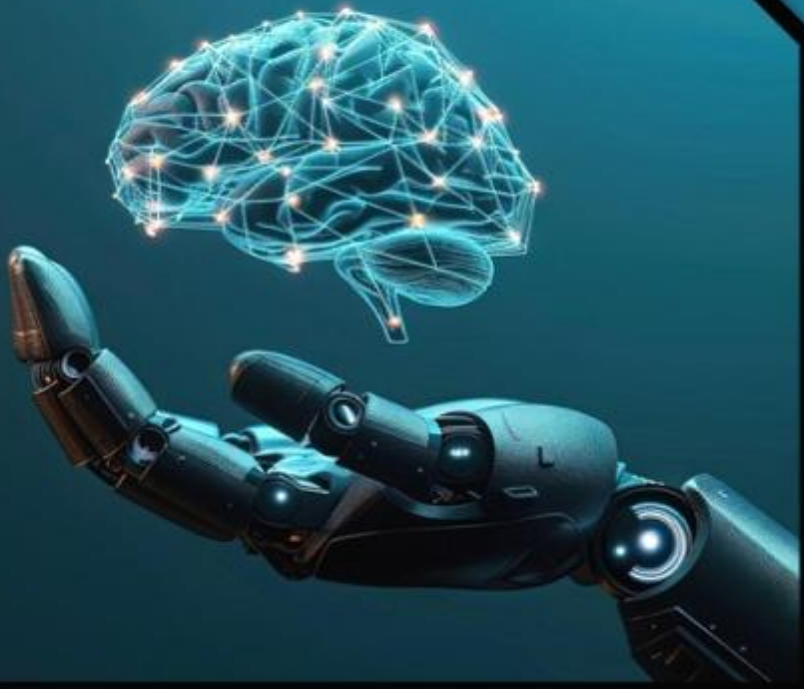


MÜHENDİSLİKTE ÖNCÜ VE AKADEMİK ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE ÖNCÜ VE AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Öncü ve Akademik Çalışmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Haziran 2025

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-5900-63-0

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	5
Nonlinear Diferansiyel Denklemlerin Momentler Yöntemi Çözümleri <i>Birkan DURAK, Aziz SEZGİN</i>	
2. Bölüm	18
ISM Bant Uygulamaları İçin Kompakt Yüksek İzolasyonlu Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Anten Tasarımı <i>İclal USANMAZ, Zeliha ÇELİK, Cem GÜLER</i>	
3. Bölüm	38
Biber Sapı Katkılı Biyobozunur Kompozitlerin Sentezlenmesi ve Yüzey Karakterizasyonu <i>Ceyda BİLGİÇ, Cemre Su ZÜBERİ</i>	
4. Bölüm	52
Yapay Zekâ Model Başarım Değerlendirme Metodolojileri <i>İbrahim Halil ÜNLÜK</i>	
5. Bölüm	68
Rotillerde Boşluk Toleranslarının Yapısal Davranış ve Yorulma Ömrü Üzerindeki Etkileri <i>Deniz ÇORA, Abdullah Engin ÖZÇELİK</i>	
6. Bölüm	80
Gerçek Zamanlı Uçuş Rotalarını Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi <i>Sılanaz ÇELİK, Erdal AYDEMİR</i>	
7. Bölüm	93
Yapay Zekâ ile Problem Çözümüne Giriş: Yeni Bir Paradigma <i>İbrahim Halil ÜNLÜK</i>	

8. Bölüm

111

Optik Ölçümler için Maliyet Etkin Arduino Tabanlı Bir Spektrofotometrenin Geliştirilmesi

Tayyar GÜNGÖR

9. Bölüm

125

İşitsel Oddball Görevlerinde P300 Tespiti için Adaboost Algoritması Kullanımı

Bahar NAZLI, Ahmet Reşit KAVSAOĞLU

Nonlinear Diferansiyel Denklemlerin Momentler Yöntemi Çözümleri

Birkan DURAK^{1*}

Aziz SEZGİN²

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Uçak Teknolojisi Programı, birkand@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-8196-5407

² İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, asezgin@iuc.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-6861-5309

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Birkan DURAK , birkand@iuc.edu.tr

ÖZET

Mühendislik ve fen bilimlerindeki bazı süreçler ve problemler nonlinear diferansiyel denklemlerle ifade edilirler. Nonlinear diferansiyel denklemlerin kaotik davranışı ve başlangıç değerlerine bağıllığı genel çözümlerini bulmayı zorlaştırır. Lineer denklemlerde kullanılan basit çözümlerin üst üste toplanmasına izin veren süperpozisyon ilkesi bu denklemler için kullanılamaz, diferansiyel denklem teorisindeki çözümün varlığını ve tekliğini garantileyen teoremler bu diferansiyel denklemler için kullanılamamaktadır. Fourier serisi, Laplace dönüşümü ve parametrelerin değişimi vb. analitik yöntemler bu denklem grubunun çözümlerine uygulanırsa bile çözüme ya ulaşamaz ya da bulunan çözüm tek değildir. Bahsedilen bu zorluklar yüzünden nonlinear denklem diferansiyel denklemlerin özelliklerini ve davranışlarını incelemek amacıyla çeşitli sayısal yöntemlerden, pertürbasyon tekniğinden, sayısal simülasyonlardan ve nitel analiz gibi özel tekniklerden yararlanılır. Bu çalışmada ağırlıklı kalanlar yöntemlerinden birisi olan momentler yöntemi nonlinear diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini bulmakta kullanılmıştır.

Bu yöntemde ilk adımda bir yaklaşık çözüm önerilir. Diferansiyel denkleme yazılan bu çözüm ile kalan elde edilir. İkinci adımda bu kalan ağırlık fonksiyonu adı verilen fonksiyonlarla çarpılarak, sınırlarda integre edildikten sonra sıfıra eşitlenir. Bu sayede elde edilen nonlinear denklem sisteminin çözümü incelenen problemin yaklaşık çözümünün katsayıları vermektedir.

Kullanılan ağırlık fonksiyonlarının ve yaklaşık çözümün polinom olarak alınması bu yöntemdeki integral hesabını kolaylıkla gerçekleştirmeye imkan verir. Momentler yöntemiyle bir problem için analitik çözüm bulmakta mümkündür. Yöntem sonucunda meydana gelen nonlinear denklem sisteminin çözüm kümelerinin elemanları birden fazla reel ve/veya karmaşık sayı ise bunlar arasında reel en küçük katsayıları içerenini seçmek göz önüne alınan probleme en uygun yaklaşık çözümü vermektedir. Çeşitli mühendislik problemlerinin yanı sıra integral, integro-diferansiyel vb. denklem veya denklem sistemlerinin çözümlerini bulmakta momentler yöntemi kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler – Momentler yöntemi, Ağırlıklı kalanlar, Yaklaşık çözüm, Sayısal analiz, Nonlinear diferansiyel denklem

GİRİŞ

Nonlinear diferansiyel denklemler yapısal olarak lineer diferansiyel denklemlere benzerler. Bu denklem tipini lineer olanlardan ayıran özellik trigonometrik veya logaritmik fonksiyonlar gibi lineerliği bozan terimleri içermesidir. Bu denklemlerin çözümlerinin bulunmasındaki güçlükler

yüzünden çeşitli sayısal teknikler, pertürbasyon yöntemi ve nitel analiz gibi özel teknikler kullanılır. Bu çalışmada öncelikle Momentler yöntemi tanıtılmış ve ardından bu yöntemle çeşitli problemler çözülmüştür.

1- Momentler Yöntemi

Değişken katsayılı homojen olmayan nonlinear diferansiyel denklem sınır şartlarıyla

$$\begin{aligned} y^{(k)} + y^m + f(x, y, y', \dots, y^{(k-1)}) &= 0 \\ y(a) &= x_1 \\ y(b) &= x_2 \end{aligned} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde k ile türev derecesi ve m ile de bağımlı değişken y' nin kuvveti gösterilmiştir. Ayrıca x_1, x_2, a ve b ise reel sayılardır. Denklem (1)'in yaklaşık çözümü

$$\bar{y}(x) = \sum_{n=0}^N C_n x^n \quad (2)$$

gibi bir polinom olsun. N burada polinomdaki en yüksek dereceyi göstermektedir. Denklem (2) 'nin, denklem (1)' de yerine yazılmasıyla kalan

$$R(x) = \bar{y}^{(k)}(x) + \bar{y}^m(x) + g(x) \quad (3)$$

olarak bulunacaktır. Denklem (2)'deki $C_0, C_1, C_2, \dots, C_N$ katsayılarının hesaplanması için denklem (3), $W_i(x) = x^i$, $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ şeklinde tanımlanan ağırlık fonksiyonlarıyla çarpılır ve problem sınırlarında integre edilerek sıfıra eşitlenir. Böylece kapalı formu

$$\int_a^b R(x) W_i(x) dx = 0 \quad (4)$$

denklem (4) deki gibi olan nonlinear denklem sistemine ulaşılır. Sistemin çözümüyle bulunan $C_0, C_1, C_2, \dots, C_N$ katsayıları, denklem (2)'de yerine yazılırsa denklem (1) ile verilen nonlinear denklemin yaklaşık çözümü bulunmuş olur.

2- Momentler Yöntemin Diferansiyel Denklemlere Uygulanması

Momentler yöntemini verilen probleme uygulayalım (Li vd., 2014).

$$\begin{aligned} y'(x) &= 1 + y^2 \\ y(0) &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

Yaklaşık çözüm

$$y = \sum_{n=0}^5 C_n x^n \tag{6}$$

şeklinde olsun. Denklem (5) deki şart uygulanırsa denklem (6) daki denklemin yaklaşık çözümü

$$y = \sum_{n=1}^5 C_n x^n \tag{7}$$

olur. Denklem (7), denklem (5) te yerine yazılırsa kalan

$$R(x) = -1 + C_1 + 2xC_2 + 3x^2C_3 + 4x^3C_4 + 5x^4C_5 - (xC_1 + x^2C_2 + x^3C_3 + x^4C_4 + x^5C_5)^2 \tag{8}$$

olarak bulunur. Yöntem uygulanırken denklem (8) deki kalan aşağıda verilen ağırlık fonksiyonlarıyla çarpılarak problemin sınırlarında integre edilerek sıfıra eşitlenirse

$$\begin{aligned} W_0 &= x^0 \\ W_1 &= x^1 \\ W_2 &= x^2 \\ W_3 &= x^3 \\ W_4 &= x^4 \end{aligned} \tag{9}$$

denklem (10) ile verilen sisteme ulaşılır.

$$\begin{aligned} \int_0^1 R(x).W_0(x) dx &= 0 \\ \int_0^1 R(x).W_1(x) dx &= 0 \\ \int_0^1 R(x).W_2(x) dx &= 0 \\ \int_0^1 R(x).W_3(x) dx &= 0 \\ \int_0^1 R(x).W_4(x) dx &= 0 \end{aligned} \tag{10}$$

olacaktır. Bu denklem sisteminin açık hali aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} &-1. + C_1 - 0.3333C_1^2 + C_2 - 0.5C_1C_2 - 0.2C_2^2 + C_3 - 0.4C_1C_3 \\ &-0.3333C_2C_3 - 0.1428C_3^2 + C_4 - 0.3333C_1C_4 - 0.2857C_2C_4 - 0.25C_3C_4 \end{aligned}$$

$$-0.1111C_4^2 + C_5 - 0.2857C_1C_5 - 0.25C_2C_5 - 0.2222C_3C_5 - 0.2C_4C_5 - 0.0909C_5^2 = 0$$

$$\begin{aligned} &-0.5 + 0.5C_1 - 0.25C_1^2 + 0.666C_2 - 0.4C_1C_2 - 0.1666C_2^2 + 0.75C_3 \\ &-0.333C_1C_3 - 0.2857C_2C_3 - 0.125C_3^2 + 0.8C_4 - 0.2857C_1C_4 - 0.25C_2C_4 \\ &-0.222C_3C_4 - 0.1C_4^2 + 0.8333C_5 - 0.25C_1C_5 - 0.222C_2C_5 - 0.2C_3C_5 \\ &-0.1818C_4C_5 - 0.083C_5^2 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-0.333 + 0.333C_1 - 0.2C_1^2 + 0.5C_2 - 0.333C_1C_2 - 0.142C_2^2 + 0.6C_3 \\ &-0.2C_1C_3 - 0.2C_2C_3 - 0.1C_3^2 + 0.6C_4 - 0.2C_1C_4 - 0.2C_2C_4 \quad (11) \\ &-0.2C_3C_4 - 0.090C_4^2 + 0.714C_5 - 0.222C_1C_5 - 0.2C_2C_5 - 0.1C_3C_5 \\ &-0.166C_4C_5 - 0.076C_5^2 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-0.25 + 0.25C_1 - 0.1666C_1^2 + 0.4C_2 - 0.285C_1C_2 - 0.125C_2^2 + 0.5C_3 \\ &-0.25C_1C_3 - 0.222C_2C_3 - 0.1C_3^2 + 0.571C_4 - 0.222C_1C_4 - 0.2C_2C_4 \\ &-0.181C_3C_4 - 0.083C_4^2 + 0.625C_5 - 0.2C_1C_5 - 0.181C_2C_5 - 0.166C_3C_5 \\ &-0.153C_4C_5 - 0.071C_5^2 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-0.2 + 0.2C_1 - 0.1425C_1^2 + 0.333C_2 - 0.25C_1C_2 - 0.11C_2^2 + 0.42C_3 \\ &-0.222C_1C_3 - 0.2C_2C_3 - 0.0909C_3^2 + 0.5C_4 - 0.2C_1C_4 - 0.181C_2C_4 \\ &-0.166C_3C_4 - 0.076C_4^2 + 0.555C_5 - 0.181C_1C_5 - 0.166C_2C_5 \\ &-0.153C_3C_5 - 0.142C_4C_5 - 0.066C_5^2 = 0 \end{aligned}$$

Denklem (11) deki denklem sisteminin çözümünüyle

$$\begin{aligned} C_1 &= 36.229 & C_1 &= 1.019 \\ C_2 &= -428.364 & C_2 &= -0.265 \\ C_3 &= 1528.58 & C_3 &= 1.398 \\ C_4 &= -2067.23 & C_4 &= -1.684 \\ C_5 &= 951.024 & C_5 &= 1.089 \end{aligned} \quad (12)$$

şeklinde iki katsayı grubu bulunur. Bunlardan en küçük olanlarını içeren ikinci gruptaki katsayıları kullanmak denklem (5) ile verilen probleme uygun çözümü verecektir. Böylece çözüm

$$y(x) = 1.089x^5 - 1.684x^4 + 1.398x^3 - 0.265x^2 + 1.019x \quad (13)$$

olmaktadır.

Tablo 1 de problemin önerilen momentler yöntemiyle bulunan yaklaşık çözümü, Adomian ayrıklaştırma (Shawagfeh, 2002) ve dalgacık işlemsel matrisi metoduyla (Li vd., 2014) karşılaştırılmıştır.

Tablo 1: Birinci problem için yaklaşık çözüm ve diğer çözümler

x	<i>Adomian ayrıklaştırma</i>	<i>Dalgacık işlemsel matrisi</i>	<i>Momentler Yöntemi</i>
0.1	0.100335	0.100342	0.100550
0.2	0.202710	0.202726	0.202157
0.3	0.308336	0.309372	0.308779
0.4	0.422793	0.422832	0.422948
0.5	0.546302	0.546363	0.547070
0.6	0.684131	0.684251	0.684738
0.7	0.842245	0.842411	0.842039
0.8	1.029370	1.029849	1.028855
0.9	1.258800	1.260573	1.260178
1.0	1.551370	1.557938	1.557411

İkinci test problemi olarak kesin çözümü $y(x) = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{x^2}{3}}}$ olan ve sınır şartlarıyla aşağıdaki problem göz önüne alınsın (Hosseini ve Abbasbandy, 2015)

$$y''(x) + \frac{2}{x} y'(x) + y^5 = 0 \quad (14)$$

$$y(0) = 1 \quad y'(0) = 0$$

Bu problem için $0 < x < 1$ olmak üzere dördüncü dereceden bir polinom şeklinde yaklaşık çözüm

$$y = \sum_{n=0}^4 C_n x^n \quad (15)$$

olarak kabul edilir ve başlangıç koşullarına dikkat edilirse son durumda bu çözüm

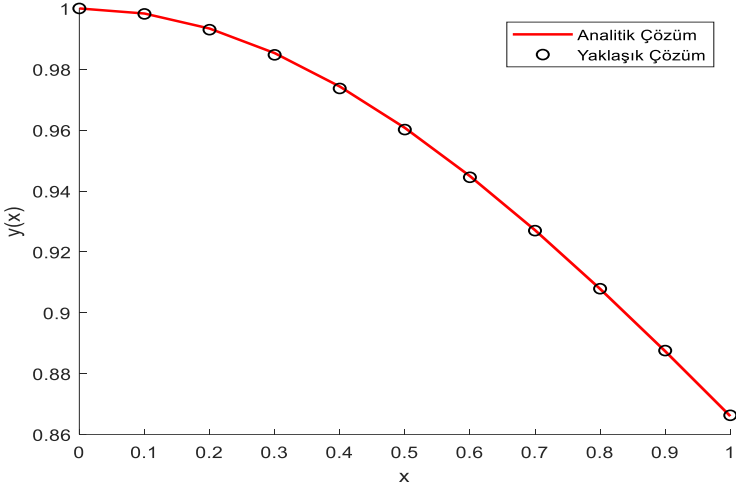
$$y = 1 + \sum_{n=2}^4 C_n x^n \quad (16)$$

formunda olur. İlk problemdeki benzer işlem adımları uygulanırsa aşağıdaki üçüncü ve dördüncü dereceden polinom şeklinde çözümler bulunacaktır.

$$y_3 = 1 - 0.1847487931349894x^2 + 0.051039789823759674x^3$$

$$y_4 = 1 - 0.17512797197473165x^2 + 0.03101x^3 + 0.01016x^4 \quad (17)$$

Şekil 1 de analitik çözüm ile üçüncü dereceden polinom şeklindeki yaklaşık çözüm değerleri grafik olarak verilmiştir.



Şekil 1: İkinci problem için analitik ve yaklaşık çözümler

Tablo 2 de bu iki yaklaşık çözümde yapılan mutlak hatalar verilmiştir. tablodaki N yaklaşık çözümde kullanılan polinomun derecesini göstermektedir.

Tablo 2: İkinci problem için yaklaşık çözümde yapılan mutlak hatalar

x	$N = 3$	$N = 4$
0.1	1.33×10^{-4}	5.67×10^{-5}
0.2	3.80×10^{-4}	1.39×10^{-4}
0.3	5.78×10^{-4}	1.71×10^{-4}
0.4	6.47×10^{-4}	1.29×10^{-4}
0.5	5.76×10^{-4}	3.86×10^{-5}
0.6	3.96×10^{-4}	5.93×10^{-5}
0.7	1.65×10^{-4}	1.20×10^{-4}
0.8	5.17×10^{-5}	1.19×10^{-4}
0.9	2.04×10^{-4}	6.81×10^{-5}
1.0	2.65×10^{-4}	2.49×10^{-5}

Momentler yönteminin uygulandığı üçüncü nonlinear diferansiyel denklem aşağıdaki gibi olsun (Yarcı, 2008).

$$y''(x) - \frac{1}{2}y^3(x) = 0$$

$$y(1) = \frac{2}{3} \quad , \quad y(3) = \frac{2}{5}$$
(18)

Bu problem için aranan yaklaşık çözüm

$$y = \sum_{n=0}^4 C_n x^n$$
(19)

olsun sınır şartlarına göre bu çözüm

$$y(x) = \left(\frac{2}{3} + 2C_2 + 6C_3 + 14C_4\right) + \left(\frac{1}{3} - 3C_2 - 7C_3 - 15C_4\right)x + \sum_{n=2}^4 C_n x^n \quad (20)$$

halinde olmalıdır. Denklem (20) denklem (18) de yerine yazılırsa problem için kalan

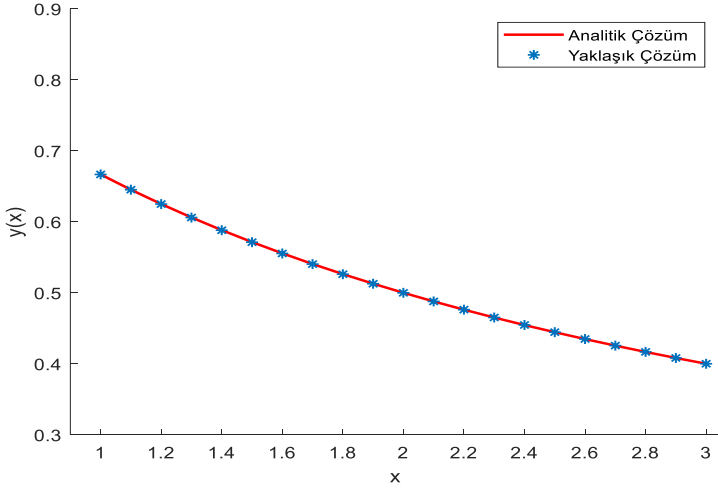
$$R(x) = -0.3502 + 0.186x + 0.1219x^2 - \frac{1}{2}(1.043 - 0.242x - 0.175x^2 + 0.031x^3 + 0.010x^4)^3$$
(21)

şeklinde olur. ağırlık fonksiyonları olarak sırasıyla $W_1 = x^1$, $W_2 = x^2$

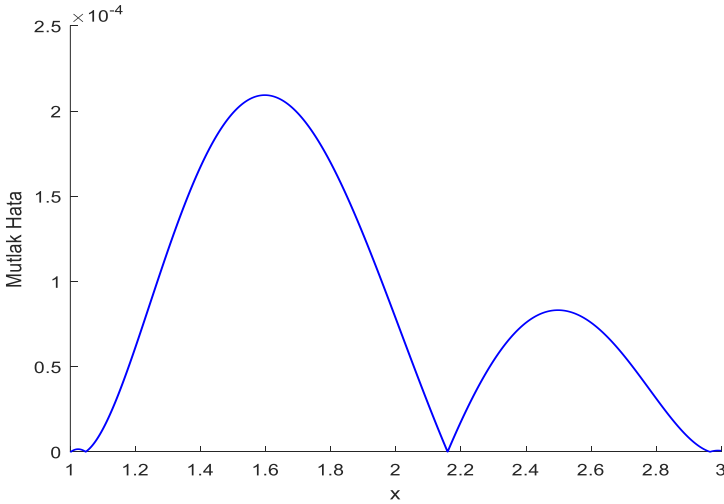
ve $W_3 = x^3$ kullanılarak kurulan denklem sisteminin çözümü ile yaklaşık çözüm katsayıları hesaplanabilir. Problemin nonlinear olması birden fazla reel veya karmaşık katsayı üçlülerinin bulunmasına neden olur. En uygun yaklaşık çözüm için denklem (5) ile verilmiş olan ilk problemdeki gibi en küçük reel katsayılar seçilmelidir. Böylece denklem (18) deki problemin yaklaşık çözümü

$$y(x) = 0.9786 - 0.4233x + 0.1350x^2 - 0.025x^3 + 0.002x^4$$
(22)

olacaktır. Ayrıca problemin analitik çözümü $\frac{2}{2+x}$ dir. Şekil 2 ile analitik ve yaklaşık çözüm grafik halinde verilirken çeşitli x ler için yapılmış olan mutlak hatalar Şekil 3 de gösterilmiştir.



Şekil 2: Üçüncü problem için analitik ve yaklaşık çözümler



Şekil 3: Üçüncü problemde nokta bazında yapılan mutlak hatalar

Başka bir örnek olarak sınır şartlarıyla aşağıda verilen problemi inceleyelim (Jafari ve Daftardar-Gejji, 2006).

$$\begin{aligned} y''(x) + y^2(x) &= x^4 + 2, & 0 < x < 1 \\ y(0) &= 0, & y(1) &= 1 \end{aligned} \quad (23)$$

Yaklaşık çözüm

$$y(x) = \sum_{n=0}^5 C_n x^n \quad (24)$$

olsun. Sınır şartları kullanılarak katsayılar arasında

$$\begin{aligned} C_0 &= 0 \\ C_1 &= 1 - C_2 - C_3 - C_4 - C_5 \end{aligned} \quad (25)$$

bağıntıları vardır. Buna göre denklem (24) deki yaklaşık çözüm

$$y(x) = (1 - C_2 - C_3 - C_4 - C_5)x + \sum_{n=2}^5 C_n x^n \quad (26)$$

haline gelir. Bu ifade denklem (23) de yazılarak kalan

$$\begin{aligned} R(x) &= -2 \cdot -x^4 + 2C_2 + 6xC_3 + 12x^2C_4 + 20x^3C_5 \\ &\quad (x^2C_2 + x^3C_3 + x^4C_4 + x(1 - 1 \cdot C_2 - 1 \cdot C_3 - 1 \cdot C_4 - 1 \cdot C_5) + x^5C_5)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

şeklinde bulunur. Denklem sistemi kurularak çözümlürse

$$\begin{aligned} C_2 &= 51.03 & C_2 &= 1 \\ C_3 &= -172.06 & C_3 &= 0 \\ C_4 &= 120.02 & C_4 &= 0 \\ C_5 &= -24.60 & C_5 &= 0 \end{aligned} \quad (28)$$

katsayıları bulunacaktır. Uygun yaklaşık çözümü veren ikinci gruptaki katsayılarıdır. Böylece yaklaşık çözüm x^2 olarak bulunur ve bu sonuç denklem (23) 'ün analitik çözümüdür. Ayrıca denklem (28) deki katsayılar bulunurken kullanılan ağırlık fonksiyonları sırasıyla x, x^2, x^3, x^4 tür. Yöntem sayesinde analitik çözüm bulunabilmiştir.

Yöntemi son olarak nonlineer ve değişken katsayılı bir diferansiyel denkleme uygulayalım (Yanfei vd., 2020).

$$\begin{aligned} y''(x) - \frac{y^3 - 2y^2}{2x^2} &= 0 \\ y(1) &= 1, \quad y(2) = \frac{4}{3} \end{aligned} \quad (29)$$

analitik çözüm $\frac{2x}{x+1}$ dir. Bu problemin yaklaşık çözümü olarak dördüncü dereceden bir polinom önerilir ve sınır şartları bu çözüme uygulanırsa çözüm

$$y(x) = \left(\frac{2}{3} + 2C_2 + 6C_3 + 14C_4\right) + \left(\frac{1}{3} - 3C_2 - 7C_3 - 15C_4\right)x + \sum_{n=2}^4 C_n x^n \quad (30)$$

olur. Bu problem için $W_1 = x$, $W_2 = x^2$ ve $W_3 = x^3$ ağırlık fonksiyonları alınarak kurulan üç bilinmeyenli üç denklemlili sistemi çözülerek denklem (30) daki katsayılar bulunur. Son olarak bu katsayılar yerine yazılarak yaklaşık çözüm aşağıdaki gibi bulunur.

$$y(x) = 0.1356 + 1.3709x - 0.6705x^2 + 0.1856x^3 - 0.0216x^4 \quad (31)$$

Tablo 3 de farklı x lere karşılık gelen kesin, yaklaşık çözüm değerleri ve yapılan mutlak hatalar verilmiştir.

Tablo 3: Son problem için yaklaşık çözümde yapılan mutlak hatalar

x	$y_{Analitik}$	$y_{yaklaşık}$	Mutlak Hata
1.0	1.00000	0.99999	2.00×10^{-6}
1.1	1.04761	1.04765	3.36×10^{-5}
1.2	1.09090	1.09099	8.49×10^{-5}
1.3	1.13043	1.13053	1.02×10^{-5}
1.4	1.16666	1.16674	7.80×10^{-5}
1.5	1.20000	1.20002	2.83×10^{-5}
1.6	1.23076	1.23074	2.24×10^{-5}
1.7	1.25925	1.25920	5.21×10^{-5}
1.8	1.28571	1.28566	5.00×10^{-5}
1.9	1.31034	1.31032	2.39×10^{-5}
2.0	1.33333	1.33332	5.33×10^{-6}

SONUÇ

Mevcut çalışmada nonlinear diferansiyel denklemler içeren problemlere Momentler yöntemiyle yaklaşık çözümler bulunmuştur. Yöntem ilk olarak incelenen problemi bir nonlinear denklem sistemine çevirir ve ardından bu denklem sistemi çözülerek yaklaşık çözüm katsayıları hesaplanır. Kullanılan ağırlık fonksiyonlarının ve yaklaşık çözümün polinom olarak alınması yöntemdeki integral hesabını kolaylıkla gerçekleştirmeye imkan verir. Momentler yöntemiyle bir problemin analitik çözümünü bulmakta mümkündür. Yöntem sonucunda meydana gelen denklem sisteminin çözüm kümeleri içerisinde reel en küçük katsayıları içerenini seçmek göz önüne alınan probleme en uygun yaklaşık çözümü vermektedir. Momentler yöntemi

çeşitli mühendislik problemlerinin yanı sıra integral, integro-diferansiyel vb. denklem veya denklem sistemlerini çözmekte kullanılabilir.

REFERANSLAR

- Li, Y., Sun, N., Zheng, B., Wang, Q., and Zhang, Y. (2014). Wavelet operational matrix method for solving the Riccati differential equation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19(3), 483–493.
- Shawagfeh, N. T. (2002). Analytical approximate solutions for nonlinear fractional differential equations. *Applied Mathematics and Computation*, 131(2-3), 517–529.
- Hosseini, S.Gh. and Abbasbandy, S. (2015). Solution of lane-emden type equations by combination of the spectral method and adomian decomposition method. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015, Article ID 534754
- Yarç, H., (2008), On the Solutions of Non-Linear Boundary Value Problems , Yüksek Lisans Tezi, İzmir: Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Jafari, H. and Daftardar-Gejji, V. (2006). Positive solutions of nonlinear fractional boundary value problems using Adomian decomposition method, *Applied Mathematics and Computation*, 180(2), 700-706.
- Yanfei, L., Qingfei, Y., Hongyi, L., Hongli, S., Yunlei, Y. and Muzhou, H. (2020) Solving higher order nonlinear ordinary differential equations with least squares support vector machines, *Journal of Industrial And Management Optimization*, 16(3), 1481- 1502.

ISM Bant Uygulamaları İçin Kompakt Yüksek İzolasyonlu Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Anten Tasarımı

İclal USANMAZ¹

Zeliha ÇELİK²

Cem GÜLER³

- 1- Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği.
iclalusanzmaz75@gmail.com ORCID No: 0009-0000-5013-1533
- 2- Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği.
zelihaeelk@gmail.com ORCID No: 0009-0006-7440-3808
- 3- Arş. Gör.; Kırklareli Üniversitesi, Lüleburgaz Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Bakım ve Onarım Bölümü. cemguler@klu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6631-7559

ÖZET

Bu çalışma, sınai, bilimsel ve tıbbi cihaz (industrial, scientific and medical-ISM) bandında çalışan, yüksek izolasyonlu ve kompakt bir çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple In Multiple Out-MIMO) mikroşerit anten yapısının tasarımını ve performans analizini sunmaktadır. Araştırmada üç aşamalı bir tasarım yaklaşımı izlenmektedir. İlk aşamada, 2.4 GHz merkez frekansında çalışan tek portlu dairesel mikroşerit yama anteni -25.23 dB geri dönüş kaybı, 70 MHz bant genişliği ve 3.68 dBi yönlülük kazancı sunmaktadır. İkinci aşamada, anten çok girişli çok çıkışlı yapıya dönüştürülerek iki portlu sistemde -25.2 dB geri dönüş kaybı, 100 MHz bant genişliği, -16.4 dB izolasyon ve 4.77 dBi kazanç elde edilmektedir. Üçüncü aşamada ise anten elemanları arasına yüksek soğurma özelliğine sahip bir yapısal soğurucu yüzey eklenerek izolasyon seviyesi -34.8 dB'ye çıkarılarak 18.4 dB iyileştirme elde edilmektedir. Ayrıca bu anten 100 MHz bant genişliği -25.1 dB geri dönüş kaybı ve 4.61 dBi yönlendiricilik kazancı sunmaktadır. Elde edilen bulgular, önerilen antenin antenler arası karşılıklı etkileşimi azalttığı, dolayısıyla endüstriyel otomasyon, akıllı şehirler, biyomedikal uygulamalar ve tarım teknolojileri gibi alanlarda güvenilir ve verimli veri iletimi sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Mikroşerit Anten, Çoklu Giriş Çoklu Çıkış, ISM bandı, İzolasyon, Soğurucu.

GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin hızla gelişmesi ve kablosuz iletişim sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, hızlı, kesintisiz ve güvenli veri aktarımı ihtiyacı giderek önem kazanmaktadır (Heylen, Bossuyt, Provoost, Borremans, & Rampelberg, 2022). Kablosuz iletişim sistemlerinin farklı alanlara yayılması, kullanıcı yoğunluğunu ve veri trafiğini arttırarak sinyal iletiminde bozulmalara ve veri akışında yavaşlamalara yol açmaktadır (Montlouis & Imoize, 2025). Özellikle yoğun kullanıcı barındıran ortamlarda, spektrumun verimli kullanımı ve sinyal kalitesinin korunmasında yüksek veri hızı, düşük gecikme süresi ve güvenilir bağlantılar sunan anten çözümlerine olan talep artmaktadır (Saunders & Aragón-Zavala, 2024). Bu gereksinimi karşılamak amacıyla, düşük yansıma katsayısına, geniş frekans aralığına ve küçük boyutlara sahip anten tasarımları ön plana çıkmaktadır (Raja ve diğerleri, 2024). 2020 yılında yapılan farklı bir araştırmada, 2.4 GHz rezonans frekansında çalışan bir mikroşerit yama anten tasarımı önerilmektedir. Sunulan anten FR-4 dielektrik tabaka üzerine $51.3 \times 51.3 \times 1.5$ mm³ boyutlarına sahip olacak şekilde yerleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen anten 220.6 MHz bant genişliği değeri, 1.389 VSWR, 2.12 kazanç değeri sunmaktadır

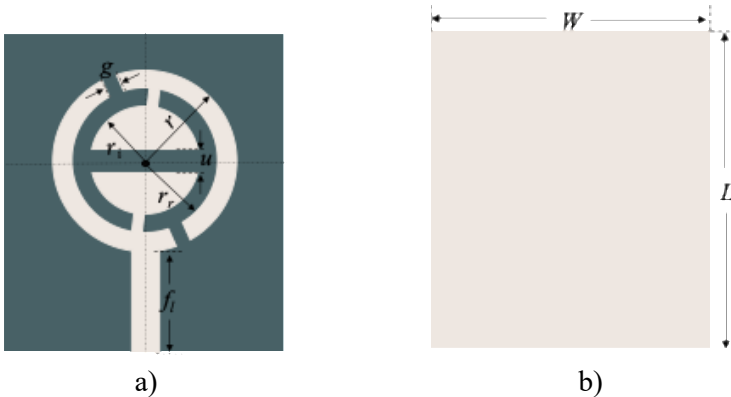
(Njokweni & Kumar, 2020). Yapılan bir diğer çalışmada 2.4 GHz merkez frekansında çalışmak üzere $80 \times 80 \times 1.6 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip FR-4 malzeme üzerine şerit beslemeli dairesel yamaya sahip bir yama anten tasarımı sunulmaktadır. Anten 48 MHz bant genişliği değeri, -25.72 dB geri dönüş kaybı ve 2.97 dBi yönlülük kazanç değeri sunmaktadır (Khidhir, 2023). Ravikiran ve arkadaşları, 2.4 GHz merkez frekansında dikdörtgen şeklinde yamaya sahip bir mikroşerit anten sunmaktadır. Sunulan mikroşerit antenin rezonans frekansı, yer düzleminde üçgen şeklinde bir yuvaya sahip kusurlu bir toprak yapısı (Defected Ground Structure) kullanılarak geleneksel 2.4 GHz mikroşerit antenle karşılaştırıldığında yamanın uzunluğu boyunca %28'e ve genişliği boyunca %18'e kadar başarılı bir küçültme elde edilmektedir. Anten tasarımında alt tabaka malzemesi olarak, $\epsilon_r = 2.2$ dielektrik sabitine ve 1.575 mm kalınlığa sahip RT/Duroid 5880 kullanılarak $49 \times 49 \times 1.575 \text{ mm}^3$ boyutlarına sahip anten 64.5 MHz bant genişliği değeri, 1.39 duran dalga oranı, -15.7 dB geri dönüş kaybı ve 4.77 dB kazanç değeri sunmaktadır (Ravikiran vd., 2023). Bluetooth ve S band uygulamalarında kullanılmak üzere tasarımı yapılan inverted F (PIFA) tipi yama anten tasarımı sunulmaktadır. Önerilen anten 2.35 GHz frekansında çalışmak üzere FR-4 malzeme üzerine $140 \times 70 \times 1.365 \text{ mm}^3$ boyutunda olacak şekilde yerleştirilmektedir. Anten -21.87 dB geri dönüş kaybı değeri, 1.175 VSWR değeri, 301 MHz bant genişliği ve 5.62 dB kazanç değeri sunmaktadır (Adel & Khidhir, 2022). Bir diğer çalışmada ise ISM bant uygulamalarında kullanılmak üzere kısmi yer düzlemi kullanılan, bir mikroşerit dikdörtgen yama anten sunulmaktadır. Anten, dielektrik sabiti 4.3 ve kalınlığı 1.6 mm olan düşük maliyetli bir FR-4 dielektrik alt tabaka üzerine antenin boyutları $28.35 \times 37.58 \times 1.6 \text{ mm}^3$ olacak şekilde tasarlanmaktadır. Önerilen antenin -27.339 dB bir geri dönüş kaybı, 147.8 MHz bant genişliğine ve 1.09 VSWR değeri ve 2.97 dBi kazanç değeri sunmaktadır (Akter & Ahmed, 2022). Bu sistemlerde kullanılan antenler genellikle tek kanallı iletişime izin vermekte, bu da veri iletim kapasitesini sınırlamaktadır. Yüksek veri iletim hızları ve güvenilir bağlantılar sağlamak amacıyla, çoklu giriş çoklu çıkış sistemleriyle uyumlu anten yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır (Singh, Das, & Anand, 2024). Çoklu giriş çoklu çıkış anten teknolojisi, aynı anda birden fazla anten kullanarak çoklu veri akışının tek bir kanal üzerinden iletilmesini sağlayarak, klasik tek giriş tek çıkış (Single In Single Out-SISO) sistemlerine kıyasla daha yüksek veri iletim hızları sunmaktadır (Sharma vd., 2024), (Mapa vd., 2024). Bu sistemlerde veriler küçük parçalara ayrılarak iletilmekte, alıcıda ise gecikme, gürültü ve parazit etkileri göz önünde bulundurularak yeniden birleştirilmektedir. Ancak, çok girişli çok çıkışlı anten sistemlerinde yakın yerleştirilen anten elemanları arasında oluşan güçlü yüzey akımları ve dalga etkileşimleri nedeniyle karşılıklı eşleşme (korelasyon) problemleri ortaya çıkmakta ve bu durum sinyal kirliliğine ve sistem performansında düşüşe neden olmaktadır (Rohaninezhad vd., 2024), (Elabd & Al-Gburi, 2024). Yüksek izolasyon sağlamak amacıyla antenler arası fiziksel mesafenin

artırılması, temel bir çözüm olsa da, bu yaklaşım cihaz boyutlarını büyötmekte ve kompakt anten tasarımları için uygunluk göstermemektedir (Qian vd., 2024). Bu nedenle, antenler arasına yerleştirilen soğurucu yüzeyler gibi yapısal çözümlerle izolasyonun iyileştirilmesi gerekmektedir (Kale & Sawale, 2024). Iqbal ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları çalışmada, iki yama anten arasındaki bağlaşımı azaltmak amacıyla metamalzeme tabanlı bir yapısal ayırım elemanı kullanılarak tasarladıkları anten yapısı, 5.8 GHz’de çalışmakta ve geleneksel düzende -15 dB olan izolasyonu yaklaşık -24.5 dB seviyelerine çekerek 9 dB iyileşme sağlamaktadır (Iqbal vd., 2018). 2.51 GHz rezonans frekansına sahip iki anten arasındaki bağlaşımı azaltmak için yapılan bir diğör çalışmada, yarım daire şekilli CSRR elemanı anten sistemine entegre edilmektedir. (Ambika & Tharini, 2019). Bir diğör çalışmada ise 2.5–6.4 GHz aralığında çalışan, CSRR ve ayrıklaştırma yapısıyla tasarlanmış Asscher şekilli iki elemanlı birçok girişli çok çıkışlı anten yapısı sunulmaktadır (Tharini & Kannammal, 2024). Sunulan bir başka çalışma 2.4, 3.5 ve 5.5 GHz bantlarında çalışan çok bantlı çok girişli çok çıkışlı anten yapısı sunmaktadır. Anten elemanları arasındaki karşılıklı bağlaşımı azaltmak için toprak düzleminde L-şekilli bozulmuş toprak yapısı kullanılmaktadır (Roy & Chakraborty, 2020). Anten tasarımında ayrıca zarf korelasyon katsayısı (ECC) ve çeşitlilik kazancı (DG) gibi parametrelerin optimize edilmesi de performans açısından önemli olmaktadır (Ali vd., 2024). Çok antenli sistemler iletim kapasitesini ve veri hızını artırmasına rağmen antenler arası etkileşim sistem performansını olumsuz etkileyebilmektedir (Haque vd., 2024). Dolayısıyla, çoklu giriş çoklu çıkış anten yapılarında yüksek izolasyon sağlanması, performansı doğrudan etkileyen temel tasarım gereksinimlerinden biri hâline gelmektedir. Bununla birlikte, sistemin çalıştığı frekans bandı da önemli bir tasarım parametresidir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından belirlenen ISM frekans bandı, endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalarda lisanssız olarak kullanılmak üzere tahsis edilmektedir (Derévianckine vd., 2024). Bu bant kablosuz iletişim, endüstriyel otomasyon, makineden makineye (M2M) sistemler ve sensör ağları gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Rojek vd., 2024). Ayrıca ISM bandı, biyomedikal uygulamalarda kablosuz hasta takibi ve uzaktan sağlık hizmetleri, akıllı şehir altyapılarında trafik yönetimi, çevre izleme ve akıllı aydınlatma, tarım teknolojilerinde ise toprak sensörleri, sulama sistemleri ve hayvan takibi gibi birçok yenilikçi uygulamada etkin rol oynamaktadır (Essa vd., 2024) (S. Sharma vd., 2024). Bu çalışma, ISM bandında çalışan, yüksek izolasyonlu ve kompakt çok girişli çok çıkışlı yama anten tasarımı sunmayı amaçlamaktadır. İlk aşamada, 2.4 GHz merkez frekansında çalışan tek portlu dairesel bir mikroşerit anten geliştirilmiş, 70 MHz bant genişliği, -25.23 dB geri dönüş kaybı ve 3.68 dBi kazanç elde edilmektedir. İkinci aşamada anten, çok girişli yapıya dönüştürölerek 100 MHz bant genişliği, -25.2 dB geri dönüş kaybı ve -16.4 dB izolasyon değeri sunmaktadır. Son olarak,

anten elemanları arasına yerleştirilen yüksek soğuruculu bir yapı sayesinde izolasyon seviyesi -34.8 dB'ye ulaşmış ve 18.4 dB iyileşme elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yapının sinyal parazitini azaltarak ISM bandındaki kablosuz sistemlerde güvenilir ve verimli iletişim sunduğunu göstermektedir.

ANTEN TASARIMI

Bu çalışmada, merkez frekansı 2.4 GHz olan dairesel bir mikroşerit yama anten tasarımı sunulmaktadır. Anten tasarımında, dielektrik sabiti 4.3 ve kalınlığı 1.6 mm olan FR-4 malzeme alt tabaka olarak kullanılmaktadır. Şekil 1'de verilen anten yapısı, mikroşerit besleme hattı ve dairesel bir yamadan oluşmaktadır. Yama kısmı, empedans uyumunu arttırmak amacıyla açıklıklarla optimize edilmiş iletken daire formundadır. Şekil 1a'da ön yüzey (iletken yama ve besleme hattı), Şekil 1b'de ise toprak düzlemi ve boyutlandırma detayları yer almaktadır.



Şekil 1. a) Antenin Ön Görünümü b) Antenin Arka Görünümü

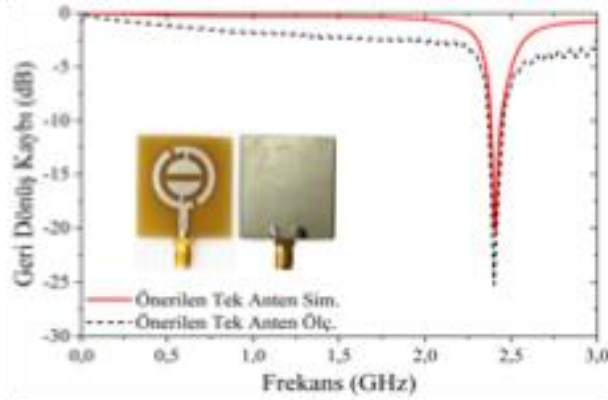
Referans antenin boyutlarına ait parametre ve uzunluk değerleri Tablo 1'de verilmektedir. Önerilen referans anten 2.4 GHz frekansında çalışmakta ve boyutları ise $28.78 \times 32.88 \times 1.6 \text{ mm}^3$ olmaktadır.

Tablo 1. Referans antene ait uzunluk parametrelerinin değerleri

Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
W	28.78	r_r	7.35
L	32.88	r_i	5.5
f_w	2.79	u	2.21
f_i	10.5	g	1.05
r	9.46		

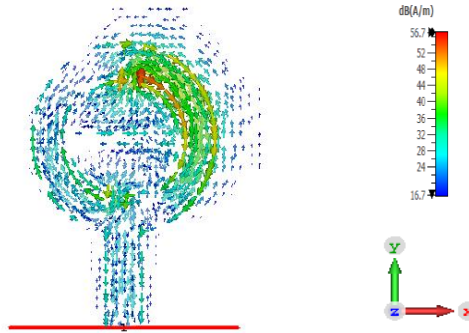
Şekil 2'de, CST Studio Suite yazılımı ile elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçlarına ait S_{11} değerleri sunulmaktadır. Simülasyonlara göre

anten, 2.38–2.44 GHz aralığında 64 MHz bant genişliğiyle çalışmakta ve -20.23 dB geri dönüş kaybı göstermektedir. Ölçüm verileri ise 2.38–2.45 GHz aralığında 70 MHz bant genişliği ve -25.23 dB geri dönüş kaybı değeri sunmaktadır.



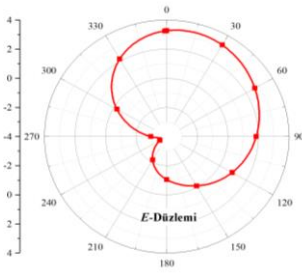
Şekil 2. Üretilen Antene ait Ölçüm ve Simülasyon Sonuçları

Şekil 3'te, 2.4 GHz rezonans frekansında antenin yüzey akımı dağılımı sunulmaktadır. Simülasyonlara göre, maksimum yüzey akım genliği 56.7 dB (A/m) olarak elde edilmektedir.

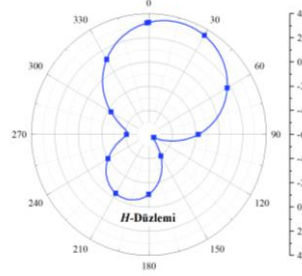


Şekil 3. Antenin Merkez Frekansında Yüzey Akımı Dağılımı

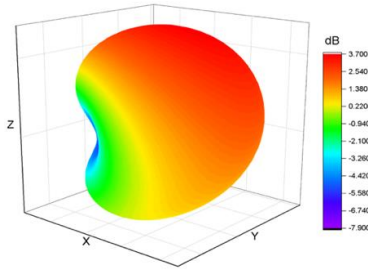
Şekil 4'te antenin 2.4 GHz'deki ışıma modellerinin simülasyon sonuçları sunulmaktadır. Sunulan sonuçlarda anten kazancı 3.68 dBi olarak elde edilmektedir. Şekil 4a ve 4b'de sırasıyla $\phi=0^\circ$ için E-düzleminde 189.9° ve $\phi=90^\circ$ için H-düzleminde 106.3° 3 dB lob genişliği elde edilmektedir. Şekil 4c'de ise Antenin 3 boyutlu ışıma deseni verilmektedir.



a)



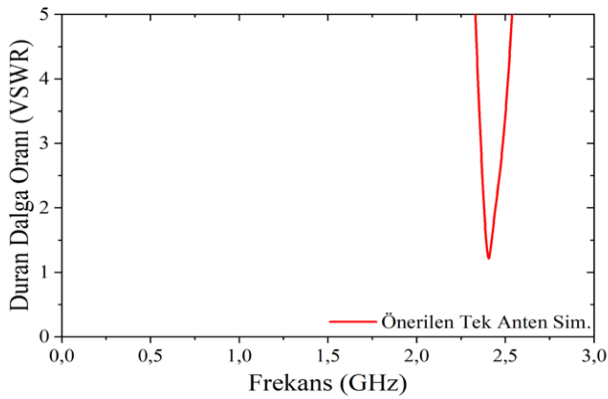
b)



c)

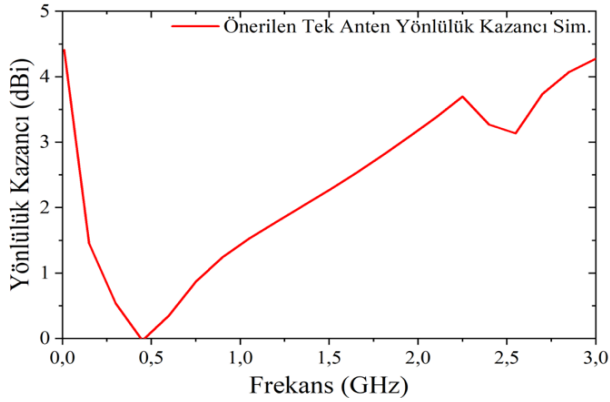
Şekil 4. a) Antene Ait iki Boyutlu Işıma Modeli $\Phi=0$ b) İki Boyutlu Işıma Modeli $\Phi=90$, c) Antenin Üç Boyutlu Işıma Modeli

Referans antene ait duran dalga oranı (VSWR) ise Şekil 5'te verilmektedir. Antenden elde edilen VSWR değeri merkez frekansında 1.2 olmaktadır.



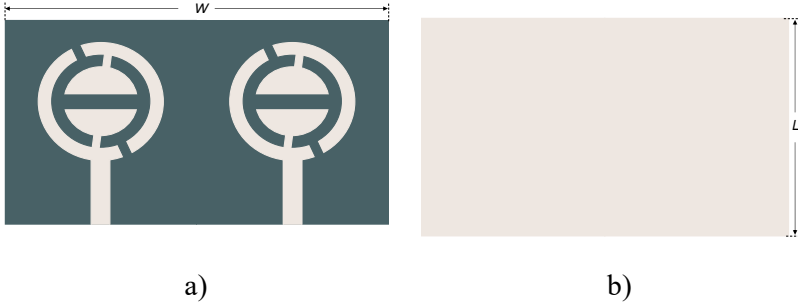
Şekil 5. Antene Ait Duran Dalga Oranı

Şekil 6'da antenin frekansa bağlı kazanç değişimi sunulmaktadır.



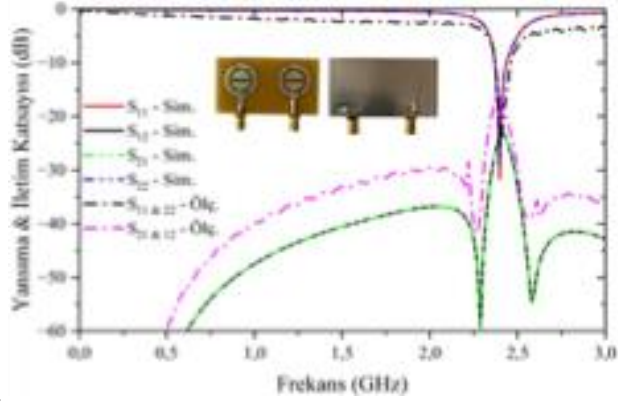
Şekil 6. Antene Ait Frekans-Kazanç Grafiği

Çoklu girişli çoklu çıkış sistemler, aynı anten yapısı üzerinde yer alan bağımsız besleme portları aracılığıyla birden fazla kullanıcıya hizmet sunarak sistem verimliliğini ve kapasitesini artırmaktadır. Bu yapı, sinyal iletim/alım performansını iyileştirirken çoklu kullanıcı desteği sağlamaktadır. Şekil 7’de gösterildiği gibi referans anten, yan yana konumlandırılarak iki portlu çoklu girişli çoklu çıkışlı tasarımına dönüştürülmektedir. Aynı frekansta çoklu sinyal iletimine olanak tanıyan bu yapı, $32.88 \times 57.56 \times 1.6$ mm³ boyutlarında optimize edilerek kompakt ve yüksek performanslı bir çözüm sunmaktadır.



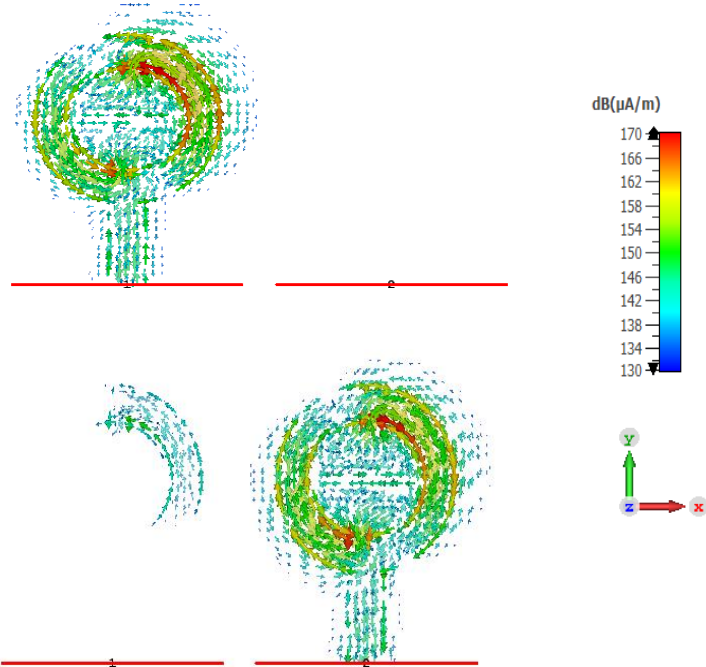
Şekil 7. Çok Girişli Çok Çıkışlı Anten Tasarımı a) Ön Yüz b) Arka Yüz

Şekil 8’de, üretilen iki portlu antenin CST Studio Suite yazılımıyla elde edilen simülasyon ve ölçüm sonuçları yer almakta olup, anten ölçüm sonuçlarına göre 2.38–2.48 GHz arasında 100 MHz bant genişliği ve merkez frekansta -25.2 dB geri dönüş kaybı, -16.4 dB izolasyon değeri elde edilmektedir.



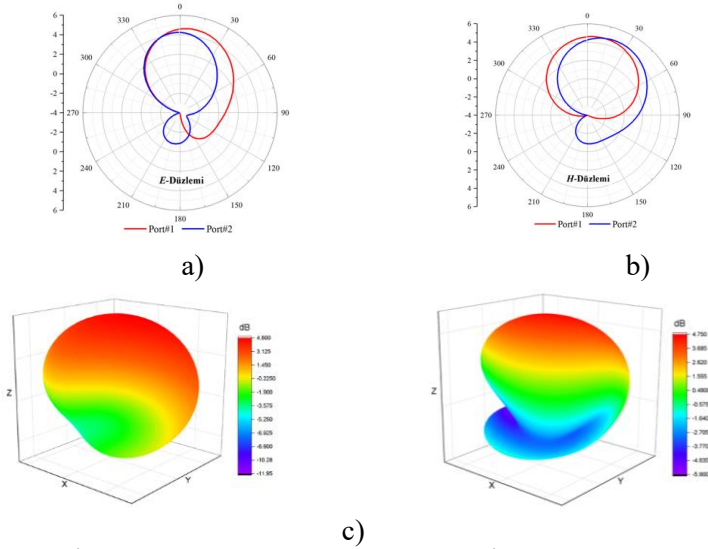
Şekil 8. İki Portlu Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Antene Ait Simülasyon ve Ölçüm Sonuçları

Şekil 9’da iki portlu çoklu giriş çoklu çıkış antene ait yüzey akımı dağılımı gösterilmekte olup, maksimum akım genliği 170 dB μ A/m olarak elde edilmektedir. Diğer anten elemanında düşük akım yoğunluğu gözlenmesi, iki anten arasındaki kuplajın düşük olduğunu göstermektedir.



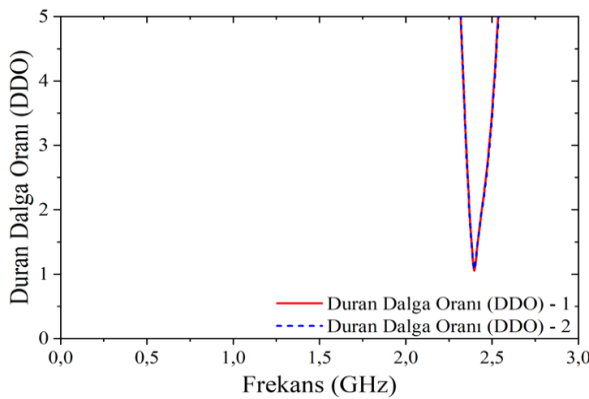
Şekil 9. Çoklu Giriş Çoklu Çıkış Antene Ait Yüzey Akım Dağılımı

Şekil 10'da iki portlu çoklu giriş çoklu çıkış antenin iki boyutlu ve üç boyutlu kazanç grafikleri sunulmakta olup, 2.4 GHz'de 4.77 dBi kazanç elde edilmektedir. Şekil 10'a ve 10b'de sırasıyla $\phi=0^\circ$ için E-düzlemi ve $\phi=90^\circ$ için H-düzlemine ait iki boyutlu ışıma desenleri gösterilmektedir. Şekil 10c'de ise üç boyutlu ışıma deseni verilmektedir.



Şekil 10. a) İki Boyutlu Işıma Modeli $\Phi=0^\circ$ b) İki Boyutlu Işıma Modeli $\Phi=90^\circ$, c) Üç Boyutlu Işıma Modeli

Şekil 11'de İki portlu çok girişli çok çıkışlı antene ait her bir porttan elde edilen duran dalga oranı (VSWR) değerini göstermektedir.



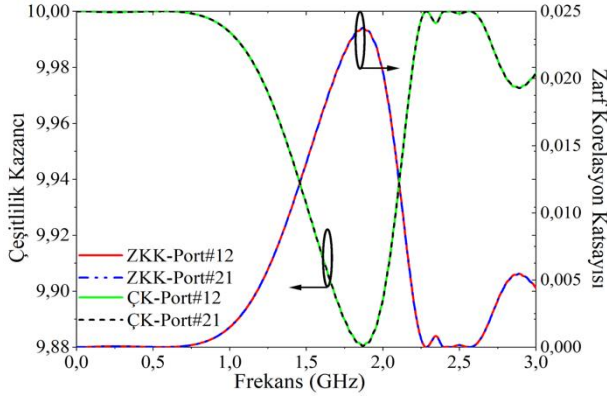
Şekil 11. Çok Girişli Çok Çıkışlı Antene Ait Duran Dalga Oranı

Çoklu girişli çoklu çıkış anten sistemlerinin performansını değerlendirmede kritik bir parametre olan zarf korelasyon katsayısı (ECC)

analiz edilmektedir. Teorik olarak ideal bir sistemde ECC'nin sıfır olması beklenirken, uygulamada çeşitli kayıplar nedeniyle $ECC < 0.5$ değeri yeterli kabul edilmektedir. MIMO antenlerde ECC, S-parametrelerine dayalı olarak denklem (1) ile hesaplanabilmektedir (Blanch et al., 2003). Bu çalışmada tasarlanan MIMO anten yapısı için elde edilen ECC değerleri, Şekil 12'de sunulmaktadır.

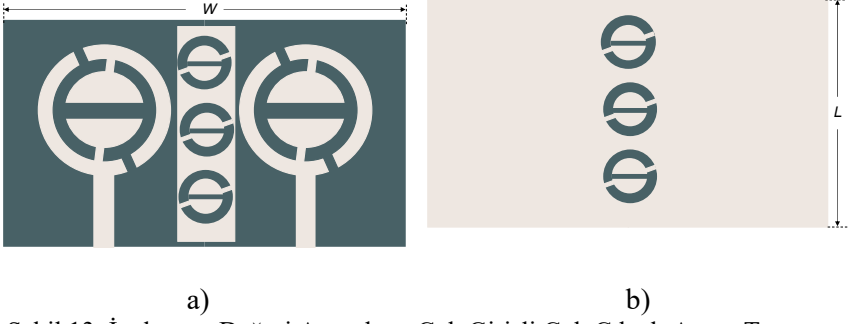
$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (1)$$

Çeşitlilik kazancı (DG), Antenin MIMO özelliklerinin yeterli olup olmadığını incelemek için bir başka temel bileşendir. Kablosuz sistemlerde çeşitlilik kazancı 10 dB'e yakın olmalıdır. MIMO anteninin çeşitlilik kazancı, Denklem (1) kullanılarak ECC'den türetilmektedir (Blanch et al., 2003). Simüle edilen kazanç değeri Şekil 12'de gösterilmektedir.



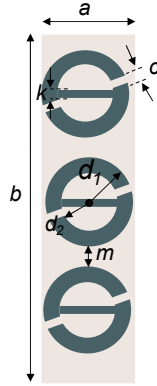
Şekil 12. Çok Girişli Çok Çıkışlı Antene ait Çeşitlilik Kazancı ve Zarf Korelasyon Katsayısı

İki portlu çok girişli çok çıkışlı antenlerin arasına soğurucu yüzey yapısı eklenerek izolasyon seviyesinin artırılması sağlanmaktadır. Şekil 13'te tasarımı yapılan çok girişli çok çıkışlı antenlerin arasına soğurucu yüzey eklenerek izolasyon seviyesinde iyileştirme sağlanmaktadır



Şekil 13. İzolasyon Değeri Arttırılmış Çok Girişli Çok Çıkışlı Anten Tasarımı

Önerilen soğurucu yüzey yapısına ait uzunluk değerleri ve yapısının gösterimi şekil 14’te verilmektedir.

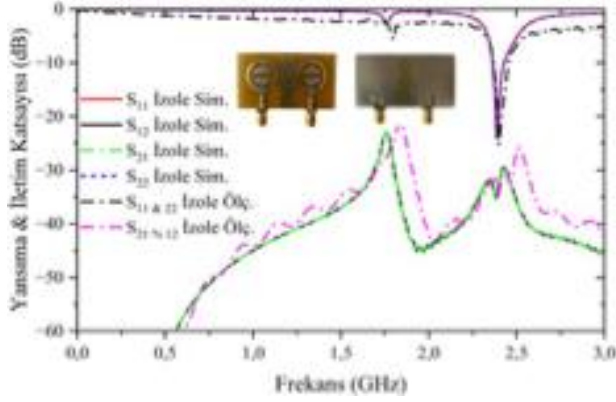


Şekil 14. Önerilen Soğurucu Yüzey Yapısına Ait Uzunluk Değerleri

Önerilen soğurucu yüzey yapısına ait uzunluk değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

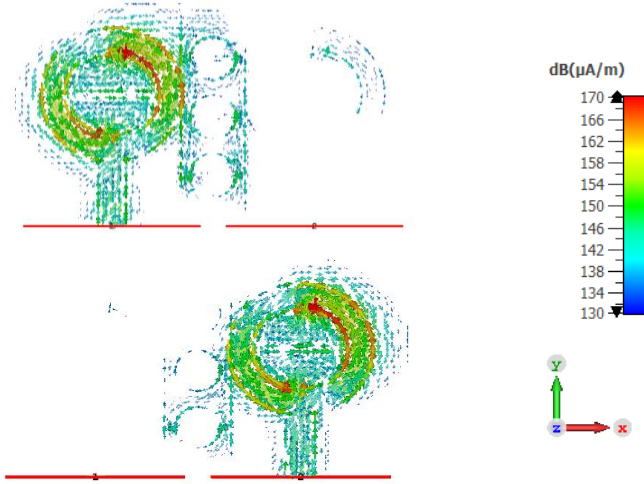
Tablo 2. Soğurucu Yüzey Yapısına Ait Uzunluk Değerleri			
Parametre	Uzunluk (mm)	Parametre	Uzunluk (mm)
a	8	b	30.88
c=m	1	k	0.75
d ₂	2.5	d ₁	3.9

Şekil 15’te, iki portlu çok girişli çok çıkışlı antenler arasına yerleştirilen soğurucu yüzey ile elde edilen yansıma ve iletim katsayılarının simülasyon ve ölçüm değerleri gösterilmektedir. 2.4 GHz merkez frekansta, anten 2.38–2.48 GHz aralığında 100 MHz bant genişliği, -25.1 dB geri dönüş kaybı ve -34.8 dB izolasyon sunmaktadır. Soğurucu yapı sayesinde izolasyon değerinde 18.4 dB iyileşme sağlanmaktadır.



Şekil 15. Araya Soğurucu Yüzey Eklenecek Tasarımı Yapılan Çok Girişli Çok Çıkışlı Antene Ait Yansıma ve İletim Katsayılarını

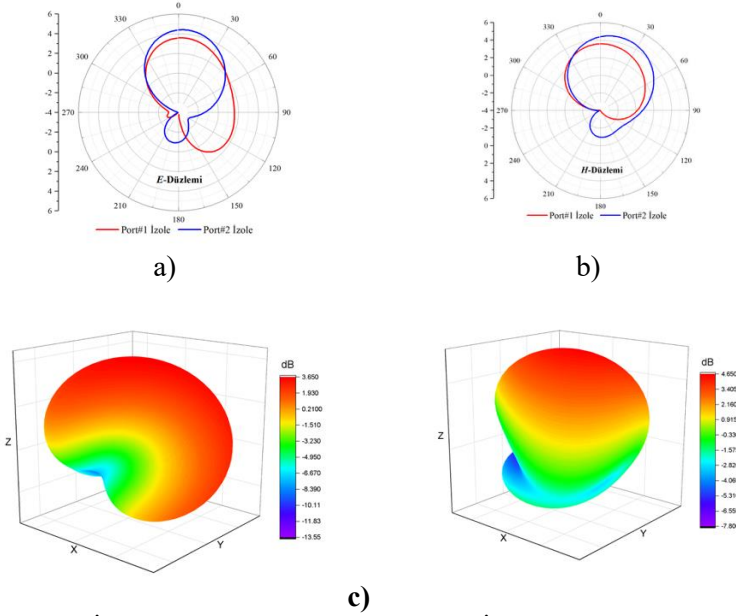
Şekil 16'da, 2.4 GHz'de yüzey akımı dağılımı gösterilmekte olup, maksimum akım genliği 170 dB μ A/m'dir. Diğer anten elemanındaki düşük akım yoğunluğu, iki anten arasında zayıf kuplaj olduğunu göstermektedir.



Şekil 16. Araya Soğurucu Yüzey Eklenecek Tasarımı Tamamlanan Çok Girişli Çok Çıkışlı Anten Tasarımına Ait Yüzey Akım Dağılımı

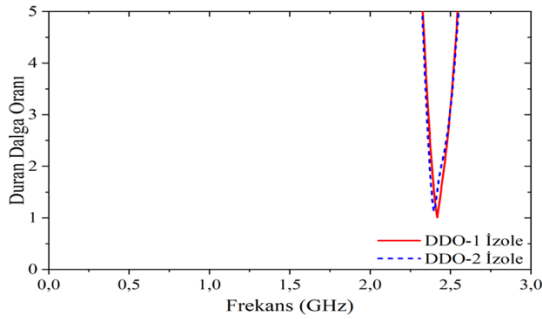
Soğurucu yüzey eklenerek oluşturulmuş çok girişli çok çıkışlı anten için elde edilen kazanç grafiği Şekil 17'de iki boyutlu ve üç boyutlu olarak gösterilmektedir. 2.4 GHz'de anten kazancı 4.61 dBi olmaktadır. Şekil 17 a'da $\Phi=0^\circ$ frekansında E-düzlemini ve b'de $\Phi=90^\circ$ 'de 2.4 GHz frekansında H-düzlemini iki boyutlu ışıma modellerini göstermektedir. Şekil

17c ve d' de ise anten elemanlarına ait üç boyutlu ışma deseni verilmektedir.



Şekil 17. a) İki Boyutlu Işıma Grafiği $\Phi=0^\circ$ b) İki Boyutlu Işıma Grafiği $\Phi=90^\circ$, c) Üç Boyutlu Işıma Grafiği

İzolasyon seviyesi artırılarak oluşturulan antene ait duran dalga oranı Şekil 18'de verilmektedir.

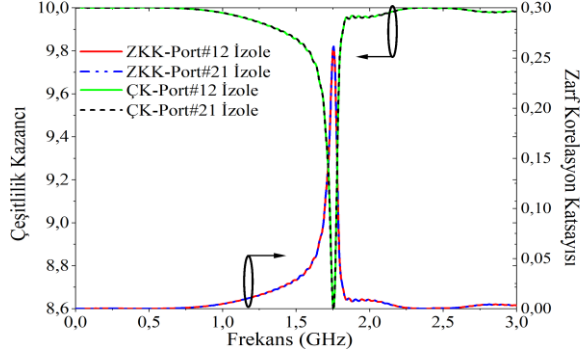


Şekil 18. Araya Soğurucu Yüzey Eklenmiş Çok Girişli Çok Çıkışlı Antenin Duran Dalga Oranı

Denklem (1) kullanılarak tasarlanan araya soğurucu yüzey eklenerek oluşturulan çok girişli çok çıkışlı anten için elde edilen ECC değerleri Şekil 19'da gösterilmektedir (Blanch et al., 2003).

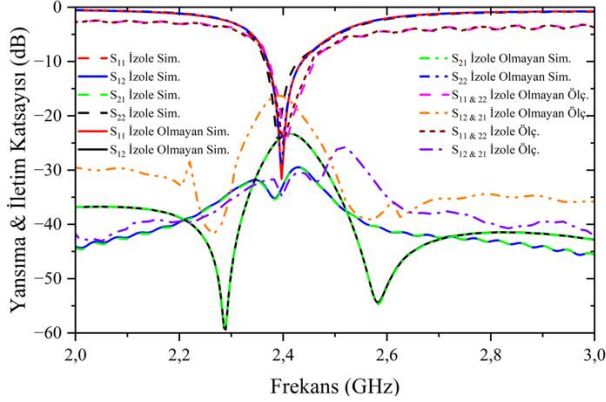
$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (1)$$

Simüle edilen çeşitlilik kazanç değeri Şekil 19’da gösterilmektedir.



Şekil 19. Araya Soğurucu Yüzey Eklenmiş Çok Girişli Çok Çıkışlı Antenin Çeşitlilik Kazancı ve Zarf Korelasyon Katsayısı Değeri

Soğurucu yüzey eklenmiş ve soğurucu yüzey eklenmemiş antenlerin simülasyon ve ölçüm sonuçlarından elde edilen grafikleri Şekil 20’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre merkez frekansı olan 2.4 GHz frekansında 18.4 dB izolasyon değeri iyileştirilmektedir.



Şekil 20. Araya Soğurucu Eklenmiş ve Eklenmemiş Çok Girişli Çok Çıkışlı Antenin Yansıtma ve İletim Katsayıları

SONUÇ

Bu çalışma, ISM bandında çalışan, yüksek izolasyonlu ve kompakt bir çoklu giriş çoklu çıkış anten tasarımı sunarak kablosuz iletişim sistemlerindeki performans gereksinimlerini karşılamayı hedeflemektedir. Tasarım çalışmalarına 2.4 GHz merkez frekansında çalışan tek portlu dairesel şekilli mikroşerit hat beslemeli referans anten tasarımı yapılarak başlanılmaktadır. Tasarımı yapılan tek portlu anten 2.38-2.45 GHz frekansları arasında 70 MHz bant genişliği değeri -25.23 dB geri dönüş kaybı değeri ve 3.68 dBi yönlülük kazanç değeri sunmaktadır. Tasarım aşamasının ikinci kısmında tek portlu anten çok girişli çok çıkışlı hale getirilerek antenler yan yana yerleştirilmektedir. Anten 2.4 GHz merkez frekansında 2.38-2.48 GHz frekansları arasında 100 MHz bant genişliği değeri -25.2 dB geri dönüş kaybı değeri ve -16.4 dB izolasyon değeri sunmakla beraber 4.77 dBi yönlülük kazanç değeri elde edilmektedir. Anten elemanları arasındaki karşılıklı etkileşimi en aza indirmek ve sistem performansını artırmak amacıyla, yüksek soğurma oranına sahip bir soğurucu yapı kullanılarak tasarımın üçüncü aşamasında ise anten elemanları arasına soğurucu yüzey eklenmektedir. Eklenilen soğurucu yüzey ile oluşturulan çok girişli çok çıkışlı anten tasarımında ise 2.4 GHz merkez frekansında 2.38-2.48 GHz frekansları arasında 100 MHz bant genişliği değeri, -25.1 dB geri dönüş kaybı değeri ve izolasyon seviyesinde ise 18.4 dB bir iyileşme göstererek -34.8 dB izolasyon değeri elde edilmektedir. Bu sayede, antenler arasındaki izolasyon seviyesi artırılarak sinyal kirliliği ve parazit etkileri azaltılmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda, ISM bandında çalışan, kompakt ve yüksek performanslı bir çok girişli çok çıkışlı anten tasarımı sunularak literatüre özgün bir katkı sağlanmaktadır.

Bu çalışma TÜBİTAK-BİDEB 2209/A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012327030 Numaralı Başvuru/Proje No ile desteklenmiştir.

Bu çalışma TÜBİTAK-BİDEB 2209/A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında 1919B012327030 Numaralı Başvuru/Proje No ile desteklenmiştir.

REFERANSLAR

- Adel, R. N., & Khidhir, A. H. (2022). Design Of Inverted F-Shape Antenna At 2.35 Ghz For S-Band Applications. *Al-Nahrain Journal Of Science*, 25(4), 38–42.
- Akter, M. S., & Ahmed, M. F. (2022). Inset Fed Rectangular Patch Antenna Design For ISM Band Applications.

- Ali, A., Yasin, M. N. M., Adam, I., Ismail, A. M., Jack, S. P., Alghaihab, A., Nor, N. I. M., & Rahman, N. A. A. (2024). Mitigating mutual coupling effects on circular polarization for improved bandwidth in MIMO systems: A novel approach. *Heliyon*, 10(6), e27782. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27782>
- Ambika, A., & Tharini, C. (2019). Semicircle csrr with circular slot array structures for High Level mutual coupling reduction in Mimo antenna. *Progress in Electromagnetics Research M*, 87, 23–32. <https://doi.org/10.2528/PIERM19091001>
- Blanch, S., Romeu, J., & Corbella, I. (2003). Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description.
- Derévianckine, G. H., Guitton, A., Iova, O., Ning, B., & Valois, F. (2024). Hate Or Love In The 2.4 Ghz ISM Band: The Story Of Lora® And
- Elabdi, R. H., & Al-Gburi, A. J. A. (2024). Low Mutual Coupling Miniaturized Dual-Band Quad-Port MIMO Antenna Array Using Decoupling Structure For 5G Smartphones. *Discover Applied Sciences*, 6(4).
- Essa, A., Almajali, E., Mahmoud, S., Amaya, R. E., Alja' Afreh, S. S., & Ikram, M. (2024). Wireless power transfer for implantable medical devices: Impact of implantable antennas on energy harvesting. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 5(3), 739–758. <https://doi.org/10.1109/ojap.2024.3392160>
- Haque, M. A., Nirob, J. H., Nahin, K. H., Ahammed, M. S., Singh, N. S. S., Paul, L. C., Algarni, A. D., ElAffendi, M., El-Latif, A. A. A., & Ateya, A. A. (2024). Regression supervised model techniques THz MIMO antenna for 6G wireless communication and IoT application with isolation prediction. *Results in Engineering*, 24(103507), 103507. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103507>
- Heylen, M., Bossuyt, P., Provoost, P., Borremans, D., & Rampelberg, C. (2022). Making Antennas For 6G. *Fusion Of Multidisciplinary Research. An International Journal*, 3(1), 235–247.
- Iqbal, A., A Saraereh, O., Bouazizi, A., & Basir, A. (2018). Metamaterial-based highly isolated MIMO antenna for portable wireless applications. *Electronics*, 7(10), 267. <https://doi.org/10.3390/electronics710026>
- Kale, R. U., & Sawale, D. M. D. (2024). A systematic review of design and performance enhancement techniques for the reduction of radar cross section in multiple input multiple output antennas. *Computers & Electrical Engineering: An International Journal*, 120(109697), 109697. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109697>
- Khidhir, A. H. (2023). Implementation of a circular shape patch antenna at 2.4 GHz for different wireless communications. *Iraqi Journal of Science*, 205–214. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2023.64.1.21>

- Mapa, M. I., Dominee Kyle M. Ibarlin, & Arboleda, E. R. (2024). Optimizing antenna performance: A review of multiple-input multiple output (MIMO) antenna design techniques. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(2), 483–444. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.12.2.1252>
- Montlouis, W., & Imoize, A. L. (2025). Fundamentals Of Wireless Communications: Massive MIMO Essentials For 6G And Beyond. *Massive MIMO For Future Wireless Communication Systems: Technology And Applications*. 1–21.
- Njokweni, S. N., & Kumar, P. (2020). Salt and sugar detection system using a compact microstrip patch antenna. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.21307/ijssis-2020-027>
- Qian, J., Izquierdo, B. S., Gao, S., Wang, H., Zhou, H., & Xu, H. (2024). A novel low-cost H-plane decoupling technique for two closely placed patch antennas using electric and magnetic coupling cancellation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 72(5), 3864–3873. <https://doi.org/10.1109/tap.2024.3376075>
- Raja, D. S. S., Kumar, D. R., Santhiyakumari, N., Kumarganesh, S., Sagayam, K. M., Thiyaneswaran, B., ... Pandey, D. (2024). A compact dual-feed wide-band slotted antenna for future wireless applications. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 118(2), 291–305. doi:10.1007/s10470-023-02233-0
- Ravikiran, H. K., Jayanth, J., Farheen, H. S., & Yogeesh, N. (2023). GSSS Institute Of Engineering And Technology For Women, & Navkis College Of Engineering. *International Journal Of Engineering Applied Sciences And Technology*, 7(9), 167–170. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2023.V07i09.025>
- Rohaninezhad, M., Asdabadi, M. J., Ghobadi, C., & Nourinia, J. (2024). Mutual Coupling In The Antennas. *Free Space Optics Technologies In B5G And 6G Era-Recent Advances*. In *New Perspectives And Applications: Recent Advances, New Perspectives And Applications*.
- Rojek, I., Kotlarz, P., Dorożyński, J., & Mikołajewski, D. (2024). Sixth-generation (6G) networks for improved machine-to-machine (M2M) communication in Industry 4.0. *Electronics*, 13(10), 1832. <https://doi.org/10.3390/electronics13101832>
- Roy, S., & Chakraborty, U. (2020). Mutual coupling reduction in a multi-band MIMO antenna using meta-inspired decoupling network. *Wireless Personal Communications*, 114(4), 3231–3246. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07526-5>
- Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. A. (2024). *Antennas And Propagation For Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons.

- Sharma, S., Popli, R., Singh, S., Chhabra, G., Saini, G. S., Singh, M., Sandhu, A., Sharma, A., & Kumar, R. (2024). The role of 6G technologies in advancing smart city applications: Opportunities and challenges. *Sustainability*, 16(16), 7039. <https://doi.org/10.3390/su16167039>.
- Singh, A., Das, L., & Anand, P. (2024). Multi-Input-Multi-Output Antenna. In *Practical Antenna: Design, Analysis, And Applications*.
- Tharini, B., & Kannammal, A. (2024). Design and Analysis of Asscher-shaped Two-element MIMO Antenna.

Biber Sapı Katkılı Biyobozunur Kompozitlerin Sentezlenmesi ve Yüzey Karakterizasyonu

Ceyda BİLGİÇ¹

Cemre Su ZÜBERİ²

1 Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü ceydabilgic@gmail.com Orcid No: 0000-0002-9572-3863

2 Yüksek Lisans Öğrencisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü cemrezuberi@hotmail.com Orcid No: 0000-0003-2144-229X

ÖZET

Son yıllarda, organik atıkları takviye veya doğal elyaf takviyeli kompozit malzemelerde (NFC) dolgu maddesi olarak kullanmak, yeni malzeme geliştirme alanına ilgi ile önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Organik atıkların NFC'lerin bir kısmı olarak değerlendirilmesi, sentetik dolgu maddeleri veya polimerler gibi NFC'leri üretmek için kullanılan yenilenemeyen kaynakların en aza indirilmesi de dahil olmak üzere çok sayıda değerle sonuçlanmıştır. Bu kompozitleri hazırlamak için kullanılan hammaddenin toplam maliyetini düşürebilir, çünkü kullanılan kaynakların çoğunluğu yenilenebilir kaynaklardan elde edilmektedir, özellikle organik veya tarımsal atıklardan oluşmaktadırlar. Bu çalışmada, Ters gaz kromatografisi (TGK), biber sapı atıkları üzerindeki bazı problemlerin (n-C6 ile n-C9 serisindeki n-alkanlar) yüzey adsorpsiyonunu ölçmek için kullanılmıştır. Yüzey enerjisinin dağılım bileşeni (γ^d_s), sonsuz seyreltme bölgesinde farklı polar problemlerin alıkonma süresi kullanılarak hesaplanmıştır. Biber sapı atıklarının yüzey enerjisinin dağılım bileşeni 40 ila 70 °C arasında hesaplanmıştır. Ayrıca Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi kullanılarak incelenen maddenin yüzey karakterizasyonu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik atık, Biber sapı, biyobozunur kompozit malzemeler, Ters gaz kromatografisi (IGC), Karakterizasyon.

GİRİŞ

Biyobozunur olmayan plastiklerin yaygın kullanımı, plastik atıkların izin verilen sınırlarını aşmıştır ve tüm dünyada çevresel dengesizlik durumu yaratmaktadır. Yakılan veya toprağa gömülen bol miktarda tarımsal atık, sera gazları, duman ve partikül maddeleri doğrudan çevreye salınmakta ve çevre yasalarını ihlal etmektedirler. Bu nedenle, araştırmacılar, buğday samanı, pirinç samanı, kenevir, kenaf, jüt, sisal gibi tarımsal atıkları, alternatif biyolojik olarak parçalanabilir malzemeler kullanarak plastik atık oluşumunu azaltmak için uygun yolu bulmalıdırlar (Dixit ve Yadav, 2019a:494; Dixit ve Yadav, 2020:1; Dixit vd., 2020:2386; Dixit ve Yadav 2019b). Tarımsal atıkların selülozik özelliği, araştırmacıları yenilenebilir özelliklerinden dolayı biyolojik olarak parçalanabilen kompozitleri sentezlemeye motive etmiş ve biyolojik olarak parçalanamayan plastiklere kıyasla olağanüstü mekanik ve termal kararlılıklar sağlanmıştır. Genel olarak, polietilen, polilaktik asit, polipropilen, nişasta ve tarımsal atıklar gibi polimerler, yeşil ambalaj uygulamaları için dikkate değer bir tutarlılığa sahiptirler.

Tarımsal atıkların polimer matrikste takviye maddesi olarak mükemmel şekilde kullanılması, mevcut araştırmacılar için ufuk açıcudur. Birçok

araştırmacı, ucuz, hafif, yüksek gerilme mukavemeti ve referans termal kararlılığı nedeniyle biyolojik olarak parçalanabilir ambalaj filmi sentezlemek için tarımsal atık kullanımını desteklemektedirler. Tarımsal atıktaki artırılmış selüloz yüzdesi alanı, yeşil tarımsal atık içeren polimerlerin katkısını en aza indirmek için bu lifin uygunluğunu teşvik etmektedir. Bu nedenle, paketlenme uygulaması için yeşil kompozitlerin sentezlenmesi için tarımsal atıkların uygun kullanımı günümüzün ihtiyaçlarıdır (Zegaoui vd., 2018:146; Dayo vd., 2017:114).

Doğal tarımsal atık içeren polimerik filmler, hidrofilik yapıları nedeniyle petrol türevli malzemelerle karşılaştırıldığında düşük mekanik ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Doğal bileşim (lignin ve hemiselüloz), tarımsal atıkların polimerik filmi başarıyla güçlendirmesine izin vermemektedir. Üstelik bu durum, tarımsal atıkla güçlendirilmiş polimerik filmin daha az mekanik kararlılık göstermesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, birçok kimyasal modifikasyon tekniği, polimer matriste uygun harmanlama için tarımsal atığın yüzey özelliğini geliştirmiştir. Bu strateji, tarımsal atıklardan istenmeyen içeriklerin çıkarılmasına yardımcı olmaktadır ve harmanlama özelliklerini iyileştirmek için yüzeyde bazı boşluklar yaratmıştır. Kimyasal, fiziksel ve biyolojik arıtmalar, tarımsal atıkların inatçı doğasını azaltmak için sıklıkla kullanılan popüler tekniklerden bazılarıdır. Pek çok araştırmacının bulguları, modifiye edilmiş tarımsal atık içeren polimerik filmin mekanik ve termal özelliklerinin, doğal tarımsal atıkla güçlendirilmiş polimerik filme kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu açıklamıştır. Bu nedenle, tarımsal atıktaki yüzey ilerlemesi, polimerik kompozit araştırmasında gelişmekte olan bir alandır (Dixit ve Yadav, 2019c:1).

Birçok araştırmacı, organik atıklar ekleyerek NFC'leri üretmenin çeşitli olası yollarını bildirmişlerdir. Birkaç araştırmada, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) veya yüksek yoğunluklu polipropilen (HDPP) ilavesi ile birlikte hayvan gübrelerinden NFC'ler üretilmiştir. Şeker kamışı küspesi, ayçiçeği ve mısır sapları gibi tarımsal atıklardan üretilen NFC'lerin özelliklerini karşılaştırmak amacıyla bazı araştırmalar yapılmıştır. Şeker kamışı küspesinden yapılan kompozitlerin diğer tarımsal atıklarla karşılaştırıldığında zengin selüloz içeriği sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda tarımsal atıklarda güçlendirilmiş NFC'lerin fiber morfolojisi yerine en-boy oranı gibi mekanik özellikleri, selüloz ve lignin gibi liflerin yönettiği, mikroskobik kimyasal içerikleri yönettiği belirtilmiştir. Bunun nedeni tamamen arayüzey üzerindeki mikroskobik içerikler ile matris ve takviyelerin doğrudan etkileşimidir.

Birçok olumlu sonuca rağmen, organik atıkları kullanma imkanı ve plastikler gibi yenilenemeyen türevlere alternatif olarak artık malzemeler derinlemesine çalışılmalıdır. Selüloz ve kül gibi kağıt çamuru bileşenleri,

kullanılan çeşitli çamur türleri ile birlikte kompozitlerin mekanik özelliklerini etkilemiştir. Araştırmacılar ayrıca atık gazete kağıdı lifinden ve güçlendirilmiş odun unundan yapılmış hibrit NFC'ler ve polipropilen (PP) ve maleik anhidrit aşılı polipropilen (MAPP) hazırlamayı denemiştir. Hazırlık sırasında, gazete liflerinin en boy oranı odun unundan en az dokuz kat daha fazla bulunmuş ve bu da kompozitlerin mukavemetinin artmasına neden olmuştur (Stark ve Rowlands 2003). Bu kompozitler, birleştirme ajanlarının yokluğunda takviyesiz PP'ye göre (termo gravimetrik analiz (TGA) kullanılarak ölçülmüştür) daha iyi yanma dayanımları ve termal kararlılık sergilemişler ve bu gözlemler Hamzeh ve arkadaşlarının çalışmaları ile benzer sonuçlar vermiştir (Hamzeh vd., 2011:120).

Yine de, PP'de güçlendirilmiş hibrit NFC'lerin mekanik özellikleri MAPP'nin bunlara dahil edilmesinden sonra daha iyileşmiştir (Ashori ve Nourbakhsh, 2010:680). Hibrit kompozitlerde ahşap unu miktarı artırıldığı zaman, ısıl kararlılık daha iyi hale gelmiştir. Bu durum odun ununda büyük miktarda lignin içeriği bulunmasından kaynaklanabilir. Bu tür hibridizasyon, muhtemelen keşfedilebilecek daha iyi sonuçlar verecektir. Bu hibridizasyonlar, aşağıdaki yollardan herhangi biriyle uygulanabilir olacaktır: (i) tek elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aksine, kimyasal ve fiziksel olarak farklı elyafların kullanılması birçok avantaj sağlar, (ii) tek bir kompozit malzemenin üretiminde birçok organik atığın kullanımı NFC'leri üretmek için atıkların yararlı kullanımını sağlayacaktır.

Norveç ladin ağacı hamurundan elde edilen uzun yağ fraksiyonları NFC'lerin hazırlanması için çok etkili bileşenler olan etan ve propen monomerlerini hazırlamak için kullanılmıştır (Pyl vd., 2012). Ağırlıkça %35 etan ve ağırlıkça %18 propen, nikel-molibden hidro-işlem katalizörlerinin mevcudiyetinde hamur hidrdeoksi üretimi vasıtasıyla uzun yağ yağ asitlerinden elde edilebilir. Bu nedenle, NFC'lerin üretiminde katkı maddesi veya takviye olarak organik atığın benimsenmesi yukarıdaki gerçeklerden açıkça görülebilir. Deneysel çalışmalar tarımsal atık ve artıkların kullanımına yönelik araştırmaların hızla arttığını kanıtlamaktadır. NFC hazırlıklarında atık ve artık malzemelerin kullanım yöntemleri ve bu fosil yakıtların kullanımını en aza indirir ve bu da çevresel etkileri azaltır. Bu kompozit endüstrileri söz konusu olduğunda da bir trend belirleyici olmuştur.

Bununla birlikte, NFC'lerin temel bileşenleri arasındaki etkileşimi iyileştirmek ve istenen özelliklerin elde edilmesi için diğer katkı maddelerinin birleştirici ajanlarının kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir. NFC pazarlarının ve endüstrilerinin mevcut hacmi, hızla artan yıllık atıkları NFC'lerde katkı maddesi olarak kullanarak en aza indirmek için yeterli

değildir (Mohammed vd., 2015). Hamzeh ve arkadaşları, yıllık organik atıkların 2025 yılı sonuna kadar 19 milyar tona kadar ulaşabileceğini tahmin ediyor. Atık yönetimi için şu anda gerekli olan atıklar ve bunları NFC'lerde kullanımı, NFC'lerin üretimindeki engellerin üstesinden gelmek için yeni bir teknolojiye yönelik talepler arasındadır (Hamzeh vd., 2011:120). Çalışmalar, organik atıkları takviye olarak kullanmak gibi çok yönlü yolları ortaya koymuştur.

Bu çalışma, biber sapı atıklarından selüloz eldesi potansiyelinin bir değerlendirmesini sunmaktadır. Literatürde bitkisel atıklardan selüloz eldesinde kullanılan yöntemlerdeki ayrım belirsizdir (Dhaka vd. 2015:54; Jedrzejczyk vd., 2019:143). Bu yayında selüloz eldesi için özellikle biber sapı atıklarının seçilmesinin nedeni; kimyasal bileşiminde % 7,9 oranında selüloz; %12, 1 hemiselüloz ve % 2,1 lignin içeriği nedeniyle tercih edilmiştir (Holilah vd., 2022:593). Bu amaçlar doğrultusunda, yerel esnaflardan temin edilmiş biber sapı atıkları hammaddesi, selüloz eldesi için kullanılmıştır. Bunun için biber sapı atıkları hammaddesinin karakterizasyonu yapılmıştır. Biber sapı atıkları hammaddesinin yüzey özelliklerinin araştırılmasında sonsuz seyreltmede uygulanan ters gaz kromatografisi (TGK) yöntemi kullanılmıştır. Ters gaz kromatografisi (TGK), adsorpsiyonun yüzey enerjisinin dispersif (dağılım) bileşenini belirlemek ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), analizi kullanılarak incelenen maddenin yüzey karakterizasyonunun tespit edilmesini sağlamıştır.

BİTKİSEL ATIKLAR

Bitkisel atıklar genellikle çiftçiler tarafından çeşitli tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Bitkisel atık, ekonomik değeri olmayan atıktır. Bitkisel atık, hafif, kolayca bulunabilen, nispeten düşük maliyetli bir ürüne ve işlenmesi basit bir malzemeye sahiptir. Bu nedenle, bitkisel atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi ve daha iyi kullanılması, yeşil yaşam için temel beklentilerdendir. Birçok bilim insanı, bitkisel atıkların, otomotiv, paketlenme, ev ve inşaat endüstrileri gibi çeşitli uygulamalar için kompozitlerin gerilme stabilitesini artırmak için polimer matriste dolgu maddesi olarak kullanma özelliğine sahip olduğunu incelemişlerdir. Böylece insan yaşamı için yeni bir yeşil çevre oluşturulacaktır (Chawla ve Bastos, 1979:191).

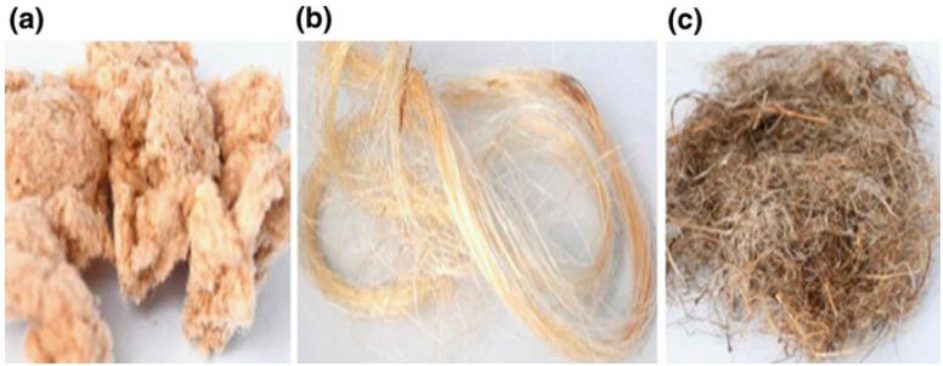
Günümüzde, çevre hususları, araştırmacıları tarımsal atıkların polimer matriste takviye maddesi olarak kullanımını artırmaya ve çevre denge koşulunu korumaya teşvik etmiştir. Tarımsal atıklar, tarla kalıntıları ve proses kalıntıları olmak üzere iki şekilde kategorize edilebilir. Tarla atıkları sap, saman, yaprak ve tohum kabukları gibi sınıflandırılırken, proses artıkları kabuk, tohum, kök ve küspe şeklinde sınıflandırılır (Sadh vd., 2018:1). Tarımsal atıklara gömülü ürünler, uzun ömürlü dayanıklılık özelliği ile düşük

bakım gerektirir. Bununla birlikte, bu özellikler, sanayicileri yeşil kompozit hazırlama için tarımsal atıkların artan kullanımına çekmektedir.

Bitkisel atık, güçlü bir lignin duvarı tarafından korunan hemiselüloz ile sıkıca gömülü selülozdan oluşur. Bitkisel atıktaki selüloz, lignin ve hemiselüloz yüzdesi, tarımsal atık türüne göre değişmektedir (Sadh vd., 2018:1). Arzu edilen özellikleri elde etmek için, tarımsal atıktaki daha yüksek selüloz yüzdesi, araştırmacıları yeşil ambalaj filmi sentezlenmesi ve bunların kullanılmasına teşvik etmiştir.

Bitkisel Atık Katkılı Kompozitler

Bitkisel lifler, Şekil 1'de gösterildiği gibi sap ve küspe olarak çeşitli formlarda ve uzunluk, çap, yüzey pürüzlülüğü ve en boy oranı gibi farklı morfolojilerde mevcut bulunmaktadır. Elyaf yüzeyleri aynı zamanda fonksiyonel gruplar yapmak için kolayca değiştirilebilir, lifler ek olarak hidrofobik veya hidrofiliktir ve bağlanmaya hazır hale getirilebilir (Faruk vd., 2012).



Şekil 1. Bitkisel lifler a.hamur b.lifsi c.elyaf (Faruk vd., 2012:1552).

Soroushian ve arkadaşları (2012:44), %100'ün ağırlık kısmında takviyenin % 8'i kadar hamur elyafı ile güçlendirilmiş çimento kompozitleri üretmek için Hatschek tekniğinde bulamaçlı vakumlu susuzlaştırma yöntemini kullanmışlardır. Burada %20 katı malzeme, su dispersiyonlu donatıların matrisi ile karıştırılarak bulamaç (harman) oluşturulmuştur. Daha sonra bulamaç, delikleri açılmış bir kalıba dökülür ve vakum uygulanmıştır. Daha sonra bulamaçın üzerine konulan levhaya, bulamacın kalınlığı 15 mm'ye düşene kadar sıkıştırılmış yük uygulanmıştır (Soroushian vd., 2012:44). Deneyler ayrıca ağırlıkça yaklaşık %4 oranında pinus (çam) ve pamuğu takviye edilmiş selüloz kompozitlere basınç altında susuzlaştırma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Claramunt vd., 2011:586). Çimento, akışkanlaştırıcı, su ve kum; sulu çimento hamurunun 1:1

oranındaki bileşenleridir. Bu macun, suda dağılmış selüloz lifler ile birleştirilmiştir. En az miktarda kum ve çimento kaybı sağlamak ve karışımdan çıkan suyun çoğunu uzaklaştırmak için, numuneler mikro ızgaralı bir kalıba yerleştirilmiş ve yük uygulanmıştır. Kalıp daha sonra bir plakaya aktarılmış ve titreşimli bir masa kullanılarak nihai bir basınç elde etmek için yaklaşık 24 saat boyunca sıkıştırılmıştır.

MALZEMELER VE YÖNTEMLER

Biyokütle kaynağı olarak kullanılan biber sapı yerel esnaflardan ve evsel atıklardan temin edilmiştir. Biber sapı atıklarından selüloz eldesi için kullanılan maddeler; Benzen (C_6H_6 , $\geq 99\%$, Sigma Aldrich), Etanol (C_2H_6O , Merck), Sodyum Klorit ($NaClO_2$, 80% , Sigma Aldrich), Asetik Asit (CH_3COOH , $99,8\%$, SigmaAldrich), Potasyum Hidroksit (KOH , 90% , SigmaAldrich) ve Sülfürik Asit (H_2SO_4 , $95-97\%$, SigmaAldrich) tir. Kimyasal reaktifler daha fazla saflaştırılmadan kullanılmıştır. Diyaliz tüpü selüloz membranı (moleküler ağırlık kesme = 12.000 Da) Sigma Chemical'dan (St. Louis, MO) satın alınmıştır.

Kromatografik deneyler, alev iyonizasyon dedektörü (FID) ile donatılmış Agilent 7890 gaz kromatografisi ile gerçekleştirildi. TGK analizi için kullanılan a-polar problar hegzan, heptan, oktan ve nonandır. Bu kimyasalların hepsi analitik saflıktadırlar ve daha fazla saflaştırma yapılmadan kullanılmışlardır. Propların gerekli diğer özellikleri literatüründen alınmıştır (Cordeiro vd., 2011:108). Bu problar genellikle TGK yöntemi ile gerçekleştirilen katı yüzey karakterizasyonları için kullanılmaktadırlar. İncelencek katı numuneleri kolonlara doldurmak için bir vakum pompası kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak yaklaşık 40 mL/dakika akış hızına sahip yüksek saflıkta azot kullanılmıştır. Taşıyıcı gazın akış hızı, James-Martin gaz sıkıştırılabilirlik faktörü kullanılarak kolondaki basınç düşüşü ve sıcaklık değişimi için düzeltilmiştir. Daha önce metanol ve asetonla yıkanmış paslanmaz çelik bir kolon (2,00 m uzunluğunda, 5,35 mm iç çapa sahip) Biber sapı atıklarıyla dolduruldu. Kolonun iki ucu silanla işlenmiş cam yünüyle kapatıldı. Ölçümler 40-70 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Kolon, 150 °C'de azot akışında bir gece boyunca stabilize edildi. Kolonların ölü hacimleri metan enjekte edilerek belirlendi. Net tutma hacminin (V_N) ortalamasının hesaplanmasında en az üç tekrarlı belirleme kullanılmıştır.

Hesaplamalar

Ters gaz kromatografisi (TGK), katıların yüzey serbest enerjisini ve yüzey özelliklerini incelemek için kullanılır; çalışma genellikle adsorbe edilen prob molekülleri arasındaki etkileşimlerin ihmal edilebilir olduğu sonsuz seyrelme bölgesi alanında gerçekleştirilir. TGK, pürüzlü ve gözenekli tozların yüzey enerjisini ölçmek için mükemmel bir yöntem sunmaktadır (Hole vd.,

2011:1847). Yüzey enerjisi, katının yüzeyindeki dengesiz moleküler kuvvetlerin bir sonucudur. İki farklı katkıyla oluştuğu düşünülebilir: dağılım (dispersive) bileşeni ve spesifik (specific) bileşenlerdir. Bir dizi homolog n-alkanın alıkonma süresi, biber sapı atıklarının yüzey serbest enerjisinin (γ_s^d) dağılım bileşenini belirlemek için kullanılmıştır. Ters gaz kromatografisi literatüründe, γ_s^d genellikle Lavielle ve Schultz tarafından tanıtılan aşağıdaki denklemden belirlenmektedir (Cordeiro vd., 2011:108).

$$RTLnV_N = 2N.(\gamma_s^d)^{1/2}.a.(\gamma_L^d)^{1/2} + C \quad (1)$$

Burada, R , ideal gaz sabitidir, T , mutlak kolon sıcaklığıdır (K), a , adsorbe edilmiş alkanla kaplanmış moleküler yüzey alanıdır, N , Avogadro sayısıdır, γ_L^d , probun yüzey serbest enerjisinin dağılım bileşenidir, C bir sabittir ve V_N , n-alkan probunun net alıkonma hacmidir. Net tutulma hacmi (V_N), aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

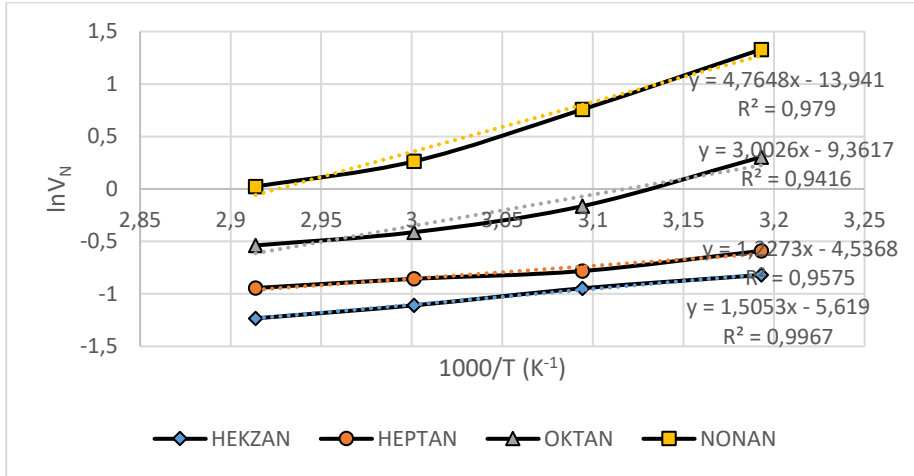
$$V_N = F_o \frac{T}{T_o} \frac{3}{2} \left[\frac{(P_i/P_o)^2 - 1}{(P_i/P_o)^3 - 1} \right] (t_A - t_o) \quad (2)$$

Burada, t_A probun alıkonma süresi iken, t_o kolondaki katı ile etkileşimde olmayan probun alıkonma süresidir (belirleyici). P_i ve P_o sırasıyla taşıyıcı gazın giriş ve çıkış basınçlarıdır, T/T_o oranı ise ortam sıcaklığındaki (T_o) akış hızının ölçümünden kolon sıcaklığındaki (T) akış hızının değerini elde etmek için kullanılır. Kolon çıkışında ve ortam sıcaklığında ölçülen taşıyıcı gazın akış hızı F_o olarak ifade edilmektedir.

SONUÇLAR

Ters gaz kromatografisi cihazından elde edilen pikler simetriktr ve piklerin maksimum değerleri enjekte edilen miktardan bağımsız, yani sonsuz seyrelme bölgesinde gözlenmiştir. Adsorpsiyonun, yüzeydeki adsorbatlar arasındaki yanıl etkileşimlerin ihmal edilebileceği Henry yasası bölgesinde (sıfır yüzey kaplamasında, sonsuz seyrelmede) gerçekleştiği varsayılmaktadır. Net alıkonma hacimleri, V_N , kromatografik tepelerin maksimumlarından ve ölü zaman hacmi çıkarılarak, denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Yüzey serbest enerjisinin dağıtıcı bileşeni, γ_s^d , 6 ila 9 karbon atomu içeren bir homolog n-alkan serisinin enjeksiyonuyla belirlenmiştir. Bir katının yüzeyindeki enerji durumunun tanımlanması için en sık ölçülen parametrelerden biri yüzey enerjisidir. Yüzey enerjisi, örneğin katalitik aktivitesini veya parçacık-parçacık etkileşiminin gücünü etkileyebilir. Biber

sapı atıklarının deneysel sıcaklıklardaki dağılım bileşenleri Denklem (1)'den hesaplanmıştır (Şekil 2). γ^d_s 'nin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak hesaplanan değişim değerlerinin sıcaklıkla azaldığı gözlemlenmiştir.

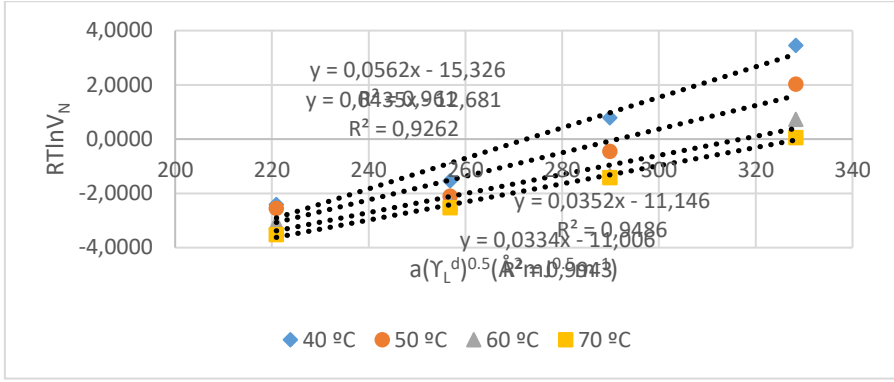


Şekil 2. Biber Sapı atıkları hammadesi için 40-70 °C sıcaklık aralığında n-alkanlar için $(1000/T)$ ye karşılık $(\ln V_N)$ grafiği

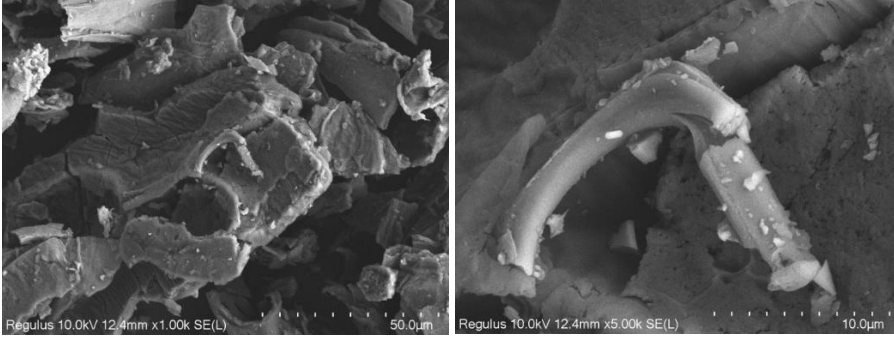
Çizelge 1. Biber Sapı atıkları hammadesi için n-alkanların $RT\ln V_N$ değerleri

	$RT\ln V_N$ (kJ/mol)				$a. (\gamma_L)^{1/2}$
	40(°C)	50(°C)	60(°C)	70(°C)	
n-Hekzan	-2,409	-2,545	-3,072	-3,518	220,9104
n-Heptan	-1,536	-2,101	-2,371	-2,522	256,8165
n-Oktan	0,792	-0,441	-1,346	-1,418	289,8341
n-Nonan	3,463	2,034	0,729	0,066	328,2707

40-70 °C sıcaklık aralıkları için hesaplanan $RT\ln V_N$ değerleri Çizelge 1’de verilmiştir. n-Alkan serisi için göre hesaplanan $a.(\gamma_{Ld})^{1/2}$ değerine karşı $RT\ln V_N$ değerlerinin grafiğe geçirilmesiyle Şekil 3 elde edilmiştir ve bu doğruların eğimlerinden γ_{sd} değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. Biber Sapı atkları hammaddesi için $RT\ln V_N - a(\gamma_L^d)^{1/2}$ grafiği



Şekil 4. Biber Sapı atkları hammaddesi için SEM görüntüleri

Biber sapı atkları hammaddesinin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4); lignin, hemiselüloz, mumlar ve diğer safsızlıklar nedeniyle kısmen pürüzsüz ve düzensiz bir yapıda olduğu görülmüştür. Asit muamelesinden sonra lifin iskelet yapısı bozulmuş ve daha pürüzlü bir yüzey haline gelmiştir. NFC'ler için asit hidrolizi sırasında selülozun amorf bölgeleri tahrip olmuş ve liflerde boyut küçülmesi meydana gelmiştir. Prasanna ve Mitra yapmış oldukları çalışmada küresel şekiller elde etmişlerdir. Bu bakımdan sonuçlar benzerlik göstermektedir (Prasanna ve Mitra, 2020:1).

Özetle tarımsal atıkların polimerik filmin ambalaj özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Su buharı geçiş hızı, şeffaflık, mekanik ve termal kararlılıklar açısından polimer matrisindeki tarımsal atıkların uygunluğunu artırmak için çeşitli iyileştirici arayüzey etkileşim teknikleri, yani fiziksel, kimyasal, biyolojik ve fizyokimyasal işlemler tartışılmıştır. Yayımlanmış literatür, polimer harmanlama için tarımsal atıklar için çeşitli stratejilerin önemini doğrulamıştır. Bol miktarda bulunan tarımsal atıkların yeşil ambalaj uygulaması için polimer matriste dolgu maddesi olarak kullanılması amaçlanmıştır.

Araştırmadaki itme alanı genellikle teknolojideki gelişmelere göre değişmektedir ve listede her zaman yalnızca birkaç alan yer alır, bunlardan biri atıkların yeniden kullanılabilirliğidir. Tarımsal atıklar, doğaları gereği çevre dostu olmaları nedeniyle özel bir öneme sahiptir. Biyomalzemeler, malzeme özelliğini geliştiren polimer matris kompozitine eklenir. Ayrıca, her durumda, elyaf işlemi, kompozit malzemelere spesifik özellikler eklenebilmesinin yanı sıra, mukavemeti de arttırır. Bu nedenle, organik atıklarla güçlendirilmiş bu tür NFC'lerin uygulaması, inşaat endüstrileri ve yapısal olmayan elemanların imalatı gibi geniş bir alana yayılmıştır.

Bu çalışmada, ham madde olarak biber sapı atıkları kullanılarak selüloz üretilmiştir. Çalışmada, Ters gaz kromatografisi (TGK)'nin, biber sapı atıklarının adsorpsiyon süreçlerini izlemek ve yüzey özelliklerini incelemek için çok yararlı olan güçlü bir analitik teknik olduğu gösterilmiştir. Adsorpsiyonla ilgili yüzey bilgisi, sıfır kaplamadaki problemler için dağılım katsayılarının sıcaklık değişiminden elde edilmiştir. Adsorpsiyonun serbest enerjisinin dağılım bileşeni γ^d_s , muhtemelen numunenin yan yüzeylerdeki yapısal heterojenliklerle ve 40-70 °C'de bulunan kanallar ve gözeneklerle ilişkilidir. Deneysel sonuçlar, incelenen malzemelerin γ^d_s değerlerinin, Gibbs serbest enerjisinin temel kavramıyla tutarlı olarak artan kolon sıcaklığıyla kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Genel olarak, sonuçlar ters gaz kromatografisinin biber sapı atıklarının yüzey özelliklerini karakterize etmek için etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, biber sapı atıklarının kimyası ve termal davranışı hakkında temel bilgiler sunarak, selüloz eldesinde kullanılabilirliğinin anlaşılmasını sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenen projenin (FYL-2023-2705) bir parçasıdır.

REFERANSLAR

- Ashori, A., ve Nourbakhsh, A. (2010). Bio-based composites from waste agricultural residues. *Waste management*, 30(4), 680-684.
- Chawla, K., ve Bastos, A. (1979) The mechanical properties of jute fibers and polyester/jute composites. *Mech Behav Mater* 3:191-196.
- Claramunt, J., Ardanuy, M., García-Hortal, J. A., ve Tolédo Filho, R.D. (2011). The hornification of vegetable fibers to improve the durability of cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 586-595.
- Cordeiro, N., Gouveia, C. ve John, M.J., (2011) Investigation of Surface Properties of Physico-Chemically Modified Natural Fibres Using Inverse Gas Chromatography, *Industrial Crops and Products*, 33, 108-115.
- Dayo, A.Q., Gao, B.C., Wang, J., Liu, W.B., Derradji, M., Shah, A.H., ve Babar, A.A. (2017). Natural hemp fiber reinforced polybenzoxazine composites: curing

- behavior, mechanical and thermal properties. *Compos Sci Technol* 144:114–124.
- Dhakal, H.N., Sarasini, F., Santulli, C., Tirillò, J., Zhang, Z., ve Arumugam, V. (2015) Effect of basalt fibre hybridisation on post-impact mechanical behaviour of hemp fibre reinforced composites. *Compos A Appl Sci Manuf* 75:54–67.
- Dixit, S., ve Yadav, V.L. (2019a) Synthesis of green thermally resistant composite: a review. *Indian J Chem Technol (IJCT)* 26:494–503
- Dixit, S., ve Yadav, V.L. (2019b) Optimization of polyethylene/ polypropylene/alkali modified wheat straw composites for packaging application using RSM. *J Cleaner Prod* 240:118228
- Dixit, S., ve Yadav, V.L. (2019c) Comparative study of polystyrene/ chemically modified wheat straw composite for green packaging application. *Polym Bull* 1–20.
- Dixit, S., ve Yadav, V.L. (2020) Biodegradable polymer composite films for green packaging applications. In: Kharissova OV, Martínez LMT, Kharisov BI (eds) *Handbook of nanomaterials and nanocomposites for energy and environmental applications*. Springer International Publishing, Cham, 1–17
- Dixit, S., Joshi, B., Kumar, P., ve Yadav, V. L. (2020). Novel hybrid structural biocomposites from alkali treated-date palm and coir fibers: morphology, thermal and mechanical properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(9), 2386-2392.
- Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P., ve Sain, M. (2012) Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 37:1552–1596.
- Hamzeh, Y., Ashori, A., ve Mirzaei, B. (2011). Effects of waste paper sludge on the physico-mechanical properties of high density polyethylene/wood flour composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 19, 120-124.
- Hole, B.B., Keller, D.S., Burry, W.M. ve Schwarz, J.A., (2011) Surface energetics of bone mineral and synthetic hydroxyapatite using inverse gas chromatography, *J. Chromatogr. B*, 879, 1847–1850.
- Holilah, H., Bahruji, H., Ediat, R., Asranudin, A., Jalil, A.A., Piluharto, B., ve Prasetyoko, D. (2022). Uniform rod and spherical nanocrystalline celluloses from hydrolysis of industrial pepper waste (*Piper nigrum* L.) using organic acid and inorganic acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 204, 593-605.
- Jedrzejczyk, M., Soszka, E., Czapnik, M., Ruppert, A.M., Grams, J. (2019) Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass. In: *Second and third generation of feedstocks*. Elsevier, Amsterdam, 143–196.
- Mohammed, L., Ansari, M.N., Pua, G., Jawaid, M., ve Islam, M.S. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International journal of polymer science*, 2015(1), 243947.
- Prasanna, N.S., ve Mitra, J. (2020). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from *Cucumis sativus* peels. *Carbohydrate Polymers*, 247, 116706, 1-10.
- Pyl, S.P., Dijkmans, T., Antonykuty, J.M., Reyniers, M.F., Harlin, A., Van Geem, K.M., ve Marin, G.B. (2012). Wood-derived olefins by steam cracking of hydrodeoxygenated tall oils. *Bioresource technology*, 126, 48-55.

- Sadh, P.K., Duhan, S., ve Duhan, J.S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and bioprocessing*, 5(1), 1-15.
- Soroushian, P., Won, J.P., & Hassan, M. (2012). Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 34, 44-53.
- Stark, N.M., ve Rowlands, R.E. (2003) Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood Fiber Sci* 35:167–174.
- Zegaoui, A., Derradji, M., Ma, R.K., Cai, W.A., Medjahed, A., Liu, W.B., Dayo, A.Q., Wang, J., ve Wang, G.X. (2018) Influence of fiber volume fractions on the performances of alkali modified hemp fibers reinforced cyanate ester/benzoxazine blend composites. *Mater Chem Phys* 213:146–156.

Yapay Zekâ Model Başarım Değerlendirme Metodolojileri

İbrahim Halil ÜNLÜK¹

- 1- Öğr. Gör.; Muş Alparslan Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü ABD.
ih.unluk@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6541-2714

ÖZET

Yapay zekâ (YZ) modellerinin başarımlarını değerlendirmesi, hem teknik doğruluk hem de etik güvenilirlik açısından kritik bir süreçtir. Bu bölümde, denetimli, denetimsiz ve pekiştirmeli öğrenme gibi farklı YZ model türlerinin temel özellikleri açıklanmakta ve her birine özgü performans değerlendirme metrikleri sunulmaktadır. Ayrıca, veri setlerinin bölünmesi, çapraz doğrulama yöntemleri, dengesiz veri setleriyle başa çıkma stratejileri ve model karşılaştırma teknikleri detaylı şekilde ele alınmaktadır. Aşırı öğrenme, hesaplama maliyetleri, şeffaflık gibi yaygın zorluklara da çözüm önerileri sunulurken; AutoML ve Açıklanabilir YZ (XAI) gibi gelecekteki eğilimlere yönelik bakış açıları da sağlanmıştır. Amaç, YZ modellerinin yalnızca sayısal başarı değil, aynı zamanda güven, adalet ve sürdürülebilirlik ekseninde de değerlendirilebilmesini sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler – Yapay Zekâ (YZ), Model Başarım Değerlendirme, Sınıflandırma ve Regresyon Metrikleri, Çapraz Doğrulama, AutoML, Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI), Dengesiz Veri, Benchmarking, Overfitting, Fairness

1. GİRİŞ

Yapay zeka, son yıllarda sağlık, finans, üretim, ulaşım ve daha birçok alanda karmaşık problemlerin çözümünde kritik bir rol oynamaktadır. Makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) tekniklerindeki gelişmeler, veriye dayalı karar alma süreçlerini daha doğru, hızlı ve ölçeklenebilir hale getirmiştir. Özellikle büyük veri (big data) ve hesaplama gücündeki artış, YZ modellerinin gerçek dünya uygulamalarında yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Ancak, bu modellerin başarısı yalnızca karmaşıklıklarına değil, aynı zamanda doğru değerlendirme metodolojileri ile ölçülebilir performanslarına bağlıdır. Örneğin, bir tıbbi teşhis sisteminin yüksek doğruluk oranına sahip olması, hastaların hayatını kurtarabilirken, hatalı bir otonom sürüş algoritması ciddi kazalara yol açabilir.

YZ modellerinin performansını değerlendirmek (Şekil 1), yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda etik ve güvenilirlik açısından da zorunludur. Bir modelin başarısı, aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

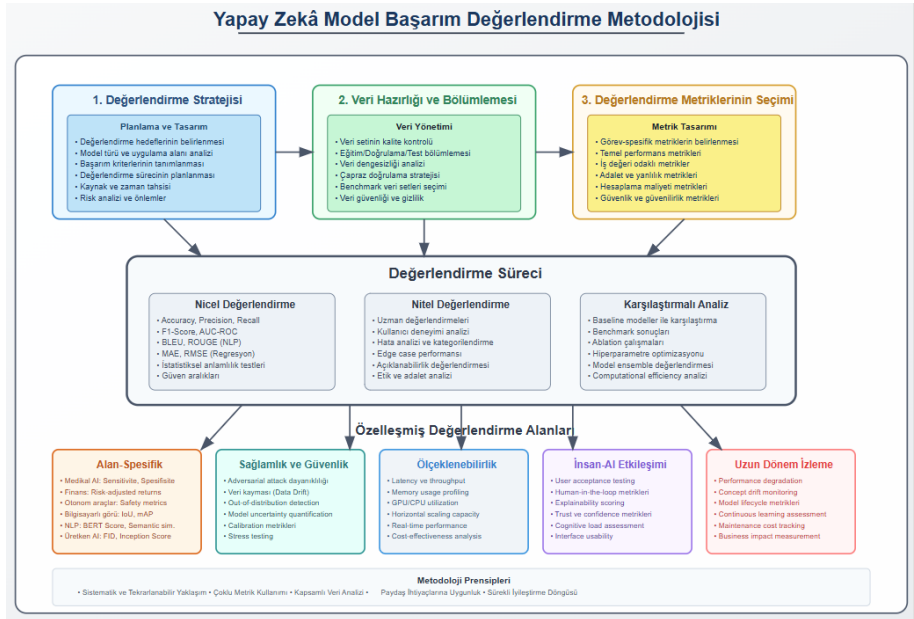
- Doğruluk (Accuracy): Modelin gerçek dünya verilerine ne kadar iyi uyum sağladığı (Jierula et al., 2021)
- Genelleme yeteneği (generalization ability): Eğitim verisi dışındaki örneklerde ne kadar iyi performans gösterdiği (Yan & Ouyang, 2018).
- Sağlamlık (Robustness): Gürültülü veya eksik verilere karşı dayanıklılığı (Munim, 2022).

- Adalet (Fairness): Farklı demografik gruplar arasında önyargı içermemesi.

Bu nedenle, model değerlendirme süreci, çok boyutlu bir yaklaşım gerektirir.

Bu bölümde, YZ tabanlı problem çözümünde kullanılan modellerin başarımını değerlendirmek için kullanılan metrikler, metodolojiler ve en iyi uygulamalar ele alınmaktadır. Temel hedefler şunlardır:

- Farklı YZ görevleri (sınıflandırma, regresyon, kümeleme) için uygun değerlendirme kriterlerini tanıtmak.
- Veri seti bölümlenme(Pala & Tuğal, 2025), (Pala & Pala, 2020), (Pala, 2023a) ve çapraz doğrulama (Pala & Ünlük, 2022) gibi temel teknikleri açıklamak.
- Model karşılaştırmalarında kullanılan benchmark yöntemlerini tartışmak (Abbasimehr & Paki, 2021).
- Yaygın tuzaklar (overfitting, veri önyargısı) ve çözüm önerileri sunmak (Srivastava et al., 2014).
- Gelecek trendleri (XAI, AutoML) hakkında perspektif sağlamak.



Şekil 1: Model başarım değerlendirme metodolojisi

2. YAPAY ZEKÂ MODELLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Yapay zeka (YZ) modelleri, öğrenme paradigmalarına ve çözülen problem türlerine göre sınıflandırılabilir. Bu bölümde, temel YZ model kategorileri (denetimli, denetimsiz, pekiştirmeli öğrenme) ve hibrit yaklaşımlar, problem çözme bağlamında ele alınacaktır.

2.1 Denetimli Öğrenme (*Supervised Learning*)

Denetimli öğrenme (Jierula et al., 2021) etiketli veriler (input-output çiftleri) kullanarak model eğitmeyi hedefler. Bu türdeki modeller başlıca iki alt kategoriye ayrılır: Birincisi sınıflandırma, ikincisi ise regresyon modelleridir.

Sınıflandırma (Classification) (Naik & Edla, 2021) modellerinin temel amacı veriyi önceden tanımlı kategorilere ayırmaktır (ör. spam/spam değil, hasta/sağlıklı). Bunun tipik modelleri arasında lojistik regresyon, karar ağaçları (decision trees), destek vektör makineleri (SVM), yapay sinir ağları (ANN) ve derin öğrenme modelleri (CNN, RNN) sayılabilir. Sınıflandırmaya dayalı uygulama örnekleri için tıbbi görüntülemelerde tümör tespiti (MRI/CT taramaları) ve finansta kredi riski değerlendirmesi verilebilir.

Regresyon modellerinin temel amacı ise sürekli bir çıktı değerini tahmin etmektir (örneğin, ev fiyatı, sıcaklık). Bunun tipik modelleri arasında Lineer Regresyon (Pala et al., 2017), Polinom Regresyon, Ridge/Lasso Regresyon ve Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM) (Gayathri et al., 2022) sayılabilir. Regresyona dayalı uygulama örnekleri için enerji tüketimi tahmini ve hisse senedi fiyatı öngörüsü zikredilebilir. Denetimli öğrenmede etiketli veri varsa yüksek doğruluk sağlar. Ancak etiketleme maliyeti yüksektir aynı zamanda veri önyargısı riski taşır.

2.2 Denetimsiz Öğrenme (*Unsupervised Learning*)

Denetimsiz öğrenme (Längkvist et al., 2014), etiket olmadan verideki yapıyı keşfetmeye odaklanır ki buna kümeleme (clustering) denilmektedir. Bu tür öğrenmenin temel amacı benzer veri noktalarını gruplamaktır (örneğin müşteri segmentasyonu). Veri kümelemede K-Ortalama (K-Means), Hiyerarşik Kümeleme ve DBSCAN modelleri kullanılabilir. Kümelemeye dayalı uygulamalara pazarlamada müşteri gruplarının belirlenmesi ve anomali tespiti (sahte işlemler) örnekleri verilebilir. Denetimsiz öğrenmenin bir diğer türü boyut indirgeme (dimensionality reduction) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun amacı veriyi öz niteliklerini koruyarak düşük boyuta indirmektir. Bu amaca hizmet eden modeller PCA (temel bileşenler analizi), t-SEN ve otokodlayıcılar (Autoencoders) dır. Uygulama örnekleri ise görüntü

sıkıştırma ve veri ön işleme (feature extraction) dır. Denetimsiz öğrenme için etiketin gerektirmemesi ve keşif amaçlı kullanılabilmesi bir avantaj iken performans ölçümü subjektiftir (örneğin küme sayısı seçimi).

2.3 Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning - RL)

RL, bir ajanın çevreyle etkileşiminden ödül alarak optimal davranışı öğrenmesini sağlar (Wang et al., 2025).

RL Temel Bileşenler:

- Ajan (Agent): Karar verici (ör. otonom araç).
- Çevre (Environment): Ajanın etkileşimde bulunduğu ortam.
- Ödül (Reward): Amaç fonksiyonu (örn. kazancı maksimize etmek).

RL Modeller:

- Q-Öğrenme (Q-Learning)
- Derin Q-Ağları (DQN)
- Politika Gradyanları (Policy Gradients)

RL Örnek Uygulamalar:

- Oyunlar (AlphaGo).
- Robotik kontrol sistemleri.

RL Avantajlar ve Sınırlılıklar:

RL dinamik ortamlarda uyum sağlayabilir ancak eğitim süresi uzun ve hesaplama maliyeti yüksektir.

2.4 Hibrit Modeller ve Diğer Yaklaşımlar

Hibrit modeller yarı-denetimli öğrenme, transfer öğrenme ve ensemble yöntemler (Pala, 2023b) olarak karşımıza çıkmaktadır.

- Yarı-Denetimli Öğrenme (Semi-Supervised): Az sayıda etiketli + çok sayıda etiketsiz veri kullanır (ör. ses tanıma).
- Transfer Öğrenme (Transfer Learning): Önceden eğitilmiş modeller (BERT, ResNet) yeni görevlere uyarlanır.
- Ensemble Yöntemler: Birden fazla modelin kombinasyonu (Random Forest, Stacking).

Örneğin bir sahtekarlık tespiti sistemi, denetimli öğrenme (sınıflandırma) + anomali tespiti (denetimsiz) hibritini kullanabilir.

Bu sınıflandırma, YZ modellerinin problem türüne göre nasıl seçileceğine dair bir çerçeve sunar. Bir sonraki bölümde, bu modellerin başarımını ölçmek için kullanılan metrikler ve metodolojiler detaylandırılmaktadır.

Tablo 2: Öğrenme türlerinin modelleri ve uygulama alanları

Öğrenme Türü	Temel Modeller	Örnek Uygulama Alanları
Denetimli öğrenme	SVM, CNN	Tıbbi teşhis, Finans
Denetimsiz öğrenme	K-Means, PCA	Müşteri segmentasyonu
Pekiştirmeli öğrenme	DQN, PPO	Otonom araçlar, Oyun AI

3. BAŞARIM DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

Yapay zeka modellerinin performansını değerlendirmek için nicel (sayısal) ve nitel (yorumlayıcı) metrikler birlikte kullanılır. Burada farklı problem türlerine yönelik ölçütler ve pratikte nasıl uygulandıkları açıklanacaktır.

3.1. Nicel Metrikler

Sınıflandırma modellerinin başarısı, karışıklık matrisi (confusion matrix) üzerinden hesaplanan metriklerle ölçülür.

Tablo 3: Sınıflandırma metrikleri

Metrik	Formül	Açıklama
Doğruluk (Accuracy)	$(TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$	Tüm doğru tahminlerin oranı. Dengesiz verilerde yanıltıcı olabilir.
Kesinlik (Precision)	$TP / (TP + FP)$	Pozitif tahminlerin ne kadarının gerçekten doğru olduğu (yanlış alarmları önler).
Duyarlılık (Recall)	$TP / (TP + FN)$	Gerçek pozitiflerin ne kadarının yakalandığı (ör. hastalık tespitinde kritik).
F1-Skor	$2(Precision \cdot Recall) / (Precision + Recall)$	Precision ve Recall'un harmonik ortalaması (dengesiz veriler için idealdir).
ROC-AUC	Eğri altında kalan alan	Modelin sınıfları ayırt etme yeteneği (1'e yakın = mükemmel).

Örneğin spam tespiti yapan bir modelde, spamleri kaçırmamak için Recall, yanlış spam işaretlememe için de Precision metriği öncelikli olabilir. Sürekli değer tahmin hata ölçümlerinde regresyon metrikleri kullanılır.

Tablo 4: Regresyon metrikleri

Metrik	Formül	Açıklama
MSE	$(1/n)\sum(\text{gerçek} - \text{tahmin})^2$	Büyük hataları cezalandırır (outlier'lara duyarlı).
RMSE	$\sqrt{\text{MSE}}$	MSE'nin ölçeklenmiş hali (gerçek değerlerle aynı birimde).
MAE	$(1/n)\sum \text{gerçek} - \text{tahmin} $	Mutlak hataların ortalaması (yorumlaması kolay).
R ² (R-Kare)	$1 - (\text{SSE}/\text{SST})$	Modelin veri varyansını açıklama oranı (1 = mükemmel uyum).

Örneğin konut fiyatı tahmininde RMSE, fiyatların ortalamaya ne kadar sapmayla tahmin edildiğini gösterir.

Kümele problemlerinde etiket olmadığı için içsel (internal) metrikler kullanılır.

Tablo 5: Kümeleme metrikleri

Metrik	Açıklama
Silhouette Skoru (-1 ile 1 arası)	Küme içi sıklık ve küme dışı ayrışmayı ölçer (1 = optimal kümeleme).
Elbow Metodu	WCSS (Within-Cluster-Sum-of-Squares) grafiğinde "dirsek" noktası seçilir.

Örneğin müşteri segmentasyonunda Silhouette skoru, küme sayısını belirlemek için kullanılır.

3.2. Nitel Değerlendirme

Nicel metrikler tek başına yeterli değildir; insan yorumu ve hata analizi büyük öneme sahiptir. Bu durumda model çıktılarının insan yorumlamasına ihtiyacı vardır. Örneğin bir görüntü sınıflandırma modelinin, köpekleri "kurt" olarak

etiketlemesi, nitel bir incelemeyle fark edilir. Hata analizi ve vaka incelemelerinde False Positive/Negative örneklerinin manuel incelenmesi (ör. yanlış kanser teşhisi) ve sistemik hatalar: Belirli bir alt grupta performans düşüklüğü (cinsiyet/ırk önyargısı) ortaya çıkabilir. Örneğin otonom araç kazalarında, modelin yağmurlu havalarda yayaları algılayamaması ve chatbot sohbetlerinde kültürel önyargı tespiti.

Nicel metrikler, modellerin sayısal performansını ölçerken; nitel değerlendirme, güvenilirlik ve adalet gibi pratik sorunları ortaya çıkarır.

4. VERİ SETLERİ VE ÇAPRAZ DOĞRULAMA

Yapay zeka modellerinin güvenilirliği ve genelleme yeteneği, verinin nasıl bölündüğüne ve doğrulama yöntemlerine bağlıdır. Burada, veri bölümlenme stratejileri, çapraz doğrulama teknikleri ve dengesiz veri setleriyle başa çıkma yöntemleri ele alınmaktadır.

4.1. Veri Bölümlenme (Train/Test/Validation Split)

Model geliştirme sürecinde veri genellikle üç ana kümeye ayrılır:

1. Eğitim Seti (Training Set, %60-70):
 - Modelin öğrenmesi için kullanılır.
 - Parametreler (ağırlıklar) bu veriyle optimize edilir.
2. Doğrulama Seti (Validation Set, %15-20):
 - Hiperparametre ayarı (ör. öğrenme oranı, katman sayısı) için kullanılır.
 - Model seçimi ve erken durdurma (early stopping) kararlarını yönlendirir.
3. Test Seti (Test Set, %15-20):
 - Final performans değerlendirmesi için ayrılır.
 - Model eğitiminde kesinlikle kullanılmaz (veri sızmasını önlemek için).

Örneğin MNIST (el yazısı rakamlar) veri setinde, 60.000 eğitim, 10.000 test için kullanılabilir.

Burada özellikle veri bölümlenme işleminin rastgele yapılmamasına dikkat edilmelidir (zaman serisi verileri hariç). Ayrıca sınıf dağılımı korunmalıdır (stratified split).

4.2. Çapraz Doğrulama (Cross-Validation)

Veri küçükse veya stabil sonuçlar gerekiyorsa, çapraz doğrulama kullanılır (Bergmeir et al., 2015).

A. k-Katlamalı apraz Doğrulama (k-Fold CV):

1. Veri k eşit parçaya bölünür.
2. Her iterasyonda 1 parça test, k-1 parça eğitim için kullanılır.
3. Ortalama performans (ör. doğruluk) raporlanır.

B. Stratified k-Fold CV:

Sınıf dağılımını her katmanda korur (dengesiz veriler için kritik).

Örneğın k=5 için test ilk aşamada parçası 1 olarak seçilmiş ise eğitim parçaları sırasıyla 2, 3, 4 ve 5 olmaktadır. İkinci aşamada test parçası 2 olacağından, eğitim parçaları ise 1, 3, 4 ve 5 olacaktır.

Bu yöntemin en büyük avantajı verinin tamamı hem eğitim hem test için kullanılır. Modelin genelleme performansı daha güvenilir ölçülür.

4.3. Veri Önyargısı ve Dengesiz Veri Setleriyle Başa ıkma

Veri önyargısı (bias) türleri için örnekleme önyargısı ve etiket önyargısı kullanılmaktadır. Örnekleme önyargısında veri, popölasyonu temsil etmemektedir (örneğin yalnızca belirli bir coğrafyadan veri tederik edilmiştir). Etiketleme ön yargısında ise Yanlış veya eksik etiketleme söz konusudur (örneğin tıbbi verilerde yanlış tanımlar gibi).

Tablo 6: Dengesiz veri (imbalanced data) çözümleri.

Yöntem	Açıklama
Örneklem Çoğaltma (Oversampling)	Azınlık sınıfı rastgele kopyalar (ör. SMOTE).
Örneklem Azaltma (Undersampling)	Çoğunluk sınıfından rastgele veri çıkarır.
Sınıf Ağırlıkları (Class Weights)	Modelin kayıp fonksiyonunda azınlık sınıfına daha fazla ağırlık verir.

Örneğin kredi sahtekarlığı tespitinde (%95 gerçek, %5 sahte);SMOTE ile sahte işlem örnekleri artırılır ve F1-Skor ana metrik olarak kullanılır.

Netice olarak; veri bölümleme ve çapraz doğrulama, modelin aşırı öğrenme (overfitting) yapmadan genelleşmesini sağlar. Dengesiz veri ve önyargı sorunları ise etik ve teknik düzenlemeler gerektirir.

5. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ VE BENCHMARKING

Yapay zeka modellerinin performansını objektif olarak değerlendirmek için sistematik karşılaştırma metodolojileri ve standart benchmark veri setleri kullanılır. Burada, model karşılaştırma süreçleri, açık kaynaklı platformlar ve SOTA (State-of-the-art) analizleri ele alınmaktadır.

5.1. Farklı Modellerin Aynı Veri Setinde Karşılaştırılması

A. Karşılaştırma Metodolojisi:

1. **Sabit Veri Bölümü:** Tüm modeller aynı eğitim/test/validation setleriyle değerlendirilir.
2. **Ortak Metrikler:** Problem türüne uygun metrikler seçilir (ör. sınıflandırmada F1-Skor).
3. **Hesaplama Kaynakları:** CPU/GPU kullanım süresi ve bellek tüketimi karşılaştırılır.

B. Örnek Model Karşılaştırması (MNIST Veri Seti)

Tablo 7: Model karşılaştırmaları

Model	Doğruluk (%)	Eğitim Süresi (sn)	Parametre Sayısı
Lojistik Regresyon	92.1	15	7,850
Random Forest	96.7	120	100,000
CNN (Basit)	98.9	300	1,200,000

Tabloda görüldüğü gibi basit modeller (Lojistik Regresyon) küçük veride yeterli olabilir. CNN gibi karmaşık modeller, doğruluk artışı sağlarken kaynak tüketimini artırır.

5.2. OpenML ve Kaggle Gibi Platformlardan Örnekler

A. OpenML:

Özellik: Standartlaştırılmış 20.000+ veri seti ve model performans benchmark'ları.

Örnek olarak Iris Çiçeği Sınıflandırması üzerinde 10 farklı algoritmanın karşılaştırılması. En iyi model: SVM (Doğruluk: 97.3%).

B. Kaggle:

Yarışma Örneği (Titanik):

Başarılı Yaklaşımlar; XGBoost + Özellik Mühendisliği (Accuracy: 0.81). Ensemble Yöntemler (Stacking).

Platformların topluluk tarafından doğrulanmış sonuçlar ve kod paylaşımı (Notebook'lar) ile metodoloji şeffaflığı gibi avantajları bulunmaktadır.

5.3. SOTA (State-of-the-Art) Modellerle Kıyaslama

A. SOTA, belirli bir problemde en güncel ve yüksek performanslı modelleri ifade etmektedir (örneğin ImageNet'te Vision Transformer).

B. Kıyaslama Adımları:

1. **Literatür Taraması:** Son 1-2 yılın hakemli makaleleri (ör. NeurIPS, CVPR).

2. **Metrik Uyum:** Aynı veri seti ve ölçütler kullanılmalı (ör. CIFAR-10'da top-1 doğruluk).
3. **Kaynak Verimliliği:** FLOPs (hesaplama maliyeti) ve parametre sayısı karşılaştırması.

Karşılaştırmalı analiz, problem-bağlamına uygun model seçimini bilimsel temellere oturtur. SOTA kıyaslamalar ise yenilikçi çözümlerin sınırlarını gösterir.

6. ZORLUKLAR VE SINIRLILIKLAR

Yapay zeka modellerinin başarımlarını değerlendirme sürecinde karşılaşılan temel zorluklar ve sınırlılıklar şu şekilde özetlenebilir:

6.1. Aşırı Öğrenme (Overfitting) ve Az Öğrenme (Underfitting)

- **Overfitting:** Modelin eğitim verisine çok iyi uyum sağlaması ancak yeni verilerde başarısız olması. Özellikle karmaşık modellerde (derin sinir ağları) yaygındır. Burada çözüm olarak düzenlileştirme (L1/L2), dropout, erken durdurma (early stopping), veri artırma (data augmentation) önerilebilir.
- **Underfitting:** Modelin verideki temel ilişkileri öğrenememesi (çok basit model). Burada çözüm olarak model karmaşıklığını artırma, özellik mühendisliği verilebilir.

6.2. Ölçeklenebilirlik ve Hesaplama Maliyeti

- **Büyük Veri ve Modeller:** GPT-3 gibi modellerin eğitimi milyonlarca dolar tutabilir. Temel zorluk, kaynak kısıtlı ortamlarda (sağlık, KOBİ'ler). Çözüm ise model hafifletme (pruning, quantization), transfer öğrenmedir.
- **Dağıtık Hesaplama:** Çoklu GPU/TPU kullanımıyla gelen teknik zorluklar.

6.3. Etik ve Şeffaflık Sorunları

Black Box Problemi: Derin öğrenme modellerinin karar süreçlerinin yorumlanamaması. Tıbbi teşhis veya kredi reddi gibi kritik uygulamalarda güven sorunu risk olarak karşımıza çıkmaktadır. Çözüm olarak, XAI (Explainable AI) teknikleri (LIME, SHAP) ve model şeffaflığı standartları önerilebilir.

Bu zorluklar, YZ modellerinin pratik uygulanabilirliğini ve toplumsal kabulünü doğrudan etkiler. Performans değerlendirme süreçlerinde yalnızca sayısal metrikler değil, sürdürülebilirlik, ve yorumlanabilirlik kriterleri de dikkate alınmalıdır.

7. GELECEK YÖNELİMLERİ VE SONUÇ

Yapay zeka (YZ) alanındaki hızlı gelişmeler, model başarımlarını değerlendirme süreçlerini dönüştürmektedir. Burada, yakın geleceğin trendleri ve uygulayıcılar için kritik öneriler sunulmaktadır.

7.1. Otomatik ML (AutoML) ve Başarımların Optimizasyonu

AutoML; hiperparametre optimizasyonu, model seçimi ve özellik mühendisliğini otomatikleştiren sistemlerdir (ör. Google AutoML, H2O.ai). Uzmanlık gereksinimini azaltma avantajıyla ön plana çıkmaktadır. Bayesian optimizasyon, evrimsel algoritmalar kullanarak en iyi modeli bulur.

AutoML'nin başarımların optimizasyonundaki rolü büyüktür. Örneğin bir veri setinde AutoML'nin 24 saatte ulaştığı doğruluk oranı, manuel ayarla 1 haftada elde edilebilen seviyeyi geçebilir. Ancak hesaplama maliyeti yüksektir ve en iyi model" seçiminde iş bağlamını göz ardı edebilir. Bu durumda küçük/orta ölçekli projelerde AutoML + insan denetimi kombinasyonu kullanılabilir.

7.2. Yorumlanabilir YZ (Explainable AI - XAI) Trendleri

Black Box Problemi: GDPR, AI Act gibi düzenlemeler, modellerin açıklanabilir olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durumda farklı teknikler kullanılmaktadır: LIME ve SHAP. LIME lokal kararları açıklayan model-bağımsız yöntemdir. SHAP her özelliğin tahsime katkısını ölçer.

Örneğin Tıpta, "Bu hasta neden yüksek riskli sınıfta?" sorusuna SHAP grafikleriyle yanıt verilebilir. Ayrıca Finasta kredi reddi kararlarının müşteriye açıklanması örnek verilebilir.

YZ'nin problem çözmedeki rolü büyüdükçe, başarımların değerlendirme kriterleri de çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir. Teknik mükemmellik kadar toplumsal sorumluluk da bu sürecin parçası olmalıdır.

SONUÇ

Bu bölümde yapay zekâ modellerinin başarımlarını değerlendirmek için kullanılan çok boyutlu metodolojiler kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Farklı öğrenme türlerine uygun metriklerin ve doğrulama tekniklerinin seçimi, modelin genelleme kabiliyetini ve güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, etik, açıklanabilirlik ve hesaplama maliyeti gibi faktörlerin de başarımların değerlendirmesine entegre edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Gelecekte, AutoML sistemleri ve XAI teknikleri sayesinde hem değerlendirme süreçleri

daha verimli hâle gelecek hem de kullanıcı güveni artırılacaktır. Neticede, YZ sistemlerinin etkili ve adil bir şekilde değerlendirilebilmesi, bu teknolojilerin toplumda kabulünü ve benimsenmesini doğrudan etkileyecektir.

REFERANSLAR

- Abbasimehr, H., & Paki, R. (2021). Prediction of COVID-19 confirmed cases combining deep learning methods and Bayesian optimization. *Chaos, Solitons and Fractals*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110511>
- Bergmeir, C., Hyndman, R. J., Koo, B., & Others. (2015). A Note on the Validity of Cross-Validation for Evaluating Time Series Prediction A Note on the Validity of Cross-Validation for Evaluating Time Series Prediction. *Monash University Department of Econometrics and Business Statistics Working Paper*, 10(April), 15.
- Gayathri, R., Rani, S. U., Čepová, L., Rajesh, M., & Kalita, K. (2022). A Comparative Analysis of Machine Learning Models in Prediction of Mortar Compressive Strength. *Processes*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/pr10071387>
- Jierula, A., Wang, S., Oh, T. M., & Wang, P. (2021). Study on accuracy metrics for evaluating the predictions of damage locations in deep piles using artificial neural networks with acoustic emission data. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/app11052314>
- Långkvist, M., Karlsson, L., & Loutfi, A. (2014). A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling. *Pattern Recognition Letters*, 42(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2014.01.008>
- Munim, Z. H. (2022). State-space TBATS model for container freight rate forecasting with improved accuracy. *Maritime Transport Research*, 3(November 2021), 100057. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100057>
- Naik, A., & Edla, D. R. (2021). Lung Nodule Classification on Computed Tomography Images Using Deep Learning. In *Wireless Personal Communications* (Vol. 116, Issue 1). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07732-1>
- Pala, Z. (2023a). Comparative study on monthly natural gas vehicle fuel consumption and industrial consumption using multi-hybrid forecast models. *Energy*, 263(PC), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125826>
- Pala, Z. (2023b). Prediction of Electricity Consumption in Turkey with Time Series. *MAUN Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 4(1), 32–40.
- Pala, Z., Bozkurt, I., & Etem, T. (2017). Estimation of low frequency electromagnetic values using machine learning. *2017 13th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2017.7937550>
- Pala, Z., & Pala, A. F. (2020). Perform Time-series Predictions in the R Development Environment by Combining Statistical-based Models with a Decomposition-based Approach. *Journal of Muş Alparslan University Faculty of Engineering and Architecture*, 1(1), 1–13.
- Pala, Z., & Tuğal, İ. (2025). Effect of frequency-dependent test length on prediction performance in monthly/quarterly time series analysis. *Knowledge-Based Systems*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113294>

- Pala, Z., & Ünlük, İ. H. (2022). Comparison of hybrid and non-hybrid models in short-term predictions on time series in the R development environment. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 2, 199–204. <https://doi.org/10.24012/dumf.1079230>
- Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, 15, 1929–1958.
- Wang, Z., Xue, W., Li, K., Tang, Z., Liu, Y., Zhang, F., Cao, S., Peng, X., Wu, E. Q., & Zhou, H. (2025). Dynamic combustion optimization of a pulverized coal boiler considering the wall temperature constraints: A deep reinforcement learning-based framework. *Applied Thermal Engineering*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124923>
- Yan, H., & Ouyang, H. (2018). Financial Time Series Prediction Based on Deep Learning. *Wireless Personal Communications*, 102(2), 683–700. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5086-2>

Rotillerde Boşluk Toleranslarının Yapısal Davranış ve Yorulma Ömrü Üzerindeki Etkileri

Deniz ÇORA^{1*}

Abdullah Engin ÖZÇELİK²

¹Makine Mühendisliği / Selçuk Üniversitesi (ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6716-0672>)

² Makine Mühendisliği / Teknoloji Fakültesi / Selçuk Üniversitesi (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8646-0950>)*denizbal97@gmail.com

ÖZET

Süspansiyon ve direksiyon sisteminde kullanılan küresel mafsallı parçalar sistemin vazgeçilmez parçaları arasındadır. Küresel mafsallı kullanılan rotiller, salıncak ve akson arasında bağlantı sağlar. Direksiyon sisteminin dönme görevini sağlayarak aracın ileri geri hareketini aktarırken her iki yönde de döndürülmesi amacını gerçekleştirir. Bu parçaların vazgeçilmez olmasının diğer bir nedeni ise sürüş konforu ile yönlendirme kabiliyetini artırmasıdır. Küresel mafsala sahip parçaların çalışma performansında kritik nokta boşluk parametresidir. Boşluk parametresi, mafsallı ile yuva arasında oluşan mesafedir. Mekanik serbestliğe etki eden boşluk parametresi, üretim parametreleri ve kullanım süresince oluşan aşınmalara bağlı dinamik olarak değişir. Küresel mafsallı parçaların çalışma performansının belirlenmesine etki eden birden fazla durum söz konusudur. Tasarım sırasında mafsallı ve yuva arası izin verilen boşluk, malzeme sertliği, çalışma sıcaklığı, araç yüklenme koşulları, yüzey pürüzlülüğü ve yağlanma durumu gibi birçok nedene bağlıdır. Boşluğun aşırı artması durumunda direksiyonda boşluk, ön takımında ses gibi konfor kayıpları gibi durumlar meydana gelir. Herhangi bir arıza durumunda güvenliği tehdit eden durumlar oluşmaktadır. Bu çalışmada küresel mafsala sahip rotillerin, boşluk parametresine etki eden üretim parametreleri ve dinamik aşınmaya bağlı oluşan boşluklar üzerinde çalışma yapılmıştır. Rotillerde eksenel ve radyal yönden gelen yüklemelerin çalışma performansında kritik öneme sahip olması nedeniyle radyal boşlukları üzerinde durularak çalışma yapılmıştır. Nihai tasarım sonucu elde edilen ürünlerin üretim sonrası tasarım geometrileri CAE (FEA) programına aktarılarak analiz uygulanmış ve Zwick Roell test cihazında boşluk testleri kıyaslanmıştır. Doğrulama sonucunda uygun tasarıma sahip 4 rotinin dinamik yorulma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen boşluk sonuçları ile laboratuvar ortamında elde edilen statik test sonuçları ile kıyaslanarak %xx sapma oranı elde edilmiştir. Dinamik testler sonucunda 0.19 mm boşluk parametresine sahip rotinin test verilerine göre daha kararlı ve performanslı çalıştığı sonucuna varılmıştır.

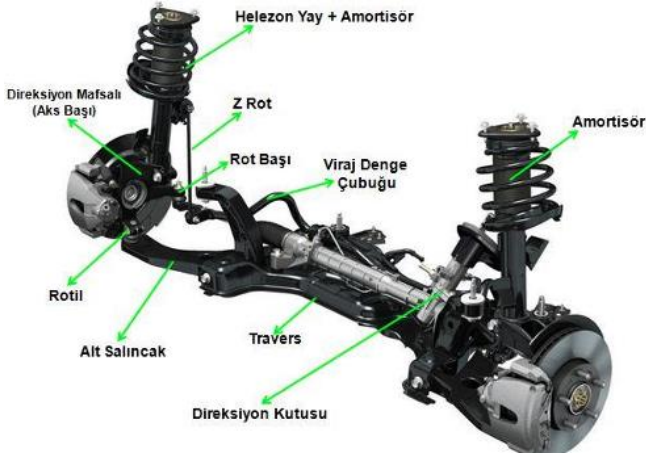
Anahtar Kelimeler – Süspansiyon, küresel mafsallı, rotiller, sonlu elemanlar analizi, yorulma testi

I. GİRİŞ

Süspansiyon sisteminin temel görevleri şöyle sıralanabilir; araç gövdesinin yolun bozucu etkisinden izole edilmesi ve bu sayede aracın konfor özelliklerinin artırılması: Bu özellik genelde aracın gövdesinin hareketi ile ilişkilendirilir. Aynı zamanda aracın yalpalama hareketlerinin kontrol altına alınması da süspansiyonun konfora yönelik görevlerinden birisidir. Aracın gerek düz gerek düzgün olmayan yol şartlarında ayrıca hızlanma ve fren sırasında yol tutuş özelliklerinin sağlanması: Bu özellik ise dikey kuvvetlerin etkisi sonucunda meydana gelen tekerleğin şekil değiştirmesi ile ilgilidir. Şekil değişiminin azaltılması araçta daha iyi yol tutuşu,

çekiş, fren ve dönme özellikleri sağlayacaktır. Aracın statik ağırlığını dengelemek: Bu özellik süspansiyon stroku ile ilgilidir [1].

Araç gövdesi ve tekerlekler arasında bağlantı kuran süspansiyon sistemi çubuk, yay, amortisör, bağlantı ve kollardan oluşan sistemin bütünüdür. Süspansiyon sistemi, araç gövdesinin akslar aracılığıyla tekerleklerle bağlantısını sağlayan, aynı zamanda yol zemininden gelen düzensizlikleri, taşıt dinamik tepkilerinden kaynaklanan titreşimleri sönümleme özelliklerini sağlar [1]. Genel anlamda aracın statik dengesini sağlama, hızlanma ve fren sırasında yol tutuşu sağlama, konfor ve güvenliği sağlama konusunda önem arz eder [2,3]. Şekil 1’de süspansiyon sistemi ve bileşenleri görülmektedir.



Şekil 1. Süspansiyon sisteminin araçta gösterimi [4]

Binek araçlarda kullanılan küresel mafsallı parçalar yönlendirme görevlerini yerine getirirken dinamik ve yatak yüklerini de üstlenirler. Küresel mafsala etki eden yükler eksenel ve radyal yönde etki ederler [5]. Otomotiv süspansiyon ve direksiyon sistemlerinde kullanılan küresel mafsallı parçaların (rotil ve rot başı gibi) üretimi, yüksek hassasiyet ve güvenlik standartlarını karşılaması gereken çok aşamalı bir süreçtir. Bu parçaların OEM (Original Equipment Manufacturer) standartlarında üretilmesi, yan sanayi üreticileri için temel kalite hedefi olmaktadır. Üretim süreci genellikle şu adımları içerir: 3B CAD tasarımı, uygun malzeme seçimi, üretim (dövme, talaşlı imalat, ısıl işlem vs.) ve son kontrol/test. Şekil 5’te bu çalışmada kullanılan süspansiyon parçasına ait rotilin alt bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2. Rotil ve alt bileşenleri [6].

Küresel mafsallar, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve farklı tür ve yapılandırmalara sahip olan önemli süspansiyon bileşenleridir. Bir otomobilin, belirli performans kriterlerini karşılamak amacıyla çok çeşitli biçimlerde tasarlanabilen kompleks bir sistem olduğu bilinmektedir. Bu sistemin temel yapı taşlarından biri olan şasi, aracın taşıyıcı iskeletini oluşturur ve gövdenin monte edildiği ana yapıdır. Şasi ile süspansiyon ve tekerlek sistemleri arasındaki bağlantıyı sağlayan burçlar ve bilyalı mafsallar, sürüş güvenliği, konfor ve yol tutuş performansı açısından kritik öneme sahiptir. Küresel mafsallar ise, hem dikey (yukarı-aşağı) hareketlere hem de yönlendirme (direksiyon) manevralarına olanak tanıyan küresel bağlantı elemanlarıdır; bu yönüyle aracın şasisini tekerleklere bağlayan hareketli bağlantı noktaları olarak görev yaparlar [7].

Üretilen bileşenler, statik testler ve diğer mekanik performans ölçümleriyle, OEM tarafından belirlenen referans standartlarla karşılaştırılarak doğrulanmaktadır. Ancak, test sonuçlarının belirlenen performans kriterlerinin altında kalması durumunda, ürün üzerinde tasarım modifikasyonları, malzeme özelliklerinin yeniden değerlendirilmesi veya imalat proseslerinin optimizasyonu gibi iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilir. Bu iyileştirme süreci, mevcut kalıp tasarımında değişiklik yapılmasını, yeni prototiplerin üretimini ve ardından testlerin tekrarlanması gerektirir. Dolayısıyla, revizyon döngüsü; kalıp üretim ve revizyon maliyetlerinde artışa, doğrulama testlerinin yinelenmesine, üretim ve onay süreçlerinde zaman kaybına ve buna bağlı olarak işçilik ve genel üretim maliyetlerinin yükselmesine yol açmaktadır. Otomotiv sektöründe, özellikle yüksek rekabet ortamında, bu tür tekrar eden revizyon süreçlerinin zaman ve maliyet açısından yaratacağı olumsuz etkiler, ürünün pazara sunulma süresini uzatmakta ve üretici firmanın rekabet gücünü azaltmaktadır.

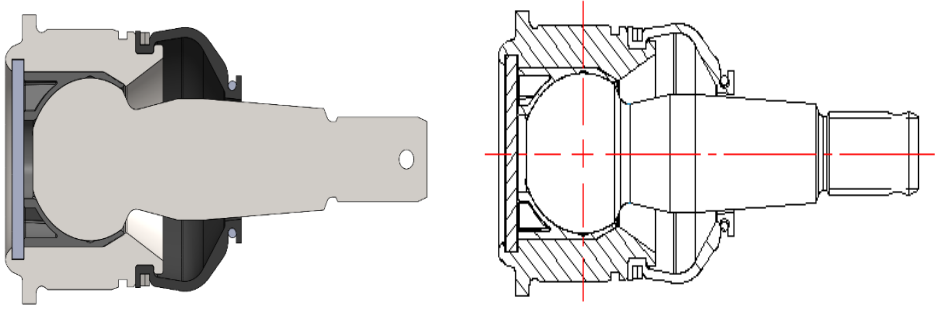
Bu çalışma kapsamında, süspansiyon sistemlerinin kritik bileşenlerinden biri olan rotillerin taşıt dinamiği üzerindeki etkileri, yapısal analizleri ve yorulma davranışları incelenecektir. Çalışmada ayrıca, bu bileşenlerin farklı geometri

kombinasyonları altında sergilediği mekanik performans, bilgisayar destekli mühendislik yazılımları aracılığıyla analiz edilerek değerlendirilmiştir. Amaç, rotıl tasarımında hem güvenliği hem de dayanıklılığı artırmaya yönelik mühendislik çözüm önerileri geliştirmektir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Numune ve geometri seçimi

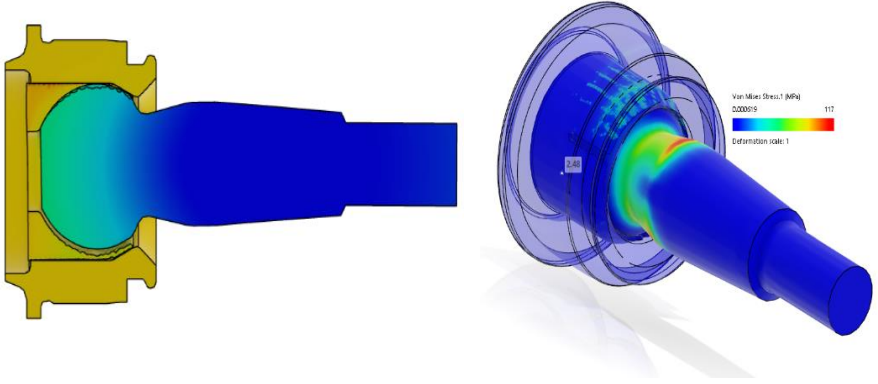
Bu çalışmada, binek araçlarda yaygın olarak kullanılan ön süspansiyon sistemine entegre rotiller referans alınarak dört farklı radyal boşluk değerine sahip numuneler imal edilmiştir. Numunelerde kullanılan malzemeler, uygulama koşullarına uygun olarak seçilmiş olup; gövde (yuva) bileşeni için orta karbonlu çelik sınıfından SAE 1040, küresel mafsals için yüksek mukavemetli alaşımlı çelik olan SAE 5140, ve plastik yatak elemanı için yüksek aşınma direncine sahip mühendislik termoplastiği olan Delrin 300CP NC010 (POM-H) tercih edilmiştir. Her bir numune, tanımlanan radyal boşluk toleranslarına göre hassas işleme yöntemiyle üretilmiş ve sonrasında montajları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te rotile ait CAD modeller verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan rotıl CAD modeli

B. Sayısal Modelleme (FEA)

Rotil bileşenlerinin üç boyutlu geometrik modelleri, SolidWorks CAD yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve daha sonra Abaqus/CAE ortamına aktarılmıştır. Her bir numune, farklı radyal boşluk değerlerine sahip olacak şekilde parametrik olarak modellenmiştir. Statik yapısal analiz kapsamında, her model üzerine radyal yönde 4 kN'luk kuvvet uygulanmıştır. Analizler sonucunda; maksimum von Mises gerilme dağılımları, toplam yer değiştirme (deplasman) değerleri ve temas bölgelerindeki gerçek temas alanı hesaplanmıştır. Şekil 4'te CAE (FEA) programında yapılan örnek bir çalışma verilmiştir.



Şekil 4. CAE analizi

C. Üretim Süreci

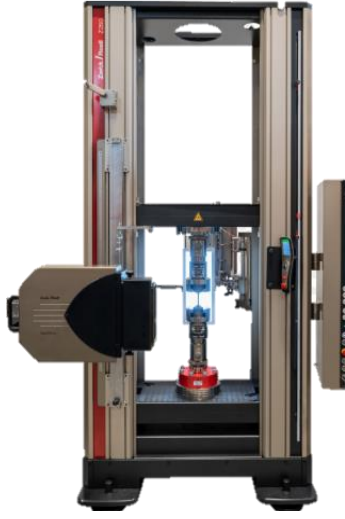
Tasarım ve malzeme belirleme işlemlerinin ardından dövme, işleme (CNC tornalama, frezeleme), ısıtılma, yüzey sertleştirme ve kaplama (örneğin çinko kaplama) gibi prosesler sırasıyla uygulanır. Şekil 5’te mafsallı ve rotallı gövdeleri için örnek bir proses gösterilmiştir.



Şekil 5. Örnek bir proses akış şeması (kalıp tasarımı, dövme, tornalama)

D. Statik ve Dinamik Testler

Sayısal analizlerin doğruluğunu değerlendirmek üzere, CAE’de kullanılan koşullar ile uyumlu olacak şekilde statik testler Zwick Roell Z250 cihazı kullanılarak radyal yükleme testleri yapılmıştır. Testlerde, yer değişimleri elde edilmiştir. Şekil 6’da kullanılan test cihazı gösterilmiştir. Şekil 7’de testin uygulama konumlandırılması ve test sonuç verisi verilmiştir.



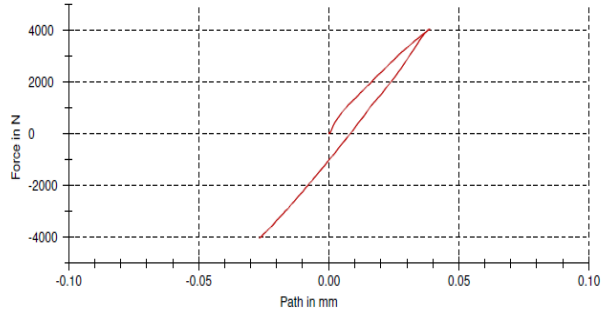
Şekil 6. Zwick Roell Z250 test cihazı



Test results:

No.	Specimen designation	F_{max} N	$dL(F_{max})$ mm	F_{min} N	$dL(F_{min})$ mm
1		4041,59	0,039	-4050	-0,027

Series graph:



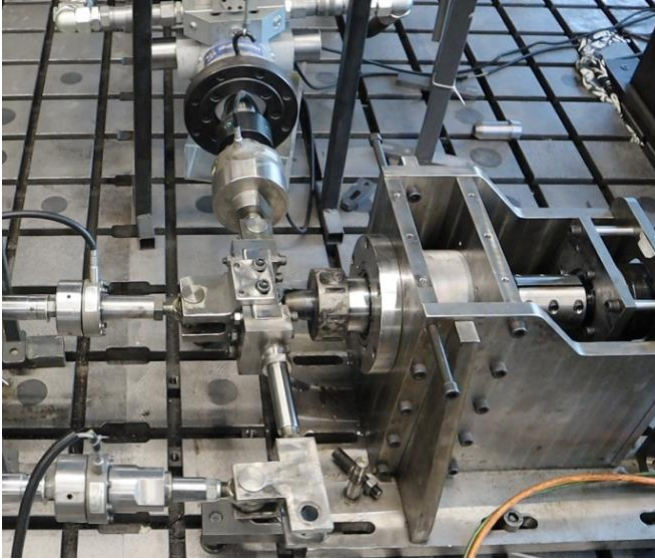
Şekil 7. Test cihazında rotinin konumlandırılması test

Statik karakterizasyon testlerinin ardından, rotillerdeki farklı radyal boşluk değerlerinin yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla servo-hidrolik kontrollü dinamik test cihazı kullanılarak çok döngülü yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, gerçek araç koşullarını temsil eden yükleme senaryoları çerçevesinde yapılmıştır. Deney düzeneği, Şekil 8’de gösterilen özel olarak tasarlanmış test fikstürü aracılığıyla servo-hidrolik aktüatöre bağlanmıştır.

Fikstür, süspansiyon elemanlarının araç altı montaj konfigürasyonuna benzer şekilde yük aktarımını sağlayacak biçimde konumlandırılmıştır. Böylece, yükleme yönü ve temas yüzeyleri, taşıtın gerçek dinamik koşullarını yansıtacak şekilde modellenmiştir. Test süresi 500,000 çevrimdir. Test çalışma koşulları aşağıda verilmiştir:

Yükleme tipi: Sıfırdan değişen sinüzoidal yükleme

- Radyal yük ve frekans: 4 kN, 1Hz
- Eksenel yük ve frekans: 1 kN, 1Hz
- Salınım açısı ve frekans: ± 10 , 0.5 Hz
- Dönme açısı ve frekans: ± 30 , 0.5 Hz



8. Servo-hidrolik test cihazı

III. BULGULAR

Bu çalışmada dört farklı rotül numunesi üzerinde uygulanan 4 kN’luk statik yükleme altında hem sonlu elemanlar analizleri (CAE) hem de fiziksel testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur:

- CAE analizleri sonucunda elde edilen maksimum deplasman değerleri 0.128 mm ile 0.108 mm arasında değişmiştir.
- Statik testlerde ölçülen maksimum deplasman değerleri 0.111 mm ile 0.098 mm arasında gerçekleşmiştir.
- Tüm numunelerde CAE sonuçları, statik test sonuçlarına göre daha yüksek deplasman tahminleri üretmiştir.

- En yüksek fark %21.43 ile 2. numunede, en düşük fark %6.93 ile 4. numunede gözlemlenmiştir.
- Statik test ve CAE sonuçları arasında %7–21 aralığında değişen sapmalar kaydedilmiştir.
- CAE ve test sonuçlarının karşılaştırmalı verileri Tablo 1’de sunulmuştur:

Tablo 1. CAE ve statik test karşılaştırması

Numune No	Statik Test (mm)	CAE (FEA) (mm)	Fark (%)
1	0.111	0.128	15.32
2	0.098	0.119	21.43
3	0.099	0.113	14.14
4	0.101	0.108	6.93

- Tüm numunelerde temas yüzeyleri, deformasyonun en yoğun olduğu bölgeler olarak belirlenmiştir.
- Statik test öncesi ve yorulma testi sonrası deplasman verileri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Yorulma testi öncesi ve sonrası veriler

Numune No	Test öncesi deplasman (mm)	Test sonrası deplasman (mm)	Fark (%)	Artış oranı
1	0.111	0.466	0.355	4.2
2	0.098	0.363	0.265	3.7
3	0.099	0.446	0.347	4.5
4	0.101	0.394	0.293	3.9

Her bir rotıl numunesi için yorulma testinden önce ve sonra ölçülen deplasman değerleri aşağıda verilmiştir. Artış oranı, test sonrası değerin test öncesi değere oranı olarak hesaplanmıştır. Toplam test süresi her numune için 500.000 çevrim olarak uygulanmıştır.

- Tüm numunelerde test sonrası deplasman değerlerinde belirgin artış gözlemlenmiştir.
- Artış miktarı 0.265 mm ile 0.355 mm arasında değişmiştir.
- En yüksek artış 1. numunede, en düşük artış ise 2. numunede kaydedilmiştir.
- Artış oranları 3.7 ile 4.5 kat arasında değişmiş, ortalama artış oranı yaklaşık 4 kat olarak hesaplanmıştır.

IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada, süspansiyon sistemlerinde kullanılan rotıl bileşenlerinin boşluk parametresine bağlı yapısal davranışı; sonlu elemanlar analizi, statik testler ve yorulma deneyleri ile kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, boşluk değerinin yalnızca montaj sırasında değil, bileşenin servis ömrü boyunca performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sayısal analizler ile statik testler karşılaştırıldığında, analiz sonuçlarının genellikle deneysel verilere kıyasla daha yüksek deformasyon tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Bu fark, modelleme sırasında temas yüzeylerinin ve plastik deformasyon potansiyelinin sınırlı biçimde temsil edilmesinden kaynaklanabilir. Ancak genel uyum düzeyi, sonlu elemanlar yönteminin bu tür bileşenler için güvenilir bir öngörü aracı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Yorulma testleri sonucunda, her bir numunede gözlemlenen deplasman artışı; yük altında tekrar eden hareketlerin, yatak-mafsalsal ara yüzeylerinde plastik oturma, mikro yapısal bozulma ve aşınma gibi fiziksel etkilerle birleşerek zamanla deformasyon birikimine yol açtığını ortaya koymuştur. Özellikle düşük başlangıç boşluklarına sahip bileşenlerin, yorulma dayanımı açısından daha uzun ömür sergilediği belirlenmiştir. Bu durum, boşluk parametresinin yalnızca mekanik uygunluk değil, aynı zamanda yorulma ömrü açısından da optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Deplasman artışlarının yaklaşık 3.7 ile 4.5 kat arasında değişmesi, hem malzeme seçimlerinin hem de üretim toleranslarının yorulma süreci üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, plastik yatak malzemesinin sürtünme, şekil değiştirme ve aşınma direnci gibi özellikleri de öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, deneysel ve sayısal yöntemlerin birlikte kullanılması sayesinde rotıl tasarım sürecinde daha güvenilir ve uzun ömürlü çözümler geliştirilmesine katkı sunmaktadır. Sonuçlar, mühendislik tasarım süreçlerinde boşluk toleranslarının sadece statik değil, dinamik yükleme koşulları altında da dikkate alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, süspansiyon sistemlerinde görev yapan rotıl bileşenlerinin yapısal davranışı, farklı boşluk parametreleri altında değerlendirilmiş; statik testler, sonlu elemanlar analizleri ve yorulma testleri ile kapsamlı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen teknik veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Rotıl bileşenlerindeki radyal boşluk, yalnızca anlık statik test için değil, aynı zamanda uzun süreli yorulma davranışı üzerinde de doğrudan etkili bir parametredir.
- Deneysel sonuçlar, sayısal analizlerin genel eğilimi doğru tahmin ettiğini, ancak temas yüzeyleri ve plastik oturma etkilerinin modellenmesinde sınırlamalar bulunduğunu göstermiştir.

- Yorulma testleri sonucunda gözlenen deformasyon artışları, hem plastik yatak malzemesinin aşınma direnci hem de üretim toleranslarının yorulma performansına etkisini ortaya koymuştur.
- Başlangıçta daha düşük boşluk değerine sahip rotül numuneleri, hem daha düşük deformasyon artışı hem de daha uzun yorulma ömrü sergilemiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında katkı sağlayan ve gerekli verilerin temininde desteğini esirgemeyen AYD Otomotiv Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bu makale, Selçuk Üniversitesi bünyesinde, Prof. Dr. Abdullah Engin Özçelik danışmanlığında hazırlamış olduğum “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Küresel Mafsallı Parçaların Servis Ömrünün Belirlenmesinde Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Ömür Testi Uygulaması” başlıklı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Putgül, Y., & Altıparmak, D. (2016). Taşıt süspansiyon sistemi çeşitleri ve ön düzen geometrisine etkileri. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 19(2), 195-202.
- [2] JRajamani, R., “Vehicle dynamics and control”, Springer, New York, (2006).
- [3] Isermann, R., “Mechatronic systems fundamentals”, Springer, New York, (2005).
- [4] Güvenc, M. A. (2015). Dayanıklılık ve ömür kriterlerine göre optimum tasarıma sahip süspansiyon ve direksiyon sistemi bileşenleri geliştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 6-13
- [5] Taş, K. (2017). Binek Araç Rotunun Push-Out Ve Yorulma Performansının Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Master Tezi, 104s.
- [6] Rutci, A., ve Eren, F. S. (2018). Investigation of Suspension Ball Joint Pull Out ForceBased on FEA Method and Experimental Study. 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science. Antalya.
- [7] Johansson, A., & Roubert, P., 2011. Development of a Hi-Per strut front suspension

Gerçek Zamanlı Uçuş Rotalarını Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi

Sılanaz ÇELİK¹

Erdal AYDEMİR²

- 1- Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE. slanazcelik@gmail.com ORCID No: 0009-0000-2460-1212
- 2- Doç. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE erdalaydemir@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-4834-725X

ÖZET

İnsansız hava araçlarının (İHA) sivil ve askeri görevlerde kullanımı hızla artarken, gerçek zamanlı güvenli uçuş rotalama sürecinde güvenlik, maliyet, enerji verimliliği, çevresel etkiler ve teknolojik kısıtlar gibi çok sayıda parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Bilimsel yazında Genetik Algoritmalar, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Tavlama Benzetimi gibi başlıca sezgisel yöntemlerin, rotalama problemlerinde yüksek performans gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte, süreci etkileyen kriterlerin büyük ölçüde uzman görüşüne ve belirsizlik içeren değerlendirmelere dayanması nedeniyle, klasik çok ölçütlü karar verme yöntemleri yetersiz kalabilmektedir. Yine de temel araştırma problemini etkileyen faktörlerin belirlenmesi ise başlı başına bir başlangıç problemi olarak düşünülebilir. Bu bağlamda çalışma kapsamında; dinamik ve belirsiz ortamlarda İHA'ların gerçek zamanlı uçuş rotalarının planlanması ve optimizasyonuna etki eden faktörlerin belirlenmesini amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı (İHA), Rota Planlama, Uçuş güvenliği, Belirsizlik Altında Çok Ölçütlü Karar Verme

GİRİŞ

Son yıllarda ortaya çıkan teknolojik gelişmeler sonrasında İnsansız Hava Araçlarının (İHA) sivil ve askeri kullanım alanları giderek genişlemektedir. Bu değişimle birlikte, İHA'ların güvenli, verimli ve sürdürülebilir biçimde operasyonlarını gerçekleştirebilmesi için etkin rota planlaması kritik bir problem haline gelmiştir. Ancak, dinamik hava sahası koşulları, değişken hava durumu, hareketli hedefler ve operasyonel kısıtlar gibi pek çok belirsizlik unsuru, klasik rota planlama yöntemlerinin bu ihtiyacı tam anlamıyla karşılamasını zorlaştırmaktadır.

İHA rota planlama problemleri genellikle çok sayıda, birbiriyle çelişebilen kriteri aynı anda değerlendirmeyi gerektirmektedir. Bunlar güvenlik, enerji tüketimi, uçuş süresi, hava trafiği durumu, çevresel etkiler gibi kriterlerdir. Ayrıca, bu kriterlerin önem dereceleri, görev tipine ve kullanıcı (operatör) deneyimine göre değişkenlik gösterebilir. Bilimsel yazında genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu, tabu arama ve benzeri sezgisel yöntemler bu tür karmaşık problemlerde rota eniyilemesi amacıyla yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak bu yöntemler, uzman görüşlerinden kaynaklanan belirsizlik ve tereddütleri yeterince işleyememekte ve çoğu zaman gerçek zamanlı sorunlara cevap veremeyebilmektedir.

Bu çalışmada, dinamik gerçek zamanlı uçuş kriterlerinin rota planı üzerindeki etkilerinin ağırlıklandırılması sürecinde uzman görüşlerinin

toplanması hedeflenmiştir. Böylece hem kriterlerin önem dereceleri uzman bilgisi ışığında belirlenecek hem de belirsizliklerin karar sürecine yansıtılması sağlanacaktır. Çalışmanın sonunda ise, belirlenen faktörler için çok ölçütlü karar verme ve meta-sezgisel algoritmalar ile devam edecek gerçek zamanlı rota eniyileme problemleri için başlangıç karar matrisi yapısı elde edilecektir.

Çalışmanın ikinci bölümünde doğrudan ilişkili bilimsel yazın araştırması ve üçüncü bölümünde ise, araştırma probleminin tanımı verilmiştir. Dördüncü bölümde, araştırma için ulaşılan uzman grubu ve niteliği ile araştırma problemini etkileyen faktörler gösterilmiştir. Son bölümde ise; mevcut çalışmanın önemi ve gelecek araştırma konuları hakkında öngörüler araştırmacılara sunulmuştur.

BİLİMSEL YAZIN ARAŞTIRMASI

İHA'lar, çeşitli sivil ve askeri uygulamalarda kullanılmakta olup, dinamik ve belirsiz ortamların getirdiği zorlukları çözmek için etkili yol planlama algoritmaları gerektirmektedir. Sivil alanda; tarımsal gözlem, orman yangını tespiti ve söndürme, kargo taşımacılığı, afet yönetimi ve arama-kurtarma operasyonlarında yoğun biçimde kullanılmaktadır. Askeri kullanım alanları ise keşif ve gözetleme, istihbarat toplama, elektronik harp, hassas hava saldırısı ve düşman unsurlarına karşı savunma uygulamalarını kapsamaktadır (Gonzalez vd. 2021).

Geleneksel rota planlama yöntemleri, sabit engeller ve önceden bilinen haritalar üzerinde bir yol bulmaya odaklanırken, insansız hava araçları çalıştığı düşman ortamları gibi karmaşık senaryolarda daha fazla bilgi ve bellek kısıtı altında gerçek zamanlı çalışabilmesi gerekmektedir. (Kim, Gu ve Postlethwaite, 2008). Özellikle askeri operasyonlarda GPS sinyali kesintisi, düşman radar tehditleri ve değişken hava koşulları gibi kısıtlar altında İHA'ların gerçek zamanlı rota değiştirme kabiliyeti hayati öneme sahiptir. Aynı şekilde, yoğun sivil hava trafiği ortamında operasyon yapan kargo İHA'larının da hava sahası kısıtları, dinamik trafik yoğunluğu ve enerji sınırlamaları gibi faktörleri göz önünde bulundurarak rotalarını planlamaları gerekmektedir.

Zhang vd. (2020), gerçekleştirdikleri çalışmalarında uçuş rotalarının güvenlik açısından eniyilemesine odaklanmış ve gizli insansız hava araçlarının üç boyutlu (3B), karmaşık ve dinamik ortamlarda güvenli bir şekilde rota planlamasını mümkün kılan gerçek zamanlı bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma, çevresel tehdit unsurlarını — özellikle radar tespitleri ve çıkma tehditlerini — dikkate alarak, İHA'ların düşman hatlarına hızlı, etkin ve güvenli bir biçimde sızabilmesini hedeflemektedir. Söz konusu çalışma, uçuş güvenliği ve tehdit algısına dayalı rotalama algoritmalarının geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunmakta ve

özellikle askeri amaçlı uygulamalarda anlık tehdit yönetiminin önemini ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, Vela vd. (2010) tarafından geliştirilen eniyileme modeli ise, hava trafik yönetiminde maliyet odaklı bir yaklaşım sergilemektedir. Araştırmada, yakıt maliyetlerini en aza indirerek hava trafiği çakışma çözümleme problemini ele alan bir model tasarlanmıştır. Model, uçaklar arasındaki muhtemel çakışma durumlarını çözmek için gerekli olan yön ve hız değişikliklerini optimize ederken, aynı zamanda operasyonel maliyetlerin önemli bir kalemi olan yakıt tüketimini de enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Artan yakıt fiyatları ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, maliyet etkin çözümler üreten bu tarz çalışmaların sivil hava taşımacılığı için önemi her geçen gün artmaktadır.

Bilimsel yazında sezgisel ve metasezgisel yaklaşımlar incelendiğinde optimal sonuçlara çoğunlukla Genetik Algoritmalarla (GA) ulaşıldığı görülmüştür. Öztürk vd. (2023) çalışmalarında insansız hava araçlarını homojen ve belirli bir menzile sınırlı bulunmayacak şekilde ele almışlardır. Hedef noktaları farklı önem seviyelerine sahiptir. Rotaların, başlangıç ve bitiş noktaları sabittir. Yöntem olarak karma tam sayılı doğrusal programlama (Mixed Integer Linear Programming (MILP)) modeli geliştirilmiştir. MILP modelinde yüksek hesaplama maliyetlerini azaltmak için GA yöntemi kullanılmış, alternatif etkin çözümler üretmek için ϵ -kısıt yöntemi uygulanmıştır. Aggarwal ve Kumar (2020) çalışmalarında, insansız hava araçları için rota planlama tekniklerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi ve optimal, çarpışmasız rotalar oluşturmayı hedeflemektedir. Dinamik ve karmaşık 3B ortamlar, insansız hava araçlarının enerji verimliliği ve çarpışma önleme gereklilikleri, uçuş süreleri kısıt alınarak değerlendirme yapıldığında özellikle GA yaklaşımının kısa sürede optimal çözüm ürettiği tespit edilmiştir.

Meta-Sezgisel yöntemlerin rota planlama problemlerine uygulandığı birçok araştırma bulunmaktadır. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization (PSO)), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization (ACO)) ve Tabu Arama (Tabu Search (TS)) gibi teknikler, özellikle çözüm uzayının geniş ve karmaşık olduğu problemlerde tercih edilmektedir. Gao vd. (2016), PSO algoritması kullanarak dinamik engellerin bulunduğu 3B ortamda İHA rota planlaması gerçekleştirmiş ve kısa sürede yüksek kaliteli sonuçlara ulaşmıştır. ACO yöntemi ise, Hu ve arkadaşları (2019) tarafından İHA'ların düşman bölgelerinde en düşük radar tespit olasılığıyla rota planlaması için uygulanmıştır. Ayrıca Yang ve ark. (2020), Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing (SA)) yönteminin 3B rota planlama problemlerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmalar göstermektedir ki, sezgisel ve doğadan esinlenen metasezgisel algoritmalar, gerçek zamanlı ve dinamik koşullar altında yol planlama için güçlü birer çözüm alternatifi sunmaktadır. Bununla birlikte, meta-sezgisel yöntemlerin belirsizliği yöneten tekniklerle entegrasyonu, çok

daha esnek ve güvenilir çözümler üretme potansiyeline sahiptir. Tablo 1’de bilimsel yazından seçilmiş kaynakları dikkate alarak uçuş kriterleri ve üzerine yapılan araştırmalarda kullanılan ve/veya geliştirilen algoritmalar verilmiştir.

Tablo 1: Uçuş Kriterleri ve Kullanılan Algoritmalar

	Szczerba vd. 2000	Arıca vd. 2012	Zhang vd. 2020	Chu vd. 2022	Vashisth vd. 2024	Wen Ma vd. (2015)
Hava Koşulları		+				
Hava Trafığı						
Yakıt-Enerji Tüketimi		+			+	
Tehlikeli Bölgeler		+	+	+		+
Manevra Kabiliyeti	+		+	+	+	+
Rota İrtifa Ayrımı		+	+			
Hareketli Hedefler		+	+			
Hedefe Ulaşma Süresi			+			+
Batarya Süresi				+		
Emniyet İrtifaları		+	+	+		
Engellerden Kaçma			+			+
Hedef Konumuna Yaklaşma Vektörü	+				+	+
Uçuş Süresi		+	+		+	+
UAV İletişim Durumu					+	
UAV Ağırlığı				+	+	
Uçuş Mesafesi	+	+		+	+	
Kullanılan Algoritmalar	<i>Seyrek A*Arama</i>	A*	A* ve ,D*	Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)	Derin Pekiştirmeli Öğrenme	IFS tabanlı DDRRT ve Geliştirilmiş RRT

Bilimsel yazında, meta-sezgisel algoritmalar ile sezgisel bulanık küme (Intuitionistic Fuzzy Sets (IFS)) yaklaşımlarının birlikte kullanıldıkları çalışmalar (örneğin IFS-PSO veya IFS-GA) daha yeni bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır (Zhang ve Chu, 2015). Tablo 1’de özetlenen bilimsel yazın çalışmaları, insansız hava araçları için rota planlama ve optimizasyonu alanında geliştirilen yenilikçi algoritmaları ve bu algoritmaların dikkate aldığı uçuş kriterlerini kapsamaktadır. Söz konusu çalışmaların katkıları ve odaklandıkları temel unsurlar aşağıda detaylı biçimde sunulmaktadır:

Szczerba vd. (2000), değişken ve tehlikeli hava koşulları altında İHA’ların gerçek zamanlı rota planlamasını sağlayan sağlam ve hızlı bir algoritma geliştirmiştir. Bu çalışma, güvenlik odaklı rota planlamasına katkıda bulunmaktadır.

Arica vd. (2012), İHA’lar için çok kriterli güzergâh planlama modeli sunmuş ve bu modeli Savunma Bilimleri Dergisi’nde yayımlamıştır. Çalışmada, çeşitli uçuş kısıtları altında en düşük maliyetli güzergâhların belirlenmesi amaçlanmıştır.

Zhang vd. (2020), karmaşık ve dinamik 3B ortamlarda düşük görünürlük gereksinimine sahip İHA’lar için yenilikçi ve gerçek zamanlı bir nüfuz etme rotası planlama algoritması geliştirmiştir. Bu çalışmanın temel hedefi, uçuş süresini minimize etmektir.

Chu vd. (2022), tehlikeli ve karmaşık tehdit ortamlarında güvenli ve optimize edilmiş rota planlaması sağlamak amacıyla, Kaotik Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tabanlı bir algoritma önermiştir. Bu yöntem, İHA sistemlerinin güvenli bir şekilde rota belirlemesine olanak sağlamaktadır.

Vashisth vd. (2024), bilinmeyen 3B ortamlarda çarpışmasız rota planlaması ile birlikte çevresel keşif ve bilgi toplama kapasitesini en üst düzeye çıkarmayı hedefleyen, dinamik grafik yapılarıyla desteklenmiş derin pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir algoritma geliştirmiştir. Bu yaklaşım, özellikle adaptif bilgi odaklı yol planlama (Adaptive Informative Path Planning (AIPP)) kapsamında önemli katkılar sunmaktadır.

Wen et al. (2015), düşük irtifa ve engellerle dolu tehlikeli çevrelerde (hem statik hem dinamik tehditlere sahip) İHA için çevrim içi rota planlama algoritması geliştirmiştir. Çalışma, sezgisel bulanık kümeler kullanarak statik tehditleri modellemekte; ayrıca dinamik tehditlerin etkisini tahmin etmek için geliştirilmiş bir RRT (Rapidly-exploring Random Tree) tabanlı yöntem (DDRRT ve RRT*) kullanmaktadır. Böylece, hem güvenli nüfuz

edilebilirlik sağlanmış hem de simülasyonlarda rota güvenliği yüksek oranda doğrulanmıştır .

Bu çalışmada ise, uçuş rotalarını etkileyen faktörler yalnızca belirli bir bakış açısıyla değil hem güvenlik hem maliyet hem de çevresel etki, hava trafiği yoğunluğu ve teknolojik kısıtlar gibi pek çok parametreyi bütüncül bir biçimde ele alan bir yaklaşım benimsenmektedir. Bu kapsamda geliştirilecek analiz çerçevesi ile günümüzün dinamik ve yoğun hava sahası koşullarında çok boyutlu ve dengeli karar destek mekanizmalarının oluşturulması amaçlanmaktadır. Böylece, gerçek zamanlı uçuş rotalarının planlanması ve eniyilemesi sürecine hem güvenlik hem verimlilik hem de sürdürülebilirlik açısından katkı sağlanacaktır.

ARAŞTIRMA PROBLEMİN TANIMI

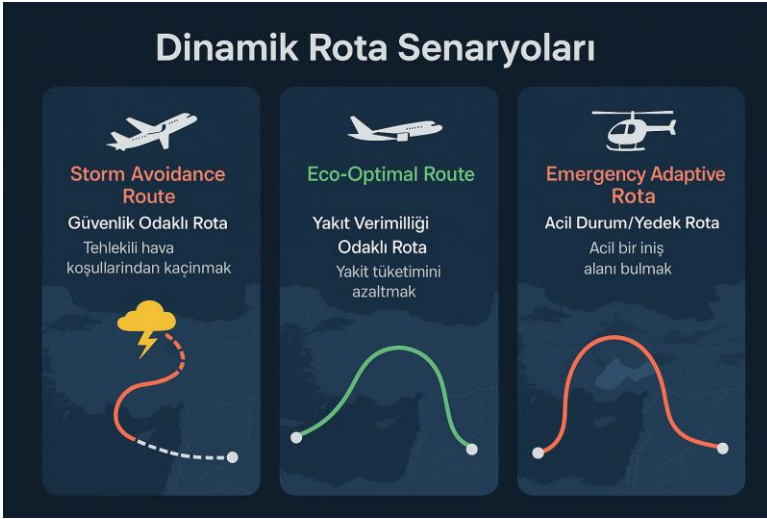
İnsansız hava araçlarının güvenli, hızlı ve enerji verimli şekilde görevlerini tamamlayabilmeleri için rota planlaması sürecinde çok sayıda çevresel ve operasyonel kısıt dikkate alınmalıdır. Bu kısıtlar arasında hava trafiği, değişken hava koşulları, tehlikeli bölgeler, hareketli hedefler, rota-irtifa ayrımı, batarya süresi, uçuş mesafesi, manevra kabiliyeti gibi faktörler yer almaktadır. Bu kısıtlar, yalnızca uçuş güvenliğini değil aynı zamanda operasyonun başarısını da doğrudan etkilemektedir.

Bu kapsamda, çalışmanın ana problemi; farklı deneyim seviyelerindeki İHA kullanıcılarının bu kısıtları nasıl önceliklendirdiğini dikkate alarak, karar destek mekanizmalarına uygun kriter ağırlıklarının belirlenmesidir. Gerçek zamanlı uçuş rotalarının belirlenmesinde; hava koşulları, hava trafiği yoğunluğu, yakıt/enerji verimliliği, güvenlik riskleri ve acil durumlar gibi çok sayıda ve dinamik faktörün aynı anda değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu faktörlerin birbirleriyle çelişebilen etkileri (örneğin, güvenlik için rota uzatılırken maliyet artışı olması gibi) karar vericiler için karmaşık bir eniyileme problemi oluşturmaktadır. Çalışmada bu karmaşıklığı örnekleyen hava araçları için üç farklı senaryo sunulmaktadır (Şekil 1):

- *Senaryo 1 Güvenlik Odaklı Rota:* Ankara'dan Frankfurt'a yönelen bir İHA'nın rotasında ani fırtına oluşumu tespit edilmiş, yapay zekâ destekli sistem, şiddetli türbülans ve yıldırım riskinden kaçınmak için rotayı yaklaşık 80 km uzatacak şekilde yeniden planlamıştır. Bu

durumda güvenlik sağlanmış, ancak uçuş süresi ve enerji tüketimi artmıştır.

- *Senaryo 2 Yakıt Verimliliği Odaklı Rota:* İstanbul'dan Doha'ya giden bir yolcu uçağı için jet akımları analiz edilerek daha verimli bir irtifa seviyesi önerilmiş ve böylece uçuşta %8 yakıt tasarrufu sağlanmıştır. Ancak bu tür öneriler, hava sahası kısıtları veya güvenlik koşullarıyla dengelenmelidir.
- *Senaryo 3 Acil Durum/Yedek Rota:* Antalya'da görev yapan bir yangın söndürme helikopteri dönüş yolunda motor arızası riski ile karşılaşmış, yapay zekâ sistemi acil durum senaryosu kapsamında en uygun acil iniş noktalarını belirleyerek hızlı ve güvenli bir iniş rotası oluşturmuştur.



Şekil 1: Üç Farklı Senaryo için Rota Alternatifleri

Bu senaryolar, gerçek zamanlı uçuş rotalarının dinamik, belirsiz ve çok kriterli yapısını açıkça göstermektedir. Bu nedenle çalışmada, farklı kriterlerin (güvenlik, maliyet, çevresel etki vb.) belirsizlik içeren etkilerini dikkate alarak, uzman görüşlerinin toplanarak belirlenmesi hedeflenmektedir.

Üç farklı senaryo için, farklı tecrübelerle sahip karar vericilerin deneyimlerine göre en kritik kısıtların belirlenmesi ve bu sayede gerçek zamanlı sistemlere entegre edilebilecek esnek bir karar verme yapısının oluşturulması bu çalışmanın temel hedefidir. Bu yapının hem uçuş öncesi

planlamada hem de uçuş esnasında dinamik olarak kullanılabilecek altyapının temelini oluşturacağı öngörülmektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI

Araştırma sürecinde 27 farklı uzman ile görüşme sağlanmıştır. Uzmanların 1'i 10 yıl ve üzeri deneyimli, 6'sı 6-10 yıl arası deneyimli ve 20'si ise; 0-5 yıl arası deneyimli İHA pilotudur. Bu uzman grubuna yukarıda tanımlanmış üç farklı senaryo altında aşağıda Tablo 2'de verilen kriterleri birbirleri arasında ikili karşılaştırmalarını Tablo 3'te verilen puanlara göre değerlendirmeleri istenmiştir.

Uzmanların yaptıkları değerlendirmeler sonrası yapılan analiz sonucu, gerçek zamanlı uçuş sürecinde rota planlarını etkileyen faktörlerin farklı senaryolar altındaki önem düzeyleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 2: Değerlendirme Kriterleri

Hava Trafiği
Tehlikeli Bölgeler
Hareketli Hedefler
Yakıt/Enerji Tüketimi
Manevra Kabiliyeti
Batarya Süresi
Uçuş Süresi
Uçuş Mesafesi

Tablo 3: Değerlendirme Ölçeği (Saaty, 1986)

Puan	Tanım	Anlamı
1	Eşit derecede önemli	Amaç için iki seçenek eşit öneme sahiptir.
3	Daha önemli	Bir seçenek diğerine göre biraz daha önemlidir
5	Orta derecede önemli	Bir seçenek diğerine göre oldukça önemlidir.
7	Çok önemli	Bir seçeneğin diğerine göre çok yüksek biçimde önemi vardır.
9	Mutlak önemli	Bir seçenek diğerine göre mutlak yüksek biçimde önemlidir.
2,4,6,8	Ara değerler	İki seçenek arasında orta bir değer vermek gerektiğinde kullanılır.

Tablo 4: Uzman görüşleri sonrası kriter önem düzeyleri

Kriterler	Hava Trafığı	Tehlikeli Bölgeler	Hareketli Hedefler	Yakıt/Enerji Tüketimi	Manevra Kabiliyeti	Batarya Süresi	Uçuş Süresi	Uçuş Mesafesi
Hava Trafığı	1,00	2,67	3,46	2,31	3,26	1,52	3,35	4,70
Tehlikeli Bölgeler	0,37	1,00	2,69	2,55	3,25	1,45	3,94	4,45
Hareketli Hedefler	0,28	0,37	1,00	1,15	1,63	0,60	1,43	1,85
Yakıt/Enerji Tüketimi	0,43	0,39	0,86	1,00	1,23	0,78	0,74	1,85
Manevra Kabiliyeti	0,30	0,30	0,61	0,80	1,00	0,27	0,50	1,11
Batarya Süresi	0,65	0,68	1,65	1,26	3,61	1,00	1,66	2,56
Uçuş Süresi	0,29	0,25	0,69	1,35	1,97	0,60	1,00	2,63
Uçuş Mesafesi	0,21	0,22	0,53	0,53	0,89	0,38	0,37	1,00

Bu aşamadan sonra, uzmanların deneyim sürelerinin karar verme sürecindeki etkilerini de sürece yansıtan çok ölçütlü karar verme modelleri ve devamında ise meta-sezgisel yaklaşımlar ile eniyileme desteği kazanılmış karar destek sistemlerinin geliştirilmesi temel amaç olacaktır.

SONUÇ

Bu çalışmada, gerçek zamanlı uçuş rotalarını etkileyen faktörler çok boyutlu ve belirsiz bir yapı içinde ele alınmış, bu kapsamda belirlenen ve ulaşılan farklı deneyim seviyelerinden 27 İHA pilotu uzman görüşleri toplanmıştır. Uzman görüşleri güvenlik, yakıt verimli ve acil durum odaklı üç farklı senaryo altında; hava trafiği, tehlikeli bölgeler, hareketli hedefler, yakıt/enerji tüketimi, manevra kabiliyeti, batarya süresi, uçuş süresi ve uçuş mesafesi kriterlerinin ikili karşılaştırma değerlendirmeleri sağlanmıştır. Elde edilen nihai ikili karşılaştırma matrisi bu çalışmanın temel sonucudur.

Bilimsel yazındaki incelemeler, sezgisel algoritmaların karmaşık ve dinamik ortamlarda etkili sonuçlar üretebildiğini; ancak uzman görüşlerinden kaynaklanan belirsizliklerin klasik yöntemlerle yeterince

işlenemediğini göstermiştir. IFS yöntemi ile belirsizlik ve tereddütler modele entegre edilerek daha güvenilir ve dengeli bir karar destek mekanizması geliştirileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, dinamik hava sahası koşullarında ve değişken görev senaryolarında uygulanabilecek esnek ve gerçekçi bir rota planlama çerçevesi sunmayı hedeflemektedir. Çalışmanın devamında, başta İHA'lar olmak üzere hava araçlarının gerçek zamanlı rota planlamaları sürecinde farklı senaryolar karşısında rota eniyileme sürecinde sezgisel bulanık küme tabanlı yaklaşımlar ile bütünleşik çok ölçütlü karar verme modellerinin geliştirilmesi ve bu yolla gerçek zamanlı rota eniyilemesi için tercih edilebilecek meta-sezgisel eniyileme algoritmalarının kullanımı ile hibrit çalışmaların üretilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca ve çeşitli İHA görev profillerine göre uyarlanması planlanmaktadır. Benzer şekilde, gerçek uçuş verileri ve simülasyon ortamlarında yapılacak testlerle modelin performansının daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, yürütülen bu çalışmanın ilerleyen süreçte daha kapsamlı araştırmalara ve uygulama odaklı çalışmalara zemin hazırlayacağı öngörülmektedir. Tüm çözüm aşamaları için gerekli temel başlangıç verilerinin elde edildiği bu çalışmanın araştırmacılara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı, Savunma Sanayi Yapay Zeka Yetenek Kümelenmesi (SAYZEK) Akademik Tez Projesi (SAYZEK-ATP) kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, T.C. Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı'na sağladıkları motivasyon ve mentörlük desteği için teşekkür eder.

REFERANSLAR

- Aggarwal, S., ve Kumar, N. (2020). Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. *Computer communications*, 149, 270-299.
- Atanassov, K. (1986). *Intuitionistic fuzzy sets*. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87–96.

- Bişkin, B., Öztürk, D. T., Şakar, C. T. (2023). İki amaçlı İHA filosu rota planlaması: Kesin ve sezgisel yöntemler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(4), 2167-2178.
- Chu, H., Yi, J., ve Yang, F. (2022). Chaos particle swarm optimization enhancement algorithm for UAV safe path planning. *Applied Sciences*, 12(18), 8977.
- Cicibas, H., Demir, K. A., ve Anca, N. (2011). İnsansız Hava Araclari icin Cok Kriterli Guzergah Planlama Modeli. In *Proceeding of National Conference on Defence Applications Modelling and Simulation (USMOS2011)*.
- Gao, J., Zhang, Y., ve Wang, H. (2016). *A particle swarm optimization-based algorithm for real-time UAV path planning in dynamic environments*. *Computers and Industrial Engineering*, 98, 372–380.
- Gonzalez, L. F., Montes, G. A., Puig, E., Johnson, S., Mengersen, K., ve Gaston, K. J. (2016). *Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation*. *Sensors*, 16(1), 97.
- Hu, J., Li, X., Wang, S., ve Xu, L. (2019). *Ant colony optimization for UAV path planning with limited fuel and threat constraints*. *Aerospace Science and Technology*, 85, 363–373.
- Kim, Y., Gu, D. W., Postlethwaite, I. (2008). Real-time path planning with limited information for autonomous unmanned air vehicles. *Automatica*, 44(3), 696-712.
- Saaty, T. (1986) *Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process*, *Management Science*; 32(7), 841- 855.
- Sahin, S., Ocak, M.A., ve Uluyol, C.(2009). A systematic evaluation of preservice teachers' opinions on learning objects. *International Journal of Human Sciences*, 6(2), 723-736.
- Szczerba, R. J., Galkowski, P., Glicktein, I. S., ve Ternullo, N. (2000). Robust algorithm for real-time route planning. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, 36(3), 869-878.
- Torra, V., Narukawa, Y. (2009). *Modeling Decisions: Information Fusion and Aggregation Operators*. Springer.
- Vashisth, A., Ruckin, J., Magistri, F., Stachniss, C., ve Popovic, M. (2024). Deep reinforcement learning with dynamic graphs for adaptive informative path planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*.
- Vela, A. E., Solak, S., Clarke, J. P. B., Singhose, W. E., Barnes, E. R., ve Johnson, E. L. (2010). Near real-time fuel-optimal en route conflict resolution. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), 826-837.
- Wen, N., Zhao, L., Su, X., ve Ma, P. (2015). *UAV online path planning algorithm in a low altitude dangerous environment*. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2(2), 173–185.
- Xie, C., Li, S., Qin, X., Fu, S., ve Zhang, X. (2024). Multiple elite strategy enhanced RIME algorithm for 3D UAV path planning. *Scientific Reports*, 14(1), 21734.
- Yang, H., Zhao, S., ve Zhang, X. (2020). *Simulated annealing-based three-dimensional path planning for UAV in dynamic environment*. *IEEE Access*, 8, 49602–49614.
- Zhang, X., Chu, X. (2015). *Risk assessment of supply chain using intuitionistic fuzzy DEMATEL< method*. *International Journal of Production Research*, 53(16), 4850–4865.

Zhang, Y., Su, R., Sandamali, G. G. N., Zhang, Y., Cassandras, C. G., ve Xie, L. (2018). A hierarchical heuristic approach for solving air traffic scheduling and routing problem with a novel air traffic model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(9), 3421-3434.

Yapay Zekâ ile Problem Çözümüne Giriş: Yeni Bir Paradigma

İbrahim Halil ÜNLÜK¹

- 1- Öğr. Gör.; Muş Alparslan Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü ABD. ih.unluk@alparslan.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6541-2714

ÖZET

Yapay zekâ (YZ), insanlığın "düşünebilen makineler" üretme arzusunun sonucu olarak gelişmiş ve artık yalnızca mühendisliğe değil, toplumsal ve bilimsel alanlara da yön vermektedir. Günümüz problemleri yüksek veri hacmi ve karmaşıklık nedeniyle klasik yöntemlerle çözülememekte, YZ bu noktada yeni bir çözüm paradigması sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Yapay Zekâ (YZ), Makine Öğrenmesi, Derin Öğrenme, Veri Bilimi, Algoritma, Sınıflandırma, Regresyon, Tahminleme, Optimizasyon

1. GİRİŞ

Yirminci yüzyılın ortalarından itibaren, insanoğlunun en temel entelektüel meraklarından biri olan "düşünebilen makineler" yaratma arayışı, bilgi işlemin ve algoritmik düşüncenin sınırlarını zorlayarak günümüze dek süregelmiştir. Bu arayışın bir ürünü olarak ortaya çıkan yapay zekâ (YZ), sadece mühendislik ve bilgisayar bilimleri disiplinlerinin bir meselesi olmaktan çıkmış, felsefeden sosyolojiye, ekonomiden tıbbı kadar pek çok alanda paradigma değişimlerinin tetikleyicisi konumuna yükselmiştir. Artık YZ, sadece karmaşık hesaplamaları hızlıca gerçekleştiren bir araç değil; aksine, insanlığın karşı karşıya kaldığı en çetrefilli problemleri anlama, analiz etme ve çözme biçimimizi kökten dönüştüren, yeni bir bilişsel mimari sunmaktadır[1].

Geleneksel problem çözme yaklaşımları, çoğu zaman belirli kurallar, mantıksal çıkarımlar ve insan uzmanlığının katı çerçeveleri içerisinde şekillenmekteydi. Bu yöntemler, iyi tanımlanmış, sınırlı ve belirli bir doğrusal akışa sahip problemler için oldukça etkili olmuştur. Örneğin, bir matematik problemini çözmek, bir mühendislik yapısını tasarlamak veya bir üretim sürecini optimize etmek gibi görevlerde insan zekâsının analitik yetenekleri ve önceden belirlenmiş algoritmalar yeterliydi. Ancak yirmi birinci yüzyılın getirdiği zorluklar, özellikle büyük veri hacminin patlamasıyla birlikte, bu geleneksel sınırları aşan bir karmaşıklık düzeyine ulaştı. Küresel tedarik zincirlerinin yönetimi, iklim değişikliğinin modellenmesi, kişiselleştirilmiş tıp uygulamaları veya otonom sistemlerin güvenliği gibi meseleler, insan beyninin işlem kapasitesini ve sezgisel yeteneklerini zorlayan, çok boyutlu, dinamik ve belirsiz ortamlarda ortaya çıkmaktadır.

İşte tam bu noktada, yapay zekâ devreye girmekte ve problem çözme yaklaşımımıza yeni bir soluk getirmektedir. YZ, özellikle makine öğrenmesi (*machine learning*) ve derin öğrenme gibi alt alanları aracılığıyla, mevcut verilerden öğrenme, örüntüleri tanıma, tahminler yapma ve en uygun kararları alma yeteneği sunar. Bu, problem çözme sürecini kural tabanlı sistemlerden veri tabanlı öğrenmeye, deterministik yaklaşımlardan

olasılıksal muhakemeye doğru evirerek, eski paradigmaların kısıtlamalarını aşmamızı sağlamıştır. Artık, yalnızca "nasıl çözmeliyiz?" sorusuna değil, aynı zamanda "ne öğrenebiliriz?" ve "nasıl adapte olabiliriz?" gibi çok daha geniş kapsamlı sorulara yanıt arıyoruz. Bu bölüm, yapay zekânın problem çözme üzerindeki dönüştürücü etkisini anlamak için bir giriş niteliğinde olup, sonraki bölümlerde bu yeni paradigmanın detaylarını ve uygulama alanlarını daha derinlemesine inceleyeceğiz.

2. YAPAY ZEKÂ İLE DAHA ETKİN ÇÖZÜLEBİLECEK PROBLEM TÜRLERİ

Yapay zekânın problem çözme kapasitesi, her türlü problemin üstesinden gelebileceği anlamına gelmez; aksine, belirli özelliklere sahip sorun alanlarında benzersiz bir etkinlik sergiler. Bu yetenek spektrumu, YZ'yi geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı veya verimsiz çalıştığı durumlarda vazgeçilmez bir yardımcı haline getirmiştir. İnsan bilişinin belirli görevlerdeki doğal sınırlamalarını aşarak, büyük ölçekli ve karmaşık problemlerin çözümüne yeni ufuklar açar.

2.1 Örüntü Tanıma ve Sınıflandırma Problemleri

Yapay zekânın belki de en çarpıcı başarılarından biri, insan algısının ve bilişinin temelini oluşturan örüntü tanıma ve sınıflandırma görevlerindeki yeteneğidir. Görsel veriler, ses dalgaları, metinler veya yapılandırılmış veri setleri içerisinde gizlenmiş karmaşık ilişkileri ve tekrarlayan yapıları keşfetme becerisi, YZ'yi bu alanda rakipsiz kılar [2].

Görüntü ve Nesne Tanıma: Tıp alanında MRI veya X-ışını görüntülerindeki anormalliklerin tespiti (örneğin, tümörlerin veya lezyonların belirlenmesi), güvenlik sektöründe yüz tanıma sistemleri veya otonom araçlarda çevresel nesnelerin (yaya, araç, trafik levhası) anlık olarak algılanması, derin öğrenmenin, özellikle evrişimli sinir ağlarının (Convolutional Neural Networks - CNNs) olağanüstü performansını sergilediği alanlardır. Milyonlarca etiketlenmiş görsel veri üzerinden öğrenen bu ağlar, insan gözünün yorulabileceği veya hata yapabileceği durumlarda bile tutarlı ve yüksek doğrulukta sonuçlar üretebilirler [3].

Doğal Dil İşleme (NLP): İnsan dilinin karmaşıklığını anlama, yorumlama ve üretme yeteneği, YZ'nin bir diğer önemli gücünü oluşturur. Duygu analizi (sosyal medya yorumlarından marka algısını çıkarma), spam filtreleme, makine çevirisi, metin özetleme ve hatta hukuki belgelerde anahtar kelime veya kavram tespiti gibi görevler, YZ'nin metinsel verilerdeki örüntüleri anlama kabiliyeti sayesinde daha etkin hale gelmiştir. Dönüştürücü

mimariler (*Transformer architectures*) gibi son gelişmeler, bu alandaki performansı yeni bir seviyeye taşımıştır.

Konuşma Tanıma: Sesli asistanlar, telefon bankacılığı sistemleri veya transkripsiyon hizmetleri, YZ'nin ses dalgalarındaki akustik örüntüleri dil birimlerine (fonemler, kelimeler) dönüştürme yeteneğine dayanır. Bu, insan-bilgisayar etkileşimini doğal dilin kolaylığına taşımaktadır [4].

2.2 Tahmin ve Regresyon Problemleri

Geleceği tahmin etme arzusu, insanlık tarihi boyunca var olmuştur. YZ, bu arzuya bilimsel bir çerçeve kazandırarak, büyük veri setlerindeki eğilimleri ve ilişkileri analiz ederek oldukça doğru tahminler yapma yeteneği sunar.

Finansal Piyasa Tahminleri: Hisse senedi fiyatları, döviz kurları veya emtia fiyatlarındaki dalgalanmaları tahmin etmek, finansal kurumlar için kritik öneme sahiptir. YZ modelleri, geçmiş piyasa verileri, ekonomik göstergeler ve hatta sosyal medya duyarlılığı gibi çok sayıda değişkeni kullanarak daha sofistike tahminler yapabilir. Ancak, piyasaların doğasındaki öngörülemezlik nedeniyle YZ'nin bile mutlak kesinlik sağlayamayacağı unutulmamalıdır [5].

Tüketici Davranışı Tahmini: Perakende sektöründe hangi müşterinin hangi ürünü ne zaman alacağını tahmin etmek, kişiselleştirilmiş pazarlama stratejilerinin temelini oluşturur. YZ, müşteri geçmişi, demografik bilgiler ve çevrimiçi davranışları analiz ederek, çapraz satış veya yükseltme fırsatları yaratır.

Enerji Tüketimi Tahmini: Elektrik şebekelerinin dengesini sağlamak ve kaynakları verimli kullanmak için gelecekteki enerji talebini doğru bir şekilde tahmin etmek zorunludur. YZ, hava durumu, günün saati, mevsimler ve geçmiş tüketim kalıpları gibi faktörleri kullanarak bu tahminleri optimize eder [6][7]

2.3 Optimizasyon ve Karar Verme Problemleri

Kaynakların kısıtlı olduğu veya çok sayıda alternatifin bulunduğu durumlarda en iyi kararı vermek veya en verimli çözümü bulmak, karmaşık bir optimizasyon problemidir. YZ, özellikle pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) ve evrimsel algoritmalar aracılığıyla bu tür problemlerde çığır açmıştır [8].

Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi: Çok sayıda depo, dağıtım merkezi, taşıma aracı ve müşteri noktası bulunan karmaşık lojistik ağlarında en kısa, en ucuz veya en hızlı rotayı belirlemek, milyarlarca olasılık içeren bir problem haline gelebilir. YZ algoritmaları, gerçek zamanlı trafik verileri,

hava durumu ve talep dalgalanmaları gibi dinamik faktörleri dikkate alarak optimum rotaları ve envanter yönetimini sağlar.

Kaynak Tahsisi ve Çizelgeleme: Üretim hatlarında işlerin sıralanması, hastanelerde randevu çizelgelerinin oluşturulması veya bir şirkette projeler için insan kaynaklarının tahsis edilmesi gibi problemler, YZ'nin optimizasyon yeteneklerinden büyük ölçüde faydalanır. Bu, hem maliyetleri düşürür hem de verimliliği artırır.

Robotik ve Otonom Sistemler: Kendi kendine giden araçlar, üretim robotları veya insansız hava araçları gibi sistemler, çevrelerini algılamak, engellerden kaçınmak ve belirli bir hedefe ulaşmak için sürekli olarak en uygun kararları vermek zorundadır. Pekiştirmeli öğrenme, bu sistemlerin deneme yanılma yoluyla karmaşık ortamlarda gezinmeyi ve görevleri başarıyla tamamlamayı öğrenmelerini sağlar.

2.4 Karmaşık Sistem Simülasyonu ve Modelleme

Bilim ve mühendislikte birçok problem, gerçek dünyada deney yapmanın maliyetli, tehlikeli veya imkansız olduğu karmaşık sistemleri içerir. YZ, bu sistemleri modelleyerek ve simüle ederek, farklı senaryoların etkilerini anlamamıza ve olası sonuçları öngörmemize olanak tanır.

İlaç Keşfi ve Malzeme Bilimi: Yeni ilaç moleküllerinin tasarımı veya yeni malzemelerin özelliklerinin tahmini, geleneksel deneysel yöntemlerle uzun ve pahalı süreçlerdir. YZ, milyarlarca moleküler bileşiği hızla tarayarak potansiyel adayları belirleyebilir veya belirli özelliklere sahip yeni malzemeleri tasarlayabilir. Örneğin, AlphaFold gibi yapay zeka modelleri, protein katlanma problemini çözerek ilaç keşfinde devrim niteliğinde bir adım atmıştır [9].

İklim Modellemeleri: İklim değişikliğinin uzun vadeli etkilerini anlamak ve farklı politika senaryolarının çevresel sonuçlarını tahmin etmek, muazzam veri setlerinin ve karmaşık fiziksel etkileşimlerin modellenmesini gerektirir. YZ, bu tür modellerin doğruluğunu artırarak daha güvenilir tahminler yapılmasına yardımcı olur [10][11].

Özetle, yapay zekâ, özellikle yüksek boyutlu verilerle başa çıkma, gizli örüntüleri keşfetme, belirsizlik altında tahmin yapma ve çok sayıda olasılık arasından en uygun çözümü seçme yetenekleri sayesinde, insan bilişinin sınırlarını zorlayan problem türlerinde benzersiz bir potansiyel sunmaktadır.

3. BİR PROBLEMİ YAPAY ZEKÂYA UYGUN HALE GETİRMEK

Yapay zekâ modellerinin gücü, büyük ölçüde kendilerine sunulan verinin kalitesine ve problemin ne kadar iyi yapılandırıldığına bağlıdır. Bir problemi YZ'nin "anlayabileceği" ve "çözebileceği" bir formata dönüştürmek, bir mühendisin bir mimari planı yorumlaması kadar, hatta daha da fazlası, bir sanatçının soyut bir kavramı somut bir eser haline getirmesi gibi karmaşık bir süreçtir. Bu, sadece teknik bir dönüşüm değil, aynı zamanda problemin doğasını derinlemesine kavrama ve onu YZ'nin öğrenme mekanizmalarına uygun hale getirme becerisi gerektiren bilişsel bir adaptasyondur.

3.1. Problemin Tanımlanması ve Hedeflerin Belirlenmesi

Her şeyden önce, çözülmek istenen problemin kesin ve anlaşılır bir şekilde tanımlanması elzemdir. Bulanık veya belirsiz problem ifadeleri, YZ projesinin başından itibaren yanlış yönlere sapmasına neden olabilir. Bu aşamada, problemin ne olduğu, neden önemli olduğu ve YZ'den tam olarak ne beklendiği gibi sorulara net yanıtlar verilmelidir.

Nicel Hedef Belirleme: Soyut hedeflerden (örn. "müşteri memnuniyetini artırmak") kaçınılmalı, bunun yerine ölçülebilir, nicel hedefler belirlenmelidir (örn. "müşteri şikayetlerini %20 azaltmak" veya "ortalama çağrı merkezinde bekleme süresini 30 saniyenin altına indirmek"). Bu, hem modelin performansının değerlendirilmesi için somut bir kriter sunar hem de projenin başarı ölçütünü netleştirir.

Kapsam ve Kısıtların Belirlenmesi: Problemin kapsamı, yani YZ modelinin ne kadar geniş bir alanı ele alacağı ve hangi sınırlamalara tabi olacağı netleştirilmelidir. Örneğin, bir dolandırıcılık tespit sistemi tasarlarken, hangi tür dolandırıcılıkların hedefleneceği, hangi veri kaynaklarının kullanılacağı ve sistemin hangi yasal kısıtlamalara uyacağı gibi detaylar baştan belirlenmelidir.

3.2. Veri Toplama, Ön İşleme ve Anlama

YZ modelleri, adeta bir çocuk gibi, veriden öğrenirler. Bu nedenle, modelin öğreneceği "ders kitabının" kalitesi ve uygunluğu, nihai başarının anahtarıdır. Bu aşama, YZ projesinin belki de en zaman alıcı ve emek yoğun kısmıdır.

Veri Kaynaklarının Belirlenmesi ve Toplanması: Problemi çözmek için hangi verilere ihtiyaç duyulduğu belirlenir ve bu veriler ilgili kaynaklardan (veri tabanları, API'lar, web kazıma, sensörler vb.) toplanır. Verinin hacmi (büyüklüğü), çeşitliliği (farklı türde veriler), doğruluğu ve hızı (dinamik veri akışı) önemlidir.

Veri Ön İşleme (Data Preprocessing): Ham veri genellikle gürültülü, eksik veya tutarsızdır ve doğrudan YZ modeline verilemez. Bu aşamada, veriler temizlenir [12][6][13].

Eksik Değerlerin Doldurulması: Verideki boşluklar uygun stratejilerle (ortalama, medyan, en sık görülen değer veya daha gelişmiş tahmin yöntemleri) doldurulur.

Aykırı Değerlerin Tespiti ve Yönetimi: Anormal veya hatalı veri noktaları (aykırı değerler), modelin öğrenmesini olumsuz etkileyebilir. Bunlar ya düzeltilir ya da analizden çıkarılır.

Veri Standardizasyonu/Normalizasyonu: Farklı ölçeklerdeki özellikler, modelin daha iyi öğrenmesi için aynı aralığa getirilir (örn. Min-Max normalizasyonu veya Z-skoru standardizasyonu).

Kategorik Verilerin Kodlanması: Metin tabanlı kategorik veriler (örn. şehir adları, ürün kategorileri) sayısal formata dönüştürülür (örn. One-Hot Encoding, Label Encoding).

Veri Anlama ve Keşifsel Veri Analizi (EDA): Veri ön işleme ile eş zamanlı veya hemen sonrasında, verinin yapısını, dağılımını, özellikler arasındaki ilişkileri ve potansiyel kalıpları anlamak için EDA yapılır. Görselleştirmeler (histogramlar, saçılım grafikleri) ve istatistiksel özetler, bu süreçte kritik rol oynar. Bu, "Verimiz gerçekten neyi anlatıyor?" sorusuna yanıt arama sürecidir.

3.3. Özellik Mühendisliği (Feature Engineering):

Belki de bir YZ projesinin en yaratıcı ve alan bilgisi gerektiren aşamalarından biri, özellik mühendisliğidir. Ham veriden modelin öğrenmesini kolaylaştıracak, performansı artıracak ve modelin karmaşıklığını azaltacak yeni ve daha anlamlı "özellikler" (feature) oluşturma sürecidir [14].

Alan Bilgisinin Entegrasyonu: Uzmanların deneyimi ve alan bilgisi, mevcut özelliklerin nasıl birleştirilebileceği, dönüştürülebileceği veya yeni özelliklerin nasıl türetilceği konusunda paha biçilmez içgörüler sağlar. Örneğin, bir hava durumu tahmin modelinde, sadece sıcaklık, nem ve rüzgar hızı yerine, bu değerlerden türetilmiş "hissedilen sıcaklık" veya "rüzgar soğukluğu" gibi özellikler daha açıklayıcı olabilir.

Boyut İndirgeme: Özellikle yüksek boyutlu veri setlerinde, gereksiz veya birbiriyle yüksek korelasyonlu özellikler, modelin performansını düşürebilir ve aşırı uyuma (overfitting) yol açabilir. Temel Bileşen Analizi (PCA) gibi teknikler, veri boyutunu azaltırken enformasyon kaybını minimize etmeye yardımcı olur.

Etkileşim Özellikleri (Interaction Features): İki veya daha fazla özelliğin birbiriyle etkileşiminden doğan yeni özellikler oluşturmak, modelin karmaşık ilişkileri yakalamasına olanak tanır. Örneğin, bir e-ticaret uygulamasında "ürün fiyatı" ile "müşteri yaşı"nın çarpımı, belirli yaş grubundaki müşterilerin fiyat hassasiyetini daha iyi temsil edebilir.

3.4. Model Seçimi ve Mimarisi

Problemin doğası, veri setinin büyüklüğü ve yapısı, kullanılacak YZ modelinin türünü ve mimarisini belirlemede kilit rol oynar. Her YZ algoritması, belirli problem türleri ve veri yapıları için optimize edilmiştir.

Denetimli Öğrenme (Supervised Learning): Eğer elimizde etiketlenmiş veri varsa (yani, girdi verilerine karşılık gelen doğru çıktılar biliniyorsa), sınıflandırma (ikili/çok sınıflı) veya regresyon problemleri için destek vektör makineleri (SVMs), karar ağaçları, rastgele ormanlar, yapay sinir ağları (YSA) veya derin öğrenme modelleri gibi denetimli öğrenme algoritmaları seçilir [15].

Denetimsiz Öğrenme (Unsupervised Learning): Etiketli veri olmadığında, veri içindeki gizli yapıları keşfetmek, kümelendirme (clustering) veya boyut indirgeme gibi görevler için K-means, hiyerarşik kümelendirme veya otomatik kodlayıcılar (autoencoders) gibi denetimsiz öğrenme yöntemleri kullanılır [16].

Pekiştirmeli Öğrenme (Reinforcement Learning): Modelin bir ortamda deneme yanılma yoluyla öğrenmesi gereken durumlarda (örn. robot kontrolü, oyun oynama), pekiştirmeli öğrenme algoritmaları (örn. Q-learning, SARSA, Deep Q-Networks) tercih edilir [17].

Model Mimarisi: Seçilen algoritmanın iç yapısı, örneğin bir sinir ağının katman sayısı, her katmandaki nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonları veya bir karar ağacının maksimum derinliği gibi parametreler, modelin öğrenme kapasitesini ve performansını doğrudan etkiler. Bu parametrelerin doğru şekilde ayarlanması (hiperparametre optimizasyonu), çoğu zaman tekrarlı denemeler ve doğrulama setleri üzerinde performans değerlendirmeleriyle gerçekleştirilir.

4. MODEL BAŞARISINI TANIMLAMA VE ÖLÇME

Yapay zekâ modelinin geliştirilmesi kadar kritik bir diğer süreç de, bu modelin performansını doğru bir şekilde değerlendirmek ve başarısını somut metriklerle ölçmektir. Bir modelin "iyi" olup olmadığını belirlemek, sadece algoritmik verimlilikten öte, uygulandığı iş veya araştırma alanındaki gerçek dünya etkisini anlamayı gerektirir. Başarıyı tanımlayan metrikler, problemin niteliğine ve belirlenen hedeflere göre değişiklik gösterir; yanlış metrik

seçimi, yanıltıcı sonuçlara ve suboptimal kararlara yol açabilir. Bu nedenle, değerlendirme paradigmalarının derinlemesine anlaşılması esastır.

4.1. Sınıflandırma Problemlerinde Başarı Metrikleri

Sınıflandırma problemleri, veriyi önceden tanımlanmış kategorilere ayırmayı hedefler (örn. spam/değil, hastalık var/yok, müşteri memnun/memnun değil). Bu tür problemler için kullanılan metrikler, modelin ne kadar doğru tahminler yaptığını ve bu tahminlerin niteliğini farklı açılardan değerlendirir.

Doğruluk (Accuracy): En basit ve yaygın metriklerden biri olan doğruluk, doğru tahminlerin toplam tahminlere oranını ifade eder [18].

$$\text{Accuracy} = \text{Toplam Tahminler} / \text{Doğru Tahminler}$$

Ancak, doğruluk metriği, özellikle sınıf dengesizliği (class imbalance) olan veri setlerinde yanıltıcı olabilir. Örneğin, bir dolandırıcılık tespit sisteminde, dolandırıcılık vakaları toplam işlemlerin sadece %1'ini oluşturuyorsa, model her zaman "dolandırıcılık yok" dese bile %99 doğruluk elde edebilir. Bu durumda model aslında işe yaramazdır, çünkü önemli olan (dolandırıcılık) sınıfını yakalayamamaktadır.

Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix): Daha kapsamlı bir değerlendirme için karışıklık matrisi kullanılır. Bu matris, modelin yaptığı tahminlerin gerçek etiketlerle karşılaştırmasını sunar ve dört temel bileşeni vardır:

Gerçek Pozitif (True Positive - TP): Pozitif olanın doğru bir şekilde pozitif tahmin edilmesi. Örneğin, hasta olan bir kişinin hasta olarak teşhis edilmesi.

Gerçek Negatif (True Negative - TN): Negatif olanın doğru bir şekilde negatif tahmin edilmesi. Örneğin, sağlıklı bir kişinin sağlıklı olarak teşhis edilmesi.

Yanlış Pozitif (False Positive - FP): Negatif olanın yanlış bir şekilde pozitif tahmin edilmesi (Tip I hata). Örneğin, sağlıklı bir kişinin yanlışlıkla hasta olarak teşhis edilmesi (gereksiz endişe ve testlere yol açabilir).

Yanlış Negatif (False Negative - FN): Pozitif olanın yanlış bir şekilde negatif tahmin edilmesi (Tip II hata). Örneğin, hasta olan bir kişinin yanlışlıkla sağlıklı olarak teşhis edilmesi (tedavi gecikmesi ve ciddi sonuçlar doğurabilir).

Hassasiyet (Precision) ve Duyarlılık (Recall): Karışıklık matrisinden türetilen bu metrikler, sınıf dengesizliği olan durumlarda çok daha bilgilendiricidir.

Hassasiyet (Precision): Modelin pozitif olarak tahmin ettiği durumların ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu gösterir. Yanlış pozitiflerin maliyetinin yüksek olduğu durumlarda (örn. tıbbi teşhis, spam olmayan bir e-postayı silme) önemlidir.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Duyarlılık (Recall) / Geri Çağırma Oranı: Gerçekten pozitif olan tüm durumların ne kadarının model tarafından doğru bir şekilde yakalandığını gösterir. Yanlış negatiflerin maliyetinin yüksek olduğu durumlarda (örn. kanser tespiti, dolandırıcılık tespiti) önemlidir.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

F1 Skoru: Hassasiyet ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve bu iki metrik arasında bir denge kurulmasını sağlar. Özellikle dengesiz veri setlerinde ve hem yanlış pozitiflerin hem de yanlış negatiflerin önemli olduğu durumlarda kullanışlıdır:

$$\text{F1 Skoru} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

ROC Eğrisi (Receiver Operating Characteristic Curve) ve AUC (Area Under the Curve): Bir sınıflandırıcının farklı eşik değerlerindeki performansını gösteren görsel bir araçtır. ROC eğrisi ne kadar sol üst köşeye yakınsa, model o kadar iyi bir performans sergiler. AUC değeri ise bu eğrinin altında kalan alanı ifade eder ve 0 ile 1 arasında değişir; 1'e yakın değerler daha iyi bir sınıflandırma yeteneğini gösterir. Bu metrik, özellikle ikili sınıflandırma problemlerinde modelin ayırım gücünü değerlendirmede etkilidir ve farklı modelleri karşılaştırmak için yaygın olarak kullanılır.

4.2. Regresyon Problemlerinde Başarı Metrikleri

Regresyon problemleri, sürekli bir değer tahmin etmeyi amaçlar (örn. ev fiyatı, hisse senedi fiyatı, sıcaklık tahmini). Bu durumda, tahmin edilen değerlerin gerçek değere ne kadar yakın olduğu önemlidir.

Ortalama Mutlak Hata (MAE - Mean Absolute Error): Tahminler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır. Hataların büyüklüğünü doğrudan yorumlamayı sağlar ve aykırı değerlerden daha az etkilenir[19].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Burada y_i gerçek değer, $\hat{y}_i$ tahmin edilen değer ve n veri noktası sayısıdır.

Ortalama Kare Hata (MSE - Mean Squared Error) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE - Root Mean Squared Error): MSE, hataların karelerinin ortalamasıdır. Büyük hataları daha fazla cezalandırdığı için, aykırı değerlere karşı daha duyarlıdır. RMSE ise MSE'nin kareköküdür ve tahmin hatasını orijinal veri birimleri ile ifade etmeyi sağlar, bu da yorumlanmasını kolaylaştırır. RMSE, modelin tipik tahmin hatasını temsil eder.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

R^2 Skoru (Belirleme Katsayısı): Modelin bağımlı değişkendeki varyansın ne kadarını açıkladığını gösterir. 0 ile 1 arasında değişir; 1'e yakın değerler, modelin veri varyansını iyi açıkladığını gösterir. R^2 , modelin veriye ne kadar iyi uyduğunu gösteren genel bir ölçüttür.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Burada $\bar{y}$ gerçek değerlerin ortalamasıdır.

4.3. İş Etkisi Metrikleri

Teknik metrikler bir modelin algoritmik performansını gösterse de, gerçek dünya başarısı genellikle **iş hedeflerine ne kadar katkı sağlandığı** ile ölçülür. Bir YZ projesinin değeri, sadece algoritmaların doğruluğuyla değil,

aynı zamanda operasyonel verimlilik, maliyet tasarrufu, gelir artışı veya müşteri memnuniyeti gibi somut iş sonuçlarıyla da değerlendirilmelidir. Bu metrikler, YZ'nin "iş değeri"ni ortaya koyar.

Maliyet Tasarrufu: Bir optimizasyon modelinin lojistik maliyetlerini yüzde kaç azalttığı, bir bakım tahmin modelinin arıza kaynaklı duruş sürelerini ne kadar kısalttığı.

Gelir Artışı: Kişiselleştirilmiş tavsiye sisteminin satışları ne kadar artırdığı, bir pazarlama kampanyasının dönüşüm oranlarını ne kadar yükselttiği.

Verimlilik Artışı: Bir otomatik metin özetleme aracının insan editörlerin harcadığı zamanı ne kadar azalttığı veya bir çağrı merkezinde YZ destekli sistemin ortalama çağrı süresini ne kadar kısalttığı.

Risk Azaltma: Bir dolandırıcılık tespit sisteminin yakalanan dolandırıcılık miktarı veya kredi risk değerlendirme modelinin tahsili gecikmiş alacakları ne kadar düşürdüğü.

Müşteri Memnuniyeti: Bir chatbotun müşteri sorularını çözme oranının veya yanıt sürelerinin ne kadar iyileştiği, bunun NPS (Net Promoter Score) gibi müşteri sadakati metriklerine yansımaları.

Model başarısını tanımlama ve ölçme süreci, tek seferlik bir işlem değildir; aksine, modelin yaşam döngüsü boyunca sürekli izlenmesi ve yeniden değerlendirilmesi gereken iteratif bir süreçtir. Doğru metriklerin seçilmesi ve bu metriklerin hem teknik hem de iş hedefleriyle uyumlu olması, YZ projelerinin uzun vadeli sürdürülebilirliği ve değeri açısından hayati öneme sahiptir. YZ'nin karmaşıklıkla başa çıkma yeteneği, ancak bu titiz değerlendirme çerçevesi içinde gerçek değerini bulabilir.

5. İNSAN-YAPAY ZEKÂ İŞ BİRLİĞİ

Yapay zekâ, problem çözme kapasitesiyle şüphesiz olağanüstü bir güçtür; ancak bu teknolojinin nihai potansiyelini açığa çıkarmak, onu insan zekâsıyla uyumlu bir şekilde bir araya getirmekten geçer. Günümüzdeki en sofistike YZ sistemleri dahi, insan zekâsının bazı benzersiz niteliklerini (sezgi, yaratıcılık, bağlamsal anlama, etik muhakeme ve adaptasyon yeteneği) henüz tam olarak taklit edememektedir. Bu nedenle, YZ'nin bir "yerine koyma" teknolojisi olmaktan ziyade, insan yeteneklerini "arttıran" bir ortak olarak görülmesi, en yüksek verimlilik ve inovasyonun anahtarıdır. Bu iş birliği, yalnızca bireysel görevleri optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda organizasyonel düzeyde daha akıllı kararlar alınmasına ve daha karmaşık sorunların üstesinden gelinmesine olanak tanır.

5.1. İnsan Odaklı Tasarım ve Geliştirme

YZ sistemlerinin etkinliği, son kullanıcıların bu sistemleri ne kadar kolay ve güvenli bir şekilde kullanabildiğine bağlıdır. Bu, insan odaklı tasarım (Human-Centered Design - HCD) prensiplerinin YZ geliştirme sürecine entegre edilmesini gerektirir. Tasarım süreci, teknik yeterlilikleri aşan, derinlemesine bir kullanıcı empati ve anlayışı gerektirir.

Kullanıcı İhtiyaçlarının Anlaşılması: YZ sistemleri, kullanıcıların mevcut iş akışlarına nasıl entegre olacağı, hangi zorluklarını çözeceği ve hangi yeni fırsatları yaratacağı net bir şekilde anlaşılmalıdır. Sistem tasarımı, sadece teknik yeterlilikleri değil, aynı zamanda kullanıcıların bilişsel kapasitelerini, beklentilerini, potansiyel önyargılarını ve hatta duygusal tepkilerini de dikkate almalıdır. Bir YZ destekli tıbbi teşhis sistemi, bir doktorun zaten aşırı yüklenmiş olan iş akışına sorunsuz bir şekilde entegre olmalı ve klinik karar verme sürecini kesintiye uğratmamalıdır.

Sezgisel Arayüzler: YZ'nin karmaşık çıktıları, insan kullanıcılar tarafından kolayca anlaşılabilir ve eyleme geçirilebilir bir şekilde sunulmalıdır. Görselleştirmeler, interaktif panolar ve doğal dil arayüzleri, YZ'nin iç işleyişini daha şeffaf hale getirebilir ve kullanıcıların sistemle etkileşimini kolaylaştırabilir. Bir veri analistinin YZ modelinden aldığı tahminleri anlaması ve bu tahminlere dayanarak iş kararları alması, sistemin çıktılarını ne kadar açıklayıcı ve görsel olarak cazip sunduğuyla doğrudan ilişkilidir.

5.2. YZ'nin Şeffaflığı ve Açıklanabilirliği (Explainable AI - XAI)

Gelişmiş YZ modelleri, özellikle derin öğrenme, genellikle "kara kutu" olarak tanımlanır; yani, girdilerden çıktılara nasıl ulaştıkları net değildir. Ancak, özellikle yüksek riskli alanlarda (tıp, hukuk, finans), YZ'nin kararlarının arkasındaki mantığı anlamak, hem güveni artırmak hem de yasal/etik sorumlulukları yerine getirmek için zorunludur. Açıklanabilir Yapay Zekâ (XAI), bu "kara kutu" problemini çözme hedefler.

Karar Mekanizmalarının Şeffaflığı: XAI teknikleri (örn. LIME, SHAP), modelin belirli bir tahmin yaparken hangi özelliklere veya verilere daha fazla ağırlık verdiğini açıklayarak, kullanıcılara modelin "düşünme" süreci hakkında içgörü sağlar. Bu, bir bankanın

kredi başvurusunu neden reddettiğini veya bir tıbbi teşhis sisteminin belirli bir hastalığı neden önerdiğini anlamaya yardımcı olur. Bu tür açıklamalar, kararların arkasındaki mantığın görünür hale gelmesini sağlar ve güven oluşturur. Aynı zamanda bu şeffaflık, yapay zekâ sistemlerinde potansiyel önyargıları veya adil olmayan uygulamaları tespit etmek ve düzeltmek için de kritik öneme sahiptir. Zira önyargılar, “yeterli bilgiye sahip olmadan edinilmiş, hatalı izlenimler, zihindeki peşin hükümlü imgelerdir” [20] ve bu tür bilişsel kalıplar, algoritmik süreçlere fark edilmeden sızabilir.

İnsan Doğrulama ve Düzeltme: Şeffaflık, insan uzmanların YZ'nin hatalarını veya önyargılarını tespit etmesine ve düzeltmesine olanak tanır. Modelin belirli durumlarda neden başarısız olduğunu anlamak, gelecekteki geliştirmeler için kritik geri bildirim sağlar. Örneğin, bir YZ sistemi yanlış bir görseli sınıflandırdığında, bir insan uzmanın bu hatanın kaynağını (örn. veri setindeki etiketleme hatası veya modelin belirli bir özelliğe aşırı odaklanması) teşhis edebilmesi, sistemin sürekli iyileştirilmesi için elzemdir.

5.3. Sürekli Öğrenme ve Geri Bildirim Döngüleri

İnsan-YZ iş birliği, statik bir ilişki değil, aksine sürekli bir öğrenme ve adaptasyon sürecidir. İnsan uzmanların YZ modeline sağladığı geri bildirimler, modelin zamanla daha akıllı ve daha doğru hale gelmesini sağlar. Bu döngüsel öğrenme, YZ sistemlerinin dinamik gerçek dünya koşullarına uyum sağlamasına olanak tanır.

İnsan-in-the-Loop (İnsan Döngüde): Birçok YZ uygulamasında, sistemin tam otomatik çalışması yerine, kritik kararlar için insan gözetimi veya onayı gerekir. Örneğin, bir siber güvenlik sisteminin potansiyel tehditleri işaretlemesi, ancak nihai kararı bir insan analistin vermesi gibi. Bu geri bildirimler, modelin daha iyi öğrenmesi için etiketli veri olarak kullanılabilir ve modelin performansının zamanla artmasını sağlar.

Aktif Öğrenme (Active Learning): YZ modeli, belirli bir tahminden emin olmadığında veya yeni bir veri türüyle karşılaştığında, insan uzmanından yardım isteyebilir. Bu, modelin en çok bilgi edineceği durumlarda insan müdahalesini optimize eder ve etiketleme maliyetlerini düşürür. Bir YZ modelinin, nadir görülen bir hastalığın teşhisinde emin olamadığı durumlarda bir doktorun görüşüne başvurması, hem modelin öğrenmesini hızlandırır hem de insan uzmanlığından en kritik anlarda faydalanılmasını sağlar.

5.4. Otomasyon ve Gözetim Arasındaki Denge

Bir görevin tamamen YZ'ye mi bırakılacağı yoksa insan gözetiminde mi kalacağı kararı, görevin karmaşıklığı, risk düzeyi ve otonomi ihtiyacına göre değişir. En yüksek verim, bu dengeyi akıllıca kurmaktan geçer.

YZ'ye Otomatikleştirilecek Görevler: Tekrarlayan, yüksek hacimli, düşük riskli ve iyi tanımlanmış görevler YZ'ye bırakılabilir. Örneğin, büyük metin hacimlerinin sınıflandırılması, temel veri girişi, rutin raporlama veya basit müşteri hizmetleri sorgularına yanıt verme gibi. Bu, insanlara daha karmaşık ve yaratıcı görevler için zaman kazandırır ve operasyonel maliyetleri düşürür.

İnsan Gözetiminde Kalacak Görevler: Etik boyutları olan, yüksek riskli, yaratıcılık gerektiren, empati veya bağlamsal anlayış gerektiren görevler insan kontrolünde kalmalıdır. Bir doktorun hasta teşhisi koyma, bir yargıcın hukuki karar verme, bir CEO'nun strateji belirleme süreçleri, YZ'nin sunduğu içgörülerle desteklense bile nihai kararlar insanlara aittir. Zira bu kararların sonuçları, yalnızca teknik doğrulukla değil, aynı zamanda etik, sosyal ve insani değerlerle de tartışılmalıdır.

5.5. İnsan ve YZ Arasında Rol Paylaşımı

İnsan-YZ iş birliği, çalışanların iş rollerini yeniden tanımlamayı ve YZ ile birlikte çalışma becerilerini geliştirmeyi gerektirir. Bu, YZ'nin iş gücünü tamamen ikame etmesi yerine, iş gücünün yeteneklerini artırması ve yeni roller yaratması anlamına gelir. Bu dönüşüm, şirketler ve bireyler için önemli fırsatlar sunarken, aynı zamanda yeni beceri setlerinin geliştirilmesini de zorunlu kılar.

Artırılmış Zeka (Augmented Intelligence): YZ, insanların bilişsel yeteneklerini güçlendiren bir araç olarak işlev görür. Örneğin, bir veri analisti, YZ'nin büyük veri kümelerindeki gizli örüntüleri hızla tespit etmesiyle desteklenerek daha derin içgörüler elde edebilir. Bir mimar, YZ'nin farklı tasarım alternatiflerini hızla üretmesiyle daha yenilikçi çözümler geliştirebilir. YZ, bilginin erişilebilirliğini artırarak ve karmaşık hesaplamaları üstlenerek insanları rutin görevlerden kurtarır ve daha stratejik düşünmeye teşvik eder.

Yeni İş Alanları ve Beceriler: YZ'nin yaygınlaşmasıyla birlikte, YZ eğitmenleri, YZ etik uzmanları, YZ arayüz tasarımcıları, YZ sistem denetçileri gibi yeni iş rolleri ortaya çıkmaktadır. Mevcut çalışanlar için ise YZ sistemlerini kullanma, anlama, denetleme ve YZ'nin sunduğu içgörülerini yorumlama becerileri giderek daha kritik hale gelmektedir. Bu, yaşam boyu öğrenmenin ve adaptasyonun önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

İnsan ve YZ arasındaki bu iş birliği, sadece teknolojinin sınırlarını zorlamakla kalmaz, aynı zamanda insan potansiyelini de yeniden tanımlar. YZ, bilginin ve hesaplama gücünün artırılmış bir kaynağı olarak, insanların daha karmaşık düşünme, daha yaratıcı olma ve daha derinlemesine anlama kapasitelerini serbest bırakabilir. Bu sinerji, yirmi birinci yüzyılın zorlu problemlerini çözmek ve daha yaşanılır bir gelecek inşa etmek için en güçlü aracımız olacaktır.

6. SONUÇ

Bu kitap bölümü, yapay zekânın klasik problem çözme yaklaşımlarına getirdiği yenilikleri ve dönüşümü kapsamlı biçimde analiz etmektedir. YZ; örüntü tanıma, tahmin, optimizasyon ve simülasyon gibi konularda geleneksel yöntemlerin ötesine geçerek, insanın bilişsel sınırlarını genişletmektedir. Ancak, başarılı uygulamalar için problemin doğru tanımlanması, nitelikli veri, uygun model seçimi ve insan-merkezli bir bakış açısı zorunludur. Nihai hedef, YZ'yi sadece otomasyon aracı değil, insanın yaratıcılığı ve sezgisiyle birlikte çalışan bir ortak hâline getirmektir.

REFERANSLAR

- [1] F. Jiang *et al.*, “Artificial intelligence in healthcare: Past, present and future,” *Stroke Vasc Neurol*, vol. 2, no. 4, pp. 230–243, 2017, doi: 10.1136/svn-2017-000101.
- [2] C. M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*. Springer Science + Business Media, 2009.
- [3] Z. Xudong, K. Xi, F. Ningning, and L. Gang, “Automatic recognition of dairy cow mastitis from thermal images by a deep learning detector,” *Comput Electron Agric*, vol. 178, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105754.
- [4] A. B. Nassif, I. Shahin, I. Attili, M. Azzeh, and K. Shaalan, “Speech Recognition Using Deep Neural Networks: A Systematic Review,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 19143–19165, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896880.
- [5] H. Yan and H. Ouyang, “Financial Time Series Prediction Based on Deep Learning,” *Wirel Pers Commun*, vol. 102, no. 2, pp. 683–700, 2018, doi: 10.1007/s11277-017-5086-2.
- [6] İ. H. Ünlük and Z. Pala, “Prediction of monthly electricity consumption used in Muş Alparslan University Complex by means of Classical and Deep Learning methods,” *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics - 2019 (DMS-2019)*, vol. 1, no. 1, pp. 237–239, 2019.
- [7] Z. Pala, İ. H. Ünlük, and E. Yıldız, “Forecasting of electromagnetic radiation time series: An empirical comparative approach,” *Appl Comput Electromagn Soc J*, vol. 34, no. 8, pp. 1238–1241, 2019.
- [8] R. Jane, G. Parker, G. Vaucher, and M. Berman, “Characterizing meteorological forecast impact on microgrid optimization performance and

- design,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–23, 2020, doi: 10.3390/en13030577.
- [9] İ. Bozkurt and Z. Pala, “Farklı Yükler Altında İmplant Yuvalarında Meydana Gelen Gerilme Değerlerinin İncelenmesi,” in *3rd International Conference on Scientific and Academic Research*, 2023, pp. 974–977. doi: 10.59287/as-proceedings.827.
- [10] Z. Pala and F. Şevgin, “Statistical modeling for long-term meteorological forecasting: a case study in Van Lake Basin,” *Natural Hazards*, vol. 120, no. 2024, pp. 14101–14116, 2024, doi: 10.1007/s11069-024-06747-2.
- [11] B. Bochenek and Z. Ustrnul, “Machine Learning in Weather Prediction and Climate Analyses—Applications and Perspectives,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/atmos13020180.
- [12] I. H. Unluk, “Ensembling Time Series Algorithms with Hybrid Models to Predict R Environment Specific Datasets,” Muş Alparslan University, 2022.
- [13] Z. Pala and İ. H. Ünlük, “Comparison of hybrid and non-hybrid models in short-term predictions on time series in the R development environment,” *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol. 2, pp. 199–204, 2022, doi: 10.24012/dumf.1079230.
- [14] C. A. Ledezma, X. Zhou, B. Rodríguez, P. J. Tan, and V. Díaz-Zuccarini, “A modeling and machine learning approach to ECG feature engineering for the detection of ischemia using pseudo-ECG,” *PLoS One*, vol. 14, no. 8, pp. 1–21, 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0220294.
- [15] Z. Pala and M. Şana, “Attackdet: Combining web data parsing and real-time analysis with machine learning,” *Journal of Advances in Technology and Engineering Research*, vol. 6, no. 1, pp. 37–45, 2020, doi: 10.20474/jater-6.1.4.
- [16] M. Långkvist, L. Karlsson, and A. Loutfi, “A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling,” *Pattern Recognit Lett*, vol. 42, no. 1, pp. 11–24, 2014, doi: 10.1016/j.patrec.2014.01.008.
- [17] Z. Wang *et al.*, “Dynamic combustion optimization of a pulverized coal boiler considering the wall temperature constraints: A deep reinforcement learning-based framework,” *Appl Therm Eng*, vol. 259, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124923.
- [18] A. Jierula, S. Wang, T. M. Oh, and P. Wang, “Study on accuracy metrics for evaluating the predictions of damage locations in deep piles using artificial neural networks with acoustic emission data,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 5, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/app11052314.
- [19] Z. Pala and A. F. Pala, “Comparison of ongoing COVID-19 pandemic confirmed cases / deaths weekly forecasts on continental basis using R statistical models,” *Dicle University Journal of Engineering*, vol. 4, pp. 635–644, 2021, doi: 10.24012/dumf.1002160.
- [20] G. Durhan, “Mantıksal Akıl Yürütmede Önyargı ve Yanılgılar,” *Mantık Araştırmaları Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 6–23, 2022, <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2583194>

Optik Ölçümler için Maliyet Etkin Arduino Tabanlı Bir Spektrofotometrenin Geliştirilmesi

Tayyar GÜNGÖR¹

1- Prof. Dr.; Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü. tgungor@mehmetakif.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2518-9535

ÖZET

Bu çalışmada, dalga boyu manuel olarak ayarlanabilen bir monokromatör, Arduino UNO, step motor sürücü ve NEMA 17 step motor entegre edilerek spektrofotometreye dönüştürülmüştür. Işığın dalga boyu motor kontrolü ile otomatik olarak değiştirilmiş, optik tepkilerin ölçümünde ise bir fotodedektör kullanılmıştır. Fotodedektörden elde edilen fotoakım, 0–1 V aralığında analog çıkış veren bir elektrometre yardımıyla gerilime dönüştürülmüş, Arduino UNO üzerindeki 10 bit çözünürlüklü analog-sayısal dönüştürücü (ADC) ile sayısallaştırılmış ve Secure Digital (SD) hafıza kartına kaydedilmiştir. Tasarlanan açık sistem spektrofotometre ile bir referans örnekten elde edilen optik geçirgenlik, yansıma ve soğurma spektrumları, ticari bir spektrofotometre ile elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmüştür. Sistem, laboratuvar ortamında hızlı ve güvenilir optik ölçümler için uygun, düşük maliyetli bir alternatif olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, sistem sabit bir dalga boyunda zamana bağlı ışık şiddeti değişimlerinin izlenmesi veya monokromatöre yönlendirilen ışığın dalgaboyuna bağlı lüminesans ölçümleri gibi uygulamalar için de kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler –Monokromatör, Spektrofotometre, Arduino UNO, Optik geçirgenlik, Optik yansıma, Optik soğurma.

GİRİŞ

Son yıllarda gerek donanım gerekse yazılım alanlarında ortaya çıkan gelişmeler sayesinde mikrokontrolcü kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Teknolojik ilerlemenin ortak paydası olarak düşünüldüğünde kodlama ve mekatronik alanında farklı fikirler mikrokontrolcüler yardımı ile hayata geçirilmeye başlanmıştır. Bunlara örnek olarak adım motorlu elektromekanik sistemler, fiziksel ölçümleri otomatik hale getiren sistemler ve en çok da elektriksel, optiksel ve manyetik karakterizasyon sistemleri örnek verilebilir (Güngör ve Güngör, 2022). Bunlara ek olarak optik ve optomekanik alanında da uygulama alanları göze çarpmaktadır (Guilherme, ve Tiago, 2022, Garg, Sharma, ve Dhingra, 2011, Ishafit, Mundilarto ve Surjono, 2020). Ayrıca, söz konusu sistemler ile yapılan ölçümlerin RS232, RS485, USB gibi fiziksel bağlantılı veya kablosuz ya da internet bağlantıları gibi farklı iletişim özellikleri kullanılarak bilgisayara veya hafıza kartlarında (Sequire-Digital, SD) kayıt edilebilmesi de büyük kolaylık sağlamaktadır. Daha çok kendi-başına da “stand-alone” çalışan bu mikrokontrolcül platformları çok sayıda girdi/çıkış işlemleri için uygun portlar, farklı besleme gerilimleri (3,3V ve 5 V), analog/sayısal dönüştürücüler ve PWM (Puls-Width-Modulation) çıkış gibi farklı birimlerine sahiptirler (Ismailov ve Jo`rayev, 2022). Farklı sensörler veya sistemler için (ışık şiddeti, sıcaklık,

basınç, ivme, kütle, ses şiddeti ve devir ölçümü vb.) var olan hazır kütüphane fonksiyonları ile de hem analog hem de sayısal kontrol işlemlerini kolaylıkla sağlayabilirler (Thedsakhulwong ve Hernmek, 2018).

Dalgaboyuna bağlı optik tepkiler, optik geçirgenlik $T(\lambda)$ ve optik soğurma $A(\lambda)$ ölçümleri spektrofotometre kullanılarak ölçülür. Özellikle sıvı numuneler için dalgaboyuna bağlı optik soğurma ölçümleri yapılır. Bu cihazlar, uygun ve özel aparatlar kullanılarak optik yansımaya $R(\lambda)$ ölçümleri için de kullanılabilir. Bu cihazların temelde yüksek maliyetli olmaları, taşınabilirliklerinin sınırlı olması gibi bazı dezavantajları vardır. Bununla beraber piyasada kolayca temin edilebilen elektronik bileşenler ve 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak geliştirilen, taşınabilir ve düşük maliyetli, mikrokontrolcü tabanlı (Arduino vb) tabanlı çift-ışın demetli görünür ve yakın infrared bölgesinde (UV-Vis) optik soğurma ölçümlerinde kullanılabilecek bir spektrofotometre tasarımları da bulunmaktadır (Poh, Goh, Tan ve Gan, 2021). Son zamanlarda kırınım ağırları ile birlikte web-kameraların kullanıldığı basit sistemler ile benzer ölçümlerin yapıldığı spektrofotometrelerde vardır (Physicsopenlab, 2025). Bununla beraber özellikle ince film formundaki malzemelerin optik sabitlerinin belirlenmesinde ise optik geçirgenlik ve yansımaya spektrumları büyük önem taşımaktadır. Bu spektrumlar yardımı ile ince filmlerin optik sabitleri (kırma indisleri, optik band aralığı ve film kalınlıkları) belirlenebilir (Swanepoel, 1983, Minkov, 1989, Güngör, 1998, Güngör ve Saka, 2004, Güngör, Güngör ve Saka, 2016). Bu ölçümlerde tek-ışın esasına göre dalgaboyuna bağlı olarak örnek içinden geçen veya örnek yüzeyinden yansıyan ışık şiddetini ölçülür. Genellikle saydam alttaş (cam vb) üzerine farklı yöntemlerle biriktirilen yarıiletken ince filmlerde optik geçirgenlik ölçümleri hava referans alınarak, optik yansımaya ölçümleri ise yansımaya referans malzemesi kullanılarak ölçülür. Çözelti formundaki numunelerin optik soğurma ölçümleri, referans çözöcöye göre ölçölür. Ayrıca belirli bir dalgaboyunda zamana bağılı ölçölmler de çözeltinin kinetiğinin anlaşılmaması açısından önem taşır. Monokromatörlerde ışığı kırmak için kullanılan kırınım ağı (grating) genellikle dönen bir tabla üzerine yerleştirilir. Tablanın açısı değıştirilerek kırınım ağıının özelliklerine de bağılı olarak çıkış yarığından istenilen dalgaboyuna ait ışığın geçmesi sağlanır. Bu tabla genellikle mikrometre koluna benzer bir mekanik sistem ile kontrol edilir. Dolayısıyla açı değışimi dalgaboyu değışimine neden olur. Bu durumda dalgaboyunu değıştirerek, örnek içinden geçen, örnek yüzeyinden yansıyan veya örnek tarafından soğurulan ışık şiddeti uygun bir ışık şiddet ölçölümü yapabilen bir dedektör aracılığıyla ölçöllebilir. Böylece dalgaboyu değıştirilebilen bir spektrofotometre elde edilmiş olur. Bu tür spektrofotometreler içerdikleri döner tabla, grating tutucu, toplayıcı mercek, yansıtıcı giriş ve çıkış aynaları gibi fiziksel olarak büyük boyutlu parçaları içermesinden dolayı bütün olarak büyük bir hacim kaplamaktadırlar. Bununla beraber, gelişen teknolojiye paralel olarak belirli bir uzunlukta tek satırlı veya çok satırlı yük-eşleşmeli-aygıt adı verilen CCD

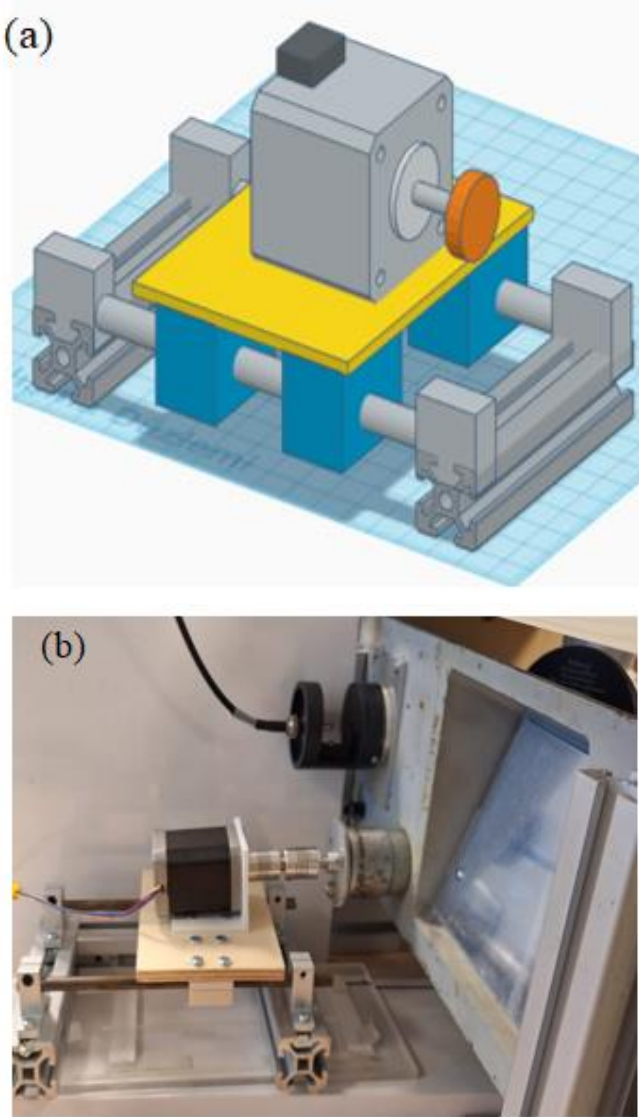
dedektörler ile birlikte sabit bir açıda ve belirli bir dalgaboyu dispersiyonuna sahip gratinglerin kullanıldığı CCD-tabanlı spektrofotometreler kullanılmaya başlanmıştır. Yarıiletken aygıt teknolojisi geliştikçe dedektör hücre boyutları küçülmekte ve bu sayede bu tür spektrofotometreler avuç-ıçi büyüklüğüne kadar boyutları küçülmüştür (Oceanoptics, 2025). Son zamanlarda gelişen ve giderek boyutları küçülen ama özellikleri artan mikrokontrolcüler ve onlarla birlikte çalışan yardımcı elektronikler (adım motor sürücüler, ışık şiddeti veya ışığın rengini ölçen vb. hazır devreler) sayesinde birçok mekanik sistem otomatik olarak çalışır hale gelmektedir. Bu sistemleri kontrol etmek için ihtiyaç duyulan yazılımlar ve kütüphanelere ulaşılması da kolaylaşmıştır. Öyle ki, step motor yardımı ile örneğin açısal konumu değiştirilerek ışığın geliş açısına bağlı olarak CCD-tabanlı spektrofotometre ile ölçülen optik geçirgenlik spektrumunun değerlendirilmesi ile de optik sabitler belirlenebilir (Güngör, Güngör ve Saka, 2022).

Bu çalışmada Arduino UNO adı verilen bir mikrokontrolcü, mikro-adım özelliği olan adım motor sürücü birimi ve ışık şiddetini ölçmek için UV-Vis bölgesinde çalışan fotodedektör uygun bir yazılımla entegre edilerek açık sistem bir spektrofotometre oluşturulmuştur. Entegrasyonu gerçekleştirilen sistem ile optik geçirgenlik, optik yansıma ve optik soğurma gibi değişik spektrofotometrik ölçümler yapılmış ve referans ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

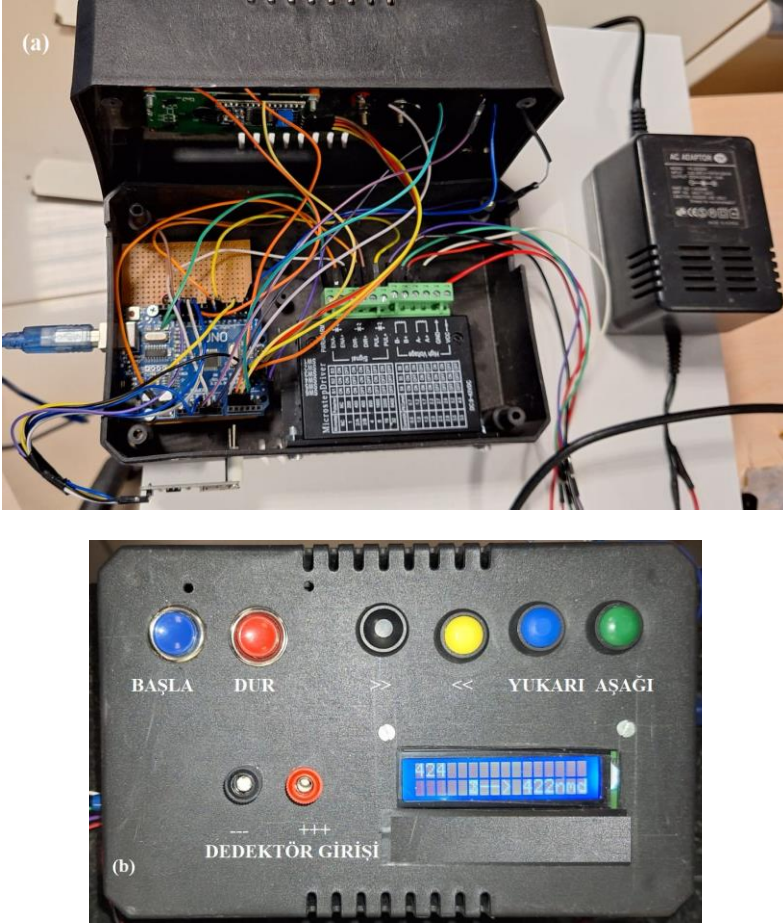
Dalgaboyu değerinin seçimini mekanik olarak sağlayan bir monokromatör, modifiye edilerek spektrofotometrik ölçümlerin yapıldığı otomatik bir sisteme dönüştürülmüştür. Sistem esas olarak yansıtımlı kırınım ağına sahip bir monokromatör ve ışığın çıkış yolu üzerine monte edilen gerek ince film gerekse sıvı numunelerin ölçülerinde kullanılacak olarak bir örnek tutucudan oluşur. Optik geçirgenlik, optik yansıma ve optik soğurma ölçümlerinde kullanılmak üzere tasarlanan örnek tutucular 3-boyutlu yazıcı yardımı ile üretilmiştir. Aynı zamanda, fotometrik ölçümler için kullanılacak olan fotodiyot, ışık yolu üzerine yerleştirilmiştir. Bu monokromatörde dalgaboyunu değiştirmek için mikrometre koluna benzer bir döner kadran bulunmaktadır. Bu kadran bir kupling ile step motor miline eş eksenli olarak sabitlenmiştir. Step motor 8 mm çapa sahip iki krom mil ve yataklı rulmandan (SCE08) oluşan kayar kızaklı bir platforma sabitlenmiştir. Monokromatör daha ağır olduğu için step motora döndürme komutu verildiğinde motor fiziki olarak bağlı olduğu monokromatör kolunu çevirerek kendisini kızak üzerinde ileri veya geri hareket ettirir. Step motor, mikro-adım özelliği olan bir adım sürücü ve Arduino UNO ile birlikte bir tam turu 200, 400, 800, 1600, 3200 ve 6400 adımda tamamlar. Tur başına düşen adım sayılarına göre 0,500nm ile 0,015nm arasında değişen hassasiyetle dalgaboyu seçimi yapılabilir. Ayrıca step motor sürücü üzerinde

bulunan anahtarlar yardımı ile motorun sağlıklı çalışması için gerekli olan akım sınır değeri de ayarlanabilmektedir. Monokromatör kontrolü için kullanılan mekanik sistem tasarımı (Şekil 1-a) ve tasarımın uygulanmış hali ise Şekil 1-b’ de gösterilmiştir. Ayrıca, Arduino UNO, adım motor sürücü, SD kart ve LCD ekran ile tasarımı gerçekleştirilen birim ve kontrol kutusu Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Monokromatör kontrolü için kullanılan (a) mekanik sistem tasarımı ve (b) uygulaması.

Monokromatörün spektrofotometreye dönüştürüldüğü sistemin toplam maliyeti (Arduino UNO, 2x16 I2C LCD ekran, SD kart modülü, Nema 17 adım motor, adım motor sürücü, BPW34 fotodedektör, 3D baskı maliyeti, akıllı profil, mil tutucular ve bazı mekanik parçalar) 2500 TL veya 65 USD kadardır. Ticari CCD dedektörlü spektrofotometrelerin minimum 500 USD'dan başlayan ve konfigürasyonuna göre binlerce USD'a kadar değişen fiyatları vardır.



Şekil 2. Arduino UNO, adım motor sürücü, SD kart ve LCD ekran ile (a) tasarımı gerçekleştirilen birim ve (b) kontrol kutusunun görünüşü

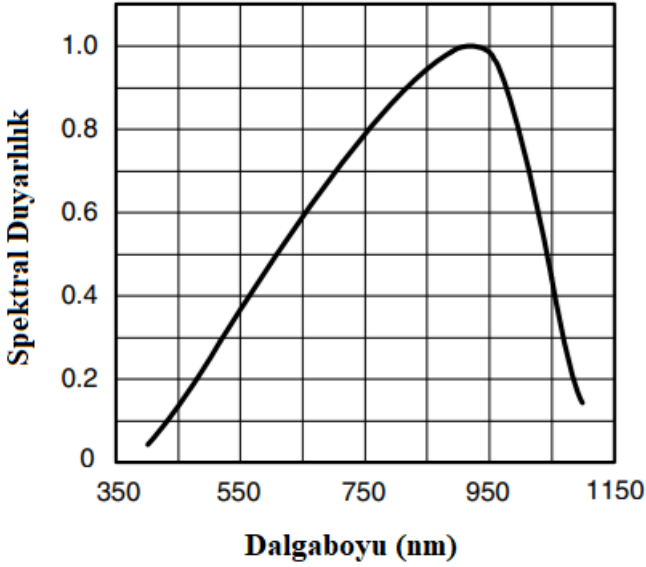
Fotodedektör akımını ölçmek için bir analog elektrometre kullanılmıştır. Bu elektrometre 3, 10, 30, 300, ve 1000 kademelerinde ve μA , nA ve pA mertebelerinde akım ölçebilmektedir. Aynı zamanda, bu elektrometre her bir kademede 0-1V çıkış gerilimi verebilmektedir. Bu nedenle Arduino UNO'da bulunan 10 bit ($2^{10}=1024$) çözünürlüklü analog-

dijital dönüştürücü (Analog to Digital Converter, ADC) 1,1V kendi-referans (internal reference) seçeneği ile elektrometre çıkış gerilimini ölçmek için kullanılmıştır. Bu durumda sistemin çözünürlüğü (1,1V/1023) yaklaşık olarak 1mV mertebesinde. Bu değerler kullanılarak optik geçirgenlik, yansıma ve soğurma ölçümleri için çözünürlük yaklaşık olarak %0,1 değerindedir. Daha yüksek hassasiyet (0,0078125mV) istenilmesi durumunda ADS1115 (16 bit) bir ADC ve kütüphanesi kullanılabilir.

Optik bant aralığı (E_g) küçük olan yarıiletken filmlerin ölçümlerinde UV-stop özelliği olan halojen lambalar ışık kaynağı olarak kullanılabilir. Ancak optik bant aralığı büyük olan ($E_g > 3$ eV) yarıiletken ince filmler için daha düşük dalgaboyu değerlerinde aydınlatmaya ihtiyaç vardır. Bu nedenle her iki tür yarıiletken ince filmler için uygun dalgaboyu aralığına sahip bir ışık kaynağı (UVA+UVB) olan halojen lamba kullanılmalıdır. Lambanın dalgaboyuna bağlı ışık şiddet dağılımı CCD dedektörlü bir spektrofotometre ile ölçülmüştür. Lambanın ışık şiddeti bir gerilim kontrollü bir sürücü devre ile ölçüm süresince sabit tutulmuştur. Optiksel tepkileri ölçmek için yansıtıcı kırınım ağına sahip monokromatörün çıkışına bir örnek tutucu yerleştirilmiştir. Bu örnek tutucuya, biri örnekten geçen ve soğurulan ışık şiddetini ölçmek üzere eksenel, diğeri örnek yüzeyinden yansıyan ışık şiddetini ölçmek üzere monokromatörün ışık çıkışına normal ile küçük açı ($< 7^\circ$) yapacak şekilde ikinci bir fotodedektör yerleştirilmiştir. Optik yansıma ölçümleri için kullanılan diğeri bir yöntemde ise monokromatör çıkışına monte edilen özel bir fiber optik yansıma probu kullanılır. Bu prob esas olarak Y-şeklinde. Y-probun bir ucu ışık kaynağı olan monokromatöre bağlanır. Biri merkezde olmak üzere 7 adet fiberden 6 tanesi ile örnek yüzeyi aydınlatılırken ortada bulunan fiber örnek yüzeyinden yansıyan ışığı detektöre iletmek için kullanılır. Her iki yöntemde de fotodedektör olarak UV-Vis bölgesinde çalışan BPW-34 seçilmiştir (Şekil 3). Bu fotodedektörün dalgaboyuna bağlı spektral duyarlılık değişimine bakıldığında özellikle UV-Vis bölgesinde oldukça doğrusal bir davranış sergilemektedir. İnce filmlerin optiksel ölçümleri için özel tasarlanmış bir örnek tutucu kullanılırken, çözelti formundaki örnekler için 10 mm optik yola sahip bir kuvvet tutucu kullanılmaktadır.

Söz konusu spektrofotometrik sistem kendi-başına (stand-alone) çalışabildiği gibi USB bağlantılı bir bilgisayar yardımı ile de çalıştırılabilir. Kendi başına çalışması için tuş-takımı ile gerekli seçimler yapılabilir. Bu seçimler; başlangıç ve bitiş dalgaboyu değerleri, dalgaboyu artış miktarı veya seçilen dalgaboyu değerinde bekleme süresi seçimleridir. Şayet bilgisayar bağlantısı ile birlikte çalıştırılacak ise söz konusu değerler program içinde belirlenir veya belirlenen değerler USB bağlantısı yardımı ile parametre olarak gönderilebilir. Her iki durumda da ölçüm kullanıcı kontrollünde başlat seçeneği ile spektrofotometrik ölçümler başlatılır. Elde edilen veriler hem 2x16 I2C bağlantılı bir LCD ekranda anlık olarak monitörlenir hem de bir SD karta yazdırılır (Şekil 2). Ayrıca, Arduino

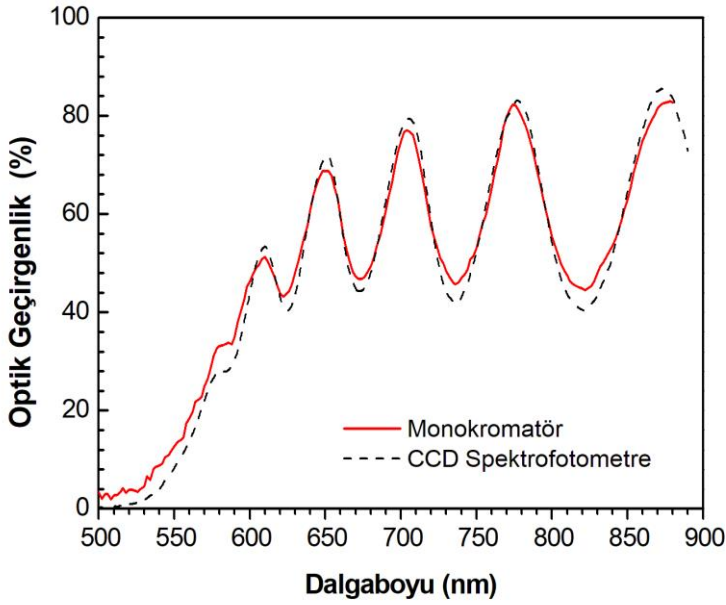
UNO'yu programlamak için kullanılan editörün seri monitör ekranında dalgaboyu ve ışık şiddetine karşı gelen gerilim değeri gönderilir ve spektrum bilgisayar ekranında grafiksel olarak da gözlenebilir.



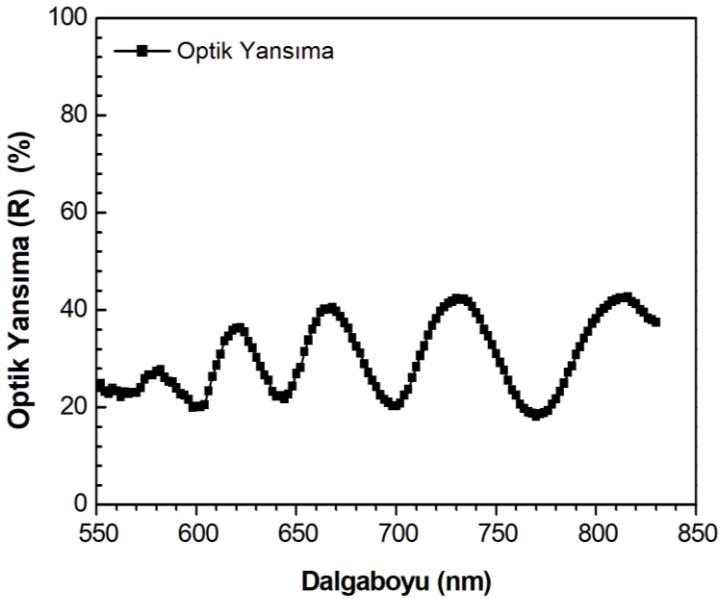
Şekil 3: BPW-34 Fotodedektöre ait dalgaboyuna bağlı rölatif spektral duyarlılık değişimi (BPW-34, 2025)

BULGULAR

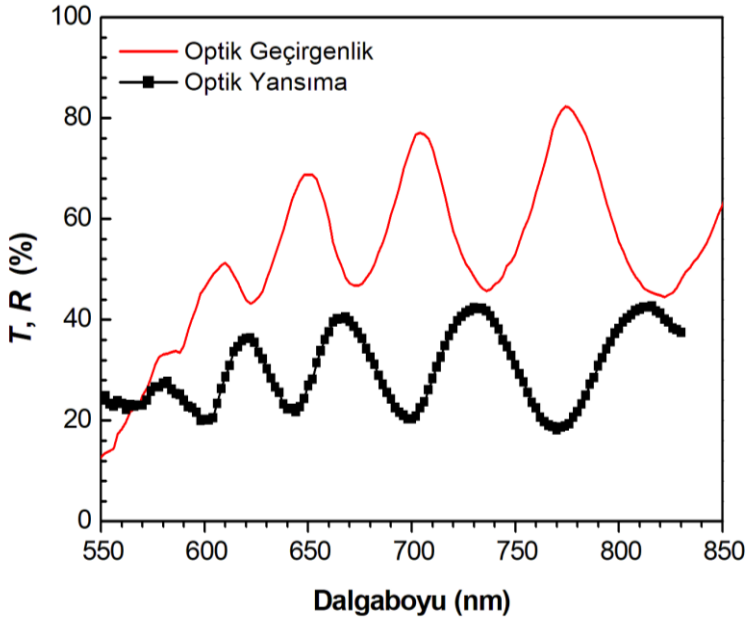
Cam üzerine rasdyo-frekans (rf) biriktirme sistemi ile hazırlanan a-SiN:H yarıiletken ince film referans örnek olarak kullanılmıştır (Güngör, 2001). Şekil 4'de referans örneğin CCD sensöre sahip spektrofotometre ile elde edilmiş optik geçirgenlik spektrumu ile bu çalışmaya konu olan spektrofotometre ile elde edilmiş optik geçirgenlik spektrumları gösterilmiştir. İnce film formundaki yarıiletken malzemenin optik geçirgenlik değerinde kayda değer bir artış ancak söz konusu yarıiletkenin optik band aralığına karşı gelen kritik dalgaboyu değerlerinden ($\lambda_c=1240.8/E_g(\text{eV})$) büyük dalgaboyu değerleri için gözlenebilir. Söz konusu örnek a-Si tabanlı azot katkılı (a-SiN:H) olduğu için optik bant aralığı 1.77 eV (Güngör, 2001, Güngör, Güngör ve Saka, 2022) ve bu değere karşı gelen kritik dalgaboyu değeri yaklaşık 700nm'dir. Bu nedenle bu dalgaboyu değerinden sonra optik geçirgenlik değerlerinde artış gözlenmiştir. Optik geçirgenlik spektrumunun zarf yöntemi (Swanepoel, 1983) ile değerlendirilmesi ince filmin kalınlığı 1217 nm olarak hesaplanmıştır. Film kalınlığının yeterli bir değerde olmasından dolayı da girişim saçakları açıkça gözlenmektedir.



Şekil 4. a-SiN:H referans örneğin CCD sensöre sahip spektrofotometre ve modifiye edilmiş spektrofotometre ile elde edilmiş optik geçirgenlik spektrumu



Şekil 5: a-SiN:H referans örneğin modifiye edilmiş spektrofotometre ile elde edilmiş optik yansımada spektrumu



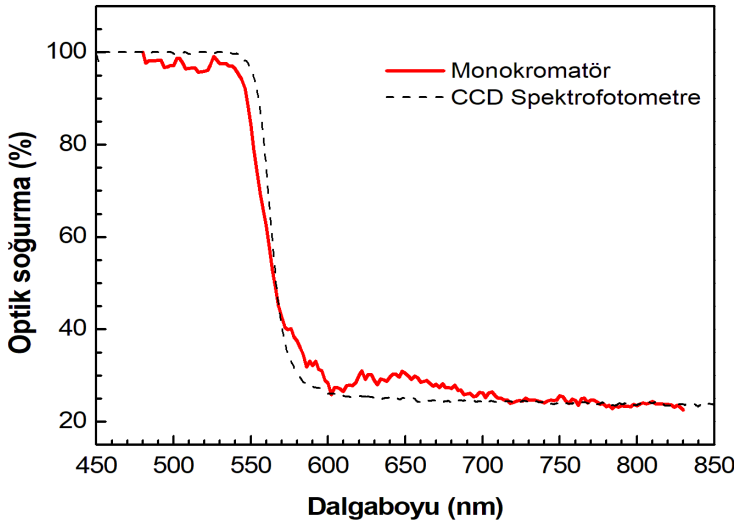
Şekil 6: a-SiN:H referans örneğın modifiye edilmiş spektrofotometre ile elde edilmiş optik yansırma (R) ve optik geçirgenlik spektrumu (T)

a-SiN:H referans örneğın modifiye edilmiş spektrofotometre ile elde edilmiş optik yansırma spektrumu Şekil 5’de gösterilmiştir. Optik yansırma ölçümü için referans olarak dalgaboyuna bağılı yansırma değeri bilinen optik kalitede bir ayna kullanılmıştır (Linor Photonics, plane mirror). Optik geçirgenlik spektrumu ile optik yansırma spektrumu arasında 180 derecelik bir faz farkı vardır. Başka bir deyişle optik geçirgenliğın maksimum olduğı dalgaboyu değerin de optik yansırma için bir minimum değeri gözlenir. Ancak optik yansırma ölçümleri için gelen ışık ile yansıyan ışık arasındaki 7°’lik bir açı olduğı için spektrumdaki ekstremum dalgaboyu değeri lerinde küçük bir fark ortaya çıkar (Şekil 6).

Optiksel tepkilerden birisi de optik soğurma dır. Bu nedenle optik soğurma ölçümleri için bir band geçirgen “high-pass” filtre örnek olarak kullanılmıştır. 560 nm dalgaboyundan büyük dalgaboylarındaki ışığı geçiren yüksek band geçirgen bir optik filtre için hem CCD sensörlü spektrofotometre hem de modifiye edilmiş spektrometre ile ölçülen optik soğurma spektrumu Şekil 7’ de gösterilmiştir.

CCD sensörlü spektrofotometre ile tasarımı gerçekleştirilen spektrofotometre yardımı ile elde edilen optiksel ölçümler arasında bir fark gözlenmiştir. Spektrumlar arasında gözlenen farklılara neden olarak CCD spektrofotometre girişindeki ve monokromatörün çıkışında bulunan yarı k (slit) genişliğı neden olmaktadır. CCD spektrofotometrede slit genişliğı

200 μ m'dir. Monokromatörün çıkış slit genişliği ise 1 mm'dir. Bu fark özellikle optik geçirgenlik spektrumunda gözlenen maksimum noktalarda minimum noktalara göre daha fazla kendisini göstermektedir (Swanepoel, 1983). Çıkış slit genişliğinin olumsuz etkisi slit genişliğini azaltarak giderilebilir. Ancak bu çalışmaya konu olan monokromatörün çıkış slit genişliği sabittir. Ancak ihtiyaç duyulması halinde daha da daraltılabilir.



Şekil 7: 560 nm yüksek geçirgen filtrenin CCD sensöre sahip spektrofotometre ve modifiye edilmiş spektrofotometre ile elde edilmiş optik soğurma spektrumu

SONUÇ

Arduino UNO, step motor, step motor sürücü ve ışık şiddetini algılamak için kullanılan bir fotodedektör bir araya getirilerek tasarımı gerçekleştirilen açık sistem bir spektrofotometre ile ince filmlerin optiksel tepkileri (optik geçirgenlik, optik yansımaya ve optik soğurma) spektrumları elde edilmiştir. Bu sistem, monokromatör çıkış yarığının genişliğinin spektrumlara etkisi göz ardı edildiği durumlarda spektrumlarda gözlenen küçük dalgalanmalara rağmen ticari spektrofotometreye alternatif olarak kullanılabilir. Bu sistem uygun maliyetli ve açık bir sistemdir ve hızlı ölçümler için kullanılabilir. Sistem sadece ince film formundaki malzemelerin değil bir küvet ile sıvıların optiksel ölçümleri içinde kullanılabilir. Ayrıca mikrokontrolcünün kolayca programlanabilir olması dikkate alınırsa bu açık sistem sadece dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak değil aynı zamanda belirli bir dalgaboyunda zamana bağlı optiksel tepkilerin ölçülmesi veya dalgaboyuna bağlı lüminesans ölçümlerinde de kullanılabilir.

REFERANSLAR

- BPW-34, <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf> adresinden 4 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Garg, A., Sharma, R., ve Dhingra, V. (2011). Polarization studies in a computer based laboratory, *Latin-American Journal of Physics Education*, 5, 17.
- Guilherme, C.C.J., Tiago J.C. (2022). Low-cost and easily replicable apparatus: an Arduino controlled device for educational activities focused on measuring Brewster's angle, *Phys. Educ.* 57 (2), 025007. DOI:10.1088/1361-6552/ac3f71.
- Güngör, T. (1998). Determination of optical constant and thickness for a-SiNx:H thin film, *Journal of Research in Physics*, 27, No.1, 1-9.
- Güngör, T. (2001). Comparison of Experimental Methods_ Used for Determination of Optical Constants of Hydrogenated Amorphous Silicon, PhD, Hacettepe University, Ankara, Turkey
- Güngör, T., Saka, B. (2004). Calculation of the optical constants of a thin layer upon a transparent substrate from the reflection spectrum using a genetic algorithm, *Thin Solid Films*, 467(1-2), 319-325. DOI:10.1016/j.tsf.2004.04.040.
- Güngör T, Güngör E, ve Saka B. (2016). Fast and interference fringe independent optical characterization of zinc oxide nano thin films using model-based genetic algorithm for optoelectronic applications. *Nanomaterials and Nanotechnology*. 6. DOI:10.1177/1847980416673785.
- Güngör, E., Güngör, T. ve Saka, B. (2022). Angle dependent wavelength measurement using open spectrophotometer and optical characterization of thin films. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 24(11-12), 523–529.
- Güngör, T., Güngör, E. (2022). Yarıiletken Aygıt Karakterizasyonu için Arduino UNO Tabanlı Otomatik Hall/Direnç Ölçüm Sistem Tasarımı ve Uygulaması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 205-212. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247019>.
- Ishafit, Mundilarto, Surjono, H.D. (2020). Development of light polarization experimental apparatus for remote laboratory in physics education. *Physics Education*, 56 (1), 015008. DOI: 10.1088/1361-6552/abc4da.
- Ismailov, A.S., Jo'rayev, Z.B. (2022). Study of arduino microcontroller board. *Science and Education, Scientific Journal*, 3(3), 172-179.
- Minkov, D.A. (1989), Calculation of the optical constants of a thin layer upon a transparent substrate from the reflection spectrum, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(8), 1157. DOI: 10.1088/0022-3727/22/8/021.
- Oceanoptics <https://www.oceanoptics.com/spectrometers> adresinden 4 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Physicsopenlab, <https://physicsopenlab.org/2015/11/26/webcam-diffraction-grating-spectrometer> adresinden 4 Mayıs 2025 tarihinde alınmıştır.
- Poh, J.J., Goh, N., Tan, S., Gan, S.K.E. (2021). Spectrophotometer on-the-go: The development of a 2-in-1 UV–Vis portable Arduino-based spectrophotometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 325 (3), 112698. DOI: 10.1016/j.sna.2021.112698.

- Swanepoel, R. (1983) Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16(12), 1214-1222. DOI:10.1088/0022-3735/16/12/023.
- Thedsakhulwong, A., Hernmek, P. (2018). Development of the low-cost hot plate temperature controller using Arduino Uno R3. *Journal of Physics: Conference Series*, 1144.

İşitsel Oddball Görevlerinde P300 Tespiti için Adaboost Algoritması Kullanımı

Bahar NAZLI^{*,1,2}

Ahmet Reşit KAVSAOĞLU²

¹Biyomedikal Mühendisliği, Kastamonu Üniversitesi, Türkiye

² Biyomedikal Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Türkiye ^{*}(btastan@kastamonu.edu.tr)

ÖZET

Bu çalışma, EEG sinyalleri üzerinden Beyin-Bilgisayar Arayüzleri alanındaki temel bileşenlerden biri olan P300 tespiti üzerine odaklanmaktadır. P300, hedef ve oddball uyaranlara karşı ortaya çıkan ve beynin bilişsel süreçleri ve çalışma belleğini yansıtan bir EEG yanıtıdır. İşitsel uyaran kullanılarak geliştirilen BBA çalışmalarında, P300 tabanlı sistemler kullanıcıların beyin aktivitesi aracılığı ile iletişim kurmalarına olanak sağlayacak sistemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. P300'ün doğru bir şekilde tespit edilmesi BBA sisteminin performansında kritik bir rol oynamaktadır.

Çalışmada, EEG Data From An Auditory Oddball Task – DS003061 veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti, katılımcılara oddball paradigması ile işitsel uyaranların sunulduğu 64 kanallı EEG kayıtlarını içermektedir. Oddball paradigması, nadir ve hedef uyaranların sık ve standart uyaranlarla karıştırılarak sunulduğu bir yöntemdir. Katılımcılar, nadir uyaranlara dikkat etmeye ve onlara tepki vermeye yönlendirilirken, beyinlerinin bu beklenmedik uyaranlara verdiği P300 yanıtı kaydedilir.

Veri setinden, P300'ün en belirgin olarak gözlemlendiği frontal, merkezi ve parietal bölgelere karşılık gelen Fz, Cz ve Pz kanalları seçilerek ERP tespiti yapılmıştır. Özellik çıkarımı için dalgacık dönüşümü yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde, sinyallerin hem frekans hem de zaman bilgilerini eş zamanlı olarak analiz edebilme yeteneği nedeniyle Daubechies 4 dalgası kullanılmıştır. Dalgacık dönüşümü, gürültüyü azaltırken P300 gibi geçici ve yüksek frekanslı bileşenleri yakalamada etkilidir.

Sınıflandırma algoritması olarak Adaptive Boosting kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, ortalama 0,75 doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu bulgular, Adaptive Boosting algoritmasının işitsel oddball görevlerinde P300 bileşenini belirlemedeki potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmak amacıyla farklı özellik çıkarım yöntemleri denenmesi planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – EEG, İşitsel Uyaran, P300, Dalgacık Dönüşümü, AdaBoost

I. GİRİŞ

Beyin bilgisayar arayüzü (BBA), periferik sinirler ve kasların müdahalesi olmadan elektroensefalografik aktiviteden üretilen kontrol sinyallerini kullanarak insanların çevreleriyle etkileşime girmesini sağlayan bir sistemdir [1]. BBA'lar genellikle insan bilişsel veya duyuşsal-motor işlevlerini araştırmaya, haritalamaya, yardımcı olmaya, artırmaya veya onarmaya yöneliktir. BBA çalışmalarının birincil amacı, ciddi motor engelleri olan kişilerin bunu iletişim ve kontrol için kullanabilmeleri için kaslarını kullanmadan bir iletişim kanalı oluşturmaktır. Bilinci açık ancak felçli

hastalar kendilerini ifade edememektedir. Kilitli kalma sendromu gibi hastalıklarda ise görme yetisi de kaybedilmektedir [2]. Bu hastaların yaşam kalitelerinin artırılması ve hayata dahil edilebilmeleri amacı ile işitsel uyaran kullanılarak geliştirilen beyin bilgisayar ara yüz çalışmaları yapılmaktadır [3], [4].

Beyin aktivitesini ölçmede kullanılan sistemler arasında Elektroensefalogram (EEG) en sık kullanılan tekniktir [5]. P300, hedef ve oddball uyaranlara karşı ortaya çıkan ve beynin bilişsel süreçleri ve çalışma belleğini yansıtan bir EEG yanıtıdır [6]. Uyaran verilmesinden yaklaşık 300 ms sonra ortaya çıkmaktadır. İşitsel uyaran kullanılarak geliştirilen BBA çalışmalarında P300 tabanlı sistemler kullanıcıların beyin aktivitesi aracılığı ile iletişim kurmalarına olanak sağlayacak sistemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. P300'ün doğru bir şekilde tespit edilmesi BBA sisteminin performansında kritik bir rol oynamaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

A. Veri Seti

Çalışmada EEG Data From An Auditory Oddball Task – DS003061 veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinde göre 64 kanallı Biosemi Active Two EEG sistemi (Biosemi, Inc.) kullanılarak 10-20 elektrot yerleşim düzenine göre kayıtlar alınmıştır. Katılımcılara işitsel uyaranlar oddball paradigması kullanılarak sunulmuştur. Oddball paradigması, nadir ve hedef uyaranların sık ve standart uyaranlarla karıştırılarak sunulduğu bir yöntemdir. Katılımcılar, nadir uyaranlara dikkat etmeye ve onlara tepki vermeye yönlendirilirken, beyinlerinin bu beklenmedik uyaranlara verdiği P300 yanıtı kaydedilir. Veri setinde toplam 13 katılımcıya ait kayıtlar bulunmaktadır. Her katılımcının verisi üç farklı koşu içerir. Her koşu için aşağıdaki dosya türleri sağlanmıştır:

- .tsv dosyaları: Kanal ve elektrot bilgilerini içerir,
- .json dosyaları: Koordinat sistemi, olaylar ve EEG yapılandırması hakkında bilgiler sunar,
- .set dosyaları: EEG verilerini içerir.

B. Sınıflandırma

Çalışmada ilk olarak ham EEG verileri 1 s'lik epoklara ayrıştırılmıştır. ERP tespiti için 64 kanaldan kayıt alınan veri setinden P300'ün en belirgin olarak gözlemlendiği frontal, merkezi ve parietal bölgelere karşılık gelen Fz, Cz ve Pz kanalları seçilmiştir. Özellik çıkarımı için dalgacık dönüşümü yöntemi tercih edilmiştir. Dalgacık dönüşümü, gürültüyü azaltırken P300 gibi geçici ve yüksek frekanslı bileşenleri yakalamada etkilidir. Bu yöntemde, sinyallerin

hem frekans hem de zaman bilgilerini eş zamanlı olarak analiz edebilme yeteneği nedeniyle Daubechies 4 (Db4) dalgası kullanılmıştır. Her bir kanal için Db4 wavelet dönüşümü uygulanarak, her seviye için ortalama, standart sapma, maksimum ve enerji özellikleri çıkarılmıştır. F-test (ANOVA) istatistiğine göre en iyi 50 özellik seçilmiştir.

Sınıflandırma algoritması olarak bir topluluk öğrenme algoritması olan Adaptive Boosting (AdaBoost) kullanılmıştır. AdaBoost, her yeni sınıflandırıcıyı, önceki modellerin hatalarını telafi edecek şekilde eğiterek zamanla hatalara karşı daha duyarlı hale gelen bir algoritmadır [7]. Veri seti %20 eğitim ve %80 test verisi olarak ayrılmış ve çapraz doğrulama yöntemi olarak Stratified K-Fold yöntemi seçilmiştir.

II. BULGULAR

Çalışmada Accuracy (Doğruluk), Precision (Keskinlik), Recall (Hassasiyet) ve F1-score (F1-Skor) değerleri Şekil 1'de verilen formüllere göre hesaplanmıştır. Ayrıca ROC eğrisi altında kalan alan (AUC) hesaplanmıştır.

Performans Metrikleri



$$\text{Accuracy} = \frac{\text{Doğru Tahminler (TP + TN)}}{\text{Toplam Tahminler (TP + TN + FP + FN)}}$$



$$\text{Recall} = \frac{\text{Gerçek Pozitif (TP)}}{\text{Gerçek Pozitif (TP) + Yanlış Negatif (FN)}}$$



$$\text{Precision} = \frac{\text{Gerçek Pozitif (TP)}}{\text{Gerçek Pozitif (TP) + Yanlış Pozitif (FP)}}$$



$$\text{F1} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

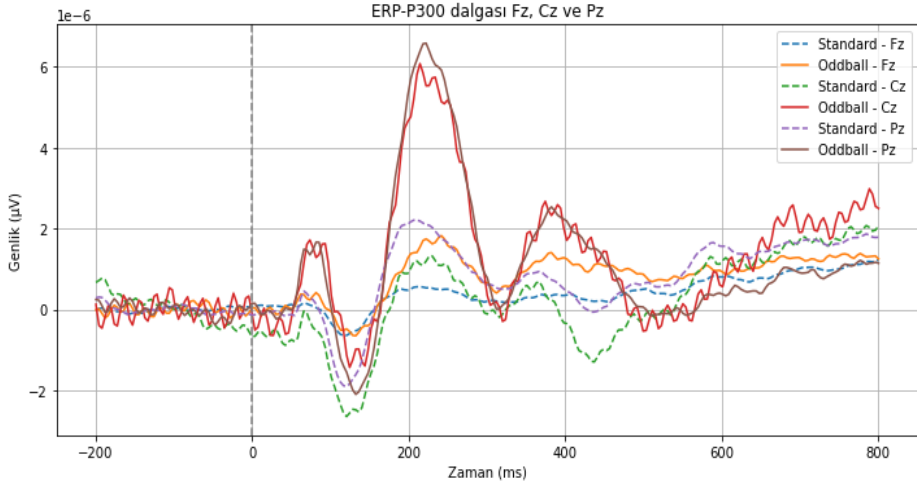
Şekil 1. Performans metrikleri ve formülleri [8].

Seçilen üç kanaldan Adaboost ile standart ve oddball uyarılara göre yapılan sınıflandırma sonucunda Doğruluk 0,75, Keskinlik 0,72, Hassasiyet 0,74 ve F1-Skor 0,69 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Sınıflandırma sonuçları

Performans Metriği	Sonuç
Doğruluk	0,75
Keskinlik	0,72
Hassasiyet	0,75
F1-skor	0,69

Elde edilen bulgulara göre her üç kanalın P300 yanıtlarını gösteren grafik Şekil 2’de verilmiştir. Elde edilen grafikten Pz ve Cz kanallarından alınan sinyaller arasında standart uyaranlar ve oddball uyaranların P300 üretme açısından belirgin farklılıkları olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Fz, Cz ve Pz kanallarından elde edilen P300 dalgası

III. TARTIŞMA

Bu çalışmada, işitsel oddball paradigması kullanılarak elde edilen EEG sinyallerinden P300 bileşeninin tespiti amaçlanmıştır. Fz, Cz ve Pz kanallarına odaklanılarak yapılan analizlerde dalgacık dönüşümü (Db4) ile özellik çıkarımı gerçekleştirilmiş ve AdaBoost algoritması ile sınıflandırma yapılmıştır. Elde edilen %75 doğruluk oranı, kullanılan yöntemlerin P300 tespitinde makul bir başarı sağladığını göstermektedir.

Literatürde yapılan benzer çalışmalarda, P300 bileşeninin tespiti için genellikle klasik makine öğrenmesi algoritmaları tercih edilmiştir [9], [10]. Örneğin Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [11] Fz, FCz, Cz ve Pz kanallarına odaklanmışlar ve yöntem olarak destek vektör makinelerini kullanmışlardır.

Elde edilen sınıflandırma metrikleri detaylı olarak incelendiğinde, precision (0,72), recall (0,75) ve F1-score (0,69) değerleri sınıflandırma performansının dengeli olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak sınıf dağılımının dengesizliği, özellikle nadir olan hedef (oddball) uyarılara karşı modelin duyarlılığını sınırlandırmaktadır. ROC eğrisinden elde edilen AUC değeri (0,56), modelin pozitif ve negatif sınıflar arasında ayırt edici güce sahip olduğunu doğrulamaktadır.

P300 bileşeni tipik olarak parietal bölgede daha belirgin görülmektedir. Şekil 2'deki ERP grafikleri incelendiğinde, Pz kanalındaki P300 yanıtının, özellikle hedef uyarılara karşı daha güçlü ve belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum literatürdeki bulgularla uyumludur ve parietal bölgenin P300 üretimindeki baskın rolünü desteklemektedir [12]. Cz kanalı da benzer şekilde güçlü yanıtlar üretmiştir. Fz kanalında ise P300 yanıtı daha zayıf gözlemlenmiştir; bu da frontal bölgenin P300'e katkısının sınırlı olabileceğini göstermektedir.

IV. SONUÇLAR

Çalışmada işitsel uyarı ile EEG sinyallerinden P300 elde edilmesi için Adaboost yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen 0,75 doğruluk algoritmanın kullanılabilirliğini göstermekle birlikte, sınıflandırma doğruluğunun artırılması için farklı yöntemlerin denenmesi gereklidir. Özellikle sınıf dengesizliği, az sayıda hedef uyarının doğru şekilde sınıflandırılmasını zorlaştırmakta ve bu durum recall değerini olumsuz etkilemektedir. Gelecek çalışmalarda, veri dengeleme teknikleri, farklı öznitelik çıkarım yöntemlerinin denenmesi önerilmektedir. Ayrıca bireysel varyasyonlar da göz önüne alınarak kişiye özgü modellerin oluşturulması, sınıflandırma performansını daha da artırabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma işitsel uyarılara dayalı P300 tespiti için dalgacık dönüşümü ve AdaBoost algoritmasının etkili bir kombinasyon sunduğunu göstermektedir. Ancak modelin sınıf dengesizliğine karşı dayanıklılığı ve genellenebilirliği, ileri çalışmalarla daha ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: KBÜBAP-24-DR-085.

KAYNAKLAR

[1] P. Sengar and S. Bardhan, "Brain-Computer Interface," in *Machine Learning and Deep Learning in Medical Data Analytics and Healthcare Applications*, 2022, pp. 23–38.

- [2] J. Heo, H. J. Baek, S. Hong, M. H. Chang, J. S. Lee, and K. S. Park, “Music and natural sounds in an auditory steady-state response based brain–computer interface to increase user acceptance,” *Comput. Biol. Med.*, vol. 84, no. March, pp. 45–52, 2017, doi: 10.1016/j.compbimed.2017.03.011.
- [3] S. Halder, I. Käthner, and A. Kübler, “Training leads to increased auditory brain-computer interface performance of end-users with motor impairments,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 127, no. 2, pp. 1288–1296, 2016, doi: 10.1016/j.clinph.2015.08.007.
- [4] N. Kaongoen and S. Jo, “A novel hybrid auditory BCI paradigm combining ASSR and P300,” *J. Neurosci. Methods*, vol. 279, pp. 44–51, 2017, doi: 10.1016/j.jneumeth.2017.01.011.
- [5] J. I. Padilla-Buritica, J. V. Hurtado, and G. Castellanos-Dominguez, “Supervised piecewise network connectivity analysis for enhanced confidence of auditory oddball tasks,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 52, pp. 341–346, 2019, doi: 10.1016/j.bspc.2019.04.020.
- [6] P. Terence W., “The P300 Wave of the Human Event-Related Potential,” *Journal of Clinical Neurophysiology* vol.9, no. 4, pp 456-479, October 1992.
- [7] P. Beja-Battais, *Overview of AdaBoost: Reconciling its views to better understand its dynamics*, 2023, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2310.18323>.
- [8] M. Küçükakarsu, A. R. Kavsaoglu, F. Alenezi, A. Alhudhaif, R. Alwadie, and K. Polat, “A Novel Automatic Audiometric System Design Based on Machine Learning Methods Using the Brain’s Electrical Activity Signals,” *Diagnostics*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/diagnostics13030575.
- [9] K. Sun, K. Hsieh, and S. Lee, “Using Mental Shadowing Tasks to Improve the Sound-Evoked Potential of EEG in the Design of an Auditory Brain – Computer Interface,” *Appl. Sci.*, vol.13, pp 813, 2023.
- [10] R. Kimura, I. Nambu, R. Fujitsuka, Y. Maruyama, S. Yano, and Y. Wada, “An auditory brain-computer interface to detect changes in sound pressure level for automatic volume control,” *Heliyon*, vol. 10, no. 1, pp. e23948, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23948.
- [11] M. Guo *et al.*, “The anterior contralateral response improves performance in a single trial auditory oddball BMI,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 22, pp. 74–84, 2015, doi: 10.1016/j.bspc.2015.06.014.
- [12] D. E. J. Linden, “The P300: Where in the Brain Is It Produced and What Does It Tell Us? ” *The Neuroscientist*, vol. 11, no. 6, pp. 563-576, 2005, doi:10.1177/1073858405280524

