaralanma	3	2	7	42	4. derece	Çalışanın iş yaptığı yerde rahat hareket edebilecek bir serbest alan oluşturulmalı	Çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	1	1	7	7
14	Üretim	Merdivenlerin yeterli genişlikte olmaması ve trabzanlarının eksik olması	İşyerinde bulunan merdivenlerin uygunsuz olması	Düşme ve yaralanma	3	2	7	42	4. derece	Merdivenler yeterli genişlikte olmalı, merdiven boyunca trabzanlar olmalı	İşveren	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	1	1	7	7
15	Üretim	Dolapların sabitlenmemiş olması	İşyerinde bulunan dolapların sabitlenmesi yapılmamış	Yaralanma	3	1	7	21	4. derece	Dolapların acil bir durumda devrilmesi için sabitlenmeli	İşveren	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	1	7	3,5
16	Üretim	Elektrikli cihazların topraklanmamış olması	İşyerindeki elektrikle çalışan makinelerin topraklanması yapılmamış	Yaralanma ve makina hasarı	6	6	40	1440	1. derece	Elektrikli cihazlar uygun şekilde topraklanmalı, yılda bir defa direnç ölçülmeli ve belgelendirilmeli	İşveren	Hemen gerekli önlemler alınmalı	0,5	1	40	20
17	Üretim	Kesim malzemelerinin makina çevresinde bırakılması	Kesilmiş malzemeler makinanın çevresinde bulunmaktadır	Düşme ve yaralanma	3	2	7	42	4. derece	Makinada işlenen malzemeler makina yanında bulundurulmamalı, kullanımdan sonra temizliği yapılmalı	Çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	1	1	7	7
18	Üretim	Talaşların temizlenmemesi	Talaşlar yerde ve makinelerin etrafında bulunmaktadır	Yaralanma ve meslek hastalığı	3	3	3	27	4. derece	Talaşların temizlenmesi için bir fırça kullanılmamalı, basınçlı hava veya elle yapılmamalı	Çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	0,5	2	3	3

19	Üretim	Tezgah üzerinde malzemelerin dağınık bulunması	Çalışılan tezgah üzerinde malzemeler dağınık bulunmaktadır	Düşme ve yaralanma	3	3	7	63	4. derece	Kullanılmayan malzemeler ve çalışan aletler tezgah üzerinde bulundurulmamalı, çalışanlar bilgilendirilmeli	İşveren ve çalışan	Bir ay içerisinde iyileştirilmeli	1	2	7	14
20	Üretim	Hijyen koşullarına uyulmaması	Çalışılan ortamda hijyen kuralına uyulmamaktadır	Meslek hastalığı	3	1	3	9	5. derece	Tüm çalışanlara genel hijyen bilgisi verilmeli ve gerekli önlemler alınmalı	Çalışan	Altı ay içerisinde iyileştirilmeli	1	1	3	3
21	Üretim	Kimyasalların yanlış etiketlenmesi veya yanlış depolanması	Çalışanın kimyasallara maruz kalması	Sindirim, cilt yolu ile etkilene, deri lezyonları	6	3	15	270	2. derece	Tüm çalışanlara eğitim ve kişisel koruyucu verilmeli	İşveren	Bir hafta içerisinde iyileştirilmeli	1	1	15	15

Risk analizi sonucu işletmede 21 risk tespit edilmiştir. Öncelikle, depo alanında malzemelerin dağınık şekilde tutulması gibi riskler ve yangın söndürme ekipmanının eksik olması gibi güvenlik eksiklikleri dikkate alınmıştır. Bu durum, malzemelere takılarak düşme veya yangın çıktığında söndürme işlemlerinin gecikmesi risklerini beraberinde getirmektedir. Bu tür tehlikeleri minimize etmek için, malzemelerin düzenli bir şekilde toplanması ve elektrik panosunun yanına yangın söndürme cihazının yerleştirilmesi gerekmektedir.

Üretim alanında, elektrik kablo hatlarının açıkta bırakılması ciddi bir elektrik çarpması riski oluşturmaktadır. Bu riski ortadan kaldırmak için elektrik kablolarının üstünün derhal kapatılması ve kablo hatları için kapakların kullanılması önerilmektedir. Bu önlemlerin acilen alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Ayrıca, inşaat alanında yüksekte çalışma sırasında uygun emniyet önlemlerinin alınmaması, düşme ve yaralanma risklerini artırmaktadır. Bu tehlikeleri azaltmak için, mobil iskelelerin ve paraşüt tipi emniyet kemerlerinin kullanılması şarttır. Bu ekipmanların hemen temin edilerek kullanılması önem taşımaktadır.

Genel olarak merdiven kullanımı sırasında da düşme ve yaralanma riskleri mevcuttur. Merdivenlerin güvenli hale getirilmesi için korkulukların takılması ve merdivenlerdeki engelleyici malzemelerin kaldırılması gerekmektedir. Bu iyileştirmelerin bir ay içinde tamamlanması beklenmektedir.

Sigara ve tütün ürünlerinin kullanımının üretim alanında zehirlenme ve yangın risklerini beraberinde getirdiği tespit edilmiştir. Bu riskleri minimize etmek için işletme içinde sigara içilmesinin yasaklanması ve gerekli ikaz ve uyarı levhalarının asılması önerilir. Bu düzenlemelerin bir ay içinde gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Bu öneriler, iş sağlığı ve güvenliği standartlarını artırmak, çalışanların güvenliğini sağlamak ve olası iş kazalarını önlemek amacıyla kritik öneme sahiptir. Yapılan risk değerlendirmesinde önerilen düzeltici ve önleyici faaliyetler uygulandığında işletme güvenli hale gelecektir.

#### 4. Sonuç ve Değerlendirme

Fabrikasyon metal ürünlerin imalatı genellikle metal yapı ve parçaların üretimi, dövme, presleme, şekillendirme, işleme, kaplama ve boyama süreçlerini içermektedir (Ceylan, 2012). Bu işlemler, İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği'ne göre, tehlikeli veya çok tehlikeli iş yeri kategorisinde yer alır. Bu alanın NACE genel kodu 25 olarak belirlenmiştir. Fabrikasyon metal ürünleri, günlük hayatta sıkça karşılaşılan metal kapı, pencere, yangın merdiveni, yangın tüpleri ve dolapları, çatı radyatörleri, sıcak ve soğuk su kazanları, teneke kutular, kovalar ve variller gibi çeşitli metal ürünleri kapsar (Ceylan, 2012).

Fabrikasyon metal ürünleri imalat sektörü, içerdiği yüksek riskli işlemler nedeniyle titizlikle yönetilmesi gereken bir alandır. Bu sektördeki genel iş akışı, 'hammadde veya yarı mamul metal sacların ve levhaların CNC, lazer kesim gibi makinelerde istenilen boyutlarda kesilmesi; pres, torna, freze, kaynak, bükme makinelerinde şekillendirilmesi; parçaların kaynak ile birleştirilmesi; taşlama, zımparalama, yüzey işleme, kaplama ve parlatma gibi işlemlerle yüzey temizliğinin yapılması; son olarak kalite kontrol işlemlerinden geçirilerek nihai ürünün paketlenip sevkiyata hazır hale getirilmesi' şeklindedir.

Önceki çalışmalar, metal ürünlerin üretim süreçlerinde karşılaşılan risklerin analizi ve yönetimi konusunda önemli katkılar sağlamaktadır. Basto ve ark., (2022) çalışmalarında, fabrikasyon süreçlerinde riskleri sistematik olarak belirleyerek ve önceliklendirerek yönetim stratejileri geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Guzzomi ve ark., (2021), metal eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel uygulamaları ve bu teknolojilerin benimsenmesi sırasında karşılaşılan zorluklar üzerine yazdıkları makalelerinde kalite, güvenlik ve çevre risklerini değerlendirmek için FMEA yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışma, fabrikasyon süreçlerinde riskleri sistematik olarak belirleyerek ve önceliklendirerek yönetim stratejileri geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Liu ve Pang (2023), FMEA ve bulanık mantık entegrasyonu kullanarak metal tozlarının patlama karakteristiklerini değerlendirerek patlama risklerinin yönetimi için kapsamlı bir model sunmuşlardır.

Önceki çalışmalardan yararlanarak hazırlanan ve Beykoz'daki bir alüminyum cephe giydirme firmasında gerçekleştirilen bu risk değerlendirme çalışması, sektörde karşılaşılan tipik tehlikeleri somut bir şekilde ortaya koymaktadır. Guzzomi ve ark., (2021)'nin çalışmasından farklı olarak, Fine-Kinney yöntemi kullanılarak yapılan bu değerlendirme, riskleri sınıflandırarak ve önceliklendirmesini yaparak, riskleri kabul edilebilir seviyelere indirebilmek için somut adımlar önermektedir. FMEA yöntemi ile karşılaştırıldığında Fine-Kinney yönteminin hem kolay uygulanabilir olması hem de güvenilir sonuçlar vermesi bakımından tercih edilen en uygun analiz yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntem, tehlikeleri sistemli bir biçimde analiz etmekte ve her bir risk için etkili önlemler geliştirerek iş sağlığı ve güvenliğini önemli ölçüde iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu süreç, sektördeki işletmelerin risk yönetimi pratiklerini güçlendirerek, daha güvenli çalışma ortamları yaratılmasına olanak tanımaktadır.

Fine-Kinney yöntemi, risk değerlendirme sürecinde kolayca uygulanabilir olması, gerekli istatistiksel bilgilere rahatça ulaşılabilmesi ve riskleri kabul edilebilir seviyelere indirmesi nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, yeterli deneyime sahip olmayan uzmanlar tarafından da kolaylıkla kullanılabilmesidir (Birgören, 2017).

Özellikle, fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründe, malzemelerin düzensiz depolanması, elektrik kablo güvenliği, yüksekte çalışma koşulları ve yangın güvenliği gibi konular önemli risk alanlarını oluşturur. Bu riskler, iş kazalarına, yaralanmalara ve hatta ölümlere yol açabilecek potansiyel tehlikeler içerir. İş ekipmanlarında sıklıkla karşılaşılan eksiklikler arasında koruyucuların bulunmaması veya işin hızlı tamamlanması için bu koruyucuların devre dışı bırakılması yer alır. Yangın, parlama ve patlama riskleri konusunda en yaygın eksiklikler ise yeterli yangın söndürme sistemlerinin bulunmaması, kullanılan kimyasalların özellikleri hakkında işveren ve çalışanların yeterli bilgiye sahip olmaması ve bu nedenle gerekli önlemlerin alınmamasıdır.

İşletmelerin hem dışarıdan gelebilecek tehditlere karşı hem de iç ortamda mevcut tehlikelere karşı korunabilmesi için gerekli güvenlik önlemlerini almaları büyük önem taşımaktadır. Bu önlemlerin alınması, işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri açısından kritik bir rol oynar. Bu nedenle, kapsamlı bir risk değerlendirme çalışması yapılması şarttır. Tehlike potansiyeli taşıyan her durumun tespit edilmesi, bu tehlikeleri ortaya çıkaran faktörlerin belirlenmesi ve tehlikelerden kaynaklanan risklerin nitel veya nicel yöntemlerle analiz edilmesi, hangi önlemlerin alınması gerektiği konusunda gerekli bilgilerin elde edilmesini sağlar. Dolayısıyla, tehlike ve risk odaklı çalışmaların sürdürülebilirliği için işletmelerin bu konuya gereken özeni göstermeleri gerekmektedir (Karamık ve Şeker, 2015).

Fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründe iş ekipmanlarının doğru ve güvenli bir şekilde kullanılması, iş kazalarının önlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, presler, torna tezgahları ve matkap gibi makinelerde koruyucuların eksik olması, operatörlerin ciddi yaralanmalar yaşamasına neden olabilmektedir. Ayrıca, yüksekte çalışma sırasında paraşüt tipi emniyet kemerlerinin kullanılmaması, düşme ve ciddi yaralanma riskini artırmaktadır. Bu tür riskleri minimize etmek için makinelerin koruyucularla donatılması, acil durdurma butonlarının yerleştirilmesi ve operatörlerin düzenli eğitimlerle bilinçlendirilmesi gereklidir.

Bu makalede gerçekleştirilen risk değerlendirme çalışmasında, yangın, parlama ve patlama riskleri, özellikle kimyasal maddelerin kullanıldığı ve kaynak işlemlerinin yapıldığı alanlarda yüksek olduğu görülmüştür. Yangın söndürme cihazlarının stratejik noktalara yerleştirilmesi, yangın algılama ve alarm sistemlerinin düzenli olarak kontrol edilmesi hayati önem taşımaktadır. Ayrıca, kimyasal maddelerin doğru şekilde etiketlenmesi ve depolanması, patlama risklerini azaltmak için gereklidir. Yanıcı maddelerin sıcak işlem yapılan alanlardan uzak tutulması ve yangın söndürme sistemlerinin uygun şekilde kurulması, yangın ve patlama risklerine karşı etkili bir önlem olacaktır.

Merdivenlerin güvenli kullanımını sağlamak için, merdiven basamaklarının kaymaz malzemelerle kaplanması, yeterli genişlikte olması ve her iki tarafında da sağlam korkuluklar bulunması gerekmektedir. Mobil iskelelerin kullanıldığı işlerde, iskelelerin çapraz bağlantılarının tam

olduğundan emin olunmalı ve çalışanların iskele üzerinde çalışırken her zaman emniyet kemeri kullanmaları sağlanmalıdır. Ayrıca, merdiven ve iskelelerin üzerinde engelleyici malzemelerin bulunmaması ve acil durumlarda kaçış yollarının açık olması sağlanmalıdır. Bu önlemler, yüksekten düşme ve yaralanma risklerini önemli ölçüde azaltacaktır.

Önerilen önlemler, iş güvenliği prosedürlerinin iyileştirilmesi, yeterli güvenlik ekipmanının sağlanması ve çalışma ortamlarının düzenli olarak gözden geçirilmesi yoluyla bu riskleri azaltmayı amaçlamaktadır. Tüm risklerde önlem planında yer alan kontrol önlemleri uygulandıktan sonra sürekliliğin sağlanabilmesi için, işveren kontrol ve denetimlerini aksatmadan yapmalı ve çalışanlar alınan tedbirlere uymalıdır.

Sonuç olarak, bu makale, sektörde iş kazalarının azaltılması ve daha güvenli çalışma ortamlarının oluşturulması açısından önemli önerilerde bulunmuştur. Risk değerlendirmesi, gerçek dünya koşullarında, işyerinin karşılaştığı özgün tehlikeleri belirlemiş ve bu tehlikeleri sistematik bir şekilde ele alarak her biri için özelleştirilmiş çözümler sunmuştur. Bu özel durum, sektördeki diğer işletmeler için de bir model teşkil edebilir, zira benzer riskleri yönetme ve azaltma konusunda uygulanabilir, somut adımlar sağlamaktadır. Bu çalışma, iş güvenliğini artırmanın yanı sıra, risk yönetiminin işletme içinde nasıl entegre edilip sürekli hale getirilebileceğini de gözler önüne sermektedir.

## **5. Makalenin Sınırlılıkları**

Fine-Kinney yöntemi, risk faktörlerini ölçmek için kullanılan etkili bir araç olmasına rağmen, her tehlikeyi ve riski kapsayıcı olmayabilir, özellikle psikososyal risk faktörleri gibi bazı alanlarda yetersiz kalabilir. Araştırma, yalnızca Beykoz'daki bir alüminyum cephe giydirme firmasında gerçekleştirildiği için bulguların genel sektöre veya farklı coğrafi konumlardaki benzer işletmelere uyarlanabilirliği sınırlı olabilir. Ayrıca, çalışmada modern risk değerlendirme araçları olan bulanık mantık, Bayes teknikleri ve kümeleme algoritmaları gibi teknolojilerin entegrasyonu gerçekleştirilmemiştir, bu da risk değerlendirme sürecinin etkinliğini sınırlayabilir.

## **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazar makaleye %100 oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

## **Kaynaklar**

Baç N., Ekmekçi I. Psychosocial risk assessment using COPSOQ II questionnaire-A case study with maintenance workers in a metal plant in Istanbul Turkey. *Heliyon*, 2021; 7(4): e06777.

Basto L., Lopes I., Pires C. Risk analysis in manufacturing processes: an integrated approach using the FMEA method. In: Kim, DY., von Cieminski, G., Romero, D. (eds) *Advances in Production*

- Management Systems. Smart Manufacturing and Logistics Systems: Turning Ideas into Action. APMS 2022. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2022; vol 663. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16407-1\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16407-1_31)
- Birgören B. Calculation challenges and solution suggestions for risk factors in the risk analysis method in the fine kinney risk analysis method. International Journal of Engineering Research and Development, 2017; 9(1): 19-25. <https://doi.org/10.29137/umagd.346168>
- Ceylan H. Analysis of occupational accidents according to the sectors in Turkey. Gazi University Journal of Science, 2012; 25(4): 909-918
- Champion J. Risk assessment: A five step process-june champion. Journal of Perioperative Practice 2000; 10(7): 350-353
- ÇSGB. İş sağlığı ve güvenliğine ilişkin işyeri tehlike sınıfları tebliği 26.12.2012 tarih ve 28509 sayılı Resmi Gazete. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2012. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16713veMevzuatTur=7veMevzuatTertip=5> (Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024).
- ÇSGB. İş sağlığı ve güvenliği uygulamaları rehberi (Yayın No: 09; Dr. F. Aydın, Ed.). 2014. <https://www.csgb.gov.tr/media/1335/iş-sağlığı-ve-guevenliği-uygulamaları.pdf> (Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024)
- ÇSGB. Ana metal sanayisi, fabrikasyon metal ürünlerin imalatı ve otomotiv yan sanayisinde iş sağlığı ve güvenliği programlı teftişi. 2017. [https://www.csgb.gov.tr/medias/11976/2017\\_metal-ueruenlerin-imalatı\\_press.pdf](https://www.csgb.gov.tr/medias/11976/2017_metal-ueruenlerin-imalatı_press.pdf) (Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024)
- Dogan B., Oturakci M., Dağsuyu C. Action selection in risk assessment with fuzzy Fine–Kinney-based AHP-TOPSIS approach: A case study in gas plant. Environmental Science and Pollution Research 2022; 29: 66222-66234
- Erickson P. Hazard and risk assessment. Occupational Health and Safety 1996; 13–23. [https://books.google.com.tr/books?hl=trvelr=veid=j9gvwrWPY8Cveoi=fndvepg=PP1vedq=Erickson,+P.+Hazard+and+risk+assessment,+Occupational+Health+and+Safety+1996veots=74IWDseoPwvesig=-xo7e2lnTGJZigUT5NMNrSqLN9Everedir\\_esc=y#v=onepageveq=Erickson%2C%20P.%20Hazard%20and%20risk%20assessment%2C%20Occupational%20Health%20and%20Safety%201996vef=false](https://books.google.com.tr/books?hl=trvelr=veid=j9gvwrWPY8Cveoi=fndvepg=PP1vedq=Erickson,+P.+Hazard+and+risk+assessment,+Occupational+Health+and+Safety+1996veots=74IWDseoPwvesig=-xo7e2lnTGJZigUT5NMNrSqLN9Everedir_esc=y#v=onepageveq=Erickson%2C%20P.%20Hazard%20and%20risk%20assessment%2C%20Occupational%20Health%20and%20Safety%201996vef=false) (Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024)
- Grassi A., Gamberini R., Mora C., Rimini B. A fuzzy multi-attribute model for risk evaluation in workplaces. Safety Science 2009; 47: 707–716.
- Gul M., Güven B., Güneri A. A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using fahpvikor incorporation. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2018; 53: 3-16.

- Guzzomi F., Rassau A., Hayward K. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences* 2021; 11(3): 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Jayendran A. Sheet metal bending and forming processes. In *Englisch für maschinenbauer*. Wiesbaden: Springer 2000; 177: 90–96
- Karamık S., Şeker U. İşletmelerde iş güvenliğinin verimlilik üzerine etkilerinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2015; 3(4): 575-584
- Liu K., Pang L. Explosion risk of metal powder used in additive manufacturing. *Processes* 2023; 11(10): 2943. <https://doi.org/10.3390/pr11102943>
- Mariscal MA., López-Perea EM., López-García JR., Herrera S., García-Herrero S. The influence of employee training and information on the probability of accident rates. *International Journal of Industrial Ergonomics* 2019; 72: 311-319.
- Özbakir O. Enhancing healthcare worker well-being and patient safety in the pediatric emergency department: a comprehensive hazard and risk analysis. *The Journal of International Scientific Researches* 2024; 9(1): 35-49
- Seyfioğlu İ., Doba Kadem F. Bir ayakkabı işletmesinin fine-kinney yöntemi ile risk değerlendirmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2022; 37(4): 925–935. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1230795>
- SGK. Sosyal güvenlik kurumu, iş kazası istatistikleri, Ankara; 2022. <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/> (Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024)
- TÜİK. Sanayi İstatistikleri. Ankara; 2024. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sanayi-Uretim-Endeksi-Mart-2024-53772> (Erişim Tarihi: 4 Temmuz 2024)
- Tümay Ateş K. Determination of high risks and elimination of possible risks in the winding section of an energy company using the fine-kinney method. *International Scientific and Vocational Studies Journal* 2023; 7(2): 62-71.
- Wang W., Liu X., Qin Y. A fuzzy Fine–Kinney-based risk evaluation approach with extended MULTIMOORA method based on Choquet integral. *Computers ve Industrial Engineering* 2018; 125: 111–123.
- Yazgan MR. . İş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirmesi rehberi. *Yazgan Medya*. 2015. İstanbul.
- Zinigrad M., Borodianskiy K. Welding, joining, and coating of metallic materials. *Materials* 2020; 13(11): 2640.



## Atlarda Hendra Virüs Enfeksiyonları

Ali GÜNGÖR<sup>1\*</sup>, Ayhan ATASEVER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Laborant ve Veteriner Sağlık Bölümü, 80010, Osmaniye

<sup>2</sup>Erciyes Üniversitesi, Veteriner Fakültesi, Patoloji Anabilim Dalı, 38280, Kayseri

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0008-7985-0986>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-6327-1604>

\*Sorumlu yazar: [aligungor@osmaniye.edu.tr](mailto:aligungor@osmaniye.edu.tr)

### Derleme

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 16.02.2024

Kabul tarihi: 26.08.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

At

Hendra Virus

Brisbane

Vaskulit

### ÖZ

Hendra virüs (HeV), 1994 yılında Avustralya'nın Queensland eyaletindeki Brisbane banliyösünde ortaya çıkan zoonotik paramyxovirüstür. HeV ilk olarak Avustralya'da atlarda ve insanlarda ölümcül bir solunum yolu hastalığı meydana geldikten sonra tanımlanmıştır. Meyve yarasaları (*Pteropus* spp.) doğal rezervuardır. Biyolojik güvenlik seviyesi-4 (BSL-4) patojenleri olarak kategorize edilen HeV atlarda, solunum ve nörolojik belirtilerle ilişkili şiddetli, genellikle ölümcül, ateşli bir hastalığa neden olur; insanlarda ise solunum ve nörolojik enfeksiyonlara neden olduğu bilinmektedir. Bu makalede atlarda Hendra virüs hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır.

## Hendra Virus Infections in Horses

### Reviews

#### Article History:

Received: 16.02.2024

Accepted: 26.08.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Horse

Hendra Virus

Brisbane

Vaskulitis

### ABSTRACT

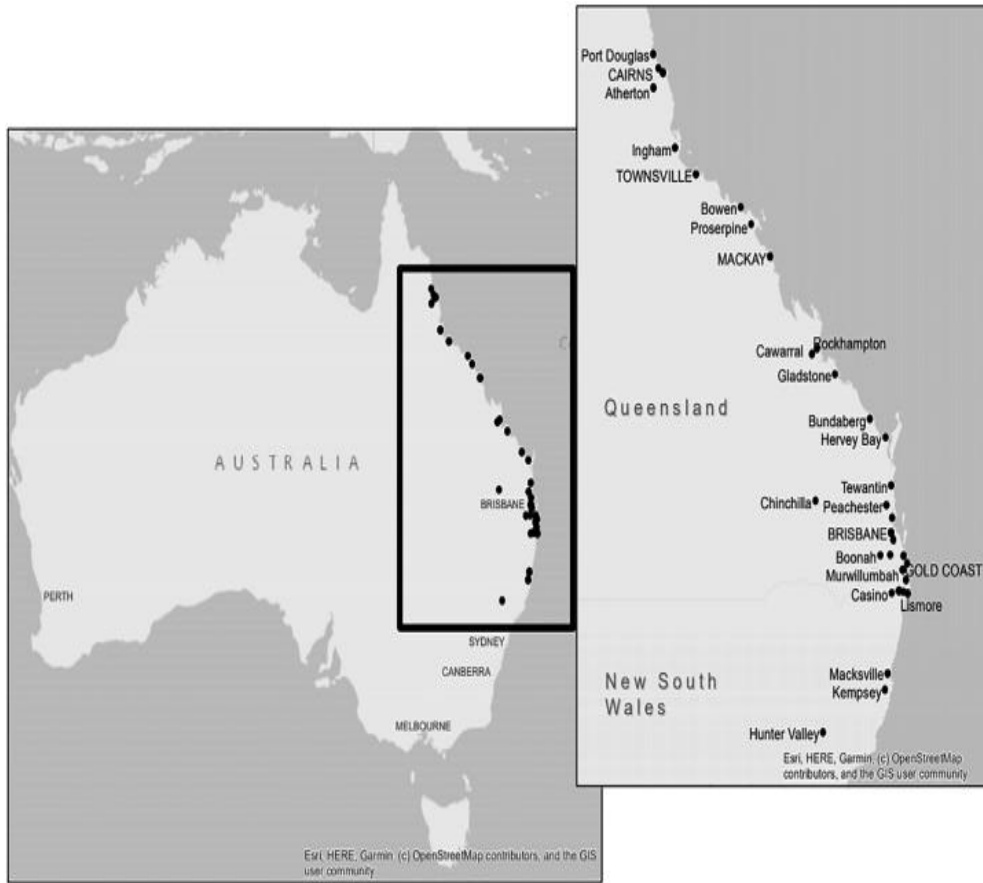
Hendravirüs (HeV) is a zoonotic Paramyxovirus that originated in suburban Brisbane, Queensland, Australia in 1994. HeV was first identified in Australia after a fatal respiratory illness occurred in horses and humans. Fruit bats (*Pteropus* spp.) is a natural reservoir. HeV, categorized as biological safety level-4 (BSL-4) pathogens, causes a severe, often fatal, febrile illness associated with respiratory and neurological symptoms in horses, while it is known to cause respiratory and neurological infections in humans. This article is intended to provide information about Hendravirüs in horses.

**To Cite:** Güngör A., Atasever A. Atlarda Hendra Virüs Enfeksiyonları. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 463-471.

### 1. Giriş

Hendra virüsü (HeV) ilk olarak Eylül 1994'te Avustralya'nın Brisbane banliyösü Hendra'da, tek bir mülkte 20 atın 14'ünde şiddetli akut solunum yolu hastalığı ve yüksek ateş ile seyreden bir salgınının araştırılmasının ardından tanımlanmıştır. Etkilenen atlarla yakın temas öyküsü olan iki kişi enfeksiyona yakalanmıştır. Enfeksiyona yakalanan kişilerden birinin enfeksiyon başlangıcından sonraki bir hafta içinde öldüğü, diğer kişinin ise iyileştiği bildirilmiştir (Murray ve ark., 1995). Benzer bir tablo Mackay, Queensland, Avustralya'da Ağustos 1994'te iki at ve bir insanı içeren bir olay da meydana gelmiştir. Bu olay detaylı olarak araştırıldığında enfekte olan kişinin ölüm sebebinin tekrarlayan ensefalit kaynaklı

olduğu belirtilmiştir (Rogers ve ark., 1996). 1998 yılında Malezya yarımadasındaki bir çiftlikte domuzlarda ortaya çıkarak 105 kişinin ölümüyle ve bir milyondan fazla domuzun itlaf edilmesiyle sonuçlanan akut solunum yolu hastalığı salgınının özellikle HeV ilgili olduğu düşünülmektedir (Chua ve ark., 2000). Genel olarak, atlarda ve insanlarda mevcut yaklaşık vaka ölüm oranı sırasıyla %80 ve %60'tır. 1994 ve 2010 yılları arasında atlarda sporadik HeV salgını olmuş ve her biri en fazla beş atı içeren 14 olay belirlenmiştir. Hepsi Queensland kıyılarında veya Yeni Güney Galler'in kuzey-doğu bölgesinde meydana gelmiştir. 2011 ve 2019 yıllarındaki Britanya'nın batısındaki vakada dahil olmak üzere atlarda toplam 26 adet HeV enfeksiyonu durumu gerçekleşmiştir. 105 at ve 7 insanı içeren salgınlar, 4 insanın ölümüyle sonuçlanmıştır (Williamson ve ark., 2020; Yuen ve ark., 2021).

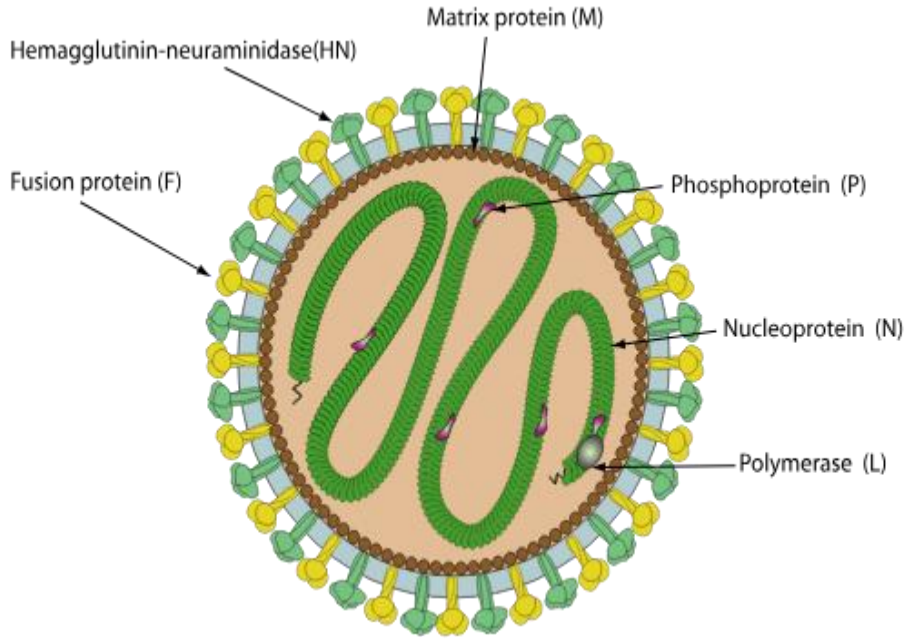


Şekil 1. HeV vakalarının 1994-2019 yılları arasındaki konumları (Williamson ve ark., 2020).

## 2. Etiyoloji

*Paramyxoviridae* ailesi içinde bulunan HeV zarlı olup, segmentsiz negatif polariteli, tek iplikli RNA genomuna sahiptir (Wang ve ark., 2000). Henipavirüs cinsinin her iki üyesi de (HeV ve Nipah virüs), tüm paramiksovirüs'lerde karakteristik bir özellik olan doğrusal bir ribonükleoprotein çekirdeğine (RNP) sahiptir. Yapısal olarak, ribonükleoprotein çekirdeği, nükleokapsid proteinlerin (N) bağlı olduğu tek iplikli bir genomik RNA molekülünden oluşur. Genomik RNA zinciri negatif polarite sergiler ve her altı nükleotit için genoma bir N bağlanır (Calain ve Roux, 1993). Virüsün şekli pleomorfiktir, segmentsiz

ve negatif iplikli RNA içerir (Khusro, 2020). Her bir Henipavirüs küresel veya filamentlidir, çapı 150-200 nm ve uzunluğu 10,040 nm'ye kadardır ve yüzey çıkıntularına sahiptir (Georgiev, 2009). HeV genomu yaklaşık olarak 18,234 nükleotit uzunluğundadır (Wang ve ark., 2000). Nükleoproteinler (N), daha küçük fosfoproteinler (P) ve büyük bir polimeraz protein (L), reseptör bağlayıcı glikoprotein (G) ve füzyon proteini (F) ile çevrili RNP çekirdeğini oluşturur (Bishop ve ark., 2005; Viralzone, 2024). G ve F proteinleri RNP çekirdeğinin yüzeyinde bulunur ve RNP çekirdeği ile birlikte, genomik RNA'nın haberci RNA'ya transkripsiyondan sorumludur (Wang ve ark., 2000). Viral zarfın altında bulunan ve RNP çekirdeğinden konak hücrelere salındığı bilinen matris proteini (M), HeV'nin yapısını tamamlar. HeV'nin genomları birçok yönden diğer paramiksoviruslerin genomlarına benzer olsa da, bazı farklı özellikler içermektedir. Bunlardan en belirgin olanı, öncelikle P ve L proteinlerine bağlı genom büyüklüğüdür. HeV'nin L proteininin dizilimi, korunmuş bir intergenik trinükleotid dizisi ortaya çıkarmıştır (Wang ve ark., 2000).



Şekil 2. Paramyxovirüs ailesinde virüs partikülü üzerinde bulunan yapılar (Viralzone, 2024).

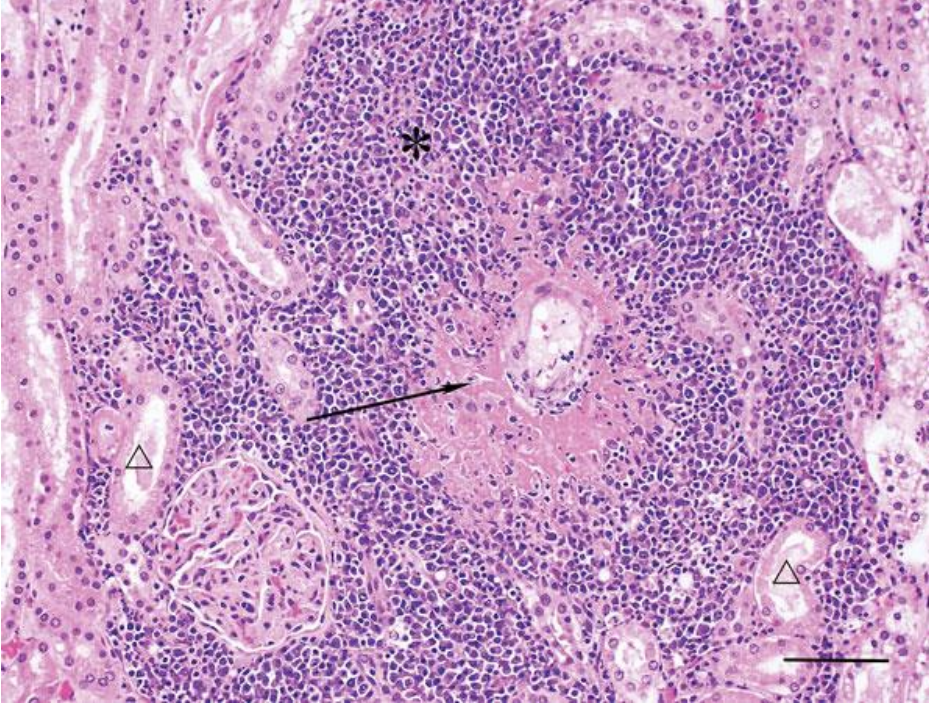
### 3. Patogenez ve Klinik Bulgular

HeV, insanlar da dahil olmak üzere çeşitli memeli türlerinde enfeksiyona neden olan bir paramyxovirüstür. Virüs, füzyon (F) ve bağlanma (G) glikoproteinlerinin koordineli işlevleri aracılığıyla konak hücrelerini enfekte eder. G glikoproteiniephrin B2 ve ephrin B3 yapılarının bağlanmasından sorumludur. Hücreleri, füzyon ve bağlanma glikoproteinlerinin aracılık ettiği pH'dan bağımsız bir membran füzyon işlemiyle enfekte ederler (Bishop ve ark., 2005). HeV ve Nipahvirus (NiV) gibi paramiksovirusler, hücreleri iki membran ekspre edilmiş yüzey glikoprotein sivri uçlarının aracılık ettiği pH'dan bağımsız bir füzyon olayı ile enfekte eder. Belirli bir virüse bağlı olarak, hemagglutininneuraminidaz proteini (HN) veya hemagglutinin proteini (H) aktiviteleri olmayan

glikoprotein (G) ve virüs ile konak hücre zarı arasındaki füzyonu kolaylaştıran bir füzyon glikoprotein (F) olarak belirlenmiştir (Bossart ve ark., 2007). HeV ve NiV'in erken karakterizasyonu, aynı konak hücre tropizmlerle genetik olarak yakından ilişkili olduklarını ve son zamanlarda konak hücrelerin enfeksiyonu için ephrin B2 olarak bilinen aynı hücre reseptörü kullandıklarını göstermiştir (Bishop ve ark., 2005). Ek olarak, yüksek dereceli dizi homolojisine sahip ilgili bir protein olan ephrin B3'ün de NiV için fonksiyonel bir reseptör olduğu gösterilmiştir (Negrete ve ark., 2005). Ephrin B2 ve ephrin B3, büyük bir tirozinkinaz reseptörleri ailesi olan Ephrin reseptörlerine bağlanan yüzey 8 ekspresyonlu glikoprotein ligandları ailesinin üyeleridir (Drescher ve ark., 2002). Ephrinler gelişim sırasında, özellikle sinir ve damar sistemlerinde kilit rol oynarlar (Heroult ve ark., 2006). EphrinB2'nin nöronlar, düz kas, arteriyel endotel hücreleri ve kılcal damarlarda fonksiyonel bir henipavirüs reseptörü olarak tanımlanması, çeşitli konakçı türlerde bu virüslerle enfeksiyonun neden olduğu tropizmi ve sonraki patojenik süreçlerin anlaşılmasında yardımcı olmuştur (Eaton ve ark., 2005). Atların HeV enfeksiyonuna yarasaların salgıları sonucunda virüse doğrudan maruz kalarak yakalandığına inanılmaktadır. Enfeksiyon sporadiktir, genellikle inkübasyon süresinin 4 ila 16 gün arasında olduğu düşünülmektedir (Murray ve ark., 1995). Ateş, depresyon, taşikardi, taşipne, dispne, facial ödem ve ataksi ile kendini gösteren akut bir hastalık başlangıcı vardır. Ölüm, vakaların yaklaşık %75'inde 48-72 saat içerisinde gerçekleşir. Enfeksiyonun prelinik evresinde, atların burun sürüntülerinde, oral ve burun yolları ile HeV'e maruz kaldıktan iki gün kadar kısa bir süre sonra viral genetik materyale rastlanılabilir (Marsh ve ark., 2008). Burun salgılarındaki gen kopya sayıları, kuluçka süresi boyunca ve enfeksiyonun klinik aşamasına, üst solunum yolu veya nazofarenkste lokal replikasyon ile tutarlı olarak sürekli artar. Viremi, ateşin başlamasıyla hızlanır ve kısa süre sonra viral genom oral salgılardan ve idrardan da tespit edilebilir (Marsh ve ark., 2008).

#### **4. Makroskobik ve Mikroskobik Bulgular**

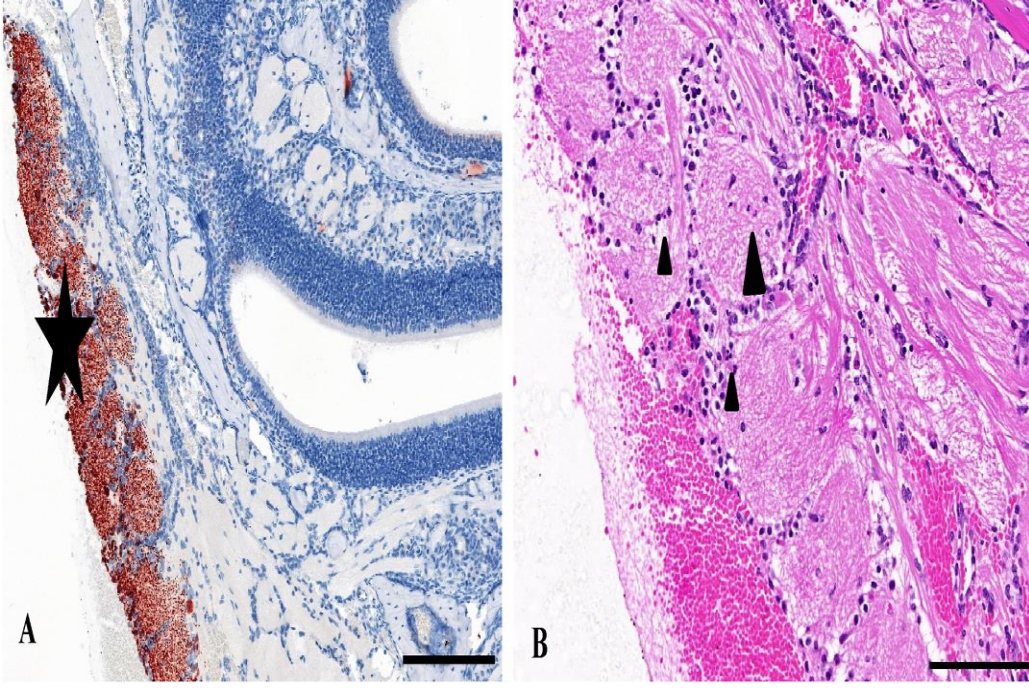
HeV ile enfekte olan atlar genellikle patognomonik belirti göstermeyen değişken klinik belirtiler gösteren akut spesifik olmayan bir hastalığa sahiptir. Klinik belirtiler üç kategoriye ayrılabilir (1) solunum: köpüklü bir burun akıntısı olsun veya olmasın taşipne; (2) nörolojik: ataksi, baş eğme, daire çizmeler, nöbetler (3) diğer: kolik, depresyon, ateş, taşikardi ve huzursuzluktur (Yuen ve ark., 2021). HeV ile enfekte atlarda bazen facial ödem, ataksi, bol köpüklü burun akıntısı eşlik eden akut, ateşli solunum yolu hastalığı gelişir (Hooper ve ark., 1996). Ölümler incelendiğinde fazla bir patolojik veri mevcut değildir ve çoğu bulgu deneysel çalışmalardan kaydedilmiştir. Perakut olguların post mortem muayenesinde anormallik tespit edilmemiştir. Akut olarak etkilenen hayvanlarda post mortem lezyonları pulmoner ödem, tıkanıklık ve konsolidasyon, hava yollarında kanla kaplı köpük (Murray ve ark., 1995), subpleural kanama (Marsh ve ark., 2008), karın içi lenf düğümlerinin tıkanıklığı (Williamson ve ark., 1998) ve genişlemiş, ödemli submandibular, sternal ve bronş lenf düğümleri olarak belirlenmiş (Marsh ve ark., 2008).



Şekil 3. Hendra virüsü ile enfekte olmuş köpeğin böbreği, belirgin vaskülitis (Kirkland ve ark., 2013).

Virüs taze karkastan, özellikle akciğer, böbrek ve lenfoid dokulardan, beyin ve omurilikten, beyin omurilik sıvısından, meninkslerden, üst solunum yollarından, kalp ve böbrek üstü bezinden de izole edilebilir. Hem nörolojik hem de solunum belirtileri içerisinde solunum yolu hastalığı olmasına rağmen, sinirsel bulgular 1994'teki orijinal salgından bu yana atlarda HeV enfeksiyonunun bir özelliği olmuştur (Rogers ve ark.,1996). Atların hem doğal hem de deneysel HeV enfeksiyonunda mikroskopik lezyonlarda akciğer, beyin, lenfoid dokular, böbrek, burun mukozası, böbrek üstü bezi, karaciğer, kalp ve gastrointestinal sistem ve dişi üreme sistemi dahil olmak üzere çok çeşitli dokularda kan damarlarını etkileyen vaskülitis tespit edilmiştir. Nekrotizan lenfadenit aşırı derecede yaygındır, ayrıca belirgin fibrinöz alveolar eksudat ile yaygın nekrotizan alveolitis de dahil olmak üzere geniş akciğer tutulumu yaygındır (Middleton ve ark., 2014). HeV enfekte bir köpeğin böbrek dokusu incelendiğinde belirgin vaskülitis tablosuyla karşılaşmıştır (Kirkland ve ark., 2013). Encefalit bulguları gösteren fareler üzerinde yapılan immünohistokimyasal boyamalarda yaygın HeV antijenine rastlanılmıştır (Edwards ve ark., 2023).





Şekil 4. A) Encefalit bulguları gösteren farede HeV antijenininimmünohistokimyasal görüntüsü  
B) Encefalit bulguları gösteren farede HeV antijenini hemotoksilen-eozin boyama ile görüntüsü (Edwards ve ark., 2023).

## 5. Teşhis

Hendra virüs tanısı, laboratuvara gönderilen sürüntü ve kan örnekleri ile matris ve nükleoprotein genine özgü Real-time RT-PCR testi kullanılarak yapılabilmektedir (Smith ve ark., 2001; OIE, 2008; Feldman ve ark., 2009). Antikorların tespitinde ELISA (Enzim Bağlı İmmünosorbent Test) ve serum nötralizasyon testleri kullanılmaktadır (Bossart ve ark., 2005). İmmünohistokimya HeV tespitinde en faydalı ve güvenilir yöntemlerden biridir (Hooper ve ark., 1996).

## 6. Koruma ve Kontrol

HeV yayılma olaylarını önlemek amacıyla atların meyve yarasalarına maruz kalmasını engellemek gerekmektedir. Bunlar, atların yalnızca kapalı mekanlarda barındırılmasını veya en azından yem depolarının ve su teknelerinin örtü altına ve yarasaların beslendiği veya tünediği alanlardan uzağa yerleştirilmesini içerebilir. En azından mülk üzerinde yarasaları çeken çiçekli ve meyve veren ağaçlar tespit edilmeli ve atlar bu otlaklardan uzaklaştırılmalıdır (XueliWang ve ark., 2023). EquivacHeV aşısı, Zoetis Avustralya tarafından üretilmiş olan, rekombinant HeV çözülebilir özellikte glikoprotein(G) ve tiyomersal (adjuvan) içeren alt birim bazlı aşıdır (Bossart ve ark., 2005; Middleton, 2014). İnsan kullanımına yönelik onaylanmış bir HeV veya NiV antiviral terapötik veya aşı mevcut değildir (Broder, 2012).

## 7. Sonuç

HeVenfeksiyonunun yakın zamanda laboratuvar koşulları dışında evcil hayvanda ve Avustralya'daki çeşitli türdeki *Pteropidspp.* (meyveyarasaları) üzerinde tanımlanması, bu virüsün hem kırsalda hem de kent popülasyonunda daha fazla morbidite ve mortaliteye neden olma potansiyelini ortaya koymaktadır. HeV'nin patogenezi, teşhisine ve tedavisine yönelik devam etmekte olan bilimsel çalışmalar, hem at hem de insan aşılarının geliştirilmesi meyve yarasaları kaynaklı zoonotik hastalıkların kontrolü için önem arz etmektedir (Mahalingam ve ark., 2012).

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Araştırmacı Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

## Kaynakça

- Bishop KA., Stantchev TS., Hickey AC., Khetawats D., Bossart KN., Krasnoperov V., Gill P., Feng YR., Bonaparte MI., Dimitrov AS., Bossart KN., Crameri G., Mungall BA., Bishop KA., Choudhry V., Dimitrov DS., Wang LF., Eaton BT., Broder CC. Ephrin-B2 ligand is a function all receptor for Hendra virüs and Nipahvirus. Proc. Natl. Acad. Sci. 2005; 102(30): 10652-10657.
- Bossart KN., Broder CC. Paramyxovirusentry. In. S. Pöhlmannand G. Simmons (ed), Viral entry host cells in press. Landes Bioscience, 2007.
- Bossart K., Crameri G., Dimitrov A., Mungall BA., Feng Y. Patch Jr. Receptor binding of Hendra virüs by a soluble G glycoprotein, fusion inhibition and induction of cross-reactive neutralizing antibodies. J. Virol. 2005; 79(11): 6690-6702.
- Broder CC. Henipavirus outbreaks to antivirals: The current status of potential therapeutics. Curr. Opin Virol. 2012; 2(2):176-187.
- Calain P., Roux L. The rule of six a basic feature for efficient replication of Sendai virüs defective interfering RNA. J. Virol. 1993; 67: 4822-4830.
- Chua KB., Bellini WJ., Rota PA., Harcourt BH., Tamin A., Lam SK., Ksiazek TG., Rollin PE., Zaki SR., Shieh WJ., Goldsmith CS., Gubler DJ., Roehrig JT., Eaton B., Gould AR., Olson J., Field HE., Daniels P., Ling AE., Peters CJ., Anderson LJ., Mahy BWJ. Nipahvirus: A recently emergent deadly paramyxovirus. Science 2000; 288: 1432-1435.
- Drescher U. Eph. Family function from an evolutionary perspective. Curr. Opin. Genet. Dev. 2002; 12: 397-402.1.
- Edwards SJ. Rowe B., Reid T., Tachedjian M., Caruso S., Blasdel K., Watanabe S., Bergfeld J., Marh GA. Henipavirus-induced neuropathogenesis in mice. Virology 2023; 587: 109856.

- Eoton BT., Broder CC., Wang LF. Hendra and Nipah viruses: pathogenesis and therapeutics. *Curr. Medd.* 2005; 5: 805-816.
- Feldman KS., Foord A., Heine HG., Smith IL., Boyd V., Marsh GA. Design and evaluation of consensus PCR assays for henipaviruses. *J. Virol. Methods.* 2009; 161: 52-57.
- Heroult M., Schaffner F., Augustin HG. Ephreceptor and ephrin ligand-mediated interactions during angiogenesis and tumor progression. *Exp. Cell Res.* 2006; 312:642-650.
- Hooper PT., Gould AR., Russel GM., Kattenbelt JA., Mitchell G. The retrospective diagnosis of a second outbreak of equine morbilli virus infections. *Aust. Vet. J.* 1996; 74(3): 244-245.
- Kirkland PD., Gabor M., Poe I., Neale K., Chaffey K., Finlaison DS. Hendra virus infection in dog, Australia, 2013. *Emerg. Infect. Dis.* 2015; 21(12): 2182-2185.
- Khusro A., Aarti C., Pliego AB., Cipriano-Salazar M. Hendra virus infection in horses: A review on emerging mystery paramyxovirus. *J Equine Vet Sci.* 2020; 91: 103149.
- Mahalingham S., Herero LJ., Playford EG., Spann K., Herring B., Rolph MS., Middleton D., Mc. Call B., Field H., Wang LF. Hendraviruses: an emerging paramyxovirus in Australia. *Lancet. Infect. Dis.* 2012; 12(10): 799-807.
- Marsh GA., Haining J., Hancock TJ., Robinson R., Foord AJ., Barr JA. Experimental infection of horse with hendraviruses. *Australia, Horse, 2008, Redlands. Emerg. Infect. Dis.* 2011; 17: 2232-2238.
- Middleton D. Hendraviruses. *Vet. Clin. North Am Equine Pract.* 2014; 30(3): 579-589.
- Middleton D., Pallister J., Klein R., Feng YR., Haining J., Arkinstall R., Frazer L., Huang JA., Edwards N., Wareing M., Elhay M., Hashmi Z., Bingham J., Yamada M., Johnson D., White J., Foord A., Heine HG., Marsh GA., Broder CC., Wang LF. Hendraviruses vaccine, a one health approach to protecting horse, human, and environmental health. *Emerg. Infect. Dis.* 2014; 20(3): 372-379.
- Murray K., Selleck P., Hooper P. A morbilli virus that caused fatal disease in horse and humans. *Science* 1995; 268: 94-97.
- Negrete OA., Levroney EL., Aguilar HC., Bertolotti-Ciarlet A., Nazarian R., Tajyar S., Lee B. Ephrin B2 is the entry receptor for Nipahvirus, an emergent deadly paramyxovirus. *Nature* 2005; 436: 401-405.
- Rogers RJ., Douglas IC., Baldock FC., Glaville RJ., Seppanen KT., Gleeson LJ. Investigation of a second focus equine morbilli virus infection in coastal Queensland. *Aust. J.* 1996; 74(3): 243-244.
- Smith IL., Halpin K., Warrilow D., Smith GA. Development of a fluorogenic RT-PCR assay (Taqman) for the detection of Hendra virus. *J. Virol Methods.* 2001; 98(1): 33-40.
- St Georgiev V. Paramyxoviridae: Nipah virus and Hendra virus. *National Institute of Allergy and Infectious Diseases, NIH. 2: Impact on Global Health.* St Georgiev V. Totowa, NJ: Humana; 2009; 143-150.



- Wang LF., Yu M., Hansson E., Pritchard LI., Shiell B., Michalski WP., Eaton BT. The exceptionally large genome of Hendravirus: support for creation of a new genus within the family paramyxoviridae. *J. Virol.* 2000; 74(21): 9972-9979.
- Williamson MM., Hooper PT., Selleck PW., Gleeson LJ., Daniels PW., Westbury HA., Murray PK. Transmission studies of Hendravirus in fruitbats, horses and cats. *Aust. Vet. J.* 1998; 76: 813-818.
- Williamson KM., Wheeler S., Kerr J., Bennett J., Freeman P., Kohlhagen J., Peel AJ., Eby P., Merritt T., Housen T., Dalton C., Durrheim DN. Bat One Health field team. Hendra in the Hunter Valley. *One health (Amsterdam, Netherlands)*. 2020; 10: 100162.
- World Organisation for Animal Health (OIE). Nipah and Hendra virus disease. *Manual of Diagnostic Test and Vaccines for Terrestrial Animals*. 2018; 526-543.
- Viralzone. [https://viralzone.expasy.org/by\\_species/556](https://viralzone.expasy.org/by_species/556). 2024; Erişim Tarihi:09.07.2024.
- Yuen KY., Fraser NS., Henning J. Hendravirus: Epidemiology dynamics in relation to climate change, diagnostic test and control measures. *OneHealth*. 2021; 12: 100207.
- Xueli Wang., Jessica C Wise., Allison J., Stewart. Hendra Virus: An update on diagnosis, vaccination, and biosecurity protocols for horses. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 2023; 39(1): 89-98.

## Korozyon Araştırmalarında DFT Yaklaşımı

Goncagül AKSARAY<sup>1\*</sup>, Mehmet Erman MERT<sup>2</sup>, Başak DOĞRU MERT<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Cukurova University, Faculty of Art and Sciences, Department of Chemistry, 01330, Adana, Türkiye

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Advanced Technology Research and Application Center, 01250, Adana, Türkiye

<sup>3</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Engineering Faculty, Energy Systems Engineering Department, 01250, Adana, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-4338-6049>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-0114-8707>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-2270-9032>

\*Corresponding author: [goncagulaksaray@gmail.com](mailto:goncagulaksaray@gmail.com)

### Derleme

#### Makale Tarihi:

Geliş tarihi: 05.06.2024

Kabul tarihi: 11.11.2024

Online Yayınlanma: 15.01.2025

#### Anahtar Kelimeler:

Korozyon  
İnhibisyon  
DFT

### ÖZ

Korozyon, çevresel kimyasal reaksiyonlarla malzemelerin bozulması nedeniyle çeşitli endüstrilerde önemli zorluklar doğurmaktadır. Bu çalışma, korozyon mekanizmalarının anlaşılmasında ve etkili korozyon inhibitörlerinin geliştirilmesinde Yoğunluk Fonksiyonel Teorisinin (DFT) önemini vurgulamıştır. Rol molekülleri, korozyon önleme performanslarını belirlemek amacıyla DFT analizi yoluyla araştırılan 1,2-dihidroksibenzen, m-guaiakol, kateşin, guaifenesin, çemen otu ve üzümdeki gallik asittir. Enerji aralığı ( $\Delta E$ ), mutlak elektronegatiflik ( $\chi$ ), sertlik ( $\eta$ ), yumuşaklık ( $\delta$ ) ve dipol momenti dahil olmak üzere temel parametreler, verimliliklerini araştırmak için analiz edildi. Kateşin, en düşük  $\Delta E$ 'si ile, yüksek inhibisyon performansına işaret eden gelişmiş elektron bağışlama yetenekleri sergiledi. Kateşin, en düşük  $\Delta E$ 'si ile, yüksek inhibisyon performansına işaret eden gelişmiş elektron verme yetenekleri sergiledi. Ek olarak, Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi bu bileşiklerin korozyona karşı koruma verimliliğini doğruladı. DFT'nin hesaplama talepleri ve doğru değişim-korelasyon fonksiyonlarına duyulan ihtiyaç gibi sınırlamalarına rağmen, hesaplama metodolojilerindeki ilerlemeler ve deneysel verilerle entegrasyon, tahmin gücünü artırabilir. Bu çalışma, korozyona dayanıklı malzemelerin tasarımına rehberlik etmede DFT'nin önemini vurgulamakta ve teorik modelleri geliştirmek ve tahminleri doğrulamak için disiplinler arası iş birliğine duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır.

## DFT Approach in Corrosion Research

### Reviews

#### Article History:

Received: 05.06.2024

Accepted: 11.11.2024

Published online: 15.01.2025

#### Keywords:

Corrosion  
Inhibition  
DFT

### ABSTRACT

Corrosion, degradation of materials due to environmental chemical reactions, poses significant challenges across various industries. This study emphasized the importance of Density Functional Theory (DFT) in understanding corrosion mechanisms and developing effective corrosion inhibitors. The role molecules were 1,2-dihydroxybenzene, m-guaiacol, catechin, guaifenesin, fenugreek and gallic acid in grape which were investigated via DFT analysis in order to determine their corrosion inhibition performance. Key parameters, including the energy gap ( $\Delta E$ ), absolute electronegativity ( $\chi$ ), hardness ( $\eta$ ), softness ( $\delta$ ), and dipole moment, were analyzed to investigate their efficiency. Catechin, with its lowest  $\Delta E$ , demonstrated enhanced electron-donating capabilities, indicating high inhibition performance. Additionally, electrochemical impedance spectroscopy confirmed corrosion protection efficiency for these compounds. Despite the limitations of DFT, such as

computational demands and the need for accurate exchange-correlation functionals, advancements in computational methodologies and integration with experimental data can enhance its predictive power. This study highlights the importance of DFT in guiding the design of corrosion-resistant materials and emphasizes the need for interdisciplinary collaboration to refine theoretical models and validate predictions.

---

**To Cite:** Aksaray G., Mert ME., Mert BD. Korozyon Araştırmalarında DFT Yaklaşımı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2025; 8(1): 472-489.

## 1. Introduction

Corrosion refers to the deterioration of materials, particularly metals, through chemical interactions with their surrounding environment (Rahal et al., 2024). This process generally occurs when metal surfaces react with corrosive agents like oxygen, moisture, acids, or salts, resulting in the formation of unwanted compounds such as oxides, hydroxides, or salts (Yüce et al., 2016; Palaniappan et al., 2019). Corrosion can occur through a variety of mechanisms, including chemical reactions, electrochemical processes, and physical degradation. Corrosion represents a common problem in numerous industries (Holla et al., 2024). In the aviation sector, for instance, aircraft components are routinely exposed to harsh environmental conditions, including humidity, salt, and elevated temperatures, which induce corrosion in structural materials like aluminum alloys. Similarly, in the automotive industry, road salt, moisture, and chemical pollutants accelerate the corrosion of vehicle parts. In the oil and gas industry, pipelines, storage tanks, and offshore platforms are particularly vulnerable to corrosion due to the corrosive nature of the transported fluids; if not adequately managed, this can result in expensive maintenance, repairs, and even catastrophic failures (Ma et al., 2020; Bobby et al., 2022; Edraki et al., 2024). In infrastructure, corrosion of steel reinforcement in concrete structures can compromise the integrity of bridges, buildings and highways, posing significant safety risks to building occupants and the public. In critical industries such as nuclear energy production and healthcare, corrosion-related failures can lead to serious consequences such as environmental pollution, loss of life and economic repercussions (Mert et al., 2014; Altunay and Kaya, 2017; Alfalah et al., 2023). Combating corrosion is essential not only to extend the lifespan and maintain the performance of materials, but also to ensure the safety and reliability of infrastructure and industrial operations. Understanding the mechanisms and factors that influence corrosion is crucial for developing effective prevention and mitigation strategies to combat the harmful effects of corrosion and ensure the longevity and durability of materials in various applications (Anadabe et al., 2020). Corrosion processes represent a complex chain of events mediated by chemical reactions and electrochemical events. Chemical reactions involve the interaction of surface metal atoms with surrounding environmental molecules, leading to chemical transformations (Emmanuel, 2024). When a metal surface comes into contact with water and oxygen, it can trigger chemical reactions that result in the formation of metal oxides and hydroxides. These reactions contribute to the formation of a passive oxide layer on the metal surface and can initiate further corrosion processes. Electrochemical events occur at the metal-surface-electrolyte interface. These events are redox reactions that occur on the metal surface, involving the transfer of electrons between electrodes (Mert et al., 2014; Sundaram et al., 2021). Oxygen molecules present on the metal surface can react with electrons from metal ions in the electrolyte

to form oxygen ions, thereby accelerating corrosion on the metal surface. The mechanisms of material degradation involve a range of chemical and physical changes occurring on the metal surface, influencing the progression of corrosion. For example, local corrosion mechanisms such as pitting corrosion can lead to the formation and deepening of micro-pits on the metal surface, significantly reducing the durability of the material. Local differences in corrosion rates between anodic and cathodic zones further add to the complexity of corrosion processes and further complicate material degradation mechanisms (Farahati et al., 2020).

## **2. Material and Method**

### **2.1. Applications of DFT in Corrosion Studies**

Density Functional Theory (DFT) is widely used to understand corrosion mechanisms because it provides atomic-level information about the complex nature of chemical reactions and surface interactions that govern corrosion processes. DFT effectively predicts the energetics and kinetics of corrosion-related events, allowing researchers to uncover the fundamental principles that drive corrosion processes, such as metal dissolution, adsorption of corrosive species, and formation of corrosion products (Ansari et al., 2013; Döşlü et al., 2018; Bouhouche et al., 2024). DFT calculations allow us to identify the basic reaction pathways, intermediate species, and surface structures involved in corrosion processes, as well as draw conclusions about the mechanisms that cause material degradation. These data on corrosion mechanisms can be used to build targeted corrosion prevention and mitigation techniques (Adil Mahraz et al., 2024).

DFT enables the prediction of various physical and chemical properties through quantum mechanical approaches to accurately describe the electronic structure of materials. This approach, based on the Hohenberg-Kohn theorem (1964) and Kohn-Sham equations (1965), allows efficient calculation of electronic energies and forces and provides the basis for the study of a variety of phenomena, from molecular bonding and chemical reactions to material properties such as electronic band structures, magnetic behavior and physical properties (Rindt et al., 2015). Additionally, DFT calculations can provide valuable information for the design of next-generation corrosion-resistant materials by elucidating the mechanisms by which specific alloying elements, surface treatments, or protective coatings reduce corrosion. The integration of DFT with experimental techniques enables a comprehensive approach to materials design, where theoretical predictions can be verified and improved through experimental validation.

The first step to grasping DFT is to have a solid understanding of the basic ideas of quantum mechanics which form the basis of its calculations. Quantum mechanics elucidates the behavior of particles at atomic and subatomic scales, furnishing a theoretical framework for comprehending the electronic structures of atoms and molecules. At the core of quantum mechanics lies the principle of wave-particle duality, asserting that particles like electrons exhibit both wave-like and particle-like characteristics. This duality finds expression in Schrödinger's wave equation, delineating the wavefunction of a particle

and providing probabilistic insights into its position, momentum, and energy. In the context of DFT, the electronic configuration of atoms and molecules is delineated by the electronic density—a foundational measure representing the likelihood of finding an electron at a specific point in space. According to the Hohenberg-Kohn theorem, a system's ground-state energy is uniquely determined by its electronic density, forming the basis for DFT's development. The Kohn-Sham equations, derived from this theorem, serve as the cornerstone of DFT computations, facilitating the determination of a system's electronic energy through the resolution of a set of self-consistent equations (Li et al., 2021; Wang et al., 2024).

DFT computations entail approximating the exchange-correlation energy, which accommodates electron-electron interactions beyond the mean-field approximation of Hartree-Fock theory. Various exchange-correlation functionals have been formulated to approximate this energy term, each with its own merits and demerits. Commonly employed functionals encompass the local density approximation (LDA), generalized gradient approximation (GGA), and hybrid functionals amalgamating a fraction of Hartree-Fock exchange. These functionals enable DFT computations to accurately depict the electronic structures of atoms and molecules across diverse systems, from simple diatomic molecules to intricate materials (Gholamhosseinzadeh et al., 2019). Overall, quantum mechanics concepts provide a theoretical basis for DFT computations, allowing researchers to investigate the electronic structures and characteristics of materials with high precision and efficiency.

The Kohn-Sham equations constitute the central mathematical framework of DFT, providing a methodology to ascertain a system's electronic density. Essentially, the Kohn-Sham formalism represents a reformulation of the many-body Schrödinger equation elucidating the behavior of a system of interacting electrons. These equations disassemble the system's total electronic energy into distinct contributions from non-interacting electrons traversing an effective potential. This effective potential encompasses both the external potential attributable to the nuclei and any supplementary potentials stemming from electron-electron interactions. The self-consistent field (SCF) technique used in DFT computations systematically solves the Kohn-Sham equations to determine the system's electronic density (Wang et al., 2024). The process commences with an initial estimation of the electronic density, typically derived from a rudimentary model or prior computation. Subsequently, the Kohn-Sham equations are self-consistently solved to procure a new electronic density, which in turn updates the effective potential. This iterative procedure persists until the electronic density converges to a stable solution, signifying that the calculated electronic structure accurately mirrors the system's ground state. Through this iterative self-consistent field approach, DFT computations can efficiently and precisely determine the electronic density and associated properties of an extensive array of materials and molecular systems. DFT computations rely on a suite of approximations and methodologies to render them computationally tractable for practical applications. The exchange-correlation functional is a key approximation that extends Hartree-Fock theory's mean-field approximation to electron-electron interactions (Mohammed et al., 2024). Various exchange-correlation functionals, such as the local

density approximation (LDA) and generalized gradient approximation (GGA), have been devised to approximate this energy term. These functionals simplify the exact exchange-correlation energy, facilitating efficient DFT computations while still furnishing accurate depictions of electronic structure and properties. Another critical approximation in DFT computations is spatial discretization, entailing the division of the system into a finite grid or set of basis functions. This discretization enables the efficient numerical solution of the Kohn-Sham equations, as it converts the continuous problem of solving differential equations into a discrete set of algebraic equations. Diverse numerical techniques, including plane-wave basis sets, Gaussian basis sets, and grid-based methods, can be employed for this purpose, each harboring its own advantages and limitations. Additionally, the selection of basis set and grid parameters can significantly influence the accuracy and efficiency of DFT computations, necessitating meticulous deliberation and optimization. Parallelization and algorithmic optimizations play an important role in rendering DFT computations computationally viable for large-scale systems. Parallel computing techniques, such as parallelization across multiple processors or nodes, enable DFT computations to be executed concurrently, substantially reducing computation times for intricate systems. Furthermore, algorithmic optimizations, encompassing efficient matrix diagonalization algorithms and iterative solution methods, aid in enhancing the scalability and efficiency of DFT computations. These optimizations take advantage of advances in computer hardware and software to enable the modeling of increasingly large and complex systems using DFT (Čertík et al., 2024; Feng et al., 2024; Martínez et al., 2024).

The B3LYP 6-311G(d,p) methodology, a widely employed DFT approach, is highly esteemed for its precision in characterizing the electronic structure and attributes of molecules and materials (Ugi, 2024). This method amalgamates a hybrid exchange-correlation functional with a basis set renowned for its adaptability and dependability, rendering it apt for an extensive array of applications across chemistry, physics, and materials science. Within computational chemistry, B3LYP 6-311G (d,p) finds frequent utilization in scrutinizing molecular systems, encompassing inquiries into molecular geometries, vibrational frequencies, electronic spectra, and reaction mechanisms. Its convenient treatment of exchange and correlation phenomena renders it adept at projecting precise electronic energies and geometries of molecules, thus furnishing invaluable insights into their chemical conduct. Furthermore, B3LYP 6-311G (d,p) holds significant utility in the domain of corrosion inhibition research, which endeavors to alleviate the deleterious consequences of corrosion on metal surfaces. Corrosion inhibitors, chemical compounds introduced into corrosive environments, exhibit efficacy in curtailing corrosion rates by fostering the formation of a protective layer atop metal surfaces. A thorough understanding of the molecular interactions between corrosion inhibitors and metal surfaces is critical for the development and improvement of effective inhibitor compounds (Thakur et al., 2024). DFT, especially techniques like B3LYP 6-311G(d,p), furnishes a potent tool for delving into the adsorption behavior of corrosion inhibitors on metal surfaces at a molecular level (Al-Nami, 2020). By simulating the electronic structure and energetics of inhibitor-metal interactions, researchers can elucidate the mechanisms underpinning

corrosion inhibition and refine their efficacy. This computational paradigm complements experimental methodologies by furnishing intricate insights into the fundamental processes governing corrosion inhibition. For example, researchers leverage B3LYP 6-311G(d,p) computations to prognosticate the adsorption energies, geometries, and electronic characteristics of inhibitor molecules on metal surfaces (Narang et al., 2023). Through comparisons between computational outcomes and experimental findings, they can authenticate theoretical constructs and gain deeper insights into the structure-activity relationships dictating inhibitor efficacy. Furthermore, DFT computations serve in identifying key chemical features that contribute to inhibitor efficiency, hence directing the scientific design of new corrosion inhibitors with increased properties. In essence, B3LYP 6-311G (d,p) appears as an important computational tool for understanding corrosion inhibition mechanisms and developing effective inhibitor chemicals (Kumar et al., 2021). By harnessing the predictive capabilities of DFT, researchers can expedite the exploration and refinement of corrosion inhibitors possessing superior performance and resilience, thereby catalyzing advancements in materials science and engineering.

### **3. Results and Discussion**

#### **3.1. Restrictions of DFT**

While DFT offers important insights into corrosion processes, several restrictions temper its application in this field. Computational demands limit the size of systems that can be effectively studied, constraining its utility for large-scale corrosion scenarios. Additionally, the accuracy of DFT calculations hinges on the selection of exchange-correlation functionals, which may struggle to capture certain aspects of corrosion, such as metal dissolution, with precision. Addressing solvation effects, inherent in electrolyte environments where corrosion occurs, poses another challenge, often necessitating computationally intensive methods (Mert et al., 2011). Moreover, the static nature of DFT calculations may overlook dynamic processes inherent in corrosion, such as ion diffusion and surface fluctuations. Describing surface reconstruction and defects accurately within the DFT framework requires sophisticated methodologies and careful consideration of surface structures. Furthermore, while DFT insights are invaluable, experimental validation remains essential, albeit challenging, particularly for complex corrosion processes. Despite these limitations, DFT remains a vital tool for understanding corrosion mechanisms and guiding the design of corrosion-resistant materials, especially when integrated with experimental and complementary computational approaches.

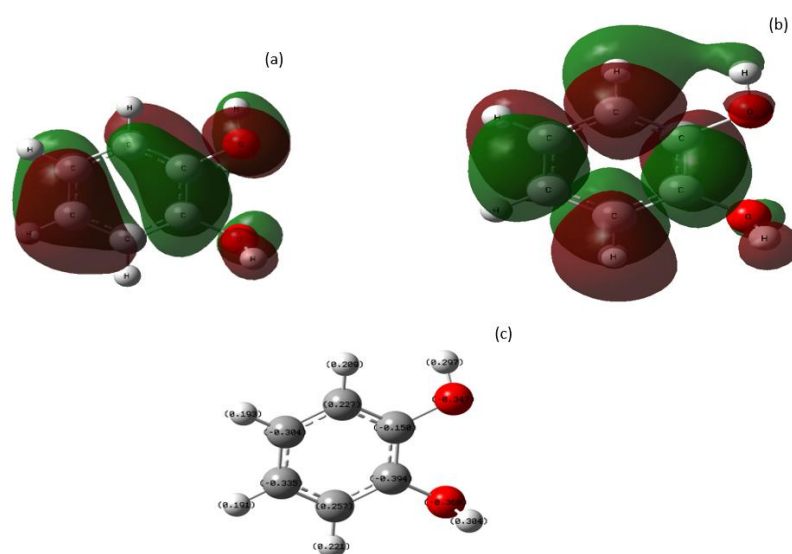
#### **3.2. Enhancing DFT Methodologies for Corrosion Studies**

To overcome the limitations of DFT in corrosion studies, several strategies can be employed. One approach involves advancing computational methodologies to enhance the efficiency and accuracy of DFT calculations for larger systems. This may entail the development of more sophisticated exchange-correlation functionals tailored specifically for corrosion processes, potentially incorporating empirical data or machine learning techniques to improve predictive capabilities (Sirivastava et al., 2017).

Additionally, efforts to incorporate solvent effects into DFT simulations through continuum solvent models or explicit solvation treatments could better mimic realistic electrolyte environments and their impact on corrosion behavior. Furthermore, advancements in computational hardware and parallelization techniques can help alleviate the computational burden associated with large-scale corrosion simulations, enabling the study of more complex systems over longer timescales. Dynamic aspects of corrosion phenomena, such as ion diffusion and surface kinetics, could be addressed through the integration of DFT with molecular dynamics or kinetic Monte Carlo methods, allowing for a more comprehensive understanding of corrosion processes. Additionally, the development of multiscale modeling approaches that seamlessly integrate atomistic DFT simulations with mesoscale or continuum-level models could bridge the gap between molecular-scale insights and macroscopic corrosion behavior. Experimentally validated computational models and databases specifically tailored for corrosion studies could serve as valuable resources for benchmarking and refining DFT methodologies. Collaborative efforts between experimentalists and computational scientists are essential for validating DFT predictions against experimental data, identifying discrepancies, and refining theoretical models to better capture the intricacies of corrosion processes (Manssouri et al., 2021). By addressing these challenges and adopting a multidisciplinary approach, researchers can enhance the predictive power of DFT in corrosion studies and accelerate the development of corrosion-resistant materials and coatings.

### 3.3. Integrating Experimental Data with DFT for Corrosion Studies

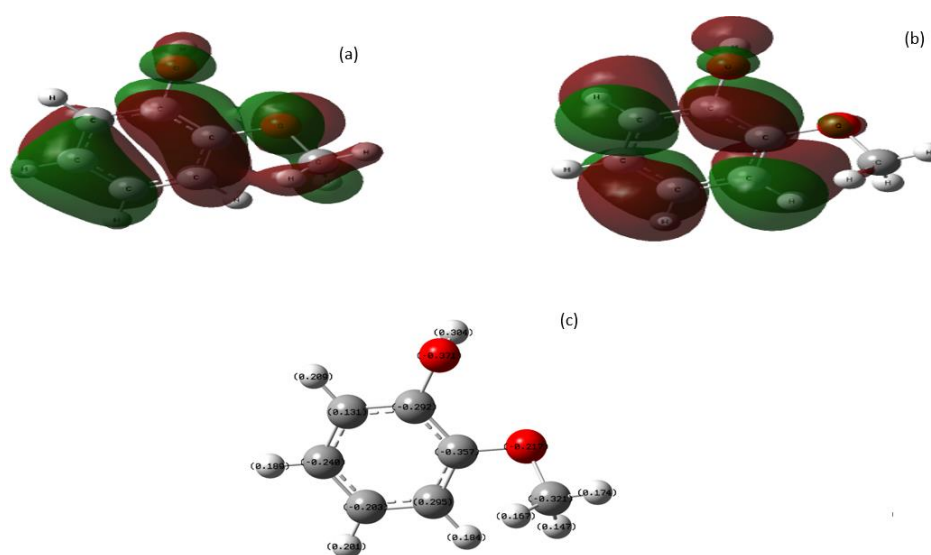
According to obtained previous studies, the quantum theoretical data and experimental findings were combined and summarized for some aromatic compounds (Aksaray et al., 2023).



**Figure 1.** The HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) (a), LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) (b) and Mulliken charges (c) of 1,2-Dihydroxybenzene

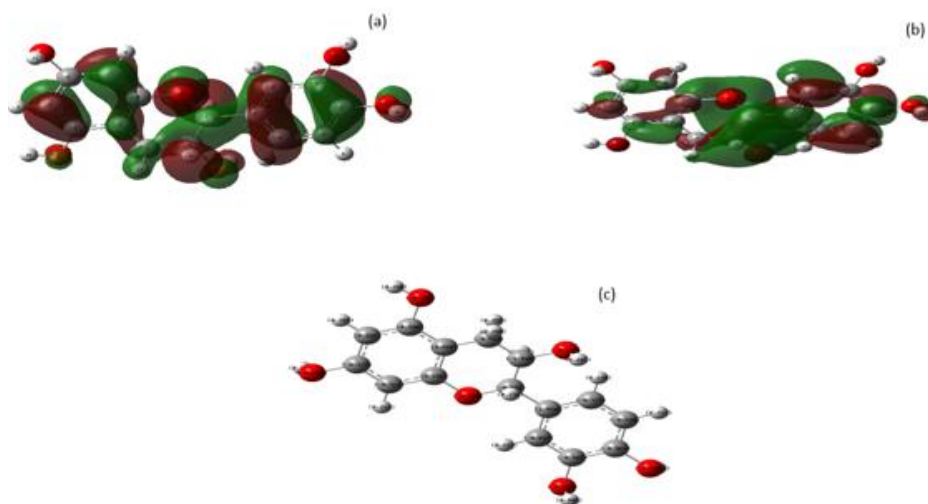


In the theoretical investigation outlined in this study, a quantum theoretical approach was employed to conduct structural analyses of all molecules, yielding critical insights into their electronic properties. Figures 1-3 depict essential parameters, including the highest occupied molecular orbital ( $E_{\text{HOMO}}$ ), energy of the lowest unoccupied molecular orbital ( $E_{\text{LUMO}}$ ), energy gap ( $\Delta E$ ) between LUMO and HOMO, and Mulliken charges on the backbone atoms. These analyses are fundamental in understanding the inhibition performance of inhibitor molecules, with particular emphasis on the gap between HOMO and LUMO energy ( $\Delta E$ ), which plays a significant role in stability. Additionally, absolute electronegativity ( $\chi$ ), absolute hardness ( $\eta$ ), and absolute softness ( $\delta$ ) values were calculated, providing insights into the molecules' electronic structures and reactivity. The comparison of these parameters among the molecules reveals valuable information regarding their potential as corrosion inhibitors.



**Figure 2.** The HOMO (a), LUMO (b) and Mulliken charges (c) of m-Guaiacol

For instance, molecules with lower  $\Delta E$  values, such as catechin, exhibit enhanced electron-donating capabilities, suggesting their potential as effective corrosion inhibitors. Moreover, the minimum  $\chi$  and  $\eta$  values observed for catechin further support its potential efficacy as a corrosion inhibitor. The analysis also highlights the importance of dipole moment, with catechin exhibiting the highest dipole moment among the molecules studied, indicative of its potential for enhanced adsorption onto metal surfaces. Overall, the integration of experimental data with DFT calculations provides valuable insights into the electronic properties and corrosion inhibition potential of molecules, contributing to the development of effective corrosion mitigation strategies in materials science and engineering.



**Figure 3.** The HOMO (a), LUMO (b) and Mulliken charges (c) of Catechin

**Table 1.** The DFT parameters of all molecules and inhibition efficiency (IE) for 168h

Molecules	$E_{HOMO}$ (eV)	$E_{LUMO}$ (eV)	$\Delta E$ (eV)	$\chi$ (eV)	$\eta$ (eV)	$\delta$ (eV)	Dipole moment (Debye)	IE (%)
1,2-Dihydroxybenzene	-6.781	-0.777	6.003	3.779	3.002	0.333	2.926	
m-Guaiacol	-6.679	-0.739	5.941	3.709	2.970	0.337	2.814	99.1
Catechin	-5.843	-0.750	5.093	3.296	2.546	0.393	3.944	
Guaifenesin	-6.035	-0.525	5.510	3.280	2.755	0.363	4.228	94.7

In Table 1, the parameters were calculated according to Equations (1)-(5).

$$A = -E_{LUMO} \quad (1)$$

$$I = -E_{HOMO} \quad (2)$$

$$\chi = I + A/2 \quad (3)$$

$$\eta = I - A/2 \quad (4)$$

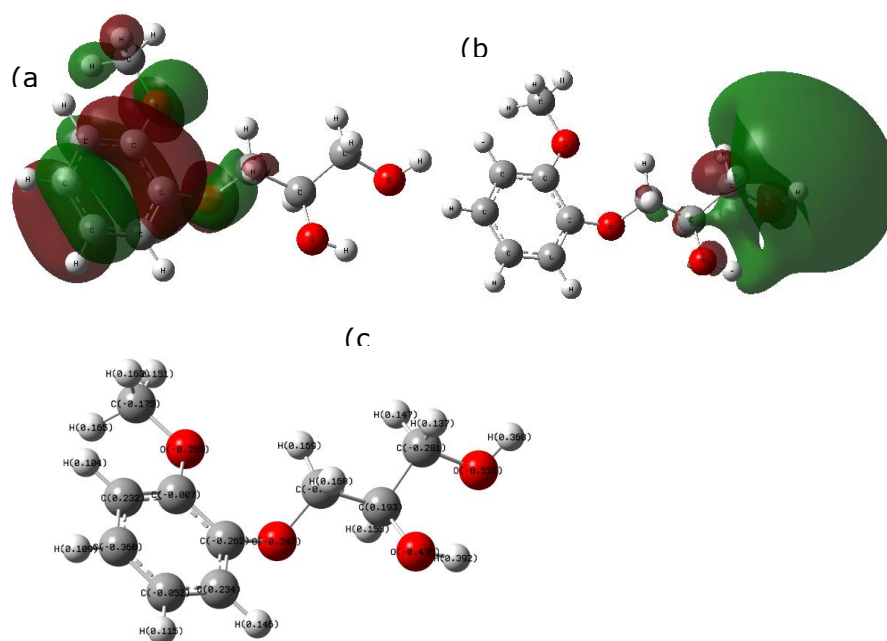
$$\delta = 1/\eta \quad (5)$$

According to the findings presented in Table 1, the molecule catechin exhibits the lowest energy gap ( $\Delta E$ ) among the studied compounds, suggesting a higher propensity to donate electrons. This characteristic indicates its potential as an electron donor to the metal surface, thus acting as a corrosion inhibitor. Such molecules, often referred to as “n-donor” or “electron-rich” inhibitors, can form protective coatings on metal surfaces by donating electrons, thereby slowing down oxidation and corrosion processes. Additionally, in DFT analysis, parameters such as absolute electronegativity ( $\chi$ ), absolute hardness ( $\eta$ ), and absolute softness ( $\delta$ ) offer valuable insights into a molecule's corrosion inhibition properties. Lower values of  $\chi$  and  $\eta$ , as observed for catechin, are indicative of increased inhibition effectiveness, as these molecules tend to behave as soft bases interacting with the soft acid metal surface. Furthermore, the dipole moment, another significant parameter, correlates with corrosion inhibition efficiency. Molecules with larger dipole moments, such as catechin, possess greater polarity and can interact more effectively with metal surface charges, thereby enhancing their adsorption onto

the metal surface. Thus, the maximum dipole moment observed for catechin underscores its potential as an effective corrosion inhibitor.

The electrochemical impedance spectroscopy data were investigated over a 168-hour immersion period in 0.5 M HCl, both with and without the presence of the studied molecules (as listed in Table 1). To conduct a thorough analysis and establish correlations between molecular structure and electrochemical performance, the experimental findings were juxtaposed with quantum theoretical properties. The results indicated a corrosion protection efficiency of approximately 95-99% after 48 and 168 hours, respectively.

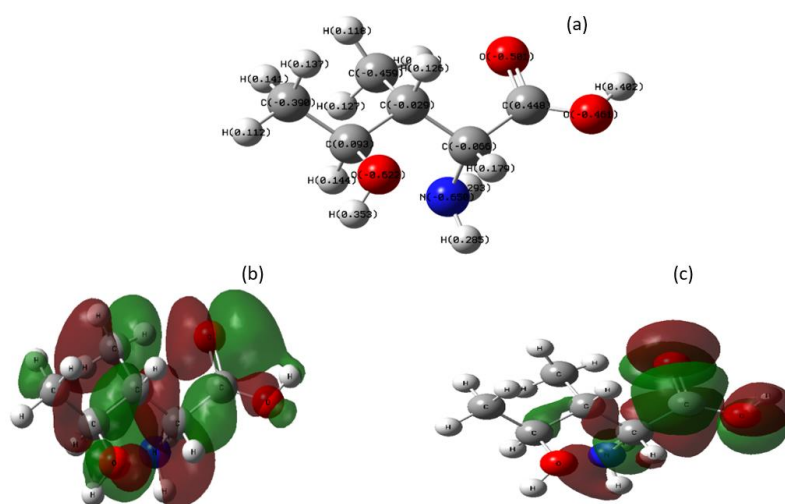
In another study (Aksaray et al., 2023), for Guaifenesin, the inhibition efficiency was observed to be 76.61% after 1 hour, 81.9% after 24 hours, 88.26% after 48 hours, 88.57% after 96 hours, and 94.66% after 168 hours of exposure.



**Figure 4.** The HOMO (a), LUMO (b) and Mulliken charges (c) of Guaifenesin

Figure 4 depicted that a significant HOMO is present on the phenyl group and a substantial LUMO is observed on the alcohol group, enhancing the molecules' adsorption capacity. The calculated HOMO and LUMO values were -6.035 eV and -0.525 eV, respectively, aligning with literature findings. Notably, the determined energy gap ( $\Delta E$ ) was approximately 5.51 eV, consistent with reported values for Tiazofurin drug, Linagliptin, and chemically modified expired Dapsone drug, which were approximately 4 eV, 2.774 eV, and 3.39-3.36 eV, respectively (Singh et al., 2019; Pour-Ali and Hejazi, 2022; Iroha et al., 2023) The calculated dipole moment was 4.228 Debye, suggesting potential enhancement in inhibition due to dipole-dipole interactions between molecules and metal surfaces. Mulliken charges on oxygen atoms were found to be -0.521, -0.476, -0.355, and -0.347 atomic units,

indicating that molecule adsorption likely occurs predominantly from these regions onto the positively charged mild steel surface in acidic media.

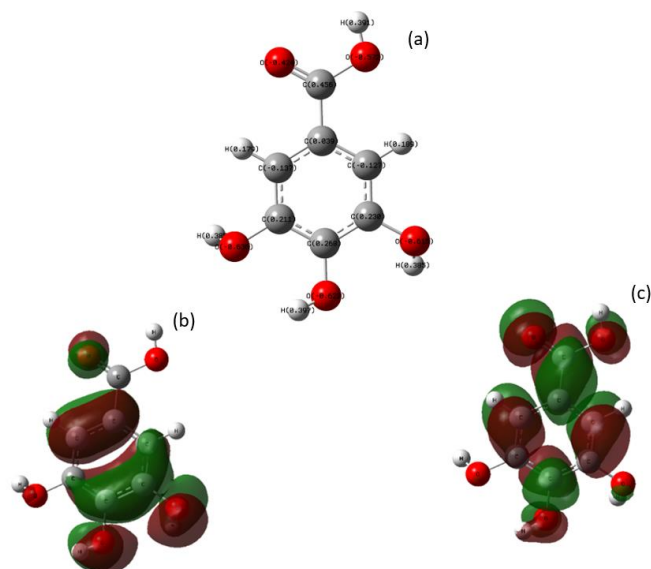


**Figure 5.** The Mulliken charges (a); HOMO (b) and LUMO (c) of active ingredient of Fenugreek

Figure 5 illustrated that large HOMO on the whole molecule and large LUMO on the carboxylic acid which improved molecules' capacity for adsorption. The obtained HOMO and LUMO values were -6.34 and -1.22 eV, respectively. The dipole moment was 3.3096 Debye. Due to dipole-dipole interactions between molecules and metal surfaces, the increased dipole moment may result in an increase in inhibition (Aksaray et al., 2023).

Figure 6 illustrated that large HOMO on the phenyl group and large LUMO on the alcohol group improved molecules' capacity for adsorption. The obtained HOMO and LUMO values were -6.71 and -1.70 eV, respectively. The dipole moment was 2.3579 Debye. Due to dipole-dipole interactions between molecules and metal surfaces, the increased dipole moment may result in an increase in inhibition (Aksaray et al., 2023).

Table 2 gives the DFT parameters of some molecules in the literature.



**Figure 6.** The Mulliken charges (a); HOMO (b) and LUMO (c) of gallic acid in grape

**Table 2.** The DFT parameters of some molecules in literature

Molecules	$E_{\text{HOMO}}$ (eV)	$E_{\text{LUMO}}$ (eV)	$\Delta E$ (eV)	$\chi$ (eV)	$\eta$ (eV)	$\delta$ (eV)	Dipole moment (Debye)	References
Imidazole	-6.560	-0.510	6.050	-	-	-	-	Saraswat et al. (2020)
Purine	-7.250	-1.700	5.500	-	-	-	-	
Adenine	-6.340	-0.990	5.350	-	-	-	-	
BAP	-6.360	-1.190	5.170	-	-	-	-	
PASP	-5.467	-1.756	3.891	3.702	1.946	0.514	3.521	Chen et al. (2021)
THA-OCH3	-5.990	-1.470	4.520	3.730	2.260	0.442	3.651	Verma et al. (2021)
THA-H	-6.160	-1.660	4.500	3.910	2.250	0.444	3.651	
THA-Br	-6.320	-1.920	4.400	4.120	2.220	0.454	3.651	
TTA	-5.211	-0.807	4.404	3.009	2.220	0.451	3.680	Damej et al. (2022)
Epi-gallocatechin-3-gallate	-5.864	-1.393	4.471	3.628	2.235	0.447	4.590	Berrissoul et al. (2022)
QMHC	-5.986	-1.986	4.000	3.986	2.000	0.209	-	El Faydy et al. (2022)
BQMT	-5.469	-1.659	3.810	3.564	1.905	0.330	-	
QMCH <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	-10.996	-8.408	2.588	9.702	1.294	-1.886	-	
BQMTH <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	-10.408	-7.929	2.479	9.168	1.239	-1.754	-	
AMP1	-5.370	-0.007	5.362	2.688	2.681	0.187	3.575	Moumeni et al. (2023)
AMP2	-5.393	-0.082	5.310	2.737	2.655	0.188	3.470	
EDMP	-6.580	-1.090	5.490	3.840	2.740	-	-	Wang et al. (2024)
DTBP	-5.920	-0.040	5.880	2.980	1.470	-	-	

A comparative analysis of the DFT parameters from Table 1 and the literature values from Table 2 highlights the relationship between molecular electronic properties and their corrosion inhibition efficiency. The molecules in Table 1, such as 1,2-dihydroxybenzene and guaifenesin, show inhibition efficiencies strongly influenced by the HOMO-LUMO energy gap ( $\Delta E$ ) and dipole moments. For example, 1,2-dihydroxybenzene, with a  $\Delta E$  of 6.003 eV and a dipole moment of 2.926 Debye,

demonstrates a higher inhibition efficiency (99.1%) compared to molecules like catechin, which has a  $\Delta E$  of 5.093 eV and a higher dipole moment (3.944 Debye).

In contrast, the literature values from Table 2 suggest that molecules such as imidazole and its derivatives also exhibit relatively high  $\Delta E$  values (6.050 eV for imidazole), indicating stability and moderate inhibition potential. However, PASP, with a significantly lower  $\Delta E$  (3.891 eV) and a dipole moment of 3.521 Debye, correlates with a more effective adsorption onto the metal surface, as supported by the literature (Chen et al., 2021). Similarly, molecules like TTA and epi-gallocatechin-3-gallate show intermediate  $\Delta E$  values of 4.404 eV and 4.471 eV, respectively, which also suggest moderate inhibition performance, reflecting their ability to stabilize interactions on metal surfaces.

Molecules from the literature with lower  $\Delta E$  values, such as QMHC derivatives ( $\Delta E \sim 4.000$  eV), show variations in dipole moments, with larger values correlating with better molecular polarity and hence better surface adsorption properties. This trend is consistent with the dipole moment of guaifenesin from Table 1, which, despite its moderate  $\Delta E$  (5.510 eV), exhibits a relatively high dipole moment (4.228 Debye), contributing to an inhibition efficiency of 94.7%. Therefore, the comparative analysis reveals that both the  $\Delta E$  and dipole moment play crucial roles in determining corrosion inhibition efficiency, with a clear trend toward higher dipole moments enhancing surface interaction and thus improving inhibitor performance.

#### **4. Conclusion**

This study underscored the critical role of DFT in elucidating corrosion mechanisms and guiding the development of corrosion inhibition strategies. Through a comprehensive analysis of molecular structures and electronic properties, informed by both theoretical DFT calculations and experimental data, valuable insights into the corrosion inhibition potential of aromatic compounds have been gained. The investigation revealed that molecules with lower energy gaps ( $\Delta E$ ), such as catechin, exhibit enhanced electron-donating capabilities, suggesting their efficacy as corrosion inhibitors. Additionally, parameters such as absolute electronegativity ( $\chi$ ), absolute hardness ( $\eta$ ), and absolute softness ( $\delta$ ) offer valuable insights into the corrosion inhibition properties of molecules, with lower  $\chi$  and  $\eta$  values indicating increased inhibition effectiveness. The dipole moment, another significant parameter, correlates with corrosion inhibition efficiency, with molecules possessing larger dipole moments showing enhanced adsorption onto metal surfaces. Furthermore, electrochemical impedance spectroscopy data demonstrated substantial corrosion protection efficiency for the studied molecules, further validating their potential as corrosion inhibitors.

Despite the significant contributions of DFT to corrosion studies, several limitations must be addressed to enhance its utility in this field. Computational demands and the selection of exchange-correlation functionals remain challenges, particularly for large-scale corrosion scenarios. Additionally, accurately describing dynamic processes such as ion diffusion and surface fluctuations within the DFT framework requires further refinement. Collaborative efforts between experimentalists and computational scientists

are essential for validating DFT predictions and refining theoretical models to better capture the intricacies of corrosion processes.

Moving forward, advancements in computational methodologies, including the development of tailored exchange-correlation functionals and the incorporation of solvent effects, hold promise for overcoming these limitations and enhancing the predictive power of DFT in corrosion studies. Integration with experimental data and complementary computational approaches will further facilitate the development of corrosion-resistant materials and coatings, contributing to advancements in materials science and engineering.

## 5. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## 6. Acknowledgement

We are greatly thankful to Prof. Dr. Birgöl YAZICI and Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ.

## 7. Researchers' Contribution Rate Declaration Summary

The authors declare that they have contributed equally to the article.

## 8. References

- Adil Mahraz M., Salim R., Loukili EH., Assouguem A., Kara M., Ullah R., Bari A., Fidan H., Laftouhi A., Mounadi Idrissi A., Hammouti B., Rais Z., Taleb M. Exploratory evaluation supported by experimental and modeling approaches of *Inula viscosa* root extract as a potent corrosion inhibitor for mild steel in a 1 M HCl solution. *Open Life Sciences* 2024; 19(1): 20220879.
- Alfalah MGK., Elid A., Ali AAA., Kamberli E., Nazlı B., Koyun S., Kandemirli F. Improvement of corrosion resistance for brass in 3.5% NaCl media by using 4-fluorophenyl-2, 5-dithiohydrazodicarbonamide. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry* 2023; 10(4): 869-876.
- Al-Nami SY. Investigation of adsorption and inhibitive effect of expired helicure drug on mild steel corrosion in hydrochloric acid solution. *International Journal of Electrochemical Science* 2020; 15: 2685-2699.
- Altunay N., Kaya S. Theoretical investigation of corrosion inhibition of iron metal by some benzothiazole derivatives: A Monte Carlo study. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry* 2017; 4(2): 573-578.
- Aksaray G., Mert ME., Mert BD. Çeşitli doğal tohumların korozyondan koruma performansını göstermek için yoğunluk fonksiyonel teorisi yaklaşımı. *The 17th International Scientific Research Congress - Science and Engineering* 2023; 147-153.

- Aksaray G., Mert ME., Mert BD. Experimental and theoretical investigation: The effect of cherry stems on corrosion behavior of mild steel. 5th International Artemis Congress on Life, Engineering, and Applied Sciences 2023; 192-201.
- Aksaray G., Mert ME., Mert BD. Experimental and theoretical study on bricanly syrup: A potential corrosion inhibitor for mild steel in HCl Aegean 9th International Applied Sciences Congress 2023; 139-147.
- Anadebe VC., Onukwuli OD., Abeng FE., Okafor NA., Ezeugo JO., Okoye CC. Electrochemical-kinetics, md-simulation and multi-input single-output (MISO) modeling using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) prediction for dexamethasone drug as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 2 M HCl electrolyte. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 2020; 15: 251-265.
- Ansari KR., Quraishi MA., Ebenso EE., Prashant. Electrochemical and thermodynamic investigation of diclofenac sodium drug as a potential corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid. International Journal of Electrochemical Science 2013; 8(12): 12860-12873.
- Bello A., Uzairu A., Shallangwa GA. Understanding inhibition of steel corrosion by some potent triazole derivatives of pyrimidine through density functional theory and molecular dynamics simulation studies. Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry 2019; 6(3): 451-462.
- Berrissoul A., Ouarhach A., Benhiba F., Romane A., Guenbour A., Outada H., Dafali A., Zarrouk A. Exploitation of a new green inhibitor against mild steel corrosion in HCl: Experimental, DFT and MD simulation approach. Journal of Molecular Liquids 2022; 349: 118102.
- Bobby KM., Rahuma M., Khakbaz H., Melchers R. Antipsychotic drug waste: A potential corrosion inhibitor for mild steel in the oil and gas industry. Waste Management 2022; 145: 38-47.
- Bouhouche I., Bouiti K., Chraka A., El Hamil A., Labjar N., Damour H., Dahrouch A., Nasrellah H., Benmessaoud M., El Hajjaji S. Eco-conscious corrosion inhibitor synthesis via Soxhlet extraction: Experimental study in HCl 1M and theoretical analysis using DFT and MC simulations. Canadian Metallurgical Quarterly 2024: 1-19.
- Čertík O., Pask JE., Fernando I., Goswami R., Sukumar N., Collins LA., Manzini G., Vackář J. High-order finite element method for atomic structure calculations. Computer Physics Communications 2024; 297: 109051.
- Chen X., Chen Y., Cui J., Li Y., Liang Y., Cao G. Molecular dynamics simulation and DFT calculation of “green” scale and corrosion inhibitor. Computational Materials Science 2021; 188: 110229.
- Damej M., Hsissou R., Berisha A., Azgaou K., Sadiku M., Benmessaoud M., Labjar N. New epoxy resin as a corrosion inhibitor for the protection of carbon steel C38 in 1M HCl. experimental and theoretical studies (DFT, MC, and MD). Journal of Molecular Structure 2022; 1254: 132425.
- Döşlü ST., Mert BD., Yazıcı B. The electrochemical synthesis and corrosion behaviour of TiO<sub>2</sub>/poly (indole-co-aniline) multilayer coating: Experimental and theoretical approach. Arabian Journal of Chemistry 2018; 11(1): 1-13.



- Edraki M., Sheydaei M. Investigation of date seed powder as green corrosion inhibitor for mild steel: A study of solution and coating phases. *Hybrid Advances* 2024; 6: 100238.
- El Faydy M., Benhiba F., Warad I., Saoiabi S., Alharbi A., Alluhaybi AA., Lakhrissi B., Abdallah M., Zarrouk A. Bisquinoline analogs as corrosion inhibitors for carbon steel in acidic electrolyte: Experimental, DFT, and molecular dynamics simulation approaches. *Journal of Molecular Structure* 2022; 1265: 133389.
- Emmanuel JK. Corrosion protection of mild steel in corrosive media, a shift from synthetic to natural corrosion inhibitors: A review. *Bulletin of the National Research Centre* 2024; 48(1): 26.
- Farahati R., Mousavi-Khoshdel SM., Ghaffarinejad A., Behzadi H. Experimental and computational study of penicillamine drug and cysteine as water-soluble green corrosion inhibitors of mild steel. *Progress in Organic Coatings* 2020; 142: 105567.
- Feng J., Wan L., Li J., Jiao S., Cui X., Hu W., Yang J. Massively parallel implementation of iterative eigensolvers in large-scale plane-wave density functional theory. *Computer Physics Communications* 2024; 299: 109135.
- Gholamhosseinzadeh MR., Aghaie H., Zandi MS., Giahi M. Rosuvastatin drug as a green and effective inhibitor for corrosion of mild steel in HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions. *Journal of Materials Research and Technology* 2019; 8(6): 5314-5324.
- Holla B., Mahesh R., Manjunath HR., Anjanapura VR. Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review. *Heliyon* 2024; 10(14): e33748.
- Iroha NB., Anadebe VC., Maduelosi NJ., Nnanna LA., Isaiah LC., Dagdag O., Berisha A., Ebenso EE. Linagliptin drug molecule as corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution: Electrochemical, SEM/XPS, DFT and MC/MD simulation approach. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect* 2023; 660: 130885.
- Kumar SH., Karthikeyan S., Vivekanand PA., Rajakumari S. Pioglitazone (PGZ) drug as potential inhibitor for the corrosion of mild steel in hydrochloric acid medium. *materials today: Proceedings* 2021; 36(4): 803-808.
- Li L., Hoyer S., Pederson R., Sun R., Cubuk ED., Riley P., Burke K. Kohn-Sham equations as regularizer: Building prior knowledge into machine-learned physics. *Physical Review Letters* 2021; 126(3): 036401.
- Ma X., Dang R., Kang Y., Gong Y., Luo J., Zhang Y., Fu J., Li C., Ma Y. Electrochemical studies of expired drug (formoterol) as oilfield corrosion inhibitor for mild steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> media. *International Journal of Electrochemical Science* 2020; 15(3): 1964-1981.
- Manssouri M., El Ouad Y., Chraka A., Khaddor M., Znin M., Majidi L. Aqueous extracts of *Aaronsohnia pubescens* subsp. *pubescens* aerial parts as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in hydrochloric acid solution. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry* 2021; 8(3): 953-968.

- Martínez PA., Vock T., Kharchi LR., Pedroza-Montero JN., Wu X., Hasnaoui K., de la Lande A. A multi-GPU implementation of real-time time-dependent auxiliary Density Functional Theory for the investigation of nanosystems irradiations. *Computer Physics Communications* 2024; 295: 108946.
- Mohammed BA., Kareem RO., Hamad OA. The electronic structure and physicochemical characteristics of chlorohydroquinone compounds using density functional theory and Hartree-Fock techniques. *South African Chemical Institute* 2024; 78: 85-94.
- Moumeni O., Mehri M., Kerkour R., Boubli A., Mihoub F., Rebai K., Khan AA., Erto A., Darwish AS., Lemaoui T., Chafai N., Benguerba Y. Experimental and detailed DFT/MD simulation of  $\alpha$ -aminophosphonates as promising corrosion inhibitor for XC48 carbon steel in HCl environment. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2023; 147: 104918.
- Mert BD., Mert ME., Kardaş G., Yazıcı B. Experimental and theoretical investigation of 3-amino-1, 2, 4-triazole-5-thiol as a corrosion inhibitor for carbon steel in HCl medium. *Corrosion Science* 2011; 53(12): 4265-4272.
- Mert BD., Yüce AO., Kardaş G., Yazıcı B. Inhibition effect of 2-amino-4-methylpyridine on mild steel corrosion: Experimental and theoretical investigation. *Corrosion Science* 2014; 85: 287-295.
- Mert BD., Mert ME., Kardaş G., Yazıcı B. The experimental and quantum chemical investigation for two isomeric compounds as aminopyrazine and 2-amino-pyrimidine against mild steel corrosion. *Anti-Corrosion Methods and Materials* 2016; 63(5): 369-376.
- Narang R., Vashishth P., Bairagi H., Shukla SK., Mangla B. Electrochemical and surface study of an antibiotic drug as sustainable corrosion inhibitor on mild steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Journal of Molecular Liquids* 2023; 384: 122277.
- Palaniappan N., Alphonsa J., Cole IS., Balasubramanian K., Bosco IG. Rapid investigation expiry drug green corrosion inhibitor on mild steel in NaCl medium. *Materials Science and Engineering: B* 2019; 249: 114423.
- Pour-Ali S., Hejazi S. Tiazofurin drug as a new and non-toxic corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution: Experimental and Quantum Chemical Investigations. *Journal of Molecular Liquids* 2022; 354: 118886.
- Rahal HT., Abdel-Gaber AM., El-Rifai MS., El-Housseiny S. The potential of natural leaf extracts as green inhibitors for mild steel corrosion in hydrochloric acid solutions. *Moroccan Journal of Chemistry* 2024; 12(8): 1554-74.
- Rindt CCM., Gaastra-Nedea SV. 15-Modeling thermochemical reactions in thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy storage systems*. Woodhead Publishing 2015: 75-415.
- Saraswat V., Yadav M., Obot IB. Investigations on eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in acid environment: Electrochemical, DFT and Monte Carlo Simulation approach. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2020; 599: 124881.

- Singh P., Chauhan DS., Chauhan SS., Singh G., Quraishi MA. Chemically modified expired dapsone drug as environmentally benign corrosion inhibitor for mild steel in sulphuric acid useful for industrial pickling process. *Journal of Molecular Liquids* 2019; 286: 110903.
- Srivastava M., Tiwari P., Srivastava SK., Prakash R., Ji G. Electrochemical investigation of irbesartan drug molecules as an inhibitor of mild steel corrosion in 1 M HCl and 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions. *Journal of Molecular Liquids* 2017; 236: 184-197.
- Sundaram RG., Vengatesh G., Sundaravadivelu M. Surface morphological and quantum chemical studies of some expired drug molecules as potential corrosion inhibitors for mild steel in chloride medium. *Surfaces and Interfaces* 2021; 22: 100841.
- Thakur A., Dagdag O., Berisha A., Ebenso EE., Kumar A., Sharma S., Ganjoo R., Assad H. Mechanistic insights into the corrosion inhibition of mild steel by eco-benign *Asphodelus Tenuifolius* aerial extract in acidic environment: Electrochemical and computational analysis. *Surface and Coatings Technology* 2024; 480.
- Ugi B. DFT and electrochemical study of novel green corrosion inhibitor (pyrantrin) for 1100-H14 aluminum corrosion remediation in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> acidic environment. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry* 2024; 11(1): 253-260.
- Verma DK., Kazi M., Alqahtani MS., Syed R., Berdimurodov E., Kaya S., Salim R., Asatkar A., Haldhar R. N-hydroxybenzothioamide derivatives as green and efficient corrosion inhibitors for mild steel: Experimental, DFT and MC simulation approach. *Journal of Molecular Structure* 2021; 1241: 130648.
- Wang X., Liu J., Zhang Z., Xiang Q., Zhang J., Chen L., Xie H. Mechanism for corrosion inhibition of pure iron in 1 M HCl by *Rauvolfia* Fujisana: Experimental, GCMS, DFT, VASP and solidliquid modeling studies. *Industrial Crops and Products* 2024; 207: 117692.
- Wang X., Chen H., Kou J., Sun S. An unconditionally energy-stable and orthonormality-preserving iterative scheme for the Kohn-Sham gradient flow based model. *Journal of Computational Physics* 2024; 498: 112670.
- Yüce AO., Telli E., Mert BD., Kardaş G., Yazıcı B. Experimental and quantum chemical studies on corrosion inhibition effect of 5, 5 diphenyl 2-thiohydantoin on mild steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquids* 2016; 218: 384-392.