OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1235-1244, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1235-1244, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Yem Bezelyesinin Yonca Otu Yerine Kullanımının Ruminant Rasyonlarında Sindirilebilirlik, Metan ve Mikrobiyal Protein Üzerine Etkileri

Bilal SELÇUK[1*], Seyit Ahmet GÖKMEN[2]

[1, 2]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lâdik Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, 55000, Lâdik, Samsun

[1]https://orcid.org/0000-0001-9136-5707
[2]https://orcid.org/0000-0003-3909-799X
*Sorumlu yazar: bilal.selcuk@omu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 09.09.2025
Kabul tarihi:10.11.2025
Online Yayınlanma: 15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Yonca
Yem bezelyesi
İn vitro gaz
Metan üretimi
Mikrobiyal protein

ÖZ

Bu çalışmada; Samsun Ladik koşullarında yetiştirilen yoncanın (*Medicago sativa*), farklı düzeylerde (%0, %10, %20, %30) yem bezelyesi (*Pisum sativum* ssp. *arvense* L.) kuru otu ile ikamesinin, Tam Karışım Rasyonları (TKR) üzerindeki *in vitro* ruminal fermantasyon parametreleri, metan üretimi ve mikrobiyal protein sentezi üzerine etkileri araştırılmıştır. Araştırmada; kontrol rasyonu (%0 ikame) tamamen yonca kuru otu içerecek şekilde hazırlanmıştır. Deneme rasyonları ise yonca kuru otunun ağırlık bazında kuru madde üzerinden sırasıyla %0 (Kontrol), %10 (%10YB), %20 (%20YB) ve %30 (%30YB) oranlarında yem bezelyesi kuru otu ile ikame edilmesiyle oluşturulmuştur. Rasyonlar, izokalorik (2400 kcal KM) ve izonitrojenik (%17 HP) olacak şekilde formüle edilmiş; gaz üretimi (GÜ), metan (CH_4), gerçek sindirilebilir kuru madde (GSKM), gerçek sindirim derecesi (GSD), taksimat faktörü (TF), mikrobiyal protein (MP) ve mikrobiyal protein sentezleme etkinliği (MPSE) ölçülmüştür. Bulgulara göre toplam gaz (97,67–101,67 ml) ve mutlak metan üretimi (14,51–15,51 ml) ikame düzeylerinden istatistiksel olarak etkilenmemiştir (P>0,05). Ancak sindirilebilirlik parametrelerinde önemli farklılıklar ortaya çıkmış; GSKM ve GSD'de kübik etki (P<0,01) gözlenmiştir. En yüksek sindirilebilirlik değerleri %10 ikame düzeyinde (GSKM: 385,40 mg; GSD: %76,17) elde edilirken, en düşük değerler %20 ikame düzeyinde (GSKM: 350,83 mg; GSD: %69,44) kaydedilmiştir. Mikrobiyal protein üretimi açısından kontrol grubuna göre düşüş göstermiştir (P<0,05). Mikrobiyal protein sentezleme etkinliğinde ise gruplar arasında anlamlı farklılık göstermemiştir. Bu sonuçlar, yem bezelyesi kuru otunun %10 düzeyinde yonca yerine kullanıldığında ruminal sindirilebilirliği (%5,02 artış) ve mikrobiyal protein üretimini iyileştirdiğini göstermektedir. Daha yüksek ikame oranları (%20 ve üzeri) ise sindirilebilirliği ve mikrobiyal protein sentezini olumsuz etkilemiştir. Metan üretimi tüm gruplarda benzer seviyelerde kalmıştır. Sonuç olarak, %10 yem bezelyesi ikamesi, ruminal verimliliğin iyileştirilmesinde avantajlı görünmektedir. Bununla birlikte, metan üretiminin azaltılması için ek stratejilerin (örneğin tanen veya yağ asidi katkıları) uygulanması gerektiği, ayrıca elde edilen bulguların *in vivo* çalışmalarla doğrulanmasının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Effects of Replacing Alfalfa Hay with Field Pea Hay on Digestibility, Methane Production, and Microbial Protein in Ruminant Diets

Research Article

Article History:
Received: 09.09.2025
Accepted: 10.11.2025
Published online: 15.06.2026

Keywords:

ABSTRACT

This study investigated the effects of substituting alfalfa (*Medicago sativa*) with different levels (0%, 10%, 20%, 30%) of field pea (*Pisum sativum* ssp. *arvense* L.) hay under the ecological conditions of Samsun-Ladik on the *in vitro* ruminal fermentation parameters, methane production, and microbial protein synthesis of Total Mixed Rations (TMR). In the experiment, the

Alfalfa
Field pea
İn vitro gas
Methane production
Microbial protein

control ration (0% substitution) was prepared to contain only alfalfa hay. The experimental rations were formulated by replacing alfalfa hay on a dry matter basis at rates of 0% (Control), 10% (10YB), 20% (20YB), and 30% (30YB) with field pea hay. The rations were formulated to be isocaloric (2400 kcal DM) and isonitrogenous (17% CP). Gas production (GP), methane (CH_4), truly digestible dry matter (TDDM), true digestibility (TD), partitioning factor (PF), microbial protein (MP), and microbial protein synthesis efficiency (MPSE) were measured. According to the results, total gas production (97.67–101.67 ml) and absolute methane production (14.51–15.51 ml) were not significantly affected by substitution levels ($P>0.05$). However, significant differences were observed in digestibility parameters, showing a cubic effect ($P<0.01$) for TDDM and TD. The highest digestibility values were obtained at the 10% substitution level (TDDM: 385.40 mg; TD: 76.17%), while the lowest were recorded at the 20% level (TDDM: 350.83 mg; TD: 69.44%). Microbial protein production decreased compared to the control group ($P<0.05$), whereas MPSE did not differ significantly among treatments. These findings indicate that replacing alfalfa hay with 10% field pea hay improved ruminal digestibility (by 5.02%) and microbial protein synthesis. Higher substitution levels (20% and above) negatively affected digestibility and microbial protein production. Methane production remained similar across all groups. In conclusion, a 10% substitution of field pea hay appears advantageous for enhancing ruminal efficiency. However, additional strategies (e.g., tannin or fatty acid supplementation) may be required to reduce methane emissions, and *in vivo* studies are recommended to validate these results.

To Cite: Selçuk B., Gökmen SA. Yem Bezelyesinin Yonca Otu Yerine Kullanımının Ruminant Rasyonlarında Sindirilebilirlik, Metan ve Mikrobiyal Protein Üzerine Etkileri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1235-1244.

1. Giriş

Ruminant hayvan yetiştiriciliği; küresel gıda güvenliği açısından hayati öneme sahip olup et ve süt gibi hayvansal ürünlerin temel kaynağını oluşturmaktadır. Bu sistemin sürdürülebilirliği ve verimliliği büyük ölçüde kullanılan yem kaynaklarının kalitesine, maliyetine ve çevresel etkilerine bağlıdır (Beauchemin ve ark., 2008). Kaba yemler; ruminant rasyonlarının temel bileşenini oluşturarak rumen sağlığı ve fonksiyonları üzerinde belirleyici bir rol oynar. Yüksek besin değeri ve lezzeti nedeniyle yonca (*Medicago sativa*), yaygın olarak kullanılan bir kaba yem kaynağıdır (Jung ve Allen, 1995). Ancak yoncanın üretiminin belirli iklim ve toprak koşulları gerektirmesi, su tüketiminin yüksek olması ve maliyetindeki dalgalanmalar, alternatif kaba yem kaynaklarının araştırılmasını zorunlu kılmaktadır (Mueller-Harvey ve ark., 2019).

Bu bağlamda, baklagil familyasına ait olan yem bezelyesi (*Pisum sativum* ssp. *arvense* L.), dikkat çekici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yem bezelyesi, iyi düzeyde ham protein ve enerji içeriğinin yanı sıra, toprağa azot bağlama kapasitesi ve düşük antinutrisyonel faktör içeriği gibi avantajlara sahiptir (Dahl ve ark., 2012). Ayrıca nişasta gibi kolay fermente olabilir karbonhidratlar bakımından zengin olması, ruminal fermantasyon deseni ve enerji salınım profilini değiştirebileceği için ayrı bir önem taşımaktadır (Titze ve ark., 2021).

Ruminantlarda enterik metan (CH_4) üretimi, hem yem enerjisinin kaybına (brüt enerjinin %2-12'si) hem de güçlü bir sera gazı emisyonuna yol açması nedeniyle önemli bir sorundur (Johnson ve

Johnson, 1995). Metan üretimini azaltacak besleme stratejilerinin geliştirilmesi hem hayvan verimliliğini artırmak hem de çevresel sürdürülebilirliği iyileştirmek açısından kritik öneme sahiptir.

In vitro gaz üretim teknikleri, ruminal fermantasyon parametrelerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan güvenilir bir yöntemdir (Menke ve Steingass, 1988). Bu yöntemle, yemlerin sindirilebilirliği, gaz ve metan üretimi, mikrobiyal protein sentezi ve fermantasyon etkinliği gibi parametreler hızlı ve ekonomik bir şekilde belirlenebilmektedir.

Literatürde, yem bezelyesinin kesif yem bileşeni veya tek başına kuru ot olarak değerlendirildiği çalışmalar mevcut olmakla birlikte (Soto-Navarro ve ark., 2012; Vahdani ve ark., 2014), yonca kuru otunun yerine Tam Karışım Rasyonu (TKR) içerisinde kısmen ikame edilmesinin ruminal fermantasyon, metan emisyonu ve mikrobiyal verimlilik üzerine etkilerini sistematik olarak inceleyen ve rasyonları izonitrojenik ve izokalorik tasarlayan kapsamlı çalışmalar sınırlıdır.

Bu çalışmanın amacı; Samsun-Ladik koşullarında yetiştirilen yonca otunun, yem bezelyesi kuru otu ile farklı düzeylerde (%0, %10, %20, %30) ikame edilmesinin, *in vitro* ruminal fermantasyon parametreleri, metan üretimi ve mikrobiyal protein sentezi üzerindeki etkilerini belirlemektir. Çalışmanın hipotezi, yem bezelyesi ikamesinin uygun düzeylerde kullanılması durumunda, ruminal sindirilebilirliği ve mikrobiyal protein sentezini iyileştirirken, enterik metan emisyonlarını azaltabileceği yönündedir. Araştırma sonuçlarının, ruminant rasyonlarında sürdürülebilir ve ekonomik alternatifler sunması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Yem Materyallerinin Hazırlanması ve Kimyasal Analizler

Bu çalışmada kullanılan yonca (*Medicago sativa*) ve yem bezelyesi (*Pisum sativum* ssp. *arvense* L.) kuru otları, Samsun ili Ladik ilçesi koşullarında aynı vejetasyon döneminde yetiştirilmiştir. Bitkiler çiçeklenme başlangıcı döneminde biçilmiş ve doğal koşullarda kurutulduktan sonra çekiçli bir değirmenden (1 mm elek) geçirilerek öğütülmüş ve analizlere hazır hale getirilmiştir. Deneme rasyonlarında kullanılan kesif yem bileşenleri (soya küspesi, buğday kepeği, arpa) de aynı şekilde öğütülmüştür.

Tüm yem hammaddelerinin kuru madde (KM), ham kül (HK), ham yağ (HY) ve ham protein (HP) içerikleri standart AOAC (1990) yöntemlerine göre belirlenmiştir. Nötral deterjan lif (NDF) ve asit deterjan lif (ADF) içerikleri ise Van Soest ve ark., (1991) yöntemine göre, alfa amilaz ve sodyum sülfit kullanılmadan analiz edilmiştir. Yem hammaddelerinin kimyasal bileşimleri, 24 saatlik *in vitro* gaz üretimi (GÜ), metabolik enerji (ME) ve organik madde sindirilebilirlik (OMS) değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Metabolik enerji (MJ/kg KM) ve organik madde sindirimi (%) değerleri, Menke ve Steingass (1988) tarafından geliştirilen regresyon eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

$$ME\ (MJ\ /\ KgKM) = 1{,}68 + (0{,}1418 * GÜ) + (0{,}073 * HP) + (0{,}217 * HY) - (0{,}028 * HK) \quad (1)$$

$$OMS\ (\%) = 14{,}88 + (0{,}8893 * GÜ) + (0{,}448 * HP) + (0{,}651 * HK) \quad (2)$$

GÜ: 24 saatlik inkübasyon, sonucunda üretilen gaz hacmi (200 mg/KM).

HP: Ham protein (%)

HY: Ham yağ (%)

HK: Ham kül (%)

Tablo 1. Yem hammaddelerinin kimyasal bileşimleri, gaz üretimi, metabolik enerji ve organik madde sindirilebilirlik değerleri

YHM	HK (%)	HY (%)	HP (%)	GÜ (ml)	ME	OMS (%)
Yem bezelyesi	6,44	3,38	18,54	42,04	9,55	64,76
Yonca	9,41	1,52	13,42	47,70	9,49	70,44
Soya küspesi	7,33	2,41	52,86	55,74	13,76	92,90
Buğday kepeği	3,41	2,68	15,53	66,24	12,69	82,96
Arpa tanesi	1,61	1,76	13,13	59,13	11,36	76,85

YHM: Yem hammaddeleri, HK: Ham kül, HY: Ham yağ, HP: Ham protein, ME: Metabolik enerji (MJ/kgKM), GÜ: Gaz üretimi (200 mg /KM). OSM: Organik madde sindirimi

2.2. Deneysel Rasyonların Formülasyonu ve Hazırlanması

Araştırmada, kontrol rasyonu (%0 ikame) tamamen yonca kuru otu içerecek şekilde hazırlanmıştır, Deneme rasyonları ise yonca kuru otunun ağırlık bazında kuru madde üzerinden sırasıyla %10, %20 ve %30 oranlarında yem bezelyesi kuru otu ile ikame edilmesiyle oluşturulmuştur. Tüm rasyonlar, NRC (2001)'e göre kuzular için bildirilen izonitrojenik (%17 ham protein) ve izokalorik (2400 kcal/kg KM metabolik enerji) olacak şekilde Microsoft Excel Yazılımı (2016) veri çözücü eklentisi kullanılarak formüle edilmiştir. Rasyon bileşenleri ve besin madde içerikleri Tablo 2'de verilmiştir.

2.3. Rumen Sıvısının Alınması ve İnkübasyon Ortamının Hazırlanması

In vitro gaz üretim deneyi için rumen sıvısı, özel bir kesimhaneden kesimi takiben üç erişkin Kıvırcık koyundan alınmıştır, Sıvılar, 39°C'de termoslarda laboratuvara getirilmiş, 250 µm gaz tülü ile süzülerek partiküllerden arındırılmış ve sürekli CO_2 verilerek anaerobik koşullar sağlanmıştır. İnkübasyon ortamı (yapay tükürük), Menke ve ark., (1979) tarafından tanımlanan protokole uygun olarak hazırlanmıştır.

2.4. In Vitro Gaz Üretim Deneyi ve Örnekleme

In vitro gaz üretimi, 100 ml'lik şırıngalarla (Häberle Labortechnik, Lonsee, Germany), Menke ve ark.,(1979) tarafından tanımlanan yönteme uygun olarak ölçülmüştür. Her şırıngaya 500 mg (±10 mg) yem örneği konulmuş, üzerine 30 ml tampon solüsyonu ve 10 ml rumen sıvısı enjekte edilmiştir. Her bir rasyon için 4 tekerrür ve 4 adet kör (sadece inokulum ve buffer) şırınga hazırlanmıştır. Şırıngalar vakumlandıktan sonra 39°C'deki su banyosunda 24 saat süre ile inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda, her şırıngadaki toplam gaz üretimi (ml) kaydedilmiş ve kör değerleri çıkarılarak net gaz üretimi hesaplanmıştır.

Tablo 2. Deneysel rasyonların bileşimi (g)

	Katkı oranı (%)			
	Kontrol	%10YB	%20YB	%30YB
Yonca	500	400	300	200
Yem Bezelyesi	-	100	200	300
Yağ	30	30	30	30
Soya küspesi	111,20	97,86	84,52	71,22
Arpa tanesi	195	226,73	258,42	292
Buğday kepeği	137,78	126,41	115,08	102,19
Tuz	10	10	10	10
Kalsiyum karbonat	15	15	15	15
Min-Vit Mix	1	1	1	1
Toplam (g)	999,98	1007	1014,02	1021,41
ME (kcal KM)	2400	2400	2400	2400
HP (%)	17	17	17	17
HY (%)	4,80	4,99	5,18	5,37
HK (%)	6,58	6,24	5,90	5,56
NDF (%)	39,1	40,64	42,96	46,20
ADF (%)	19,14	20,22	21,4	24,5

ME: Metabolik enerji, HP: Ham protein, HY: Ham yağ, HK: Ham kül, NDF: Nötral deterjan fiber, ADF: Asit deterjan fiber, Min-Vit Mix: Mineral vitamin karışımı, YB: Yem bezelyesi ikame oranı.

2.5. Metan Analizi

İnkübasyon sonunda üretilen gazın metan (CH_4) içeriği, bir kızılötesi (IR) metan analizörü kullanılarak ölçülmüştür (Goel ve ark., 2008). Mutlak metan üretimi (ml), aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

CH_4 (ml) = (GÜ (ml) * CH_4 (%)) / 100 (3)

2.6. Sindirilebilirlik ve Mikrobiyal Protein Parametrelerinin Hesaplanması

Yirmi dört saatlik inkübasyon sonunda, şırıngalardaki artıklar toplanmıştır. Gerçek sindirilebilir kuru madde (GSKM), gerçek sindirim derecesi (GSD), taksimat faktörü (TF), mikrobiyal protein üretimi (MP) ve mikrobiyal protein sentezleme etkinliği (MPSE) değerleri, Blümmel ve ark., (1997) ve Vercoe ve ark., (2010) tarafından önerilen aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır:

GSKM (mg) = [İnkübasyona konulan KM (mg) – İnkübasyon sonrası artık KM (mg)] (4)

GSD (%) = (GSKM / İnkübasyona konulan KM (mg)) (5)

TF = (GSKM / GÜ) (6)

MP = (GKM – (2,2 * GÜ)) (7)

MPSE = (GSKM – (2,2 * GÜ)) / GSKM) * 100 (8)

GÜ: Gaz üretimi 24 saat fermentasyon sonrası üretilen gaz hacmi (500 mg/KM)

2.7. İstatistiksel Analiz

Araştırmadan elde edilen veriler, tamamen şansa bağlı deneme desenine göre yürütülmüş ve IBM SPSS Statistics 20,0 (SPSS, 2011) yazılımı kullanılarak tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Farklı ikame oranlarının (0, 10, 20, 30) etkisi incelenmiştir, Ortalamalar arasındaki farkların belirlenmesinde Duncan çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır (Duncan, 1955), Ayrıca, ikame oranlarına bağlı doğrusal (L), kuadratik (Q) ve kübik (C) trendler polinom kontrast analizi ile test edilmiştir, İstatistiksel anlamlılık düzeyi olarak P<0,05 kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, yonca kuru otunun farklı düzeylerde (%0, %10, %20, %30) yem bezelyesi kuru otu ile ikamesinin, izonitrojenik ve izokalorik Tam Karışım Rasyonları (TKR) üzerindeki *in vitro* ruminal fermantasyon parametreleri, metan üretimi ve mikrobiyal protein sentezi üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular Tablo 3'te özetlenmiş olup, istatistiksel analizler önemli etkileşimleri ortaya koymuştur.

Tablo 3. Yonca kuru otunun yem bezelyesi kuru otuyla kısmen ikame edilmesinin rasyonlarının fermantasyon parametreleri ve mikrobiyal protein değerleri üzerine etkisi

	Katkı oranı (%)				***P* values**			
	Kontrol	**%10YB**	**%20YB**	**%30YB**	**SHO**	**L**	**Q**	**C**
GÜ (ml)/ inkübe edilmiş	97,67	98,00	98,67	101,67	2,59	,161	,488	,813
CH_4 (ml)/ inkübe edilmiş	14,51	14,80	15,15	15,51	1,29	,437	,970	,987
CH_4 (%)	14,84	15,05	15,35	15,26	1,05	,648	,847	,886
GSKM (mg)	365,43^{ab}	385,40^{b}	350,83^{a}	367,26^{ab}	8,52	,312	,777	,004
GSD (%)	72,53^{ab}	76,17^{b}	69,44^{a}	72,95^{ab}	1,75	,353	,962	,006
GÜ (ml)/g sindirilen KM	267,89	254,39	281,39	276,87	11,56	,179	,598	,084
CH_4(ml)/g sindirilen KM	39,78	38,45	43,22	42,24	3,66	,325	,949	,336
TF	3,74	3,93	3,56	3,61	0,16	,172	,561	,088
MP (mg)	150,55^{ab}	169,79^{b}	133,75^{a}	143,59^{ab}	12,40	,185	,607	,033
MPSE (%)	41,06	44,03	38,09	39,08	2,54	,179	,598	,084

^{abc}Aynı sembolle gösterilen ve aynı satırda yer alan ortalamalar arasında fark yoktur, SHO: Standart hata ortalaması (P<0,05), GÜ: Gaz üretimi 500 mg KM, CH_4 (ml) ve CH_4 (%): Rasyonların metan üretim miktarı 500 mg KM, GSD: Gerçek sindirim derecesi, GSKM: Gerçek sindirilebilir kuru madde 500 mg KM, TF: Taksimat faktör, MP: Mikrobiyal protein, MPSE: Mikrobiyal protein sentezleme etkinliği. YB: Yem bezelyesi ikame oranı.

Deneme rasyonlarının toplam gaz üretimi (GÜ) 97,67 ml (kontrol) ile 101,67 ml (%30YB ikame) arasında değişim göstermiş olmasına rağmen, ikame düzeyleri arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir farklılık bulunmamıştır (P>0,05). Benzer şekilde, mutlak metan üretimi (CH_4 ml) (14,51-15,51 ml) ve metan yüzdesi (CH_4 %) (%14,84-%15,35) parametrelerinde de ikame düzeylerine bağlı belirgin bir

değişim gözlenmemiştir (P>0,05). Bu sonuçlar, yem bezelyesi ikamesinin ruminal metanojenez üzerinde doğrudan bir baskılama etkisi oluşturmadığını göstermektedir.

Literatürle karşılaştırıldığında, Yi ve ark, (2023) nişasta içeriği yüksek yemlerin propiyonat üretimini artırarak H_2 kullanımını teşvik ettiğini ve dolaylı yoldan metanı azaltabileceğini belirtmiştir. Ancak bu çalışmada, yem bezelyesinin yüksek nişasta içeriğine (Tablo 1) rağmen metan üretiminde azalma olmaması, rasyonun genel lif içeriğindeki (NDF: %39,1'den %46,20'ye) artışla ilişkili olabilir. Nitekim Li ve ark, (2022), yapısal karbonhidratların (NDF/ADF) metanojenez için daha fazla H_2 kaynağı oluşturduğunu vurgulamaktadır. %20 ve %30 ikame gruplarında artan ADF içeriği (%21,4-24,5, Tablo 2), selüloz fermantasyonuna bağlı metan üretimini sürdürmüş ve nişastadan beklenen potansiyel azaltıcı etkiyi maskelemiş olabilir.

İkame oranlarının gerçek sindirilebilir kuru madde (GSKM) ve gerçek sindirim derecesi (GSD) üzerinde belirgin kübik etki yarattığı tespit edilmiştir (sırasıyla, P<0,01 ve P<0,01). En yüksek GSKM (385,40 mg) ve GSD (%76,17) değerleri %10YB ikame grubunda elde edilirken, %20YB ikame grubunda bu değerler anlamlı şekilde düşmüştür ve (sırasıyla 350,83 mg ve %69,44), %30 ikame düzeyinde ise parametreler kontrol grubu seviyelerine geri dönmüştür. Bu kübik eğilim, kısmi ikamenin sindirimi desteklerken, yüksek düzeylerin olumsuz etki yaratabileceğine ve bu etkinin lineer olmadığına işaret etmektedir.

İkamenin %10YB olduğu gruptaki olumlu sonuçlar, yem bezelyesinin yoncaya kıyasla daha dengeli karbonhidrat fraksiyonları (kolay fermente olabilir nişasta + sindirilebilir lif) sunmasıyla açıklanabilir (Titze ve ark., 2021). Bu etkileşim, rumen mikrobiyal popülasyonu için daha uygun bir substrat profili sağlayarak sindirimi artırmış olmasından kaynaklanabilir. Ancak %20YB ikamede, artan NDF/ADF oranları (Tablo 2) ve yapısal karbonhidratların mikrobiyal parçalanmaya direnci, sindirilebilirliği sınırlandırmış olabilir. Bu durum Van Soest (1994)'in yüksek NDF/ADF içerikli yemlerin ruminal parçalanmayı azaltabileceği yönündeki bulgularıyla örtüşmektedir, %30YB gruptaki kısmi toparlanma ise, rumen mikroorganizmalarının artan lifli substrata adaptasyonu veya farklı mikrobiyal popülasyonların devreye girmesiyle ilişkili olabilir.

Mikrobiyal protein üretimi (MP) değerlerinde de GSKM ve GSD'de olduğu gibi belirgin bir kübik etki gözlenmiştir (P<0,05). En yüksek MP değeri %10YB ikame grubunda (169,79 mg) kaydedilirken, en düşük değer ise %20YB ikame grubunda (133,75 mg) tespit edilmiştir. Mikrobiyal protein sentezleme etkinliği (MPSE) ve taksimat faktörü (TF) değerlerinde ise istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık oluşmamıştır (P>0,05).

İkamenin %10YB olduğu gruptaki MP artışı, bu rasyonun rumen mikroorganizmaları için optimal besin dengesini (enerji ve azot) sağladığını düşündürmektedir. Yem bezelyesinin sağladığı kolay fermente olabilir nişastanın, mikrobiyal büyüme için gerekli enerji kaynağı olarak kullanılması (Yi ve ark., 2023), MP artışını açıklayabilir. Buna karşılık, %20YB ikamede gözlenen düşüş, sindirilebilirliğin azalmasıyla paraleldir ve muhtemelen artan yapısal karbonhidrat içeriğinin rumen mikrobiyal popülasyonunun büyüme verimliliğini olumsuz etkilemesiyle ilişkilidir. Taksimat faktörü

ve MPSE'de gruplar arasında anlamlı bir fark olmamıştır (P>0,05). Taksimat faktörü önemli fermantasyon parametrelerinden biri olup, bu çalışmada 3,56 ile 3,93 arasında değişmektedir. Mevcut çalışmada elde edilen taksimat faktörleri değerleri, Blümmel ve ark. (1997b) tarafından belirtilen teorik aralığa (2,75 - 4,41) düşmektedir. Blümmel ve ark. (1997a) , yüksek taksimat faktörüne sahip kaba yemlerin daha yüksek yem tüketim değerine sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu nedenle, yem bezelyesi ilavesiyle oluşan bölme faktörlerindeki düşüş yem alımını, dolayısıyla süt üretimini veya kuzuların büyüme performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

4, Sonuç

Elde edilen bulgular, %10 yem bezelyesi ikamesinin optimum sonuçları sağladığını ortaya koymaktadır, Bu düzeyde ikame ile GSD %72,53'ten %76,17'ye çıkarak %5,02 oranında artmış, MP ise 150,55 mg'dan 169,79 mg'a yükselerek %12,8'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca, metan üretiminde herhangi bir artış gözlenmemiştir. Bu sonuçlar, hipotezimizin kısmen desteklendiğini göstermektedir: Yem bezelyesi, %10 düzeyinde ikame edildiğinde sindirilebilirlik ve mikrobiyal protein sentezini iyileştirebilmekte, ancak metan azaltımı sağlayamamaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik açısından ise, metan azaltımı için ek stratejiler (yağ asitleri, tanen ilavesi vb,) gerekliliği açıktır. Bu çalışmanın temel sınırlılığı, *in vitro* koşulların rumen dinamiklerini tam olarak yansıtamamasıdır. Bu nedenle, gelecekte yapılacak araştırmalarda *in vivo* denemelerle rumen sıvısının uçucu yağ asitleri profili ve mikrobiyal kompozisyonunun incelenmesi, farklı iklim koşullarında yetiştirilen yem bezelyesi varyetelerinin performanslarının karşılaştırılması ve yem bezelyesinin metan azaltıcı ajanlarla (örneğin tanenler, saponinler) kombinasyon halinde kullanımının değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: BAP08-2025-5561

Çıkar Çatışma Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

AOAC. Official Method of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, 15thEdition, Washington, DC, USA, 1990.

Beauchemin KA., Kreuzer M., O'Mara F., McAllister TA. Nutritional management for enteric methane abatement: A review. Animal Production Science, 2008; 48(2): 21–27. https://doi,org/10,1071/EA07199

Blümmel M., SteingaβH., Becker K. The relationship between in vitro gas production, in vitro microbial biomass yield and 15N incorporation and its implications for the prediction of voluntary feed intake of roughages. British Journal of Nutrition 1997a, 77(6): 911-921. https://doi.org/10.1079/bjn19970089

Blümmel M., Ørskov ER., Makkar HPS., Becker K. In vitro gas production: A technique revisited. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 1997b; 77(1-5): 24–34. https://doi,org/10,1111/j,1439-0396,1997,tb00734,x

Dahl WJ., Foster LM., Tyler RT. Review of the health benefits of peas (Pisum sativum L,). British Journal of Nutrition 2012; 108(S1): S3-S10. https://doi,org/10,1079/BJN2002792

Duncan DB. Multiple range and multiple F tests, Biometrics, 1955; 11(1): 1–42.

Goel G., Makkar HP., Becker K. Effects of Sesbania sesban and Carduus pycnocephalus leaves and Fenugreek (Trigonella foenum-graecum L,) seeds and their extracts on partitioning of nutrients from roughage-and concentrate-based feeds to methane. Animal Feed Science and Technology 2008; 147(1–3): 72–89.

Johnson KA., Johnson DE. Methane emissions from cattle. Journal of Animal Science 1995; 73(8): 2483-2492. https://doi,org/10,2527/1995,7382483x

Jung HG., Allen MS. Characteristics of plant cell walls affecting intake and digestibility of forages by ruminants. Journal of Animal Science 1995; 73(9): 2774-2790. https://doi,org/10,2527/1995,7392774x

Li Q., Wang R., Ma ZY., Zhang XM., Jiao J., Zhang ZG., Ungerfeld EM., Yi K., Zhang B., Long L., Long Y., Tao Y., Huang T., Greening C., Tan Z., Wang M. Dietary selection of metabolically distinct microorganisms drives hydrogen metabolism in ruminants. The ISME Journal 2022; 16(11): 2535–2546. https://doi,org/10,1038/s41396-022-01294-9

Menke KH., Raab L., Salewski A., Steingass H., Fritz D., Schneider W. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor in vitro. The Journal of Agricultural Science 1979; 93(1): 217–222.

Menke KH., Steingass H. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid, Animal Research and Development 1988; 28: 7–55.

Microsoft Corporation. Microsoft Excel, Retrieved from https://office,microsoft,com/excel 2016.

Mueller-Harvey I., Bee G., Dohme-Meier F., Hoste H., Karonen M., Kölliker R., Terrill TH. Benefits of condensed tannins in forage legumes fed to ruminants: Importance of structure,

concentration, and diet composition. Crop Science 2019; 59(3): 861–885. https://doi,org/10,2135/cropsci2017,06,0369

National Research Council. NRC, Nutrient requirements of dairy cattle (7th rev, ed,), National Academies Press,2011. https://doi,org/10,17226/9825

Soto-Navarro SA., Encinias AM., Bauer ML., Lardy GP., Caton JS. Feeding value of field pea as a protein source in forage-based diets fed to beef cattle. Journal of Animal Science 2012; 90(2): 585–591. https://doi.org/10.2527/JAS.2011-4098

SPSS. IBM SPSS statistics for Windows, version 20,0, New York: IBM Corp 440, 2011,

Titze N., Krieg J., Steingass H., Rodehutscord M. In situ crude protein and starch degradation and in vitro evaluation of pea grains for ruminants. Archives of Animal Nutrition 2021; 1–13. https://doi,org/10,1080/1745039X,2021,1994831

Vahdani N., Moravej H., Rezayazdi K., Dehghan-Banadki M. Evaluation of nutritive value of grass pea hay in sheep nutrition and its palatability as compared with alfalfa. Journal of Agricultural Science and Technology 2014; 16(3): 537–550. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143170193

Van Soest PJ. Nutritional ecology of the ruminant (2nd ed,) Cornell University Press, 1994.

Van Soest PV., Robertson JB., Lewis BA. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition, Journal of Dairy Science 1991; 74(10): 3583-3597.

Vercoe PE., Makkar HP., Schlink AC. (Eds,), In vitro screening of plant resources for extra-nutritional attributes in ruminants: Nuclear and Related Methodologies 2010; 247, Heidelberg: Springer.

Yi S., Zhang XM., Zhou J., Gao C., Ma ZY., Wang R., Tan Z., Wang M. Fermentation of increasing ratios of grain starch and straw fiber: effects on hydrogen allocation and methanogenesis through in vitro ruminal batch culture. PeerJ 2023: 11: e15050. https://doi,org/10,7717/peerj,15050

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1245-1280, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1245-1280, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

0–1 Sırt Çantası Problemleri için Transfer Fonksiyonlarına Dayalı İkili Zebra Optimizasyon Algoritması

Emine BAŞ[1*], Avni Avnullah KAŞIKÇI[2]

[1]Konya Teknik Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Konya
[2]Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yazılım Mühendisliği Programı, Konya

[1]https://orcid.org/0000-0003-4322-6010
[2]https://orcid.org/0009-0006-4698-8634
*Sorumlu yazar: ebas@ktun.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 01.07.2025
Kabul tarihi: 10.11.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Zebra
Sırt çantası problemi
İkili optimizasyon
S-Şekilli ve V-Şekilli
Transfer fonksiyonları

ÖZ

Bu çalışmada, sürekli optimizasyon problemlerini çözmeye yönelik olarak önerilmiş yenilikçi bir yaklaşım olan Zebra Optimizasyon Algoritmasını (ZOA) incelemiştir. ZOA, original makalesinde yazarlar tarafından sürekli optimizasyon problemlerini çözmedeki başarısı kanıtlanmıştır. Fakat gerçek dünya problemleri her zaman sürekli değişkenler içermemektir. Birçok gerçek dünya problemleri ayrık değişkenlerde içerebilmektedir. Bu yüzden sürekli optimizason için önerilmiş meta sezgisel algoritmaların ayrık problemler üzerinde de başarıları test edilmelidir. Bu çalışmada, ZOA algoritması ayrık bir problem türü olan ikili optimizasyon problemlerini çözebilecek şekilde tekrar yapılandırmıştır. ZOA'nın sürekli arama uzayı S- ve V- şekilli aktarım fonksiyonları ile ikili arama uzayına haritalanmıştır. Böylece İkili ZOA (BinZOA) algoritması önerilmiştir. BinZOA algoritmasının başarı testleri literatürde sıklıkla ikili optimizasyon problemleri için kullanılan 0-1 sırt çantası problemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. 0-1 Sırt çantası problemi, belirli bir kapasite kısıtı altında en değerli öğelerin seçimini içermekte olup, çeşitli alanlarda geniş uygulama alanına sahiptir. ZOA, uyarlanabilir yapısı ve zebraların doğal davranışlarından esinlenen yenilikçi arama stratejileriyle, geleneksel yöntemlere alternatif bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada, ZOA'nın ikili optimizasyona uyarlanması ele alınmış ve sekiz farklı aktarım fonksiyonu kullanılarak İkili ZOA (BinZOA1, BinZOA2, …, BinZOA8) türetilmiştir. Sırt çantası problemi üzerine yapılan karşılaştırmalı analizler, BinZOA4 varyantının en etkili BinZOA türü olduğunu ortaya koymuştur. Aktarım fonksiyonlarının tek başına sınırlı etki gösterdiği görülürken, XOR tabanlı BinZOAX varyantı tüm veri kümelerinde sıfır optimum değerden ortalama sapma (DMO) (optimal) çözümler elde ederek üstün performans sergilemiştir. BEOV3, WOS2, PSOS2, FPS2 ve BAS2 gibi mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında, hem BinZOA4 hem de BinZOAX doğruluk ve verimlilik açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, ZOA çerçevesinin karmaşık ve NP-zor problemleri çözmedeki esnekliğini ve etkinliğini doğrulamaktadır. Ayrıca, bu çalışma ZOA'nın ikili optimizasyondaki potansiyelini ortaya koymakta ve algoritmanın daha geniş uygulama alanlarına yönelik kullanılabilirliğine dair ipuçları sunmaktadır. Bununla birlikte, yalnızca aktarım fonksiyonlarına dayanmanın sınırlamaları da kabul edilerek, gelecekteki çalışmalar için çeşitli metodolojilerle geliştirme yapılması önerilmektedir. ZOA'nın ikili optimizasyon problemlerine yönelik ilk uygulamasını temsil eden bu çalışma, alana yeni bakış açıları ve analitik derinlik kazandırarak, daha ileri düzey araştırmalara zemin hazırlamaktadır.

Binary Zebra Optimization Algorithm Based on Transfer Functions for 0–1 Knapsack Problems

Research Article

Article History:
Received: 01.07.2025
Accepted: 10.11.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Zebra
Knapsack problem
Binary optimizastion
S-Shaped and V-Shaped
Transfer functions

ABSTRACT

This study examines the Zebra Optimization Algorithm (ZOA), an innovative approach proposed for solving continuous optimization problems. In the original paper, the authors demonstrated the success of ZOA in solving continuous optimization problems. However, real-world problems do not always involve continuous variables. Many real-world problems also involve discrete variables. Therefore, meta-heuristic algorithms proposed for continuous optimization should also be tested on discrete problems. In this study, the ZOA algorithm is restructured to solve binary optimization problems, a discrete type of problem. The continuous search space of ZOA is mapped to the binary search space using S- and V-shaped transfer functions. Thus, the Binary ZOA (BinZOA) algorithm is proposed. Success tests of the BinZOA algorithm are conducted on the 0-1 knapsack problem, a frequently used method for binary optimization problems in the literature. The 0-1 knapsack problem, which involves selecting the most valuable items within a given capacity constraint, has a wide range of applications across various domains. ZOA offers an alternative to traditional methods, distinguished by its adaptive structure and innovative search strategies rooted in the natural behaviors of zebras. In advancing ZOA, this paper presents its adaptation to binary optimization, incorporating eight different transfer functions to create Binary ZOA (BinZOA1, BinZOA2, …, BinZOA8). A comparative study on the knapsack problem revealed BinZOA4 as the most effective BinZOA variant. While transfer functions alone showed limited impact, the XOR-based BinZOAX variant achieved optimal, zero- the deviation of the mean from the optimum value (DMO) solutions across all datasets. When compared with established methods (e.g., BEOV3, WOS2, PSOS2, FPS2, BAS2), both BinZOA4 and BinZOAX demonstrated superior performance in accuracy and efficiency. These results confirm the ZOA framework's adaptability and strength in solving complex NP-hard problems. In addition to validating the binary optimization potential of ZOA, this investigation provides a lead for the application of the algorithm in broader fields. However, the study also recognizes the limitations of relying solely on transfer functions, suggesting avenues for future improvements through diversified methodologies. Marking the first application of ZOA to binary optimization problems, this work contributes new perspectives and analytical depth to the field, paving the way for further exploration and optimization.

To Cite: Baş E., Kaşıkçı AA. Binary Zebra Optimization Algorithm Based On Transfer Functions for 0–1 Knapsack Problems. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1245-1280.

1. Introduction

Optimization presents a challenge laden with diverse solutions, and the pursuit of optimization involves navigating through the array of potential answers to find the most optimal one for a given problem. Decision variables, constraints, and an objective function delineate the contours of each optimization problem. A spectrum of analytical methods has been introduced to tackle optimization challenges, ranging from gradient-based approaches to numerical computations. However, gradient-based methods, exemplified by techniques like gradient descent, grapple with the limitation of handling only straightforward derivative functions. These methods become impractical when applied to functions that are neither continuous nor differentiable. Moreover, the effectiveness of numerical computation techniques largely depends on the careful selection of the initial solution. Although they can be highly effective in addressing optimization problems, their performance is vulnerable to suboptimal outcomes

if the starting point is not appropriately chosen (Trojovská et al., 2022; Bas and Ihsan, 2023; Ihsan and Doğan, 2023; Sag and Ihsan, 2023; Ihsan and Doğan, 2024). The development of metaheuristic algorithms, predicated upon the quintessential principles of exploration and exploitation, endows these algorithms with the proficiency to discern apt resolutions for optimization quandaries. Exploration denotes the algorithm's aptitude for a comprehensive and precise global scrutiny of the search domain, thereby pinpointing the optimal sector. Conversely, exploitation encapsulates the algorithm's finesse in conducting a localized scrutiny of the search domain to ameliorate solutions. It is imperative for optimization algorithms to calibrate an equitable equilibrium between exploration and exploitation to secure a satisfactory resolution (Liu et al., 2013). The development of metaheuristic algorithms often involves the abstraction of processes observed in nature, including biological evolution, physical dynamics, and behavioral patterns of living organisms. These algorithms are generally classified into three main groups: swarm intelligence-based, evolutionary-based, and physics-inspired techniques (Trojovská et al., 2022). Particularly, physics-based methods have gained attention by mathematically modeling fundamental natural laws to guide the search process. Prominent examples include Simulated Annealing (SA) (Yao, 1995), which mimics the metallurgical annealing process, the Gravitational Search Algorithm (GSA) (Rashedi et al., 2009), based on Newtonian gravitational theory, and the Big Bang–Big Crunch (BB-BC) algorithm (Erol and Eksin, 2006), inspired by cosmological cycles of expansion and contraction.

Beyond these, several other algorithms rooted in physical concepts have been introduced, such as the Water Cycle Algorithm (WCA) (Sadollah et al., 2016), Nuclear Reaction Optimization (NRO) (Wei et al., 2019), Ray Optimization (RO) (Kaveh et al., 2013), Central Force Optimization (CFO) (Formato, 2007), and Galaxy-Based Search Algorithm (GbSA) (Shah-Hosseini, 2011). These techniques rely on analogies from fluid dynamics, nuclear physics, optics, force fields, and astrophysics, respectively.

Among the well-known benchmark problems used to test such algorithms is the Knapsack Problem, a fundamental combinatorial optimization problem. First formally addressed by Smith in 1997, it requires selecting a subset of items, each with a defined weight and value, to maximize total value without exceeding a given capacity constraint (Smith et al., 1997). The problem’s computational complexity increases rapidly with problem size, rendering it NP-hard for large instances (Singh, 2011). Typically, it is expressed as choosing the optimal set of items to fit within a fixed capacity, balancing between total weight and value (Kulkarni and Shabir, 2016).

The Knapsack Problem is commonly explored in two variants: classical and multiple. While the classical version focuses on a single container, the Multiple Knapsack Problem (MKP) extends this to several containers, increasing the complexity. Efficient algorithms and strong upper bounds for MKP are crucial for solving advanced resource allocation problems across diverse fields, making it a vital research area in combinatorial optimization (Smith et al., 1997; Abdel-Basset et al., 2021).

A novel upper boundary proposition is introduced for the Multiple Knapsack Problem (MKP), achieved through the transformation of MKP into the Bounded Sequential Multiple Knapsack Problem (BSMKP)

via a method of relaxation. This methodological relaxation hinges on a variant of the multiple knapsack dilemma wherein item dimensions are divisible. Empirical analyses underscore the utility of this newly proposed upper limit, especially in instances characterized by a minimal ratio of items to knapsacks. Detti's research delves into the pragmatic ramifications of this innovative strategy for MKP, critically evaluating the caliber of upper boundaries across disparate problem magnitudes (Detti, 2021). The essence of Detti's proposition is to unveil an efficacious upper boundary through the lens of "Bounded Sequential Multiple Knapsack Problem" (BSMKP), aiming to validate the efficiency of this relaxation technique in addressing the Multiple Knapsack Problem (MKP). Notably, this upper boundary shines in situations marked by diminutive ratios of items to knapsacks (Detti, 2021). In academic literature, numerous strategies have been extensively investigated to address the complexities of the Knapsack Problem. Among these, the Genetic Algorithm (GA) has emerged as a robust tool for solving combinatorial optimization tasks across diverse fields. Rezoug et al. introduced a hybrid heuristic known as the Guided Genetic Algorithm (GGA), specifically designed for the Multidimensional Knapsack Problem (MKP) (Rezoug et al., 2018). This memetic framework integrates a two-phase structure that combines preliminary data analysis with an improved GA mechanism.

The initial phase employs an efficiency-based approach to extract critical information from the dataset, which subsequently informs both the initialization of the population and the fitness evaluation process. A comprehensive experimental evaluation is conducted using standard MKP benchmark datasets, including the tuning of key GGA parameters and comparison with other established algorithms. The results demonstrate that GGA significantly outperforms the conventional GA and exhibits strong competitiveness against other heuristic methods (Rezoug et al., 2018).

Additionally, the literature presents an enhanced hybrid Genetic Algorithm, referred to as the Guided Genetic Algorithm (GGA), as an effective approach for solving the Multiple Constrained 0-1 Knapsack Problem (MKP). GGA represents a novel and strategic advancement in optimization methodologies, specifically tailored to handle the complexities inherent in MKP instances. Its design is characterized by the incorporation of a pre-optimization phase that leverages the linear programming (LP) relaxation of the MKP, enabling more informed guidance during the evolutionary search process. This approach is further strengthened by the implementation of novel repair and local search operators aimed at refining newly generated solutions. The algorithm is carefully designed to mitigate common issues such as loss of genetic diversity within the population and difficulties in converging to optimal or near-optimal solutions, thereby establishing the Guided Genetic Algorithm (GGA) as an effective method for tackling the Multiple Knapsack Problem (MKP) (Raidl, 1998).

In the context of optimization for the 0-1 Knapsack Problem, Berberler et al. introduced a genetic algorithm that represents solutions as binary strings, where each gene corresponds to the inclusion (1) or exclusion (0) of an item. Fitness evaluation involves summing the values of selected items, while parent selection is conducted via a roulette wheel mechanism, favoring individuals with higher fitness to ensure the transmission of superior traits. The crossover operator aligns genes by index to enable

dominant parents to transfer advantageous features, and mutation is applied to 25% of genes randomly, recursively over the population. This algorithm is extensively tested against randomly generated instances and benchmarked with dynamic programming, consistently achieving optimal solutions (Berberler and Güler, 2016).

Further foundational contributions include approximate algorithms proposed by Sahni et al. in 1975 and a fully polynomial-time approximation scheme developed by Ibarra and Kim in 1975 (Ibarra and Kim, 1975; Sahni et al., 1975). Martello and Toth offered a highly efficient algorithm for large-scale knapsack instances (Martello and Toth, 1990), while Horowitz et al. presented a simpler yet effective solution method (Horowitz et al., 1997). Collectively, these works underscore the rich variety of algorithmic strategies developed to address the 0-1 Knapsack Problem.

Additionally, Baş and Guner enhanced the Crayfish Optimization Algorithm by incorporating bitwise and repair operators to solve the 0-1 knapsack problem effectively (Baş and Guner, 2025).

The Zebra Optimization Algorithm (ZOA), introduced by Trojovská et al. in 2022, represents a state-of-the-art metaheuristic inspired by zebra herd behaviors (Trojovská et al., 2022). It has demonstrated strong performance across various benchmark functions, including unimodal and multimodal test suites, as well as the CEC2015 and CEC2017 reference sets. These comprehensive evaluations highlight ZOA's adaptability and robustness (Trojovská et al., 2022).

ZOA's practical applications extend notably into renewable energy optimization, such as hybrid Maximum Power Point Tracking (MPPT) for solar and wind energy systems. Its integration with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) has led to significant reductions in computational time 26.17% for solar panels and 35.5% for wind turbines thereby improving operational efficiency (Elymany et al., 2024). Furthermore, ZOA has been applied to the tuning of PID controllers within Automatic Voltage Regulator (AVR) systems, demonstrating enhanced voltage regulation when used alongside the Osprey Optimization Algorithm (OOA) (Pazhanimuthu et al., 2023). These applications affirm ZOA's potential for advancing control system performance and energy management.

Overall, these studies validate the effectiveness of ZOA as proposed by Trojovská et al., illustrating its broad applicability and potential to foster further innovation in diverse optimization problems, particularly those related to renewable energy and control systems (Trojovská et al., 2022). This research proposes the novel use of ZOA for solving the knapsack problem, addressing a gap in the literature concerning the application of bio-inspired algorithms based on zebra social and defensive behaviors. The paper presents the algorithm's mathematical formulation and procedural steps, showcasing how the natural dynamics of zebra herds can be translated into an efficient metaheuristic for binary knapsack optimization (Trojovská et al., 2022). Additionally, Baş and Baş have utilized ZOA for estimating weight parameters in multilayer perceptron neural networks (Baş and Baş, 2024a), while ZOA has also been successfully applied to feature selection and uncapacitated facility location problems, further demonstrating its versatility (Baş, 2024; Baş and Baş, 2024b).

This study introduces a novel metaheuristic algorithm inspired by the behavioral patterns of zebras, aimed at effectively solving binary knapsack problems through mathematical modeling of zebra behaviors. Experimental results on various optimization benchmarks demonstrate the Zebra Optimization Algorithm's (ZOA) strong performance. Originally designed for continuous optimization tasks, the classic ZOA algorithm has been adapted in this work to address binary optimization challenges such as the well-known binary knapsack problem. To convert the continuous search space of ZOA into a binary domain, eight well-established transfer functions are utilized comprising four S-shaped and four V-shaped variants. These transfer functions enable the transformation of continuous values into binary representations, thereby improving the balance between exploration and exploitation in the binary search process. Accordingly, eight Binary ZOA (BinZOA) variants named BinZOA1 through BinZOA8 are developed based on these transfer functions. The performance of these variants is rigorously evaluated over 25 knapsack datasets, spanning low, medium, and high dimensionalities. Results indicated that relying solely on transfer functions do not sufficiently enhance BinZOA's effectiveness. Building on this, the most successful BinZOA variant, BinZOA4, is further improved by integrating an XOR logic gate operation, resulting in a new variant termed BinZOAX. BinZOAX demonstrated remarkable success by achieving zero optimality gaps across all tested knapsack datasets. Both BinZOA4 and BinZOAX are benchmarked against six other heuristic algorithms from the literature namely BEOV3, WOS2, PSOS2, FPS2, and BAS2. While BinZOA4 showed competitive but slightly lower performance, BinZOAX consistently ranked first by attaining zero-DMO results in every instance. These findings confirm the effectiveness of the logic gate-enhanced BinZOAX variant for binary optimization problems and suggest promising potential for broader applications in this domain. This study marks the first introduction of a transfer function-based binary adaptation of ZOA, enriching the metaheuristic optimization literature with valuable insights and tools.

1.1. Main Contributions of The Study

In this study, the recently proposed ZOA algorithm is examined. A review of the literature on the ZOA algorithm reveals its success in continuous optimization problems. However, real-world problems do not always involve continuous variables. Most engineering problems involve discrete variables. For optimization algorithms to solve such problems, continuous search space structures must be modified into discrete search space structures. Binary optimization problems are a type of discrete optimization problem. In discrete optimization problems, the search space consists of real integer values, while in binary optimization problems, the search space consists of binary values. This study examines in detail the success of the binary version of the ZOA algorithm on the discrete problem of the 0-1 knapsack problem. The main contributions of the study to the literature are as follows:

- Although the binary version of the ZOA algorithm, Binary ZOA, has been presented in various papers by Baş and colleagues on feature selection and UFL problems, it has not been adequately compared with literature studies. This study addresses this gap. The binary version of ZOA,

BinZOA, is examined based on transfer functions and its performance on the 0-1 knapsack problem is analyzed.

- While the primary goal of this study was to analyze BinZOA's performance on the 0-1 knapsack problem, it was found that even the most successful BinZOA variant, BinZOA4, was insufficient to solve binary optimization problems. Therefore, BinZOA's binary search space was developed using xor gates. This newly derived version was named BinZOAX. This paper introduced the BinZOAX version to the literature for the first time.

1.2. Purpose Of The Study

The aim of this study is to demonstrate the success of the newly proposed ZOA algorithm for continuous optimization problems in binary optimization problems in recent years. Real-world problems do not always consist of continuous variables. In such cases, the proposed metaheuristic algorithms require some updates and improvements to their structures to provide solutions to discrete problems as well. The aim of this study is to configure ZOA to provide solutions to binary problems and to improve its search space exploration and exploitation capabilities. Binary problems are a subset of discrete problems. Instead of real integer values in discrete problems, binary problems contain binary values. These binary values are used in the problem-solving phase. In this study, we utilized S- and V-shaped transfer functions, frequently used in the literature, to transform the continuous search space of the ZOA algorithm into a binary search space. Because there is more than one transfer function, the success of these functions on ZOA is analyzed in this study. Furthermore, the population size and the maximum iteration number, which are fixed parameters in optimization algorithms, are also analyzed in this study. Detailed parameter analyses are important for metaheuristic algorithms. In this study, the success of the proposed Binary ZOA algorithm was tested on the 0-1 knapsack problem, a challenging binary problem. The 0-1 knapsack problem was chosen because its optimal values are generally known in the literature and because open access datasets are abundant. Analyses revealed that BinZOA versions were not sufficiently successful. Binary search space exploration and exploitation capabilities were enhanced using xor logic gates, and the BinZOAX algorithm was proposed. BinZOAX achieved outstanding success by finding optimal values on 25 knapsack datasets. This demonstrates that BinZOAX can also successfully solve various binary optimization problems.

Section 2 of the study details the working structures of the ZOA, BinZOA, and BinZOAX algorithms. Section 3 analyzes the success of the BinZOA and BinZOAX algorithms on 0-1 knapsack problems using experimental results. BinZOAX's success is demonstrated by comparing the results of literature algorithms (BEOV3, WOS2, PSOS2, FPS2, and BAS2) with those of BinZOAX. Section 4 interprets the results, discusses BinZOAX's limitations, and discusses planned applications for future work.

2. Material And Methods

2.1. Zebra Optimization Algorithm (ZOA)

This section introduces the proposed nature-inspired Zebra Optimization Algorithm (ZOA) and presents its corresponding mathematical formulation.

Inspiration:

Zebras, belonging to the equine family, are indigenous to the regions of Eastern and Southern Africa. They are most recognizable by their distinctive black and white striped coats, with the stripes usually running vertically along the neck and body. These unique markings provide various benefits such as camouflage against predators and protection from biting insects. Zebras typically have a body length ranging from 210 to 300 cm, tails measuring between 38 and 75 cm, shoulder heights from 110 to 160 cm, and weigh between 175 and 450 kilograms. Known for their endurance, zebras possess long, slender legs that enable them to reach high speeds when necessary. Similar to other wild equids, each of their feet has a single toe, and their long necks and heads are adapted for efficient grazing on grasses (Trojovská et al., 2022).

In the wild, zebras exhibit two primary social behaviors: guiding the group during foraging and employing defensive tactics against predators. When searching for food, a leading zebra directs the herd toward areas with plentiful grazing, with the rest following closely. To escape threats, zebras often utilize a zigzag running pattern but may also band together to confuse or deter predators. These complex social interactions have been mathematically modeled and serve as the core inspiration behind the Zebra Optimization Algorithm (ZOA) (Trojovská et al., 2022).

Mathematical Modelling:

This subsection presents mathematical simulations of natural zebra behaviors to formulate the modeling of the Zebra Optimization Algorithm (ZOA).

Initialization:

The Zebra Optimization Algorithm (ZOA) is conceptualized as a population-based metaheuristic optimization framework, wherein the metaphorical representation of the population units as zebras stands central. Mathematically, each zebra is delineated as a potential solution vector within the optimization landscape. The habitat or plain inhabited by these zebras is analogous to a specific locus within the multidimensional search space of the problem at hand. The position of each zebra within this search space inherently dictates the value assignments to the decision variables under consideration. Thus, within the ZOA paradigm, each zebra is effectively a vectorial representation of a candidate solution, encapsulating the variable values as its components. The collective of zebras, or the population, is mathematically structured into a matrix form, facilitating the representation and manipulation of multiple candidate solutions simultaneously. The inception of the zebra positions within this matrix is

initiated through stochastic processes, thereby determining the preliminary configuration of the ZOA population matrix (Trojovská et al., 2022).

Further, the decision-making parameters for each zebra, or optimization agent, are intrinsically tied to its spatial coordinates within the search domain. Hence, every zebra within the ZOA framework is not merely a metaphorical entity but serves as a vectorial embodiment of solution hypotheses, with each vector component mirroring a decision variable pertinent to the optimization challenge. This vector is, in essence, a conduit through which the ZOA seeks to navigate the solution space. The architectural underpinnings of the zebra collective, or population matrix, are thus established through a matrix representation, offering a structured approach to simulate and evaluate the efficacy of multiple solution vectors in parallel. The initial deployment of zebras within the search terrain is governed by aleatory mechanisms, setting the stage for the exploratory dynamics of the ZOA. Equation (1) delineates the formal parameters and structure defining the initial ZOA population matrix, marking the commencement of the optimization journey (Ghadi et al., 2023).

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N\times m} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & \cdots & x_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} & \cdots & x_{i,m} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,j} & \cdots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N\times m}, \tag{1}$$

In this context, X denotes the entire zebra population, while X_i refers to the i^{th} individual zebra. The element $x_{i,j}$ represents the value assigned by the i^{th} zebra to the j^{th} decision variable. The population size, or the total number of zebras, is given by N, and m indicates the number of decision variables involved. Each zebra corresponds to a potential solution within the optimization problem. Consequently, the objective function can be calculated based on the variable values suggested by each zebra. The resulting objective function values are collectively represented as a vector, as shown in Equation (2) (Trojovská et al., 2022).

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N\times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N\times 1}, \tag{2}$$

The vector F contains the objective function values corresponding to each zebra, with F_i representing the objective function value for the i^{th} zebra. By comparing these values, the quality of each candidate solution can be assessed, enabling the determination of the optimal solution. For minimization tasks, the zebra with the lowest objective function value is considered the best solution, while for maximization problems, the zebra with the highest value holds that distinction. Since the zebras' positions-and thus

their objective values-are updated at every iteration, it is essential to re-evaluate and identify the best solution in each cycle (Trojovská et al., 2022).

The algorithm updates the population members by mimicking two key natural behaviors of wild zebras: grazing and defense against predators. Accordingly, each iteration in ZOA involves two main stages:

(i) Grazing,

(ii) Defense strategies against predators.

Phase 1: Foraging Behavior

In the initial phase, individuals update their positions by simulating the grazing behavior of zebras. Zebras primarily feed on grasses and reeds but can adapt their diet to include buds, fruits, bark, roots, and leaves when preferred food is scarce. They spend about 60% to 80% of their time grazing, depending on the quality and availability of vegetation. Plain zebras consume taller, less nutritious grasses, which helps create better conditions for other species that feed on shorter, more nutrient-rich grasses below. In the Zebra Optimization Algorithm (ZOA), the best individual is called the lead zebra and guides others toward its position in the search space during the grazing phase. The position updates during this phase are mathematically expressed by specific equations (Trojovská et al., 2022).

$$x_{i,j}^{\text{new},P1} = x_{i,j} + r \cdot \left(PZ_j - I \cdot x_{i,j}\right) \tag{3}$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{\text{new},P1}, & F_i^{\text{new},P1} < F_i \\ X_i, & \text{else} \end{cases}, \tag{4}$$

where, $x_i^{\text{new},P1}$ represents the new state of the i^{th} zebra in the first phase, $x_{i,j}^{\text{new},P1}$ is the j^{th} dimension value, $F_i^{\text{new},P1}$ is the objective function value, PZ is the lead zebra, PZ_j is its j^{th} dimension, r is a random number in the [0, 1] range, and $I = round\ (1 + rand)$, where $rand$ is a random number in the [0, 1] range. Thus, $I \in 1,2$, and if the parameter I is 2, there will be much more variation in the population movement during this phase (Trojovská et al., 2022).

Phase 2: Defense Strategies Against Predators

In the second phase of the Zebra Optimization Algorithm (ZOA), the position updates of individuals are inspired by zebras' defensive behaviors against predators. Lions are the main threats to zebras, but other predators such as cheetahs, leopards, wild dogs, and brown hyenas also pose significant risks. Zebras adjust their defense tactics depending on the predator's nature and behavior. Against lions, zebras typically use evasive actions like zigzag running and sudden, unpredictable turns to avoid capture. On the other hand, when facing smaller predators like hyenas or wild dogs, zebras often respond more aggressively by grouping together and coordinating their defense to confuse and discourage the

attackers. In ZOA, these behaviors are abstracted into two distinct scenarios, each selected with equal probability for updating positions during this defense phase (Trojovská et al., 2022).

(i) A zebra succumbs to a lion attack, prompting the zebra to adopt an evasive strategy;

(ii) Other predators assail a zebra, eliciting the zebra to opt for an aggressive strategy. In the former scenario, when zebras are subjected to lion attacks, they expeditiously retreat from the locus of the lion's assault within their present states. Mathematically articulated, this strategy can be modeled employing Equation (5). In the latter scenario, when other predators initiate an assault on a zebra, fellow zebras within the herd converge towards the targeted zebra, assume a defensive posture, and endeavor to confound the assailant. The mathematical formulation of this strategy is similarly expressed using Equation (5). During the process of updating the positions of zebras, a novel position is accepted for a zebra if it yields a superior value for the objective function in the new position. This updating condition is formalized by Equation (6) (Trojovská et al., 2022).

$$x_{i,j}^{\text{new},P2} = \begin{cases} S_1: x_{i,j} + R \cdot (2r-1) \\ \quad \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot x_{i,j}, & P_s \leq 0.5 \\ S_2: x_{i,j} + r \cdot \left(AZ_j - I \cdot x_{i,j}\right), & \text{else} \end{cases} \tag{5}$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{\text{new},P2}, & F_i^{\text{new},P2} < F_i \\ X_i, & \text{else}, \end{cases} \tag{6}$$

where, $x_{i,j}^{\text{new},P2}$ represents the new state of the i^{th} zebra in the second phase, $x_{i,j}^{\text{new},P2}$ denotes its j^{th} dimensional value, F_i^{new} (P2) represents the updated objective function value, where t denotes the current iteration number and T is the total number of iterations allowed. The constant R is set to 0.01, and P_s indicates the probability of randomly choosing between two strategies, ranging from 0 to 1. AZ refers to the state of the attacked zebra, with AZ_j being its value in the j^{th} dimension. Figure 1 illustrates the overall flowchart of the Zebra Optimization Algorithm (ZOA), while Figure 2 provides the corresponding pseudo-code for the algorithm's implementation (Trojovská et al., 2022).

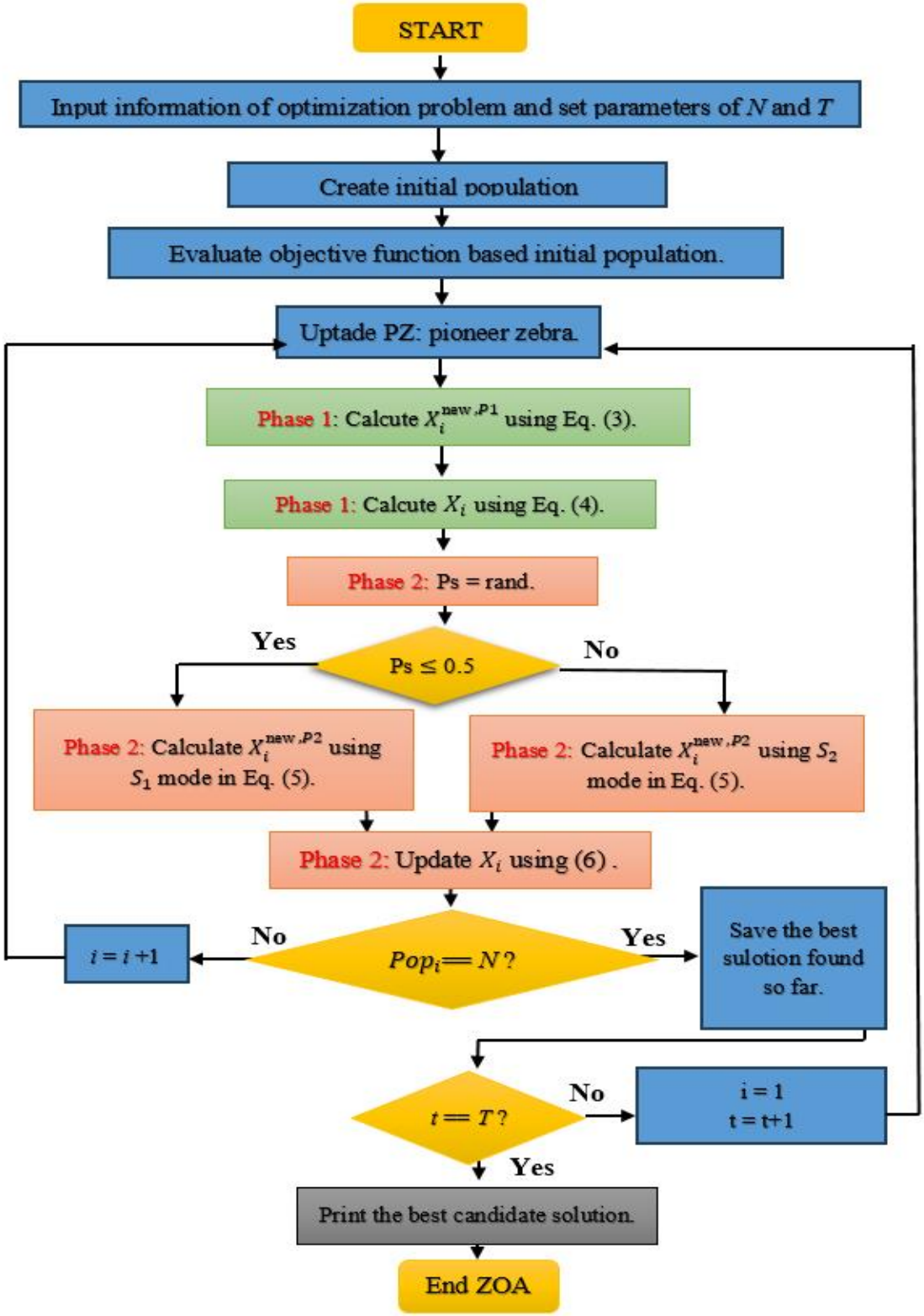


Figure 1. The flowchart of ZOA (Trojovská et al., 2022)

Start ZOA:
Input: The optimization problem information.
Set the number of iterations (T) and the number of zebras' population (N).
Initialize the position of zebras and evaluate their fitness function.
For t = 1: *T*
  Update zebra leader (ZL).
  For i = 1: *N*
    Stage I: Foraging activity
    Calculate new status of the i^{th} zebra using Eq. (3).
    Update the i^{th} zebra using Eq. (4).
    Stage II: Anti-predators' defensive techniques
    Ps = rand
    If Ps <0.5 Then
      Exploitation (Defensive technique against lion)
      Calculate the new status of the i^{th} zebra using Eq. (5).
    Else
    Exploration (Defensive techniques against other predators)
      Calculate the new status of the i^{th} zebra using Eq. (5).
    End If
    Update the i^{th} zebra using Eq. (6).
  End For
Save best candidate solution so far.
End For
Output: The best solution obtained by ZOA for given optimization problem.
End ZOA.

Figure 2. The pseudo-code of ZOA (Trojovská et al., 2022)

2.1.1. The computational complexity of ZOA

The computational complexity of ZOA in the initialization phase is obtained by multiplying the number of zebras (N) and the problem size variables (m) ($O(N \times m)$). In ZOA, in each iteration, each population member is updated in two stages and the objective function is evaluated. This is obtained by computation in $O(2 \times N \times m \times T)$, where T represents the maximum number of iterations. The total computational complexity for ZOA is calculated as $O(N \times m \times (1 + 2 \times T))$ (Trojovská et al., 2022).

2.2. Binary Zebra Optimization Algorithm (BinZOA)

This section introduces a binary version of the Zebra Optimization Algorithm (BinZOA) tailored for solving 0-1 knapsack problems. Although the original ZOA excels in continuous optimization, it cannot directly handle discrete problems like the knapsack. To overcome this limitation, the algorithm is adapted to work within a binary search space by applying transfer functions that convert continuous outputs into binary decisions where 0 means excluding an item and 1 means including it in the knapsack. By mapping ZOA's continuous search space to a binary domain, BinZOA becomes suitable for discrete optimization tasks. Literature offers various transfer functions to perform this conversion, such as S-shaped, V-shaped, taper-shaped, U-shaped, Z-shaped, and X-shaped functions. Among these, S-shaped and V-shaped functions are the most widely used. This work employs four different S-shaped and four

different V-shaped transfer functions, summarized in Table 1 along with their mathematical expressions and key features. Consequently, eight BinZOA variants are created: BinZOA1 to BinZOA4 use transfer functions S1 to S4, while BinZOA5 to BinZOA8 correspond to V1 through V4. The transformation of continuous values into binary form follows the mathematical expression given in Equation (7).

$$X_{bin(i,:)} = transfer_{func}(X(i,:), i, m, transfer_{number}) \tag{7}$$

According to the equation above, $x_{bin(i,:)}$ represents the binary version of the i^{th} row of the X matrix. The function call to $transfer_{func}(X(i,:), i, m, transfer_{number})$ refers to a process that converts the value at the i^{th} index of the vector, utilizing the dimension (m) and the specified transfer function ($transfer_{func}$). The $X_{bin(i,:)}$ matrix can be expressed as follows in the subsequent equation.

$$X_{bin(i,:)} = \begin{bmatrix} X_Bin_1 \\ \vdots \\ X_Bin_i \\ \vdots \\ X_Bin_N \end{bmatrix}_{N \times m} \tag{8}$$

In the study, all elements of the population are converted into discrete expressions as depicted in Equation (7), and this conversion is applied to the entire population. A total of eight transfer functions are used as the transfer function. The $transfer_{number}$ variable in Equation (7) indicates which of these eight functions will be utilized. The $transfer_{func}$ is designed to transform a population using a specific type of transfer function (S-Shape or V-Shape) and a particular set of parameters. Figure 3 shows the pseudo-code of BinZOA.

Table 1. S-Shaped and V-Shaped transfer functions (Ervural et al., 2023; Abdel-Basset et al., 2021)

S-Shaped		V-Shaped	
S1(x)	$\frac{1}{1+e^{-x}}$	**V1*(x)***	$\left\lvert \frac{2}{\pi} arc\mathrm{Tan}\left(\frac{2}{\pi}x\right) \right\rvert$
S2*(x)*	$\frac{1}{1+e^{-2x}}$	**V2*(x)***	$\lvert \tan h(x) \rvert$
S3*(x)*	$\frac{1}{1+e^{-\frac{x}{2}}}$	**V3*(x)***	$\left\lvert \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right\rvert$
S4*(x)*	$\frac{1}{1+e^{-\frac{x}{3}}}$	**V4*(x)***	$\left\lvert \mathrm{erf}(\frac{\sqrt{\pi}}{2}x) \right\rvert$

Start BinZOA:
Input: The optimization problem information.
Set the number of iterations (T) and the number of zebras' population (N).
Initialize the position of zebras and evaluate their fitness function.
Convert position of zebras to binary form with transfer function using Eq. (7).
For t = 1: *T*
  Update zebra leader (ZL).
  Convert ZL to binary form with transfer function using Eq. (7).
  For *i* = 1: *N*
    Stage I: Foraging activity
    Calculate new status of the i^{th} zebra using (3).
    Convert i^{th} zebra to binary form with transfer function using Eq. (7).
    Update the i^{th} zebra using (4).
    Stage II: Anti-predators' defensive techniques
    Ps= rand
    If *Ps* <0.5 Then
      Exploitation (Defensive technique against lion)
      Calculate the new status of the i^{th} zebra using (5).
    Else
    Exploration (Defensive techniques against other predators)
      Calculate the new status of the i^{th} zebra using (5).
      Convert i^{th} zebra to binary form with transfer function using Eq. (7).
    End If
    Update the i^{th} zebra using (6).
  End For
  Save best candidate solution so far.
End For
Output: The best solution obtained by BinZOA for given optimization problem.
End BinZOA.

Figure 3. The pseudo-code of BinZOA (Trojovská et al., 2022)

2.2.1. The computational complexity of BinZOA

Since the BinZOA algorithm code does not contain any loop structures that would affect the calculation of complexity differently than the ZOA algorithm, the computational complexities of BinZOA and ZOA algorithms are the same. In other words, the computational complexity of BinZOA is $O(N \times m \times (1 + 2 \times T))$.

2.2.2. XOR logic gate method (for BinZOAX)

In recent years, logic gates have been frequently used in the development of binary optimization algorithms (Baş et al., 2024). It is very suitable for binary optimization problems because the logic gate inputs are binary values ({0, 1}) and the output values are binary values ({0, 1}). In particular, the xor logic gate (exclusive OR) produces four different states for two different variables (x and y), and 50% of the outputs are 1 value and 50% are zero values. The xor truth table of xor logic gate is shown in Table 2. In this study, logic gates were used in the development of BinZOA. It has been shown in the experimental part of the study that transfer functions alone are not sufficient to explore binary space. Therefore, after the most successful transfer function was determined as S4, binary candidate solutions for BinZOAS4 are produced using the xor logic gate method. The xor logic gate method is shown in Equation (9). The candidate zebra population produced with this xor gate is effective in increasing the

performance of BinZOA. The proposed new BinZOA variation is named BinZOAX.

$$X_{bin_new(i)} = (X_{bin(i)} \text{ xor } (X_{bin(rand)} \text{ xor } PZ_{bin})) \quad (9)$$

where $X_{bin_new(i)}$ represents i^{th} new binary the zebra, $X_{bin(i)}$ represents i^{th} binary the zebra, $X_{bin(rand)}$ represents a random binary the zebra, and PZ_{bin} represents the best binary zebra in binary zebra population.

Table 2. Truth table of xor logic gate

Input variables		Output variable
A	***B***	***C***
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

The computational complexity of BinZOAX:

Since the BinZOAX algorithm code does not contain any loop structures that would affect the calculation of complexity differently than the ZOA and BinZOA algorithms, the computational complexities of BinZOAX, BinZOA, and ZOA algorithms are the same. In other words, the computational complexity of BinZOAX is *O(N × m × (1 + 2 × T)).*

2.3. Knapsack Problem Definition

The 0-1 knapsack problem is a classic optimization challenge that involves selecting a subset of items to include in a knapsack without exceeding its capacity. This problem belongs to the NP-hard category, meaning that the time required to find an exact solution grows rapidly as the problem size increases. The mathematical formulation of the 0-1 knapsack problem is given in Equation 10 (Abdel-Basset, et al., 2021; Baş, 2023).

$$Max \quad f(x) = \sum_{s=1}^{m} X_{bin(s)} \times Profit_s, \quad (10)$$

$$Subject\ to\ = \sum_{s=1}^{m} Weight_s \times X_{bin(s)} \leq Capacity_{bag}$$

$X_{bin(s)} \epsilon\ 0\ or\ 1$, *s=0, 1, 2, …, m*

where $Profit_s$ represents the profit (or value) of each item, while $Weight_s$ denotes the weight of each item. The maximum carrying capacity of the knapsack is defined as Capacitybag. The variable m indicates the dimension, and $X_{bin(s)}$ is a binary decision variable, where $X_{bin(s)} = 1$ means the item is

included in the knapsack, and $X_{bin(s)} = 0$ means it is excluded.

3. Experimental Result And Discussion

This study presents a tailored adaptation of the Zebra Optimization Algorithm (ZOA) for solving the knapsack problem, referred to as Binary ZOA (BinZOA). Eight different BinZOA variants have been developed based on distinct S-shaped and V-shaped transfer functions. The original ZOA code is obtained from the Mathworks repository and then modified accordingly.

3.1. Experimental Setup

The all implementations have been coded in the Matlab programming environment, and performance evaluations have been conducted using a computer equipped with an Apple Silicon M2 CPU and 16.0 GB of RAM. All applications performed in this study are performed on a computer with the hardware and software specifications specified in Table 3.

Table 3. Computer specifications

Name	Settings
Hardware	16C
CPU	Apple M2 Pro
Frequency	3.49 Mhz
RAM	16.0 GB
Operation System	macOS Sonoma
Software Environment	Matlab R2018b

3.2. Details Of The Dataset Used In The Study

BinZOA's performance is tested on small, medium, and large-scale knapsack datasets, using a collection of 25 diverse problem instances. Table 4 details the definitions of these datasets, which include problem sizes ranging from 8 to 24 items and are sourced from https://pages.mtu.edu/~kreher/cages/Data.html.

Table 4. Details of the dataset used in the study

Dataset ID	Max. bag weight	Dimension	Opt. value	Dataset ID	Max. bag weight	Dimension	Opt. value
KP8a	1863633	8	3924400	***KP16d***	4550938	16	9348889
KP8b	1822718	8	3813669	***KP16e***	3760429	16	7769117
KP8c	1609419	8	3347452	***KP20a***	5169647	20	10727049
KP8d	2112292	8	4187707	***KP20b***	4681373	20	9818261
KP8e	2493250	8	4955555	***KP20c***	5063791	20	10714023
KP12a	2805213	12	5688887	***KP20d***	4286641	20	8929156
KP12b	3259036	12	6498597	***KP20e***	4476000	20	9357969
KP12c	2489815	12	5170626	***KP24a***	6404180	24	13549094
KP12d	3453702	12	6992404	***KP24b***	5971071	24	12233713
KP12e	2520392	12	5337472	***KP24c***	5870470	24	12448780
KP16a	3780355	16	7850983	***KP24d***	5762284	24	11815315
KP16b	4426945	16	9352998	***KP24e***	6654569	24	13940099
KP16c	4323280	16	9151147				

3.3. Parameter Analysis On BinZOA1 For KPs

This subsection analyzes two variable parameter values (population size (*N*) and maximum number of cycles (*T*)) that directly affect the success of ZOA. The ZOA algorithm does not have a fixed parameter setting. Therefore, this subsection focuses on population size and maximum operating cycle analysis. To analyze the impact of population size (*N*) and maximum number of cycles (*T*) on algorithm performance, BinZOA1 is evaluated across ten different population sizes and six different maximum number of cycles (population size (*N*) = {10, 20, ..., 100}; maximum number of cycles (*T*)={100, 500, 1000, 2000, 5000, and 10000}) on five knapsack instances (KP16a to KP16e), with results shown in Table 5 and Table 6. The maximum iteration count is fixed at 500 for population size (*N*) analysis. The population size (*N*) is fixed at 20 for maximum number of cycles (*T*) analysis. Findings indicate that increasing the population size improves BinZOA1's success rate but also leads to longer computational times. The decrease in running time in Table 5 depends on the population size. As the population size increases, the study time also increases. Table 5 shows an inverse relationship between the population value and running time. This situation indicates the need to choose a more reasonable population size rather than a high one. However, for fairness in literature comparisons, this value is kept equal across all algorithms.

A similar situation to the population size analyses is observed in the maximum cycle analyses. Increasing the maximum number of cycles increased the success rate of BinZOA1 but prolonged the runtimes. Analyses of BinZOA variants determined a population size as 20 and a maximum number of cycles as 5000. These values are chosen because these parameter values are frequently used in literature comparisons and to ensure fair comparisons.

Table 5. The average fitness and time results of population size (*N*) analysis on BinZOA1 for KPs (*T*=500; *N*={10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, and 100})

Dataset ID	BinZOA1									
	Average									
	10	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**
KP16a	7801929	7830468	7830981	7838511	7834770	7838479	7842529	7847191	**7849087**	7847191
KP16b	9298973	9289819	9327551	9336867	9342377	9339211	**9352472**	9349075	9346436	9351419
KP16c	9084718	9112616	9126483	9134266	9143582	9134670	9130890	9142617	**9146223**	**9146223**
KP16d	9319854	9329207	9335665	9335665	9339707	9346449	9334822	9347669	9346449	**9347669**
KP16e	7746434	7748888	7760707	7759720	7763531	7761014	7758350	7761697	7767254	**7767633**
	Time									
KP16a	**0.3716**	0.4015	0.4300	0.4641	0.5062	0.4965	0.5645	0.5857	0.6189	0.6330
KP16b	**0.3106**	0.3327	0.3613	0.3984	0.4260	0.4347	0.4871	0.5179	0.5636	0.5703
KP16c	**0.2973**	0.3306	0.3628	0.4076	0.4382	0.4411	0.4910	0.5317	0.5390	0.5562
KP16d	**0.2993**	0.3376	0.3839	0.4011	0.4945	0.4344	0.5509	0.4815	0.5348	0.5365
KP16e	**0.3038**	0.3858	0.4150	0.3816	0.4316	0.4928	0.5226	0.4845	0.5209	0.5146

Table 6. The average fitness and time results of maximum number of cycles (*T*) analysis on BinZOA1 for KPs (*N*=20; *T*={100, 500, 1000, 2000, 5000, and 10000})

Dataset ID	BinZOA1					
	Average					
	100	**500**	**1000**	**2000**	**5000**	**10000**
KP16a	7779060.75	7830468	7837553.1	7841580.5	7847616.55	**7850983**
KP16b	9230345.5	9289819	9343808.55	9349338.5	9349338.5	**9352998**
KP16c	9061085.85	9112616	9133412.7	9139304.95	9146971.45	**9151147**
KP16d	9274849.05	9329207	9336329.9	9341536.5	9345517.7	**9348889**
KP16e	7709982.4	7748888	7761035.8	7766890.85	7767632.9	**7769117**
	Time					
KP16a	**0.2814**	0.4015	0.4894	0.5944	0.9321	1.5407
KP16b	**0.2840**	0.3327	0.3892	0.5290	0.8774	1.5642
KP16c	**0.2807**	0.3306	0.4098	0.5139	0.8860	1.6575
KP16d	**0.2847**	0.3376	0.3900	0.4991	0.8649	1.7010
KP16e	**0.2849**	0.3858	0.3943	0.6835	0.8800	1.5409

3.4. Detailed Analysis Of BinZOA Variations For KPs

For the comparative study of BinZOA variants, the parameters are set as summarized in Table 7: population size was fixed at 20, maximum iterations at 5000, and problem dimensions varied with dataset sizes of 8, 12, 16, 20, and 24. Each variant is independently run 20 times to ensure statistical robustness. The analysis computed key performance metrics including best, worst, average, standard deviation (std), and the deviation of the mean from the optimum value (DMO) metrics (defined in Equation (11) (Baş, 2023)). Results are presented both in tables and column charts to support clear comparison and interpretation.

$$DMO(\%) = \frac{(Opt.\ fitness\ value - average\ fitness\ value)}{Opt.\ fitness\ value} \times 100 \tag{11}$$

When analyzing the variations of the eight transfer functions (S-shaped and V-shaped) in BinZOA, the best results as indicated in Table 8 reveal that the optimal values change as the number of dimensions increases. The best results are found for dimensions 8, 12, 16, 20, and 24. These best results are distinctly highlighted and emphasized in bold. The worst outcomes for the BinZOA variations across the 8 transfer functions are presented in Table 9. The worst results do not show any variation across the 8 different transfer functions in 8 dimensions, indicating consistency in performance across these functions. Average results are provided in Table 10 and a comparison of the sums of these results across the 8 transfer functions is shown in Figure 4. Standard deviation values are depicted in Table 11 and a comparison of the sums of these results across the 8 transfer functions is shown in Figure 5. Table 12 presents the DMO values, while Figure 6 compares the summed results of all eight transfer function variants. Based on the overall average results, BinZOA3 emerged as the best-performing variation. When considering the total standard deviation, BinZOA4 shows the most consistent performance. The DMO values align closely with the standard deviation findings, reinforcing that BinZOA3 and BinZOA4 are the most effective BinZOA variants overall. Conversely, BinZOA2 and BinZOA8 were identified

as the least successful.

Figures 7 through 9 display convergence graphs for the BinZOA variants on three randomly selected knapsack problem instances. These graphs visually demonstrate the algorithm's performance, effectiveness, and stability across different problem settings. They provide insight into how quickly and reliably each BinZOA variant converges toward optimal or near-optimal solutions, illustrating the dynamics of the search process in various scenarios.

Tables 13 and 14 present the results of the Wilcoxon signed-rank test conducted between BinZOA4 the most successful BinZOA variant and the other BinZOA variants. The Wilcoxon test is a non-parametric statistical method used to assess whether two related samples differ significantly. A *p* value below 0.05 indicates a statistically significant difference between the results, corresponding to an *h* value of 0. Conversely, a *p* value above 0.05 suggests no significant difference, with an *h* value of 1 (Baş and Yildizdan, 2024). Table 12 reports the *p* values, while Table 14 shows the associated *h* values.

The analysis reveals that BinZOA4 produces significantly different results from BinZOA1, BinZOA2, and BinZOA8 when applied to high-dimensional knapsack problems. However, for lower-dimensional instances, the results across all BinZOA variants tend to be similar. Furthermore, there is no significant difference detected between the outcomes of BinZOA4 and BinZOA3. Similarly, BinZOA4 and BinZOA5 yield comparable results overall, except in the cases of KP16d, KP16e, and KP20b problem instances, where some differences are observed.

Table 7. Basic settings used in the study for BinZOAs

Parametric variables	Value
Number of zebras in the population (*N*)	20
Maximum number of cycles (*T*)	5000
Knapsack Problem Dimension (*m*)	8, 12, 16, 20, 24

Table 8. The best fitness values of the BinZOAs on binary conversion functions (S- and V- shaped transfer functions)

Dataset ID	BinZOAs							
	BinZOA1	**BinZOA2**	**BinZOA3**	**BinZOA4**	**BinZOA5**	**BinZOA6**	**BinZOA7**	**BinZOA8**
KP8a	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400
KP8b	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669
KP8c	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452
KP8d	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707
KP8e	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555
KP12a	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887
KP12b	6498597	6498597	6498597	6498597	6498597	6498597	6498597	6498597
KP12c	5170626	5170626	5170626	5170626	5170626	5170626	5170626	5170626
KP12d	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404
KP12e	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472
KP16a	7850983	7850983	7850983	7850983	7850983	7850983	7850983	7850983
KP16b	9352998	9352998	9352998	9352998	9352998	9352998	9352998	9352998
KP16c	9151147	9151147	9151147	9151147	9151147	9151147	9151147	9151147
KP16d	9348889	9348889	9348889	9348889	9348889	9348889	9348889	9348889
KP16e	7769117	7769117	7769117	7769117	7769117	7769117	7769117	7769117
KP20a	10727049	10727049	10727049	10727049	10727049	10705222	10727049	10717569
KP20b	9818261	9774200	9818261	9818261	9818261	9818261	9818261	9790311
KP20c	10714023	10712572	10714023	10714023	10714023	10714023	10714023	10712572
KP20d	8915396	8929156	8929156	8929156	8929156	8929156	8929156	8929156

KP20e	9357969	9357969	9357969	9357969	9357969	9357969	9357969	9357969
KP24a	13521334	13517399	13521334	13521334	13514028	13514028	13517963	13517963
KP24b	12176736	12162024	12213704	12233713	12220754	12193732	12190267	12170258
KP24c	12445379	12437046	12445379	12408833	12448780	12440695	12448780	12448780
KP24d	11810051	11761633	11815315	11801123	11793333	11780518	11783685	11780518
KP24e	13897782	13885329	13930566	13889768	13940099	13925043	13909292	13858935

Table 9. The worst fitness values of the BinZOAs on binary conversion functions (S- and V- shaped transfer functions)

	BinZOAs							
Dataset ID	**BinZOA1**	**BinZOA2**	**BinZOA3**	**BinZOA4**	**BinZOA5**	**BinZOA6**	**BinZOA7**	**BinZOA8**
KP8a	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400
KP8b	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669
KP8c	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452
KP8d	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707
KP8e	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555
KP12a	5688887	5682404	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887
KP12b	6498597	6460377	6498597	6498597	6473019	6498597	6498597	6498597
KP12c	5170626	5164941	5170626	5170626	5164941	5169676	5169676	5169676
KP12d	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6988075
KP12e	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472
KP16a	7821574	7796706	7823318	7823318	7823318	7821255	7789517	7805404
KP16b	9324296	9286887	9347736	9347736	9324296	9292636	9324296	9292636
KP16c	9116878	9072812	9126526	9151147	9151147	9105949	9116878	9079887
KP16d	9305859	9270229	9348889	9336691	9288862	9296536	9302090	9296272
KP16e	7754276	7690592	7769117	7754276	7747451	7733329	7726504	7726504
KP20a	10663195	10594306	10665994	10659097	10604758	10606867	10645474	10599355
KP20b	9728193	9660838	9753810	9744578	9717541	9689498	9666409	9679371
KP20c	10646849	10559278	10642722	10655671	10565530	10555608	10584640	10564217
KP20d	8822946	8766076	8865083	8865508	8821793	8839299	8822209	8783240
KP20e	9290479	9309340	9330924	9330924	9320597	9319658	9330924	9253107
KP24a	13385042	13281317	13401096	13415824	13339723	13366858	13355225	13353196
KP24b	12074951	12016797	12102100	12108937	12095767	12060548	12042082	12004186
KP24c	12304523	12284395	12329608	12334644	12309551	12297196	12293290	12261498
KP24d	11677031	11608256	11708673	11684111	11673377	11661004	11649678	11578840
KP24e	13792494	13685095	13817213	13801423	13769243	13721891	13765976	13717756

Table 10. The average fitness values of the BinZOAs on binary conversion functions (S- and V- shaped transfer functions)

Dataset ID	BinZOAs							
	BinZOA1	**BinZOA2**	**BinZOA3**	**BinZOA4**	**BinZOA5**	**BinZOA6**	**BinZOA7**	**BinZOA8**
KP8a	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400	3924400
KP8b	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669	3813669
KP8c	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452	3347452
KP8d	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707	4187707
KP8e	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555	4955555
KP12a	5688887	5688562.85	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887	5688887
KP12b	6498597	6494128.2	6498597	6498597	6496039.2	6498597	6498597	6498597
KP12c	5170626	5169962.5	5170626	5170626	5170341.75	5170531	5170531	5170341
KP12d	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992404	6992187.55
KP12e	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472	5337472
KP16a	7847616.55	7831863.2	7849599.75	7848651.75	7842528.5	7842425.35	7837959.1	7838327.9
KP16b	9349338.5	9333960.55	9352734.9	9352734.9	9349075.4	9348927.5	9351299.8	9330321
KP16c	9146971.45	9131671.7	9149915.95	9151147	9151147	9142934.05	9140333.8	9128188.2
KP16d	9345517.7	9322908.6	9348889	9348279.1	9330459.85	9343219.05	9331810.35	9327349.65
KP16e	7767632.9	7742826.35	7769117	7768374.95	7760366.15	7759092.3	7762360.2	7748957.5
KP20a	10686806.1	10664753.6	10701196.8	10701630.8	10686675.9	10674475.4	10686793	10673749.2
KP20b	9766318.9	9727949.65	9785342.05	9784199.55	9767862.15	9766195.75	9759078.8	9741572.75
KP20c	10688738.9	10660474	10698762.8	10700678.4	10696073.4	10678195.6	10673260.2	10642738.8
KP20d	8866705.85	8854330.6	8905453.7	8898056.8	8892496.95	8897157.95	8886586.45	8869505.1
KP20e	9330475.15	9341014.25	9347862.2	9345035.95	9344210.55	9344013.45	9349280.2	9334471.65
KP24a	13446959.4	13421129.1	13454595.5	13465425.7	13440097.7	13449822.5	13450648.6	13420694
KP24b	12124082	12087269.4	12154805.4	12167023.7	12147839.8	12137243.8	12131228.2	12083826.5
KP24c	12364231.8	12346202.7	12377252	12366592.9	12387132.9	12371089.9	12367166.5	12350934
KP24d	11740335	11689040.8	11754520.2	11742266.2	11735554.4	11712917.4	11723511.5	11688010.1
KP24e	13850265.6	13809228.9	13867935.1	13855697.6	13859200.6	13845808.4	13840395.4	13798770.5
Sum	**206238765**	**205875936**	**206434751**	**206412564**	**206304648**	**206230192**	**206208386**	**205893684**

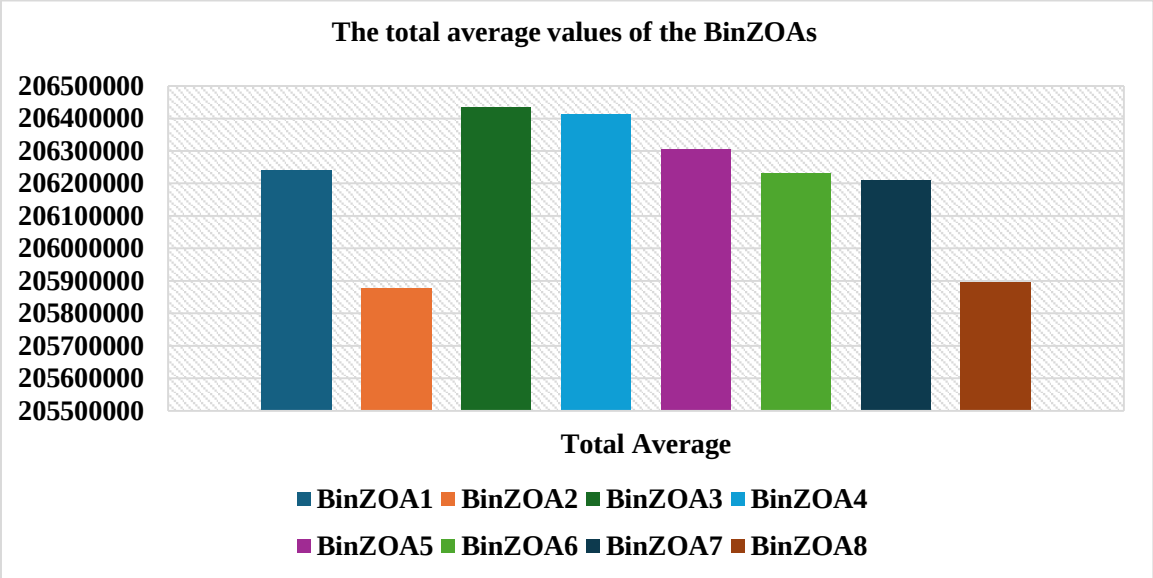


Figure 4. The total average values of the BinZOAs

Table 11. The std (standard deviation) values of the BinZOAs

Dataset ID	BinZOAs							
	BinZOA1	**BinZOA2**	**BinZOA3**	**BinZOA4**	**BinZOA5**	**BinZOA6**	**BinZOA7**	**BinZOA8**
KP8a	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8b	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8c	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8d	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8e	0	0	0	0	0	0	0	0
KP12a	0	1412.93709	0	0	0	0	0	0
KP12b	0	10885.3872	0	0	7673.4	0	0	0
KP12c	0	1697.62783	0	0	1239.01702	285	285	435.344691
KP12d	0	0	0	0	0	0	0	943.483676
KP12e	0	0	0	0	0	0	0	0
KP16a	8237.69619	13431.3654	6029.44696	7127.90044	10625.4944	10819.7235	16931.9286	13877.3787
KP16b	8552.30009	25910.5519	1146.82631	1146.82631	8516.53794	13082.3282	6300.06263	26528.8548
KP16c	10094.6701	25242.0973	5366.02254	0	0	15091.7997	13504.4154	22052.2938
KP16d	9802.67829	25855.4326	0	2658.49247	21931.6045	15219.7048	19890.1982	21940.8193
KP16e	4452.3	21031.2588	0	3234.52096	8973.72224	10778.6648	12808.924	11301.8041
KP20a	17778.278	36595.2108	19432.2886	18499.4068	29071.0963	26796.4538	24092.2228	28023.8157
KP20b	24177.2187	34983.0117	16194.1487	21805.4028	31269.1737	35564.9263	32761.2848	35025.6691
KP20c	20132.7521	47724.8536	18009.4277	15307.0962	34937.5227	47569.4449	37015.5593	41969.4675
KP20d	23161.9636	42937.2173	22410.674	25193.6663	31158.0592	26330.5672	26173.0942	36462.4885
KP20e	21703.7272	15219.8506	9071.11583	9181.85878	13629.1449	11213.235	9379.37643	22514.0158
KP24a	36811.1337	57268.2182	33442.5815	27009.9648	40294.0149	33741.854	43703.1956	45241.6676
KP24b	28023.4118	43952.7485	28616.836	32774.0732	32895.1119	37305.8602	36139.2825	45659.5061
KP24c	40843.9305	37589.922	24547.3036	18347.1511	39133.323	42686.6862	41352.1158	48535.8301
KP24d	33248.9368	41675.4436	26697.7303	27020.178	30474.5346	31220.4739	38734.3505	53740.6381
KP24e	31478.4299	44486.5164	28865.5576	24711.8633	41788.8606	51325.658	35810.0737	48833.9281
Total	**318499.427**	**527899.651**	**239829.96**	**234018.402**	**383610.618**	**409032.38**	**394881.084**	**503087.006**

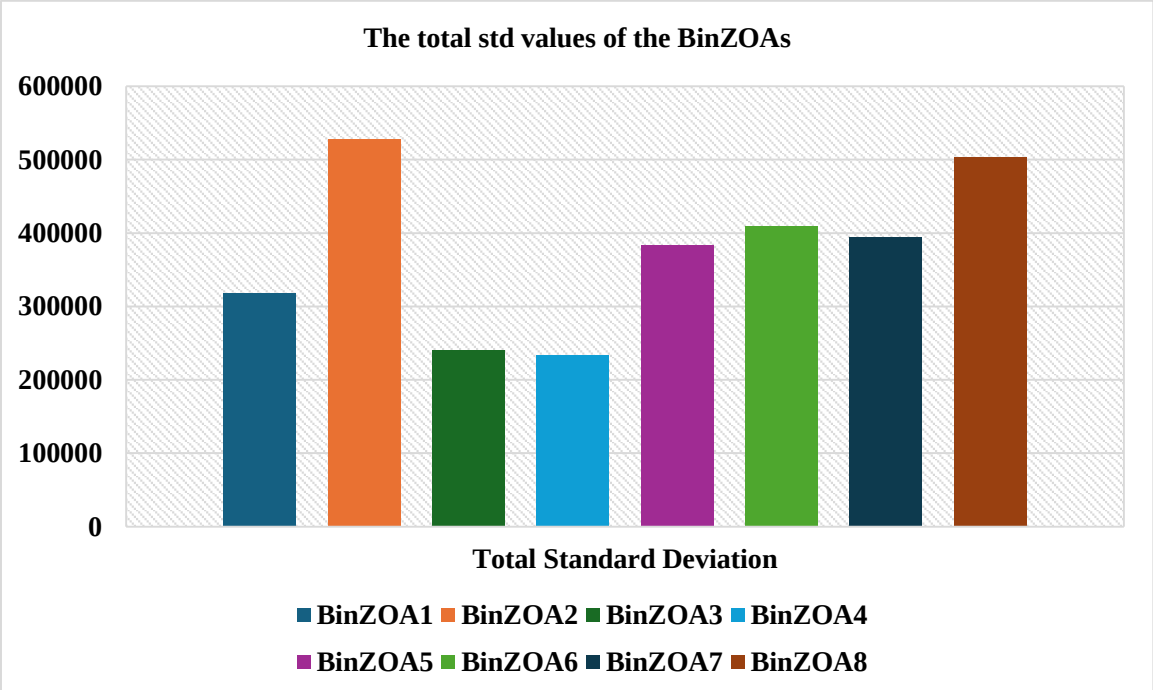


Figure 4. The comparasion of the total std values of the BinZOAs

Table 12. The *DMO* values of the BinZOAs

Dataset ID	BinZOAs							
	BinZOA1	**BinZOA2**	**BinZOA3**	**BinZOA4**	**BinZOA5**	**BinZOA6**	**BinZOA7**	**BinZOA8**
KP8a	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8b	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8c	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8d	0	0	0	0	0	0	0	0
KP8e	0	0	0	0	0	0	0	0
KP12a	0	0.00569795	0	0	0	0	0	0
KP12b	0	0.06876561	0	0	0.03935926	0	0	0
KP12c	0	0.0128321	0	0	0.0054974	0.0018373	0.0018373	0.00551191
KP12d	0	0	0	0	0	0	0	0.0030955
KP12e	0	0	0	0	0	0	0	0
KP16a	0.0428	0.24353384	0.01761881	0.02969373	0.10768715	0.109001	0.16588878	0.16119128
KP16b	0.039126	0.20354383	0.002813	0.002813	0.04193949	0.0435208	0.01815675	0.24245702
KP16c	0.04563	0.21281813	0.01345241	0	0	0.08974777	0.11816224	0.2508844
KP16d	0.03606	0.27789826	0	0.00652377	0.19712663	0.06064838	0.18268107	0.23039476
KP16e	0.01910256	0.33839946	0	0.00955128	0.11263635	0.12903268	0.08696999	0.25948251
KP20a	0.37515397	0.58073194	0.24100011	0.23695426	0.37636726	0.28721123	0.37527562	0.40885951
KP20b	0.52903	0.47318809	0.3352829	0.34691938	0.51331748	0.53028994	0.60277681	0.49782126
KP20c	0.23599072	0.48632579	0.14243203	0.12455312	0.16753417	0.33439727	0.38046213	0.65188127
KP20d	0.55286	0.83798962	0.26544838	0.34828824	0.41055448	0.3583547	0.47674775	0.66804634
KP20e	0.29380146	0.18117981	0.10800207	0.1382036	0.14702389	0.14913012	0.09284921	0.25109455
KP24a	0.55005408	0.71219286	0.49357963	0.41348213	0.54706376	0.47510261	0.49796297	0.71955368
KP24b	0.43241473	0.61465592	0.48223373	0.54512763	0.59664281	0.46325604	0.48431097	0.71018667
KP24c	0.65202715	0.73042546	0.5474084	0.34040389	0.49520596	0.55949527	0.65559436	0.78598867
KP24d	0.59031117	0.61719533	0.51454278	0.4987394	0.48992596	0.57383385	0.51065138	0.78526173
KP24e	0.34189916	0.54806155	0.44959372	0.24529171	0.58032909	0.5690083	0.49532787	0.43412102
Total	**4.736261**	**7.14543553**	**3.61340796**	**3.28654515**	**4.82821116**	**4.73386725**	**5.14565518**	**7.06583207**

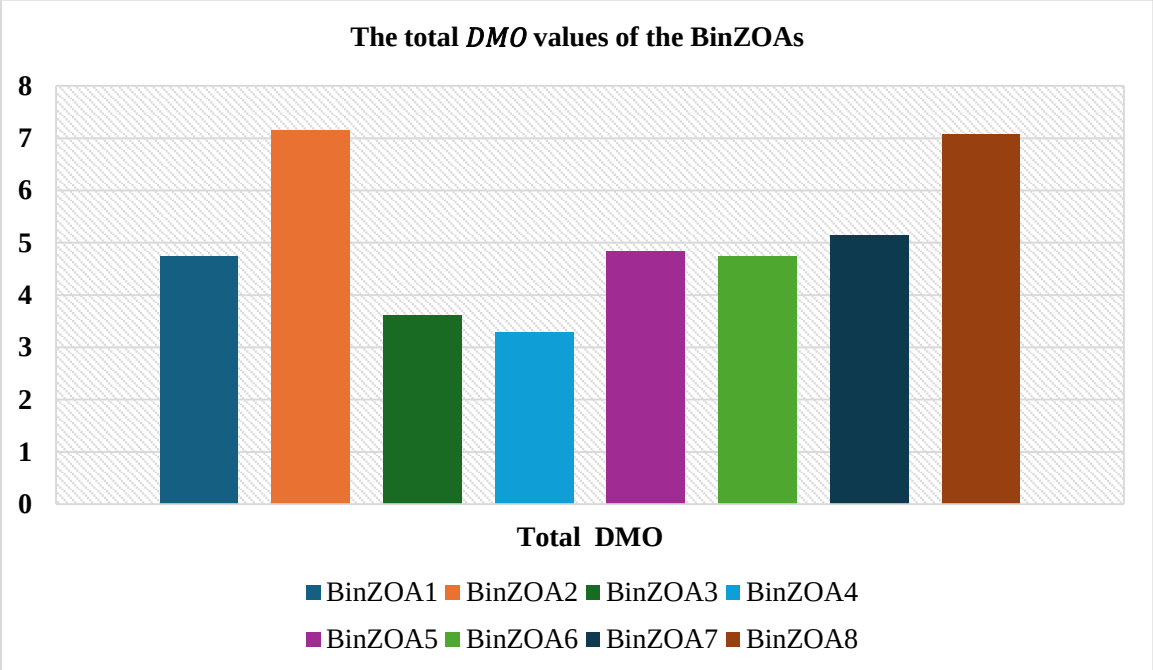


Figure 6. Comparasion of the total *DMO* values of the BinZOAs

Table 13. The wilcoxon sign test results on BinZOA4 with other BinZOAs

Dataset ID	BinZOA4 - BinZOA1	BinZOA4 - BinZOA2	BinZOA4 - BinZOA3	BinZOA4 - BinZOA5	BinZOA4 - BinZOA6	BinZOA4 - BinZOA7	BinZOA4 - BinZOA8
				***p* values**			
KP8a	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP8b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP8c	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP8d	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP8e	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP12a	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP12b	1.00	0.25	1.00	0.5	1.00	1.00	1.00
KP12c	1.00	0.125	1.00	1.00	0.50	0.5	0.0313
KP12d	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP12e	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
KP16a	0.75	0.001	1.00	0.0723	0.015625	0.007813	0.0117
KP16b	0.15625	0.004883	1.00	0.09375	0.1875	0.75	0.00293
KP16c	0.5	0.01171875	1.00	1.00	0.0625	0.0156	0.000488
KP16d	0.25	0.0010	1.00	0.002	0.25	0.00195	0.000488
KP16e	0.5	0.0003	1.00	0.002	0.002	0.0625	0.00028
KP20a	0.040	0.0017	0.9199	0.1418	0.006	0.091	0.0043
KP20b	0.007	0.0002	0.4723	0.0086	0.04996	0.0052	0.000253
KP20c	0.100	0.0033	0.3486	0.836	0.2598	0.02352	0.00025
KP20d	0.004	0.0096	0.0936	0.856	0.5869	0.601	0.1625
KP20e	0.030	0.251	0.50148	0.6138	0.9405	0.234	0.049996
KP24a	0.279	0.0080	0.47813	0.156	0.41146	0.526	0.0206
KP24b	0.040	0.0032	0.50159	0.7652	0.4330	0.279	0.00034
KP24c	0.247	0.0176	0.91082	0.7089	0.3507	0.37	0.0442
KP24d	0.550	0.00089	0.19133	0.156	0.00405	0.09	0.00034
KP24e	0.0419	0.000163	0.21217	0.17896	0.0276	0.004	0.0001

Table 14. The wilcoxon sign test values on BinZOA4 with other BinZOAs

Dataset ID	BinZOA4 - BinZOA1	BinZOA4 - BinZOA2	BinZOA4 - BinZOA3	BinZOA4 - BinZOA5	BinZOA4 - BinZOA6	BinZOA4 - BinZOA7	BinZOA4 - BinZOA8
				***h* values**			
KP8a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP8b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP8c	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP8d	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP8e	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP12a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP12b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP12c	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**
KP12d	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP12e	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP16a	0.00	**1.00**	0.00	0.00	**1.00**	**1.00**	**1.00**
KP16b	0.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**
KP16c	0.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	**1.00**	**1.00**
KP16d	0.00	**1.00**	0.00	**1.00**	0.00	**1.00**	**1.00**
KP16e	0.00	**1.00**	0.00	**1.00**	**1.00**	0.00	**1.00**
KP20a	**1.00**	**1.00**	0.00	0.00	**1.00**	0.00	**1.00**
KP20b	**1.00**	**1.00**	0.00	**1.00**	**1.00**	**1.00**	**1.00**
KP20c	0.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	**1.00**	**1.00**
KP20d	**1.00**	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
KP20e	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**
KP24a	0.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**
KP24b	**1.00**	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**
KP24c	0.00	**1.00**	0.00	0.00	0.00	0.00	**1.00**
KP24d	0.00	**1.00**	0.00	0.00	**1.00**	0.00	**1.00**
KP24e	**1.00**	**1.00**	0.00	0.00	**1.00**	**1.00**	**1.00**

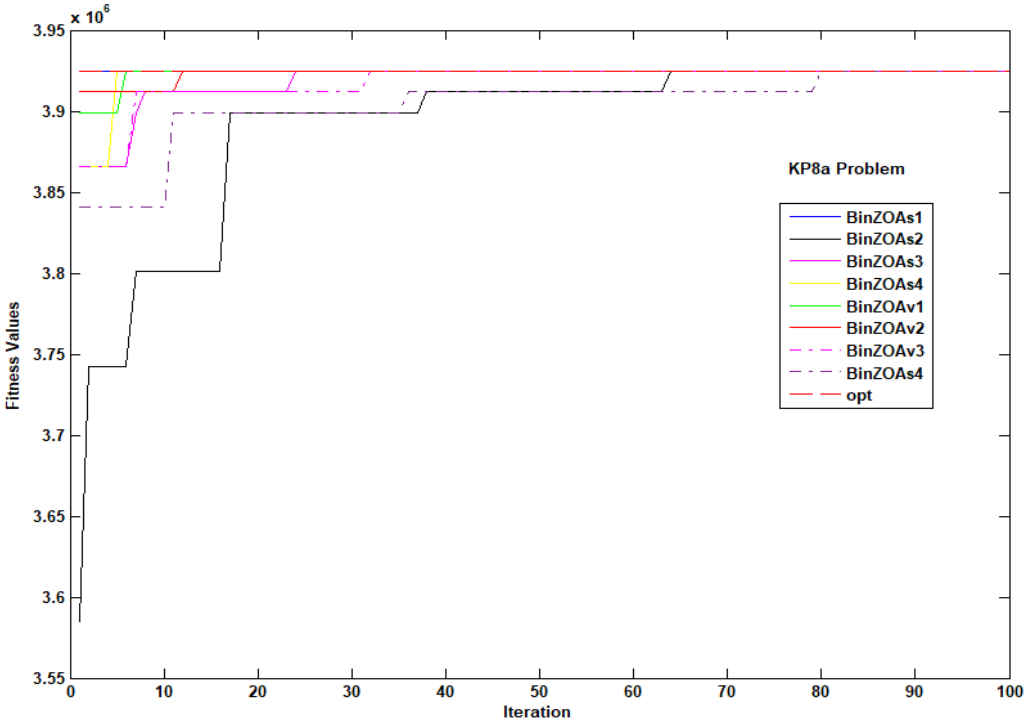


Figure 7. The convergence graph of BinZOAs on KP8a KP dataset

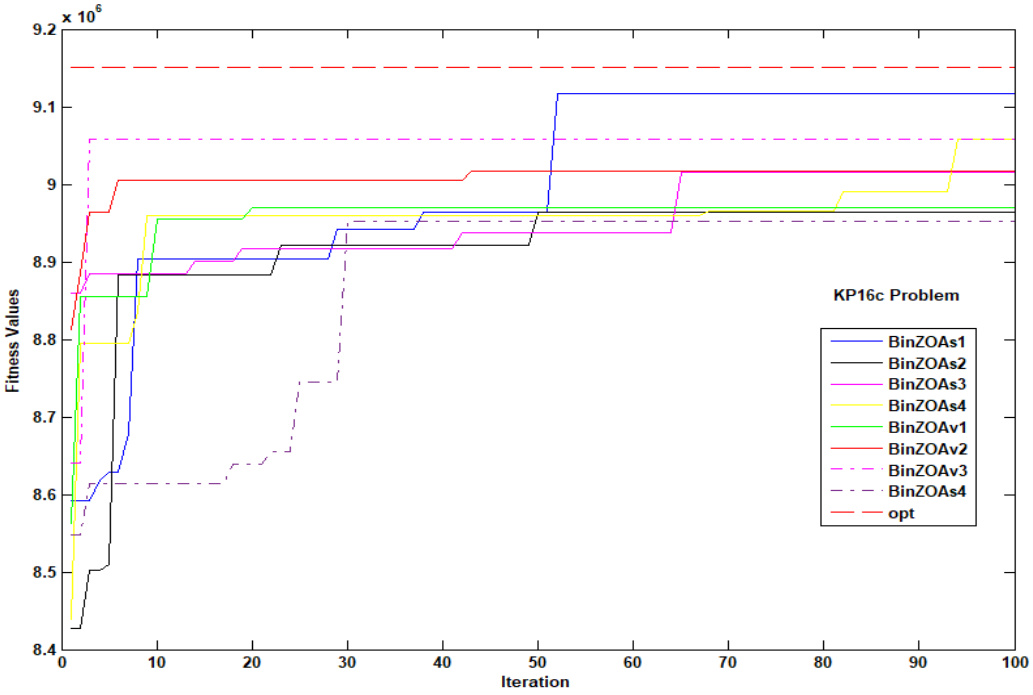


Figure 8. The convergence graph of BinZOAs on KP16c KP dataset

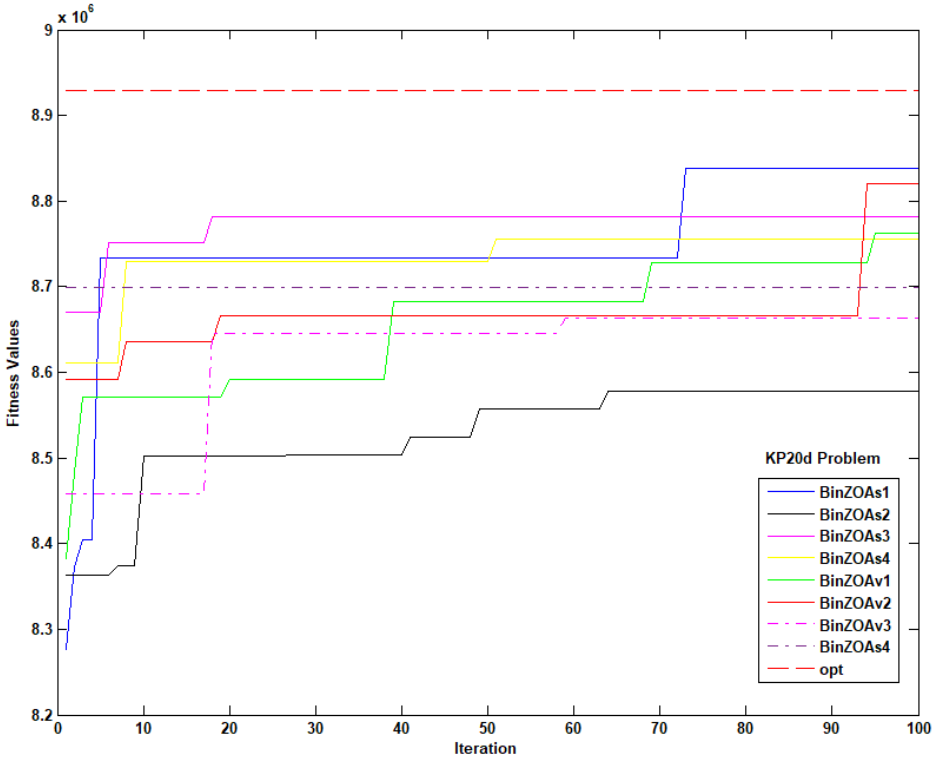


Figure 9. The convergence graph of BinZOAs on KP20d KP dataset

3.5. Literature Comparisons Of BinZOA

In this subsection, the most successful BinZOA variant based on DMO metrics (BinZOA4) is compared against several binary heuristic algorithms from the literature. Additionally, a new version called BinZOAX is developed by integrating the XOR logic gate method into BinZOA4. Both BinZOA4 and BinZOAX are benchmarked against FPS2 (Yang et al., 2014), WOS2 (Mirjalili and Lewis, 2016), BAS2 (Yang and He, 2013), PSOS2 (Yang et al., 2014), and BEOV3 (Abdel-Basset et al., 2021).

To ensure a fair comparison, all algorithms are run with a population size of 20 and a maximum of 5000 iterations, consistent with the settings used in (Abdel-Basset et al., 2021), where the benchmark results for the comparative algorithms are reported. Maintaining identical parameter settings is crucial for an unbiased evaluation. Specifically, the BEOV3 study employed these same parameters, and the FPS2, WOS2, BAS2, and PSOS2 algorithms are similarly executed under comparable configurations.

Performance is assessed using key statistical measures: best, worst, average, standard deviation (std), and DMO values. The detailed outcomes are summarized in Tables 15–19. The algorithms compared include:

Flower Pollination Algorithm with S2 transfer function (FPS2) (Yang et al., 2014).

Whale Optimization Algorithm with S2 transfer function (WOS2) (Mirjalili and Lewis, 2016).

Bat Algorithm with S2 transfer function (BAS2) (Yang and He, 2013).

Particle Swarm Optimization with S2 transfer function (PSOS2) (Kennedy and Eberhart, 1995; Yang et al., 2014).

Binary Equilibrium Optimization Algorithm with V3 transfer function (BEOV3) (Abdel-Basset et al., 2021).

Figure 10 illustrates the total DMO results for these seven algorithms in a column chart. According to the figure, BinZOAX demonstrated the highest overall success, while BinZOA4 was the least successful among the group. The BEOV3 algorithm ranked as the second-best performer after BinZOAX. This highlights that relying solely on transfer functions may not be sufficient for achieving optimal performance in binary optimization algorithms, emphasizing the need for enhancements through additional methods.

In this study, the incorporation of the XOR logic gate in BinZOAX significantly improved the algorithm's ability to explore and exploit the binary search space, leading to superior performance compared to the other heuristics. Thus, BinZOAX emerges as a highly effective approach for solving binary optimization problems.

Table 15. Comparisons on 8-dimensional KP datasets

Dataset ID	Opt.	Metaheuristics Alg.	Best	Worst	Average	Std	DMO	Rank
KP8a	3924400	*BinZOA4*	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		BEOV3	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		WOS2	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		PSOS2	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		FPS2	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		BAS2	3924400	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
KP8b	3813669	*BinZOA4*	3813669	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	3813669	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		BEOV3	3813669	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		WOS2	3813669	3813669	3813669	13419	0.20	2
		PSOS2	3813669	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		FPS2	3813669	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		BAS2	3.813669	3.813669	3.813669	0.00	0.0000	1
KP8c	3347452	*BinZOA4*	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
		BEOV3	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
		WOS2	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
		PSOS2	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
		FPS2	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
		BAS2	3347452	3347452	3347452	0.00	0.0000	1
KP8d	4187707	*BinZOA4*	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
		BEOV3	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
		WOS2	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
		PSOS2	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
		FPS2	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
		BAS2	4187707	4187707	4187707	0.00	0.0000	1
KP8e	4955555	*BinZOA4*	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1
		BEOV3	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1
		WOS2	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1
		PSOS2	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1
		FPS2	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1
		BAS2	4955555	4955555	4955555	0.00	0.0000	1

Table 16. Comparisons on 12-dimensional KP datasets

Dataset ID	Opt.	Metaheuristics Alg.	Best	Worst	Average	Std	DMO	Rank
KP12a	5688887	*BinZOA4*	5688887	5688887	5688887	0.00	0.000	1
		BinZOAX	5688887	5688887	5688887	0.00	0.0000	1
		BEOV3	5.688.887	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		WOS2	5688887	5683266	5665980	5062.05	0.01	2
		PSOS2	5688887	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		FPS2	5688887	3924400	3924400	0.00	0.0000	1
		BAS2	5688887	3924.400	3924400	0.00	0.0000	1
KP12b	6473019	*BinZOA4*	6498597	6498597	6498597	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	6498597	6498597	6498597	0.00	0.0000	1
		BEOV3	6498597	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		WOS2	**6498597**	6494760	6473019	**9133.17**	0.06	2
		PSOS2	6498597	3813669	3813669	0.00	0.0000	1
		FPS2	6498597	3813669	3813669	0,00	0,0000	1
		BAS2	**6498597**	6488365	6473019	12530.6	0.15	3
KP12c	5170626	*BinZOA4*	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
		BEOV3	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
		WOS2	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
		PSOS2	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
		FPS2	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
		BAS2	5170626	5170626	5170626	0.00	0.0000	1
KP12d	6941564	*BinZOA4*	6992404	6992404	6992404	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	6992404	6992404	6992404	0.00	0.0000	1
		BEOV3	6941564	6941564	6941564	0.00	0.0000	1
		WOS2	6941564	6941564	6941564	0.00	0.0000	1
		PSOS2	6941564	6941564	6941564	0.00	0.0000	1
		FPS2	6941564	6941564	6941564	0.00	0.0000	1
		BAS2	6992404	6992404	6992404	**23341.7**	0.29	2
KP12e	5337472	*BinZOA4*	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1
		BEOV3	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1
		WOS2	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1
		PSOS2	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1
		FPS2	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1
		BAS2	5337472	5337472	5337472	0.00	0.0000	1

Table 17. Comparisons on 16-dimensional KP datasets

Dataset ID	Opt.	Metaheuristics Alg.	Best	Worst	Average	Std	DMO	Rank
KP16a	7850983	*BinZOA4*	7850983	7823318	7848651.75	7127.90044	0.02969373	2
		BinZOAX	7850983	7850983	7850983	0.00	0.0000	1
		BEOV3	7850983	7850983	7850983	0.00	0.0000	1
		WOS2	**7850983**	7832971	7832023	**4132.236**	0.22	3
		PSOS2	7850983	7850983	7850983	0.00	0.0000	1
		FPS2	7850983	7850983	7850983	0.00	0.0000	1
		BAS2	7850983	7850983	7850983	0.00	0.0000	1
KP16b	9352998	*BinZOA4*	9352998	9352998	9352734.9	1146.82631	0.002813	2
		BinZOAX	9352998	9352998	9352998	0.00	0.0000	1
		BEOV3	9.352.998	9352998	9352.998	0.00	0.0000	1
		WOS2	**9352998**	9334569.85	9213927	0.00	0.20	3
		PSOS2	9352998	9352998	9352998	42733.237	0.0000	1
		FPS2	9352998	9352998	9352998	0.00	0.0000	1
		BAS2	9352998	9352998	9352998	0.00	0.0000	1
KP16c	9151147	*BinZOA4*	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1
		BinZOAX	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1
		BEOV3	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1
		WOS2	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1
		PSOS2	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1

		FPS2	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1
		BAS2	9151147	9151147	9151147	0.00	0.0000	1
KP16d	9348889	*BinZOA4*	9348889	9336691	9348279.1	2658.49247	0.00652377	2
		BinZOAX	**9348889**	**9348889**	**9348889**	0.00	0.0000	1
		BEOV3	**9348889**	**9348889**	**9348889**	0.00	0.0000	1
		WOS2	**9348889**	**9348889**	**9348889**	**0.00**	0.12	4
		PSOS2	**9348889**	**9348889**	**9348889**	0.00	0.0000	1
		FPS2	**9348889**	**9348889**	**9348889**	0.00	0.0000	1
		BAS2	**9348889**	9347059.3	9.336.691	**4879.200**	0.019	3
KP16e	**7769117**	*BinZOA4*	7769117	7754276	7768374.95	3234.52096	0.00955128	2
		BinZOAX	7769117	7769117	7769117	0.00	0.0000	1
		BEOV3	7769117	7769117	7769117	0.00	0.0000	1
		WOS2	**7769117**	7761876.6	7691882	16054.133	0.022	3
		PSOS2	7769117	7769117	7769117	0.00	0.0000	1
		FPS2	7769117	7769117	7769117	0.00	0.0000	1
		BAS2	7769117	7769117	7769117	0.00	0.0000	1

Table 18. Comparisons on 20-dimensional KP datasets

Dataset ID	Opt.	Metaheuristics Alg.	Best	Worst	Average	Std	DMO	Rank
KP20a	**10727049**	*BinZOA4*	**10727049**	10659.097	10701630.8	18499.4068	0.23695426	3
		BinZOAX	**10727049**	**10727049**	**10727049**	0.00	0.0000	1
		BEOV3	**10727049**	**10727049**	**10727049**	0.00	0.0000	1
		WOS2	**10727049**	1071775.5	10674.314	15820.500	0.05	2
		PSOS2	**10727049**	**10.727049**	**10727049**	0.00	0.0000	1
		FPS2	**10727049**	**10.727049**	**10727049**	0.00	0.0000	1
		BAS2	**10727049**	**10.727049**	**10727049**	0.00	0.0000	1
KP20b	9818261	*BinZOA4*	9818261	9744578	9784199.55	21805.4028	0.34691938	2
		BinZOAX	9818261	9818261	9818261	0.00	0.0000	1
		BEOV3	9818261	9818261	9818261	0.00	0.0000	1
		WOS2	9818261	9818261	9818261	0.00	0.0000	1
		PSOS2	9818261	9818261	9818261	0.00	0.0000	1
		FPS2	9818261	9818261	9818261	0.00	0.0000	1
		BAS2	9818261	9818261	9818261	0.00	0.0000	1
KP20c	10714023	*BinZOA4*	10714023	10655671	10700678.4	15307.0962	0.12455312	3
		BinZOAX	10714023	10714023	10714023	0.00	0.0000	1
		BEOV3	10714023	10714023	10714023	0.00	0.0000	1
		WOS2	10712572	10707307.9	10687036	**7182.320**	0.62	4
		PSOS2	10714023	10714023	10714023	0.00	0.0000	1
		FPS2	10714023	10714023	10714023	0.00	0.0000	1
		BAS2	10.714023	10713732.8	10712572	**580.400**	0.0027	2
KP20d	8929156	*BinZOA4*	8929156	8865508	8898056.8	25193.6663	0.34828824	4
		BinZOAX	8929156	8929156	8929156	0.00	0.0000	1
		BEOV3	8929156	8929156	8929156	0.00	0.0000	1
		WOS2	8929156	8917460	8915396	**4913.303**	0.13	3
		PSOS2	8929156	8925028.0	8915396	**6305.624**	0.040	2
		FPS2	8929156	8929156	8929156	0.00	0.0000	1
		BAS2	8929156	8929156	8929156	0.00	0.0000	1
KP20e	9357969	*BinZOA4*	9357969	9330924	9345035.95	9181.85878	0.1382036	3
		BinZOAX	9357969	9357969	9357969	0.00	0.0000	1
		BEOV3	9357969	9357969	9357969	0.00	0.0000	1
		WOS2	9357969	9352636.4	9332165	8573.682	0.06	2
		PSOS2	9357969	9357969	9357969	0.00	0.0000	1
		FPS2	9357969	9357969	9357969	0.00	0.0000	1
		BAS2	9357969	9357969	9357969	0.00	0.0000	1

Table 19. Comparisons on 24-dimensional KP datasets

Dataset ID	Opt.	Metaheuristics Alg.	Best	Worst	Average	Std	DMO	Rank
KP24a	13549094	*BinZOA4*	13521334	13415.824	13465425.7	27009.9648	0.41348213	3
		BinZOAX	13549094	13549.094	13549094	0.00	0.0000	1
		BEOV3	13549094	13549.094	13549094	0.00	0.0000	1
		WOS2	**13549094**	9332165	13513046.15	8573.682	0.27	2
		PSOS2	13549094	13549094	13549094	0.00	0.0000	1
		FPS2	13549094	13549094	13549094	0.00	0.0000	1
		BAS2	13549094	13549094	13549094	0.00	0.0000	1
KP24b	12233713	*BinZOA4*	12233713	12108937	12167023.7	32774.0732	0.54512763	2
		BinZOAX	12233713	12233713	12233713	0.00	0.0000	1
		BEOV3	12233713	12233713	12233713	0.00	0.0000	1
		WOS2	12233713	12233713	12233713	0.00	0.0000	1
		PSOS2	12233713	12233713	12233713	0.00	0.0000	1
		FPS2	12233713	12233713	12233713	0.00	0.0000	1
		BAS2	12233713	12233713	12233713	0.00	0.0000	1
KP24c	12448780	*BinZOA4*	12408833	12334644	12366592.9	18347.1511	0.34040389	2
		BinZOAX	12448780	12448780	12448780	0.00	0.0000	1
		BEOV3	12448780	12448780	12448780	0.00	0.0000	1
		WOS2	12448780	12448780	12448780	**0.00**	0.0000	1
		PSOS2	12448780	12448780	12448780	0.00	0.0000	1
		FPS2	12448780	12448780	12448780	0.00	0.0000	1
		BAS2	12448780	12448780	12448780	0.00	0.0000	1
KP24d	11815315	*BinZOA4*	11801123	11684111	11742266.2	27020.178	0.4987394	6
		BinZOAX	**11815315**	**11815315**	**11815315**	0.00	0.0000	1
		BEOV3	**11815315**	11810051	11814367	2795.200	0.00361	2
		WOS2	11810051	11810051	11810051	0.00	0.044	5
		PSOS2	**11815315**	11810840.6	11810051	1879.624	0.037	4
		FPS2	**11815315**	11810840.6	11810051	1879.624	0.044	5
		BAS2	**11815315**	11811103.8	11810051	2105.600	0.035	3
KP24e	**13940099**	*BinZOA4*	13889768	13801423	13855697.6	24711.8633	0.24529171	3
		BinZOAX	**13940099**	**13940099**	**13940099**	0.00	0.0000	1
		BEOV3	**13940099**	**13940099**	**13940099**	0.00	0.0000	1
		WOS2	**13940099**	13931016.65	13894074	14162.599	0.07	2
		PSOS2	**13940099**	**13940099**	**13940099**	0.00	0.0000	1
		FPS2	**13940099**	**13940099**	**13940099**	0.00	0.0000	1
		BAS2	**13940099**	**13940099**	**13940099**	0.00	0.0000	1

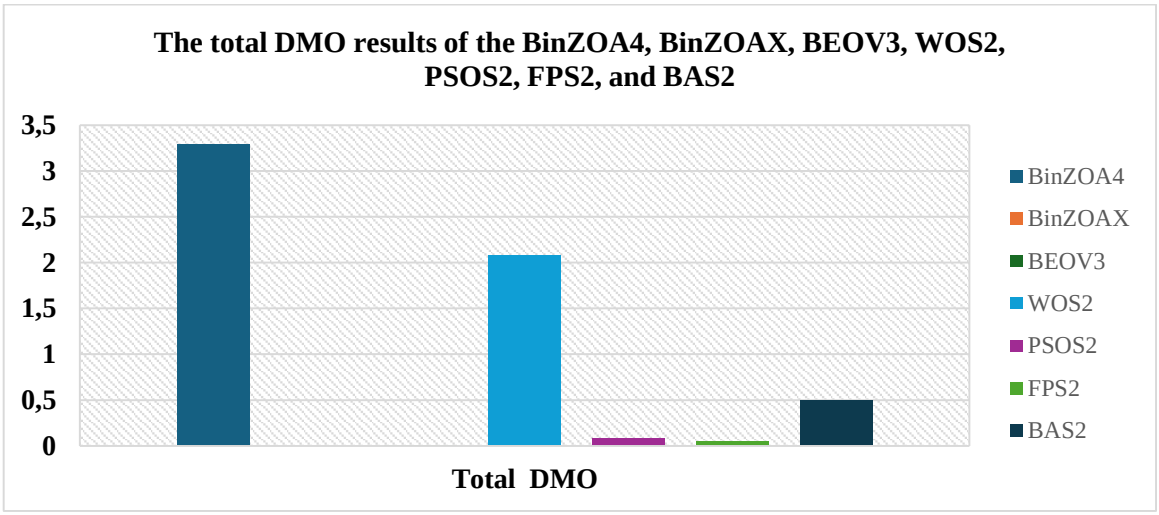


Figure 10. Comparison of seven metaheuristic algorithms with respect to total $DMOs$

4. Conclusions

This study focused on the Zebra Optimization Algorithm (ZOA), a heuristic method inspired by the natural behaviors of zebras. Originally designed for continuous optimization problems, ZOA is a relatively new algorithm with limited exploration and evaluation in existing literature. Literature reviews have shown that the success of ZOA on discrete problems has not been adequately analyzed. To fill this gap, ZOA is extended to binary optimization by incorporating eight different transfer functions comprising four S-shaped and four V-shaped functions variants resulting in eight distinct binary versions called BinZOA (BinZOA1 through BinZOA8). These variants are tested on 25 benchmark instances of the 0–1 knapsack problem, covering small to large scales. The 0–1 knapsack problem, a classic NP-hard problem commonly used for benchmarking binary optimization algorithms, involves selecting items to maximize total profit without exceeding a capacity constraint. Performance evaluation is based on multiple statistical indicators, including best, worst, mean, standard deviation (std), and DMO values. Among the BinZOA variants, BinZOA4 emerged as the most effective according to DMO metrics. To further assess its competitiveness, BinZOA4 is compared with several established binary heuristic algorithms from the literature namely BEOV3, WOS2, PSOS2, FPS2, and BAS2. The results indicated that relying solely on transfer functions is insufficient for achieving high performance, signaling the need for enhanced strategies. Consequently, the BinZOA4 variant is improved by integrating an XOR logic gate, leading to a new version named BinZOAX (using the S4 transfer function). When benchmarked against the comparison algorithms, BinZOAX consistently outperformed all others, achieving optimal solutions across all knapsack datasets. This demonstrates the effectiveness of XOR logic gates in strengthening binary optimization algorithms.

Overall, this study represents one of the first comprehensive applications of ZOA to binary optimization problems, accompanied by a detailed analysis of transfer functions and logic gate integration. The promising experimental results contribute valuable insights to the literature and establish BinZOAX as a competitive heuristic for binary optimization challenges.

4.1. Limitations Of The BinZOA Algorithm And Future Works

Although the ZOA algorithm has solved many different engineering design problems with its continuous version, there are still many limitations associated with the ZOA algorithm. For example, most continuous problems solved with ZOA are small in size. There is a need to solve larger problems with ZOA. Furthermore, in this study, the ZOA algorithm is configured to solve binary optimization problems, and a transfer function-based analysis is conducted. In this study, the success of S- and V-shaped transfer functions, commonly used in the literature, is tested on Binary ZOA. However, there are also newly introduced or more recently proven transfer functions in the literature, such as Taper-shaped, U-shaped, X-shaped, and so on. It is necessary to test the Binary ZOA algorithm with these transfer functions. This paper demonstrates that Binary ZOA cannot achieve sufficient success with transfer functions alone. XOR gates allow the Binary ZOA algorithm to better explore and exploit the binary

search space. The BinZOAX algorithm also achieved optimal performance on the 25 medium-sized KP datasets presented in this study. BinZOAX's success on just the 25 KP dataset is not sufficient. BinZOAX's success needs to be proven on KP datasets of different sizes. Furthermore, BinZOAX must also demonstrate its success on binary optimization problems other than the KP problem.

In future work, we plan to test the performance of BinZOA and BinZOAX on large-scale datasets for the KP problem, filling the gaps in this work. Furthermore, we will run the classical test functions BinZOA and BinZOAX on low, medium, and high-scale datasets to demonstrate the success of BinZOAX. In addition to S- and V-shaped transfer functions, we will investigate other transfer functions proposed in the literature, and examine BinZOA's performance on these functions.

5. Author Contributions Statement

In the conducted study, Yazar 1 and Yazar 2 contributed equally to the development of the idea, study design, literature review, data collection and analysis, evaluation of the obtained results, the writing process, and the content review of the manuscript.

6. Ethics Committee Approval and Conflict of Interest Statement

The study presented in this article does not involve any experimental research on humans or animals, clinical research on humans or animals, or any qualitative or quantitative research methods such as surveys, interviews, focus groups, observations, experiments, or interviews that require data collection from participants. Therefore, ethics committee approval was not required for the preparation of this manuscript. There is no conflict of interest between the authors and any person or institution regarding the preparation and publication of this manuscript.

References

Abdel-Basset M., Mohamed R., Mirjalili S. A binary equilibrium optimization algorithm for 0–1 knapsack problems. Computers & Industrial Engineering 2021; 151: 106946.

Bas E., Ihsan A. Gray Wolf and Krill Herd optimizations: Performance analysis and comparison. Pamukkale Universitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi 2023; 29(7): 711–736.

Bas E., Guner LB. The binary crayfish optimization algorithm with bitwise operator and repair method for 0–1 knapsack problems: an improved model. Neural Computing Applications 2025; 37: 4733–4767.

Baş E. Binary Aquila optimizer for 0–1 knapsack problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2023; 118: 105592.

Baş E. Feature selection problem via a novel binary chaotic zebra optimization. Presented at: Africa 5th International Conference on New Horizons in Science 2024; Apr 25–28, Cairo, Egypt.

Baş E., Baş Ş. An example of classification using a neural network trained by the zebra optimization algorithm. Sinop Universitesi Fen Bilimleri Dergisi 2024; 9(2): 388–420.

Baş E., Baş Ş. Uncapacitated facility location problem via binary zebra optimization algorithm based on S shaped transfer functions. Presented at: Africa 5th International Conference on New Horizons in Science, 2024 Apr 25–28, Cairo, Egypt.

Baş E., Yildizdan G. A new binary arithmetic optimization algorithm for uncapacitated facility location problem. Neural Computing Applications 2024; 36: 4151–4177.

Berberler ME., Güler A., Nuriyev U. A new genetic algorithm for the 0-1 knapsack problem. Academic Platform-Journal of Engineering and Science 2016; 4(3).

Detti P. A new upper bound for the multiple knapsack problem. Computers & Operations Research 2021; 129: 105210.

Elymany MM., Enany MA., Elsonbaty NA. Hybrid optimized-ANFIS based MPPT for hybrid microgrid using zebra optimization algorithm and artificial gorilla troops optimizer. Energy Conversion and Management 2024; 299: 117809.

Erol OK., Eksin I. A new optimization method: big bang–big crunch. Advances in Engineering Software 2006; 37(2): 106–111.

Ervural B., Hakli H. A binary reptile search algorithm based on transfer functions with a new stochastic repair method for 0–1 knapsack problems. Computers & Industrial Engineering 2023; 178: 109080.

Formato R. Central force optimization: a new metaheuristic with applications in applied electromagnetics. Progress in Electromagnetics Research 2007; 77: 425–491.

Ghadi YY., Neamah NM., Hossam-Eldin AA., Alqarni M., AboRas KM. State-of-the-art frequency control strategy based on an optimal fuzzy PI-FOPDF λ for SMES and UPFC integrated smart grids using zebra optimization algorithm. IEEE Access 2023; 11: 122893–122910.

Horowitz E., Sahni S., Rajasekaran S. Computer algorithms C++: C++ and pseudocode versions. New York: Computer Science Press; 1997.

Ibarra OH., Kim CE. Fast approximation algorithms for the knapsack and sum of subset problems. Journal of the ACM (JACM) 1975; 22(4): 463–468.

Ihsan A., Doğan N. Improved affine encryption algorithm for color images using LFSR and XOR encryption. Multimedya Tools Applications 2023; 82: 7621–7637.

Ihsan A., Doğan N. An innovative image encryption algorithm enhanced with the Pan-Tompkins algorithm for optimal security. Multimedya Tools Applications 2024; 83: 82589–82619.

Kaveh A., Ghazaan MI., Bakhshpoori T. An improved ray optimization algorithm for design of truss structures. Period Polytech Civil Engineering 2013; 57(2): 97–112.

Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. In: Proc ICNN'95 - International Conference Neural Networks, 1995 Nov 27–Dec 1, Perth, Australia.

Kreher DL. Available from: [https://pages.mtu.edu/\~kreher/cages/Data.html](https://pages.mtu.edu/~kreher/cages/Data.html). (Accessed: 2025 Apr 18).

Kulkarni AJ., Shabir H. Solving 0–1 knapsack problem using cohort intelligence algorithm. International Journal Machine Learning and Cybernetics 2016; 7: 427–441.

Liu SH., Mernik M., Hrnčič D., Črepinšek M. A parameter control method of evolutionary algorithms using exploration and exploitation measures with a practical application for fitting Sovova's mass transfer model. Applied Soft Computing 2013; 13(9): 3792–3805.

Martello S., Toth P. Knapsack problems: Algorithms and Computer Implementations. New York: John Wiley & Sons; 1990.

Mirjalili S., Lewis A. The whale optimization algorithm. Advances in Engineering Software 2016; 95: 51–67.

Pazhanimuthu C., Saravanan G., Suresh KP. Performance analysis of voltage profile improvement in AVR system using zebra optimization algorithms based on PID controller. e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy 2023: 100380.

Raidl GR. An improved genetic algorithm for the multiconstrained 0-1 knapsack problem. In: Proc 1998 IEEE International Conference Evol Computation, 1998 May 4–9, Anchorage, AK, USA.

Rashedi E., Nezamabadi-Pour H., Saryazdi S. GSA: A gravitational search algorithm. Information Sciences 2009; 179(13): 2232–2248.

Rezoug A., Bader-El-Den M., Boughaci D. Guided genetic algorithm for the multidimensional knapsack problem. Memetic Computing 2018; 10: 29–42.

Sag T., Ihsan A. Particle swarm optimization with a new intensification strategy based on K-means. Pamukkale Universitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 29(3): 264–273.

Sahni S. Approximate algorithms for the 0/1 knapsack problem. Journal of the ACM (JACM) 1975; 22(1): 115–124.

Sadollah A., Eskandar H., Lee HM., Kim JH. Water cycle algorithm: A detailed standard code. SoftwareX 2016; 5: 37–43.

Shah-Hosseini H. Principal components analysis by the galaxy-based search algorithm: a novel metaheuristic for continuous optimization. International Journal of Computational Science and Engineering 2011; 6(1-2): 132–140.

Singh RP. Solving 0–1 knapsack problem using genetic algorithms. In 2011 IEEE 3rd international conference on communication software and networks 2011 May 27–29, Xi'an, China.

Smith GD., Steele NC., Albrecht RF., Cotta C., Troya JM. A hybrid genetic algorithm for the 0–1 multiple knapsack problem. In Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms: Proceedings of the International Conference in Norwich, UK, 1997, Springer, Vienna.

Trojovská E., Dehghani M., Trojovský P. Zebra optimization algorithm: A new bio-inspired optimization algorithm for solving optimization algorithm. IEEE Access 2022; 10: 49445–49473.

Wei Z., Huang C., Wang X., Han T., Li Y. Nuclear reaction optimization: a novel and powerful physics-based algorithm for global optimization. IEEE Access 2019; 7: 66084–66109.

Yang XS., He X. Bat algorithm: literature review and applications. International Journal of Bio-inspired Computation 2013; 5(3): 141–149.

Yang XS., Karamanoglu M., He X. Flower pollination algorithm: a novel approach for multiobjective optimization. Engineering Optimization 2014; 46(9): 1222–1237.

Yao X. A new simulated annealing algorithm. International Journal of Computer Mathematics 1995; 56(3–4): 161–168.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1281-1301, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1281-1301, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Influence of Water Aging on The Mode-I Fracture Toughness of Intraply Hybrid Carbon/Aramid/Elium Composites

Muhammed Huseyin GUZEL[1*], Gurol ONAL[2]

[1]Konya Technical University, Technical Sciences Vocational School, Machine and Metal Technologies Department, 42250, Konya
[2]Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Mechanical Engineering Department, 42250, Konya

[1]https://orcid.org/0000-0003-3093-3453
[2]https://orcid.org/0000-0003-2430-9283
*Corresponding author: mhguzel@ktun.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 24.04.2025
Accepted: 23.11.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Carbon/aramid intraply
Double-cantilever beam
Elium
Fracture toughness
Hybrid composite
Water aging

ABSTRACT

In this study, the fracture behavior of carbon/aramid intraply hybrid fiber-reinforced composites with a thermoplastic Elium matrix was investigated using the double-cantilever beam test. The composites were aged in distilled water for up to 6 months, and the fracture performance of unaged samples was compared with those aged for 2, 4, and 6 months. The maximum force and Mode-I fracture toughness of unaged samples were 152.84 N and 1131.43 J/m^2, respectively. After aging, these values increased by 26.99% and 32.14%, reaching 194.09 N and 1495.11 J/m^2, respectively. Notably, water aging positively affected the interlaminar delamination behavior of carbon/aramid/Elium composites. The findings of this study demonstrate that Elium matrix hybrid composites are a promising alternative for real-world applications in demanding environments such as marine and automotive, as their interlaminar fracture toughness increases even after water aging.

Suda Yaşlandırmanın Katman İçi Hibrit Karbon/Aramid/Elium Kompozitlerin Mod-I Kırılma Tokluğu Üzerindeki Etkisi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.04.2025
Kabul tarihi:23.11.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Çift ankastre kiriş
Elium
Karbon/aramid
Katman içi hibrit kompozit
Kırılma tokluğu
Su yaşlandırması

ÖZ

Bu çalışmada, termoplastik Elium matrisli karbon/aramid katman içi hibrit fiber takviyeli kompozitlerin kırılma davranışı çift ankastre kiriş testi yapılarak incelenmiştir. Kompozitler, 6 aya kadar damıtılmış suda yaşlandırılmıştır ve yaşlandırılmamış numunelerin kırılma performansı, 2, 4 ve 6 ay boyunca yaşlandırılmış numunelerle karşılaştırılmıştır. Yaşlandırılmamış numunelerde maksimum kuvvet ve Mod-I kırılma tokluğu sırasıyla 152,84 N ve 1131,43 J/m^2 olarak bulunmuştur. Yaşlandırma sonrasında bu değerler sırasıyla %26,99 ve %32,14 artarak 194,09 N ve 1495,11 J/m^2'ye ulaşmıştır. Sonuç olarak, su yaşlandırması karbon/aramid/Elium kompozitlerinin tabakalar arası ayrılma davranışı üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Bu çalışmanın bulguları, Elium matris hibrit kompozitlerin, suda yaşlanma sonrasında bile tabakalar arası kırılma tokluğunun artması nedeniyle, denizcilik ve otomotiv gibi zorlu ortamlarda gerçek dünya uygulamaları için umut verici bir alternatif olduğunu göstermektedir.

To Cite: Guzel MH., Onal G. Influence of Water Aging on The Mode-I Fracture Toughness of Intraply Hybrid Carbon/Aramid/Elium Composites. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3):1281-1301.

1. Introduction

Composites are engineered materials created by combining a matrix and reinforcements to achieve properties that individual or traditional materials lack (Karacor et al., 2020). Composites can be classified based on the type of matrix material as polymer, metal, or ceramic composites, and based on their structural components as fiber or particle reinforced, and laminated composites (Unal et al., 2022; Yalcin et al., 2024). Thermoplastic composites are more advantageous than thermoset composites because they are formable, recyclable, and repairable (Kaybal and Ulus, 2024).

Fiber-reinforced polymeric (FRP) composites are becoming widely used in a range of industries such as military, defense, aerospace, aeronautics, automotive, and energy for their lightweight and superior strength and durability properties (Coskun and Sahin, 2022; Bandaru et al., 2023). Thanks to their outstanding chemical resistance and exceptional thermal performance, FRP composites have found broad application across various sectors, including construction, architecture, food, and chemical industry (Sukur et al., 2020; Adem et al., 2025).

Carbon fibers are known for their strength, stiffness, and lightness, but are limited in energy absorption and impact resistance. Aramid fibers are recognized for their high energy absorption and impact resistance (Dharmavarapu and MBS, 2022). A combination of different fibers can be used to optimize mechanical properties, and hybrid structures containing two types of fibers can achieve superior properties (Cetin et al., 2022; Demir et al., 2023). Laminated composites are produced as interply (stacking different fabric layers on top of each other) or intraply (intra-layer hybrid fabric where the same layer is woven with different material warp and weft yarns) hybridization (Deniz and Karakuzu, 2025). Although there are studies that have characterized the properties of both interply and intraply Carbon/Aramid (CA) hybrid composites, this study is only considered for intraply CA hybrid FRP composites.

Kim et al. (2011) investigated the tensile properties of intraply CA fiber-reinforced epoxy composites and reported that fiber orientation significantly influenced tensile strength and modulus. In a later study, Kim et al. (2023) produced both interply and intraply composites via the resin infusion method and found that intraply composites exhibited superior tensile performance when carbon fibers were aligned in the loading direction. Alsaadi et al. conducted a series of studies examining the influence of hybridization with glass fibers and the addition of nano-silica and nano-clay particles on the tensile and flexural behavior of CA composites (Alsaadi et al., 2018; Alsaadi et al., 2020). Improvements up to 20-35% in mechanical performance were reported with appropriate nanoparticle content. Sebaey and Wagih (2019) compared the flexural response of intraply and sandwich composites, noting different damage mechanisms and higher specific strength in sandwich structures. Yin et al. (2021) demonstrated that fiber orientation affected flexural strength, with carbon fiber direction yielding higher values than aramid. Quanjin et al. (2020) highlighted the potential of CA composites in automotive crash box applications due to their lightweight and energy absorption capabilities. Qi et al. (2024) validated tensile, compressive, and shear properties through both experimental methods and finite element analysis,

showing a strong correlation between predicted and measured results. These studies highlight the potential of intraply CA fiber composites as high-performance materials for advanced structural applications.

Failure of composite materials can occur in different ways depending on the type of loading applied. Various types of loading, such as tension, compression, bending, buckling, and impact, can cause different failure mechanisms in the material (Coskun et al., 2024; Sozen et al., 2024). Fracture damage is often seen in composite materials. This damage occurs due to structural deterioration caused by microcrack propagation and weaknesses at the fiber-matrix interface (Ulus et al., 2019). Different types of loads can cause delamination cracking in layered composites. This can happen through opening (Mode-I), sliding (Mode-II), or tearing (Mode-III) fracture modes, or a combination of them (Pietras et al., 2023). Opening mode is the fracture mode where interlaminar failure occurs most easily, and fracture toughness is the lowest, Double-Cantilever Beam (DCB) testing is a commonly used method to measure Mode-I interlaminar fracture toughness.

Bhudolia et al. (2016) experimentally investigated the critical mechanical properties for racket-like sports products. They manufactured carbon fiber-reinforced composites using both Elium and epoxy resins through vacuum-assisted resin infusion and conducted tensile, flexural, and DCB tests for comparison. Their findings highlighted the significantly superior potential of Elium resin in resisting crack propagation. In a subsequent study, Bhudolia et al. (2018) used Elium resin with carbon fiber and reported the excellent Mode-I interlaminar fracture performance of Elium-based composites. Barbosa et al. (2019) explored the damage mechanisms resulting from delamination in composite materials. They produced carbon fiber-reinforced Elium matrix composites via vacuum infusion and conducted Mode-II interlaminar fracture toughness tests. The results revealed that Elium composites were 40% more resistant to interlaminar failure compared to epoxy-based counterparts. In another study, Khan et al. (2022) introduced initial cracks in carbon fiber-reinforced Elium composites and subsequently post-cured the samples at various durations and temperatures above the glass transition temperature of Elium. Mode-I interlaminar fracture toughness was evaluated using DCB tests, and results indicated that higher post-curing temperatures and longer durations significantly enhanced fracture toughness values. Chen et al. (2024) investigated the interlaminar delamination characteristics of unidirectional carbon fiber-reinforced Elium matrix composites through DCB tests. Their findings demonstrated that strengthening the fiber–matrix interface bond significantly increased the Mode-I interlaminar fracture toughness of the composites. These comprehensive studies demonstrate that Elium resin offers superior mechanical performance compared to epoxy, particularly in terms of crack propagation resistance and interlaminar fracture toughness in FRP composites.

In terms of the fracture behavior of carbon and aramid FRP composites, Kim et al. (2011) investigated the performance of intraply CA fiber-reinforced epoxy matrix composites using DCB samples. Test results showed that carbon fiber-reinforced samples exhibited higher performance than the intraply hybrid ones, while aramid fiber-reinforced samples exhibited fiber splitting. Furthermore, the Mode-I

fracture toughness of the CA hybrid was found to be approximately equal to the average of the individual carbon and aramid fiber-reinforced samples. In contrast, Rajasekar et al. (2019) reported that the Mode-I fracture toughness of CA fiber-reinforced epoxy composites was higher than that of both single-fiber counterparts. This improvement was attributed to the bridging effect and enhanced fiber-matrix interfacial bonding, suggesting that intraply hybridization contributes positively to delamination resistance. Pincheira et al. (2018) also experimentally examined the influence of aramid fibers in CA fiber-reinforced epoxy composites and compared the results to carbon fiber composites. Although a slight decrease in stiffness was observed due to the aramid fibers, a significant improvement in impact and fracture resistance was reported, owing to the ductile nature of aramid compared to carbon. This was highlighted as a valuable advantage for high-performance applications such as aerospace. Alsaadi and Erklig (2021) explored the fracture behavior of aramid and carbon fiber-reinforced epoxy composites, including the effect of silicon carbide particle reinforcement. Using DCB samples for Mode-I fracture tests, they observed stronger bonding of particles in aramid/epoxy composites compared to carbon/epoxy. Bulut et al. (2020) experimentally investigated the effect of nano-clay and nano-silica particle additions on CA fiber laminates. They found increased Mode-II fracture toughness with 1.5 wt.% nano-silica and 2 wt.% nano-clay, and also reported that higher nanoparticle content led to increased water absorption in both cases. These studies demonstrate that the integration of aramid and carbon fibers significantly enhances the fracture resistance and mechanical performance of composites. The findings underscore the potential of hybrid fiber-reinforced materials for improving delamination resistance and fracture toughness, particularly for high-performance applications such as aerospace, where both strength and durability are critical.

Water aging is a critical factor in evaluating the long-term performance and durability of composites, particularly in environments where exposure to moisture is inevitable. The effects of water aging on Elium matrix composites have been summarized in the following studies.

Barbosa et al. (2019) studied the effects of distilled water aging on layered composites, using carbon fiber-reinforced Elium and epoxy matrix composites. The results showed that Elium composites exhibited 30% higher tensile strength than epoxy composites for non-aged samples, with the difference reducing to 14% after 8 weeks of aging at +80 °C. Epoxy composites absorbed more water due to higher void content. Bel Haj Frej et al. (2021) investigated the impact of hydrothermal aging on carbon fiber-reinforced Elium matrix composites at +70 °C in deionized water, observing minimal changes in tensile properties but significant reductions in interlaminar shear values. Their subsequent study showed that higher aging temperatures led to more significant mechanical effects (Bel Haj Frej et al., 2021). Devine et al. (2023) researched the behavior of glass fiber-reinforced Elium and epoxy composites after immersion in seawater at +50 °C, finding minimal impact on mechanical properties. Das et al. (2023) studied the behavior of flax and glass fiber-reinforced Elium and epoxy composites after aging at +23, +40, and +60 °C, noting that flax fiber composites absorbed more water than glass fiber composites. Kumar et al. (2024) examined glass fiber-reinforced Elium composites after two months in seawater at

+55 °C, finding a 25.6% decrease in tensile strength and a 14.8% decrease in flexural strength. Hussnain et al. (2024) studied the properties of glass fiber-reinforced Elium composites after aging in seawater at +35 and +70 °C for up to 135 days, observing significant reductions in tensile strength and modulus at higher temperatures. A study by Mohamad et al. (2025) investigated the properties of basalt fiber-reinforced Elium and epoxy composites. These composites were aged in seawater at +45°C for 45 and 90 days. The study found that the Elium composites exhibited superior mechanical properties compared to the epoxy composites, both initially and after aging. Specifically, the tensile strength of the Elium composites was found to be 33% higher, and the flexural strength was 71% higher. Furthermore, the Elium composites showed a smaller reduction in mechanical properties due to aging. These studies highlight the significant impact of water aging on the mechanical properties of Elium matrix composites, demonstrating varying degrees of degradation depending on fiber type, aging conditions, and temperature. Notably, Elium composites consistently exhibit better performance in terms of water absorption and mechanical retention compared to traditional epoxy composites, positioning them as a promising material for applications in challenging environmental conditions (Devine et al., 2023). According to the best of the authors' knowledge, there are no studies investigating the Mode-I fracture behavior of thermoplastic Elium matrix reinforced with CA hybrid fibers. Thus, composite samples reinforced with intraply CA hybrid fibers in Elium matrix were manufactured, and their interlaminar delamination properties were investigated. Fracture tests were also performed on samples subjected to distilled water aging for 2, 4, and 6 months.

2. Material and Method

2.1. Production of Composites

In this study, Elium, a thermoplastic resin based on methyl methacrylate and developed by Arkema, with a density of 1.19 g/cm^3 and a maximum operating temperature of +85 ºC, which is preferred in the production of FRP composites by vacuum infusion method, was utilized (Han et al., 2020). CA intraply hybrid twill fabric, composed of 61% carbon and 39% aramid fiber and having an areal density of 210 g/m^2, was used as the reinforcement for Elium. This specific intraply structure was chosen because the homogeneous distribution of fibers within the hybrid layer leads to superior mechanical properties and enhanced fracture performance compared to interply composites (Meninno and Chalivendra, 2021; Altaee and Mostafa, 2023; Huang et al., 2025). All materials and consumables for manufacturing were supplied by Dost Kimya Co. Ltd.

The composite laminates were produced utilizing a hand lay-up assisted vacuum infusion method as illustrated in Figure 1. Initially, a mixture of Elium resin and hardener (2% dibenzoyl peroxide) was applied to the CA hybrid fiber layers with a roller to ensure uniform distribution (hand lay-up). Following this, the vacuum infusion process was carried out, where the resin was drawn into the dry fiber stack under vacuum, allowing thorough impregnation. In the production of plates for the DCB test, a pre-crack is required. For this purpose, during the production of the plates, after half of the fabrics

were placed, the Polytetrafluoroethylene (PTFE) film shown in brown in Figure 2-a was placed. On top of the PTFE film, the mixture was applied again, and the fabrics were continued to be placed. During the vacuum infusion process, a vacuum was applied for approximately 30 minutes using Elium resin, which has a viscosity of 100 mPa·s (Brookfield LVF #2, 60 rpm). Once the resin flow was visually confirmed to have finished, the vacuum pump was turned off (Guzel, 2025). After the production process, the composites were left at room temperature for 24 hours for pre-curing, followed by a post-curing stage at +80 °C for 4 hours. Figure 2-b shows the vacuumed composite plate. The manufactured and cured composite laminates were cut according to the sample dimensions for DCB tests.

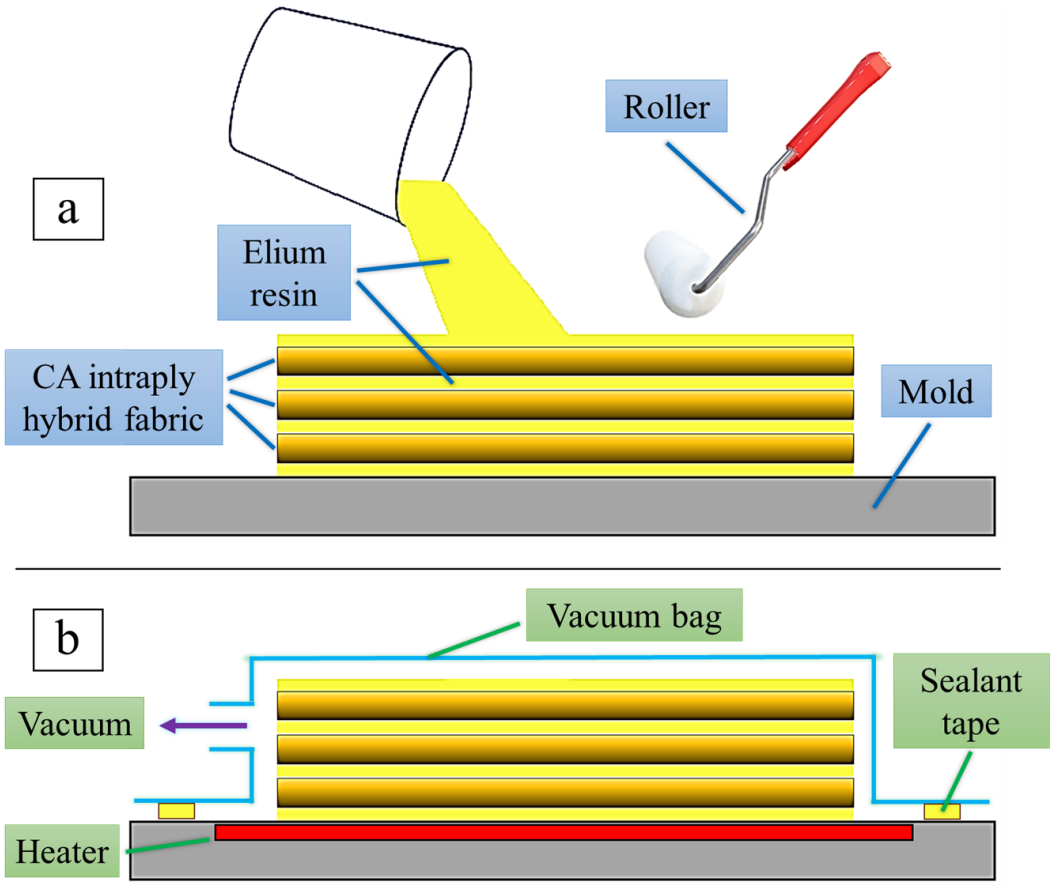


Figure 1. a) Hand lay-up, **b)** vacuum infusion method

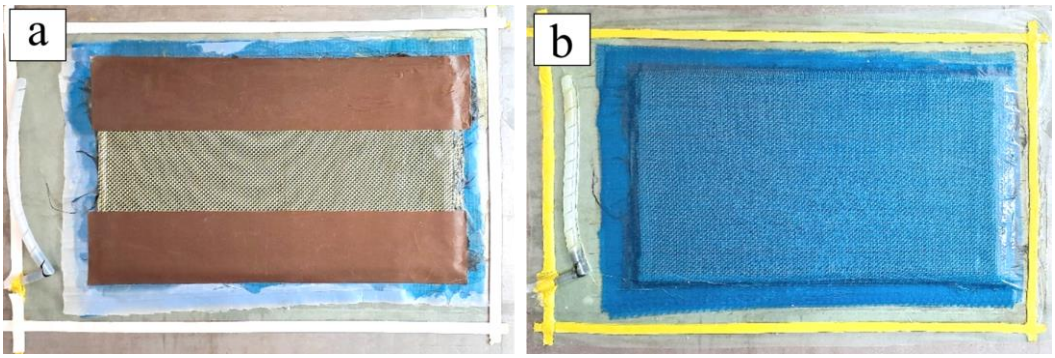


Figure 2. a) Production of samples for DCB, **b)** vacuumed composite plate

2.2. Water aging

The durability of composites is affected by environmental factors like moisture, temperature changes, UV exposure, and chemicals, which can impact long-term performance (Sukur and Onal, 2021; Yildirim et al., 2021). To assess the composites under realistic conditions, samples were immersed in distilled water at room temperature for 6 months to evaluate the effects of moisture on their mechanical properties. After the unaged samples were subjected to the DCB test, it was also performed on water-aged samples for 2, 4, and 6 months.

2.3. DCB test

DCB tests were performed on the Instron 8801 testing machine (Figure 3-a). All tests were carried out three repetitions at room temperature to obtain valid results. The tests were conducted according to ASTM D5528, and all DCB tests were performed at a cross-head speed of 2 mm/min. The length, width, and thickness of the samples were 140 x 25 x 5.8 mm. The length of the pre-crack created by the PTFE film was 70 mm. The loading applied to the samples in DCB tests is shown in Figure 3-b.

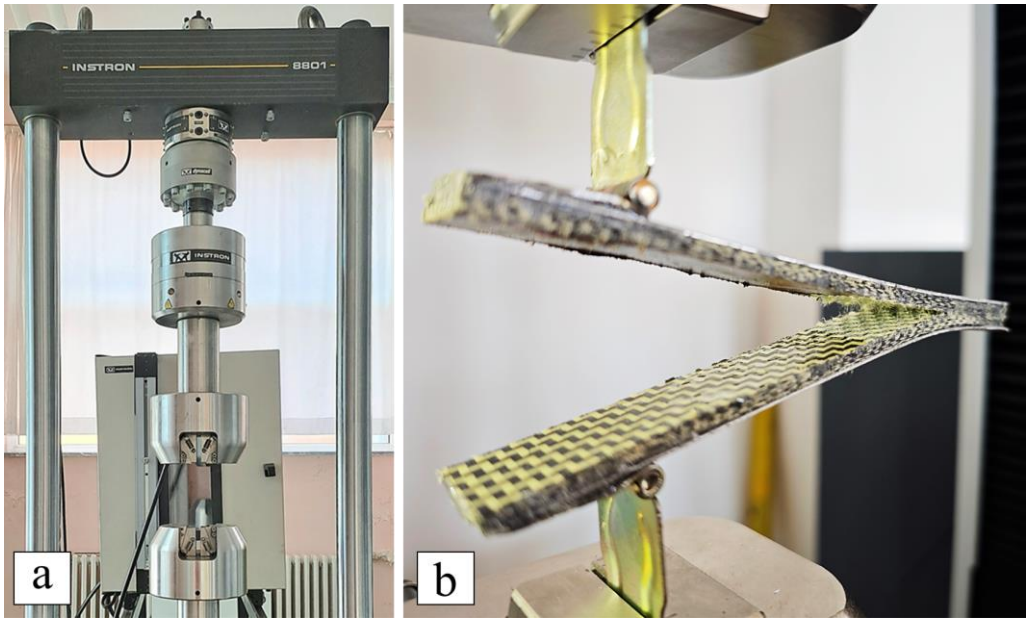


Figure 3. a) The Instron 8801 testing machine, **b)** performing DCB tests

2.4. Calculation of Mode-I Fracture Toughness with The Modified Beam Theory

Modified beam theory considers Mode-I fracture toughness as a result of the DCB test, as in Equation 1. Where; G_{Ic} is Mode-I fracture toughness in J/m^2, P is the force applied to the sample in N, δ is the displacement in mm, b is the sample width in mm and a is the crack length in mm.

$$G_{Ic} = (3\ P\ \delta)\ /\ (2\ b\ a) \quad (1)$$

Since rotation is likely to occur in the delamination zone, the G_{Ic} values calculated by Equation 1 will be overestimated. The way to correct for this rotation is to assume that the crack length contains a slightly

longer delamination. For this purpose, the normalized crack length, $|\Delta| + a$ is calculated. The graph showing the normalized crack length is presented in Figure 4.

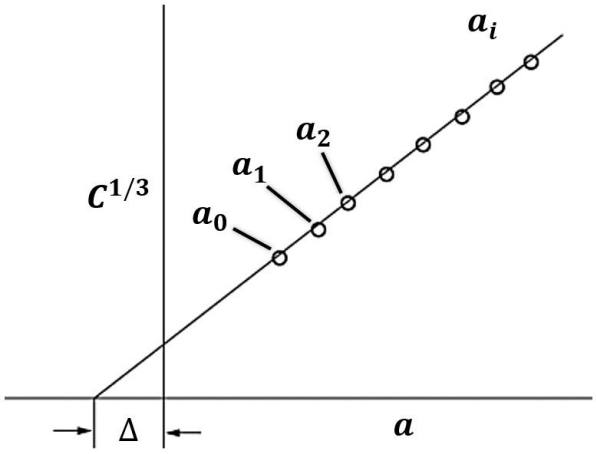


Figure 4. Finding the normalized crack length

C stands for compliance and is the ratio of the load point displacement δ to the applied force P ($C = \delta / P$). Accordingly, $|\Delta| + a$ is found experimentally from the relationship between the compliance C and the crack length a. As a result, the Mode-I fracture toughness value is obtained as in Equation 2.

$$G_{Ic} = (3\,P\,\delta\,) / \left(2\,b\,(|\Delta| + a)\right) \tag{2}$$

3. Results and Discussion

DCB tests were carried out on unaged and 2, 4, and 6 months water-aged samples and the force-displacement curves obtained are shown in Figure 5. These curves were generated by using the values of a specific sample for each aging time that showed the closest and similar result to the average. Accordingly, it is seen that the force values increase as the aging time increases.

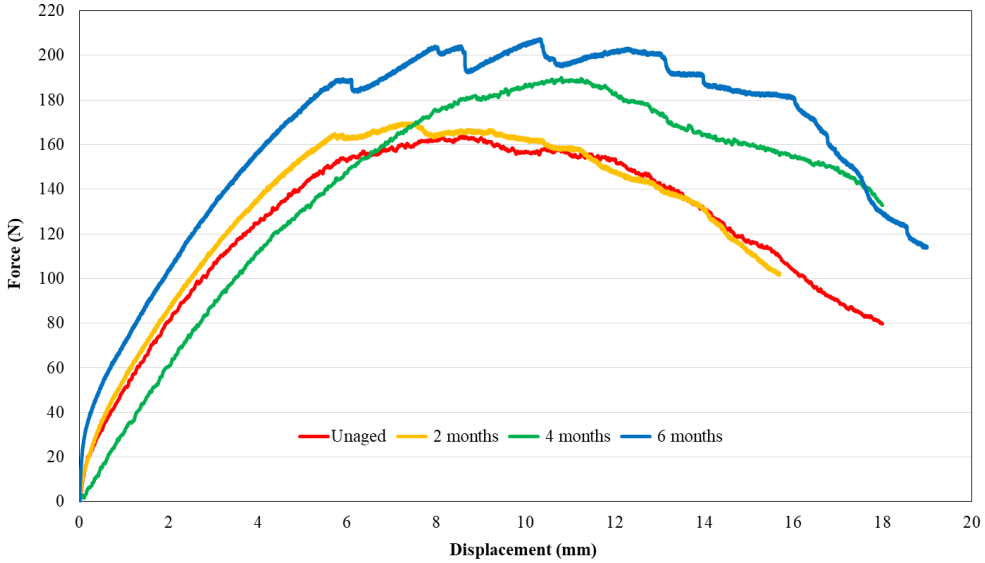


Figure 5. Force-displacement (N - mm) curves for composite samples subjected to varying aging periods (unaged, 2, 4, and 6 months)

Figure 6 shows the Mode-I fracture toughness-crack length curves according to aging time. The curves in this figure present the values of a specific sample that showed most similar result to the average for each aging time. Similar to the force-displacement curves, these curves also show that the aging duration has an effect that leads to an increase in fracture toughness. In unaged samples, fracture toughness increased as crack length progressed, whereas in the samples aged for 2 and 4 months, an increase is observed after the onset of crack propagation, followed by a behavior with less variability. In the samples aged for 6 months, fracture toughness increased at the beginning of crack propagation but showed a decrease as the crack continued to propagate, which can be attributed to the degradation of the matrix and the loss of fiber bridging efficiency after long-term aging as reported by Zhou et al. (2024).

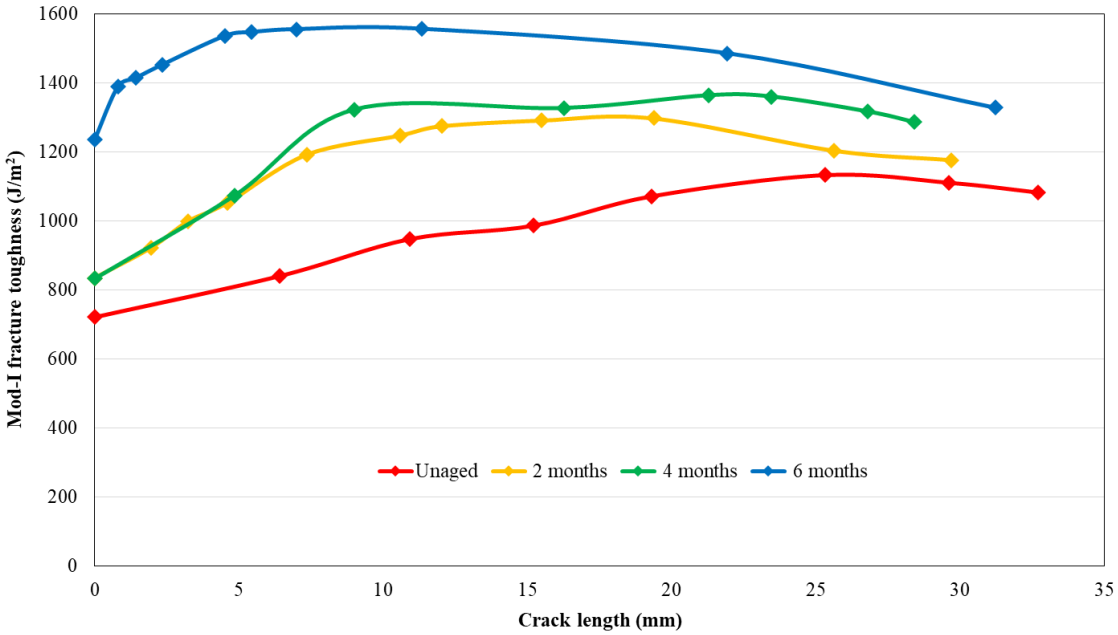


Figure 6. Mode-I fracture toughness-crack length (J/m^2 - mm) curves for composite samples subjected to varying aging periods (unaged, 2, 4, and 6 months)

The average maximum force and Mode-I fracture toughness values of the samples as a function of aging time are presented in Figure 7 and Figure 8, with standard deviations shown as error bars. The average DCB test results and their corresponding standard deviation values are also provided in Table 1. The increased values in the table are calculated with reference to unaged samples.

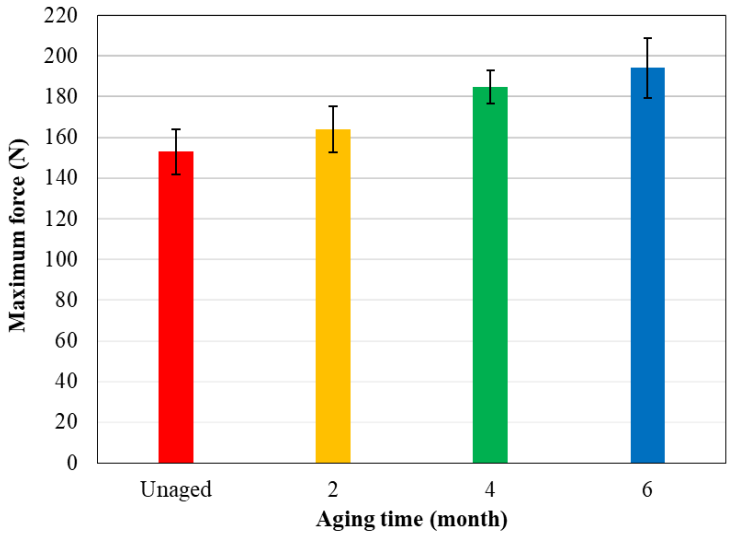


Figure 7. Average maximum force (N) of samples as a function of varying aging periods (unaged, 2, 4, and 6 months)

In the unaged samples, the average maximum force was determined to be 152.84 N, and the Mode-I fracture toughness was 1131.43 J/m^2. Following the aging process, an increase in maximum force was observed. After 2 months of aging, the maximum force increased by 7.22% to 163.87 N. A further increase of 13.65% was recorded after 4 months, reaching 184.73 N. After 6 months, an additional increase of 6.12% brought the maximum force to 194.09 N.

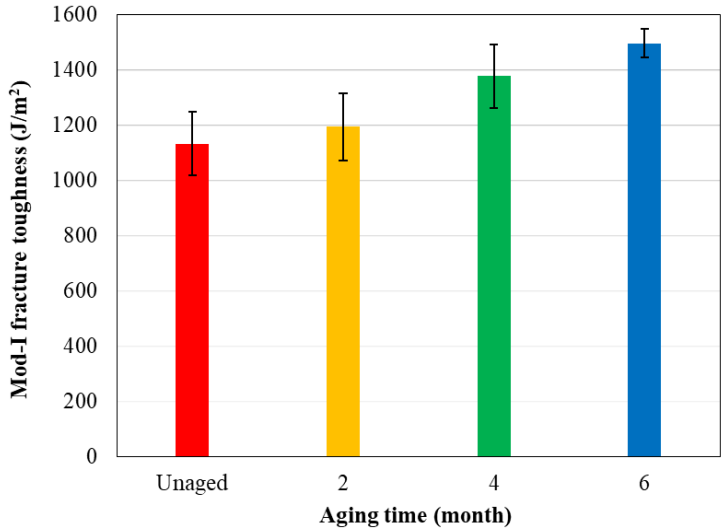


Figure 8. Average Mode-I fracture toughness (J/m^2) of samples as a function of varying aging periods (unaged, 2, 4, and 6 months)

Similarly, Mode-I fracture toughness also exhibited an increasing trend with aging duration. After 2 months, the fracture toughness increased by 5.41% to 1192.67 J/m^2. After 4 months, a further increase of 16.24% was observed, reaching 1376.37 J/m^2. At the end of the 6-month aging period, the fracture toughness increased by an additional 10.49%, reaching 1495.11 J/m^2.

In conclusion, after 6 months of aging, the maximum force and Mode-I fracture toughness showed increases of 26.99% and 32.14%, respectively, compared to the unaged samples.

The unaged DCB test results obtained in this study were evaluated in comparison with fracture toughness values reported in the existing literature for composite materials that were tested under similar conditions, specifically at room temperature and without exposure to any artificial aging processes. This comparative assessment aims to contextualize the current findings within the broader scope of previously published data, thereby providing a reference point for the performance of unaged composites. Such a comparison is essential for validating the reliability of the experimental results and for identifying any distinctive behavior of the composite system investigated in this study. When compared with existing literature, the Mode-I fracture toughness of 1131.43 J/m^2 obtained for the Elium matrix-based intraply CA hybrid composites at room temperature in this study falls within the expected range for similar composite systems. Rajasekar et al. (2019) reported Mode-I fracture toughness values ranging from 1015.76 to 1239.26 J/m^2 for CA fiber-reinforced epoxy composites, depending on the initial crack length. They noted that shorter initial crack lengths result in higher fracture toughness. Alsaadi and Erklig (2021) reported a Mode-I fracture toughness of 1093 J/m^2 for aramid fiber-reinforced epoxy composites. Kim et al. (2011) found a Mode-I fracture toughness of 942 J/m^2 for carbon fiber-reinforced epoxy composites, while Bhudolia et al. (2016) obtained a similar value of 970 J/m^2. In another study, Bhudolia et al. (2018) investigated Elium matrix-based carbon fiber-reinforced composites and reported a Mode-I fracture toughness of 1310 J/m^2, suggesting that the Elium matrix may contribute positively to fracture toughness. Overall, the results of this study are in good agreement with previous findings and indicate that the combination of hybrid fiber reinforcement and a thermoplastic matrix offers a promising approach to improving the fracture performance of composite materials.

Table 1. Average DCB test results according to aging time

Aging time	**Maximum force**	**Increase in maximum force**	**Mode-I fracture toughness**	**Increase in Mode-I fracture toughness**
Month	**N**	**%**	**J/m^2**	**%**
Unaged	152.84 ± 11.22	-	1131.43 ± 115.03	-
2	163.87 ± 11.26	7.22	1192.67 ± 120.46	5.41
4	184.73 ± 8.00	20.87	1376.37 ± 114.78	21.65
6	194.09 ± 14.62	26.99	1495.11 ± 52.45	32.14

In this study, the effect of water aging on fracture properties was evaluated. In their investigation of the impact of long-term aging on fracture performance, Bandaru et al. (2023) reported that the Mode-I fracture toughness of glass fiber-reinforced Elium composites increased by 90.15%, from 751 to 1428 J/m^2, after 60 days of aging. In contrast, Xu et al. (2024) observed a 16.67% decrease in Mode-I fracture toughness after immersing carbon fiber-reinforced epoxy composites in water at +75°C for 108 days. Similarly, Ulus et al. (2022) reported that the Mode-I fracture toughness of basalt fiber-reinforced epoxy composites decreased from 1190 to 720 J/m^2, a reduction of 39.7%, after six months of exposure to seawater. In conclusion, while water aging leads to a reduction in fracture properties in epoxy-based composites, it has been observed to enhance the fracture performance of Elium matrix-based composites. Furthermore, considering the interlaminar fracture behavior after water aging, it can be concluded that Elium matrix-based intraply CA hybrid fiber-reinforced composites offer reliable performance for long-term use.

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) analysis (Figure 9) was performed to examine the chemical changes occurring in the composite material after water aging, and the results revealed that the fundamental structure of the Elium thermoplastic matrix did not undergo any significant degradation. In both unaged and 6 months aged samples, the characteristic C=O stretching peak of the resin around 1720 cm^{-1} was largely preserved in terms of position and intensity. In contrast, a slight decrease was observed in the C-O stretching band around 1140 cm^{-1}, accompanied by a minor increase in the O-H band near 3300 cm^{-1}. These changes indicate that the absorbed water partially diffused into the matrix, resulting in limited hydroxylation and chain relaxation. In addition, the decrease or disappearance of the bands corresponding to the aramid fiber at 1540 cm^{-1} (Amide II) suggests interfacial bond weakening or fiber detachment from the surface (Das et al., 2023; Alsaadi et al., 2025). Furthermore, the partial plasticization observed in the FTIR spectra, along with the weakening of the fiber-matrix interfacial bonding, is believed to have contributed to the increase in fracture toughness observed in the DCB tests. This behavior can be attributed to water diffusion, enhancing the matrix's energy dissipation capability, which allows for greater energy absorption during crack propagation.

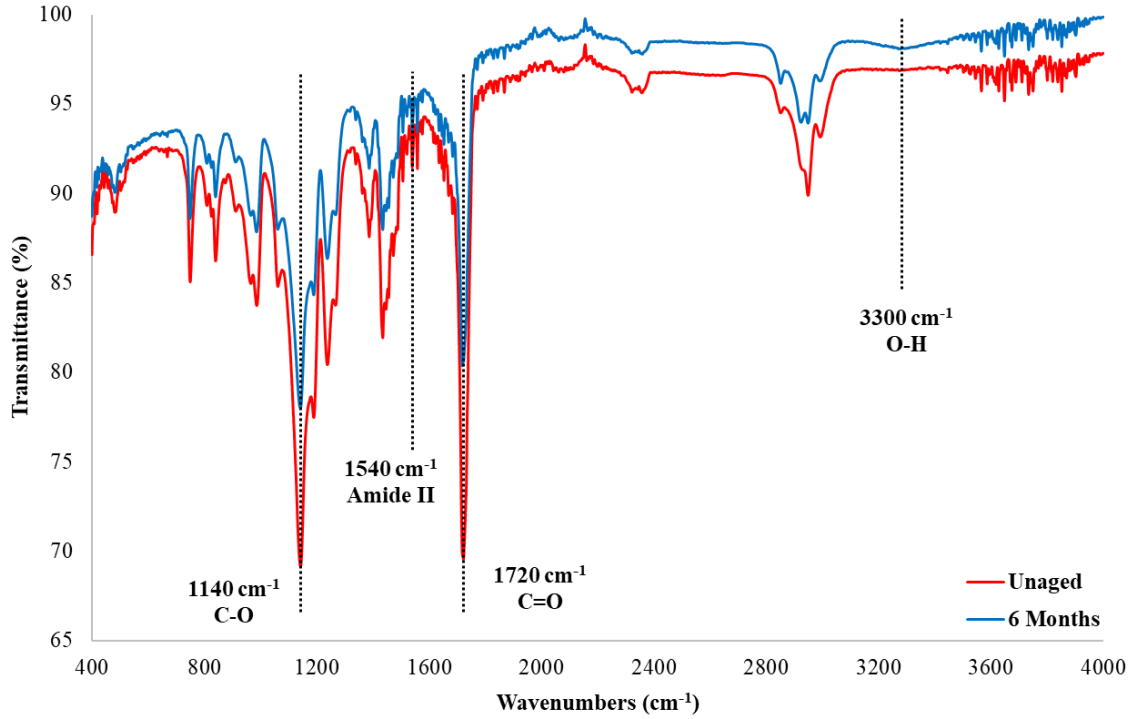


Figure 9. ATR-FTIR spectra of unaged and 6 months aged CA intraply hybrid composites

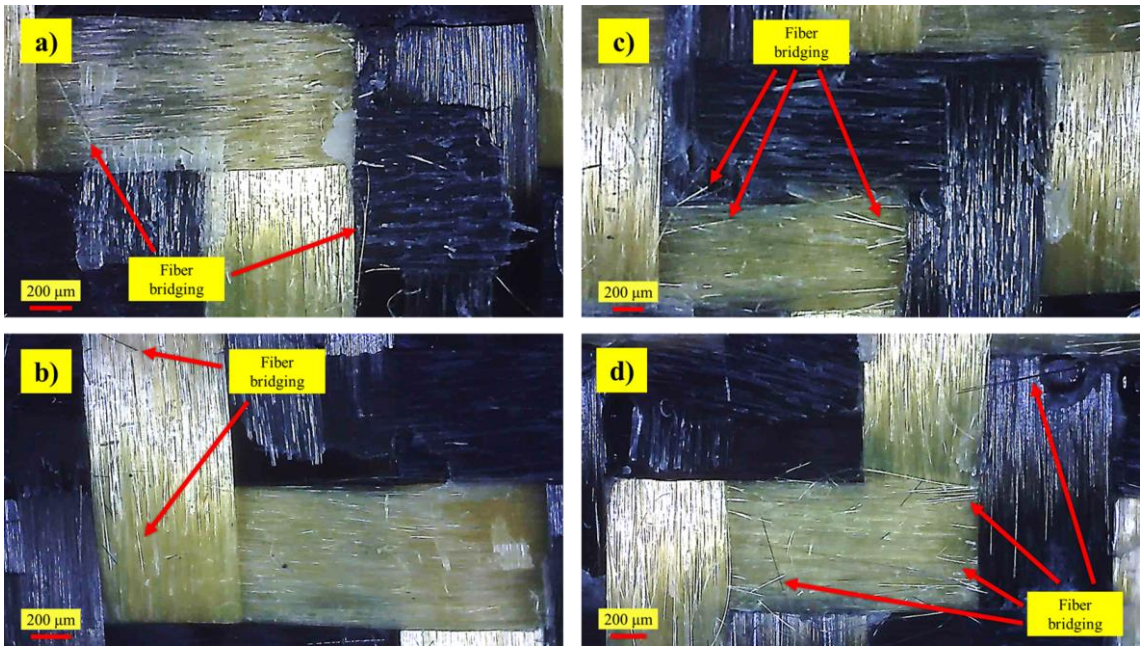


Figure 10. Macro failure images of DCB test of varying aging periods: a) unaged, b) 2 months aged, c) 4 months aged, d) 6 months aged

Figure 10 shows macro failure images of DCB test samples after aging. The images were taken from the surfaces completely separated by crack propagation starting from the pre-crack. Resins become plasticized and more ductile upon water absorption (Zhu et al., 2024). In this study, the plasticization of the Elium matrix due to water aging allowed the matrix to absorb more energy during crack propagation,

leading to an increase in the fracture toughness of the samples (Alejandro Rodriguez-Gonzalez et al., 2018). Simultaneously, the weakening of the fiber-matrix interfacial bonding -which is often considered a negative property- also contributed to the enhanced performance in DCB tests (Rodriguez-Gonzalez and Rubio-González, 2021). This interfacial weakening enabled fibers to debond more easily from the matrix, resulting in a more pronounced fiber bridging mechanism (Williams et al., 2025). The increased fiber bridging led to higher energy absorption as the crack propagated, thereby increasing the Mode-I fracture toughness (Han et al., 2022; Duan et al., 2024). As the water aging duration increased, a more pronounced fiber bridging mechanism was observed. The weakening of the fiber/matrix interface led to easier fiber pull-out, which resulted in extensive fiber bridging. Increased fiber bridging hindered crack propagation and contributed to the enhancement of Mode-I fracture toughness (Bandaru et al., 2023; Liu et al., 2025).

Scanning Electron Microscope SEM images detailing the fracture surfaces of CA-reinforced Elium composites following the DCB test are presented in Figure 11, revealing the distinct influence of aging on the delamination mechanism. Unaged specimens exhibited a smooth fracture surface morphology, indicating a tendency for brittle matrix fracture (Obande et al., 2019). This morphology, combined with good interfacial bonding, constrained the energy dissipation during crack propagation. In contrast, the fracture surface of the specimens subjected to 6 months of aging was characterized by interfacial weakening and a rough fracture surface. This environmentally induced interfacial degradation facilitated easier debonding of the fibers from the matrix, leading to a significantly more pronounced fiber bridging and fiber pull-out mechanism, which contributes substantially to the composite's toughness (Bhudolia et al., 2018). This result demonstrates that despite environmental conditioning weakening the interfacial bond, it concurrently triggers a highly effective bridging mechanism, thereby enhancing the ultimate delamination toughness of the composite (Bhudolia et al., 2023).

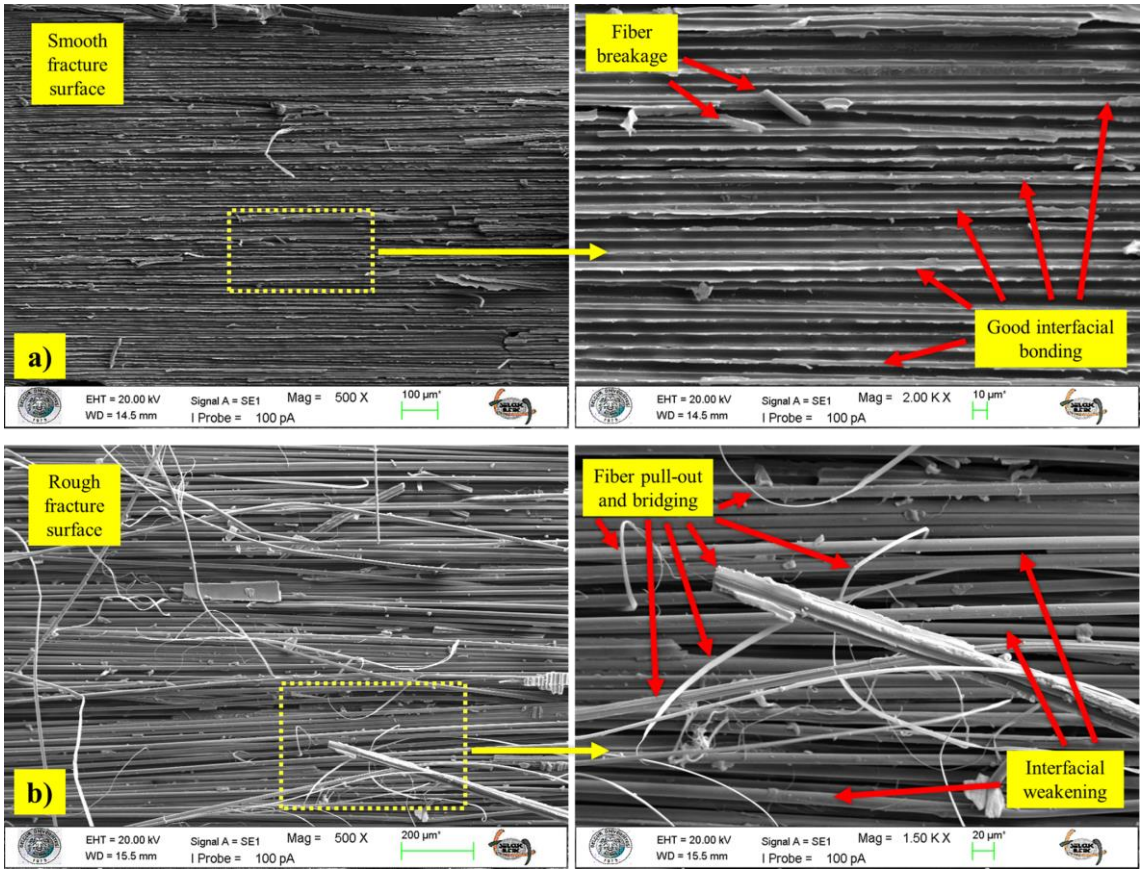


Figure 11. SEM images of DCB fracture surfaces after testing: a) unaged and b) 6 months aged

4. Conclusions

In this study, the DCB behavior of CA intraply hybrid fiber-reinforced composites with a thermoplastic Elium matrix was experimentally investigated after being aged in distilled water for 6 months. The fracture performance of unaged samples was compared with those aged in water for 2, 4, and 6 months. The key findings are as follows:

- In the DCB tests, the maximum force and Mode-I fracture toughness obtained for the unaged samples were 152.84 N and 1131.43 J/m^2, respectively. After aging, these values increased by 26.99% and 32.14%, reaching 194.09 N and 1495.11 J/m^2, respectively.
- The aging process positively influenced the interlaminar delamination behavior, which indicates that water aging can enhance certain aspects of fracture in hybrid fiber-reinforced composites.
- The results indicate that hybrid fiber composites with a thermoplastic matrix are a reliable and durable option for long-term use. This is because they not only improve fracture toughness but also maintain their performance under aging conditions.
- FTIR analysis revealed moisture-induced interfacial weakening and minor chain relaxation, suggesting that the absorbed water degraded the fiber/matrix bonding but preserved the Elium matrix's fundamental structure. This chemical change was corroborated by SEM fractography, which showed that the transition from a smooth (unaged) to a rough fracture surface (aged) was

a direct result of the highly effective fiber bridging and fiber pull-out mechanism triggered by the weakening interface, leading to enhanced Mode-I toughness.

The findings of this study demonstrate that Elium matrix hybrid composites are a promising alternative for potential real-world applications in demanding environments such as aerospace, marine, automotive, and humid settings. Specifically, the increased interlaminar fracture toughness even after water aging highlights the potential of these materials for applications requiring long-term durability and reliability. While some studies in the literature have utilized accelerated aging conditions, this work was limited to water aging at room temperature. Therefore, future research can build upon these findings by conducting tests under temperature-controlled accelerated aging conditions, which will enable a more comprehensive assessment of the material's aging behavior.

Additionally, to further advance these findings, investigating Mode-II and mixed-mode (Mode-I/Mode-II) fracture behaviors will provide a more comprehensive understanding of the material's failure mechanisms. Fatigue tests and longer-term aging experiments at different temperatures and salinity levels will also allow for a more thorough assessment of the durability performance of these composites for a broader range of applications.

Acknowledgements

This study, supported by Konya Technical University Coordinatorship of Scientific Research Projects (No: 221110045).

Statement of Conflict of Interest

The authors declare that there is no potential for conflict of interest to the research, authorship, or publication of this article.

Author's Contributions

The authors declare that they have contributed equally to the article.

References

Adem E., Batu T., Onal G., Wu Q. Investigation of fracture behaviour of hybrid composite materials under compact tension. Results in Engineering 2025; 25: 104616.

Alejandro Rodriguez-Gonzalez J., Rubio-Gonzalez C., de Jesus Ku-Herrera J., Ramos-Galicia L., Velasco-Santos C. Effect of seawater ageing on interlaminar fracture toughness of carbon fiber/epoxy composites containing carbon nanofillers. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2018; 37(22): 1346-1359.

Alsaadi M., Bulut M., Erklig A., Jabbar A. Nano-silica inclusion effects on mechanical and dynamic behavior of fiber reinforced carbon/kevlar with epoxy resin hybrid composites. Composites Part B: Engineering 2018; 152: 169-179.

Alsaadi M., Erklig A. Mode-l interlaminar fracture of aramid and carbon fibers reinforced epoxy matrix composites at various sic particle contents. Materials Testing 2021; 63(10): 913-918.

Alsaadi M., Erklig A., Abbas M. Effect of clay nanoparticles on the mechanical and vibration characteristics of intraply aramid/carbon fiber reinforced epoxy composite. Polymer Composites 2020; 41(7): 2704-2712.

Alsaadi M., Flanagan T., Devine DM. Seawater ageing effects on the mechanical performance of basalt fibre-reinforced thermoplastic and epoxy composites. Journal of Composites Science 2025; 9(7): 368.

Altaee MA., Mostafa NH. Mechanical properties of interply and intraply hybrid laminates based on jute-glass/epoxy composites. Journal of Engineering and Applied Science 2023; 70(1): 121.

Bandaru A., Khan AN., Durmaz T., Alagirusamy R., O'Higgins R. Improved mechanical properties of multi-layered ptfe composites through hybridisation. Construction and Building Materials 2023; 374 (2023): 130921.

Bandaru AK., Hickey S., Singh D., Gujjala R., Pichandi S. Influence of hygrothermal ageing on the novel infusible thermoplastic resin reinforced with quadriaxial non-crimp glass fabrics. Journal of Thermoplastic Composite Materials 2023; 36(10): 3813-3836.

Barbosa LCM., Bortoluzzi DB., Ancelotti Jr AC. Analysis of fracture toughness in mode ll and fractographic study of composites based on elium® 150 thermoplastic matrix. Composites Part B: Engineering 2019; 175: 107082.

Barbosa LCM., Santos M., Oliveira TLL., Gomes GF., Ancelotti Junior AC. Effects of moisture absorption on mechanical and viscoelastic properties in liquid thermoplastic resin/carbon fiber composites. Polymer Engineering & Science 2019; 59(11): 2185-2194.

Bel Haj Frej H., Léger R., Perrin D., Ienny P. Effect of aging temperature on a thermoset-like novel acrylic thermoplastic composite for marine vessels. Journal of Composite Materials 2021; 55(19): 2673-2691.

Bel Haj Frej H., Léger R., Perrin D., Ienny P. A novel thermoplastic composite for marine applications: Comparison of the effects of aging on mechanical properties and diffusion mechanisms. Applied Composite Materials 2021; 28(4): 899-922.

Bhudolia SK., Gohel G., Vasudevan D., Leong KF., Gerard P. Delamination behaviour and surface morphology of wholly thermoplastic composites using different ultra-high molecular weight thermoplastic fabrics with pristine and toughened elium resin under mode i loading. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2023; 164: 107273.

Bhudolia SK., Perrotey P., Joshi SC. Experimental investigation on suitability of carbon fibre thin plies for racquets. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology 2016; 230(2): 64-72.

Bhudolia SK., Perrotey P., Joshi SC. Mode-l fracture toughness and fractographic investigation of carbon fibre composites with liquid methylmethacrylate thermoplastic matrix. Composites Part B: Engineering 2018; 134: 246-253.

Bulut M., Alsaadi M., Erklig A. The effects of nanosilica and nanoclay particles inclusions on mode ll delamination, thermal and water absorption of intraply woven carbon/aramid hybrid composites. International Polymer Processing 2020; 35(4): 367-375.

Cetin ME., Bastosun Y., Tatar AC., Cetin MH., Demir O., Onal G., Avc A. The effect of halloysite nanotube modification on wear behavior of carbon-aramid fiber reinforced hybrid nanocomposites. Polymer Composites 2022; 43(1): 624-637.

Chen Y., Prasad V., Yasar M., Murphy N., Ivankovic A. Enhancing interfacial performance and fracture toughness of carbon fibre reinforced thermoplastic composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2024; 187: 108434.

Coskun T., Sahin OS. Effects of stacking sequence on the structural performance of composite overwrapped pressure vessels. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2022; 5(Special Issue): 117-134.

Coskun T., Sozen B., Kapıcı S., Sahin OS. Mechanical and dynamic characteristics for the cfrp, gfrp, and hybrid composites exposed to hcl environment. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2024; 0(0): 1-15.

Das SC., Srivastava C., Goutianos S., La Rosa AD., Grammatikos S. On the response to hygrothermal ageing of fully recyclable flax and glass fibre reinforced polymer composites. Materials 2023; 16(17): 5848.

Demir O., Yar A., Eskizeybek V., Avc A. Combined effect of fiber hybridization and matrix modification on mechanical properties of polymer composites. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 2023; 237(9): 1935-1951.

Deniz ME., Karakuzu R. Effect of hybridization type, hole-distance and number of holes on the resistance of intraply hybrid composite plates against multiple impact. Materials Testing 2025; 67(4): 690-702.

Devine M., Bajpai A., Obande W., Brádaigh CMÓ., Ray D. Seawater ageing of thermoplastic acrylic hybrid matrix composites for marine applications. Composites Part B: Engineering 2023; 263: 110879.

Dharmavarapu P., MBS SR. Aramid fibre as potential reinforcement for polymer matrix composites: A review. Emergent Materials 2022; 5(5): 1561-1578.

Duan Q., Hu H., Cao D., Cai W., Li S. A new mechanism based cohesive zone model for mode i delamination coupled with fiber bridging of composite laminates. Composite Structures 2024; 332: 117931.

Guzel MH. Effect of different temperatures and water aging on the mechanical properties of aramid/carbon reinforced elium matrix composites. Konya Technical University Institute of Graduate Studies PhD thesis, Page:28, Konya, Türkiye, 2025..

Han N., Baran I., Zanjani JSM., Yuksel O., An L., Akkerman R. Experimental and computational analysis of the polymerization overheating in thick glass/elium® acrylic thermoplastic resin composites. Composites Part B: Engineering 2020; 202: 108430.

Han N., Yuksel O., Zanjani JSM., An L., Akkerman R., Baran I. Experimental investigation of the interlaminar failure of glass/elium® thermoplastic composites manufactured with different processing temperatures. Applied Composite Materials 2022; 29(3): 1061-1082.

Huang C., Norton M., Joosten MW. Investigation of pseudo-ductile behaviour in 3d printed glass/carbon composites using interply and intraply hybridisation. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2025: 109118.

Hussnain S., Shah S., Megat-Yusoff P., Choudhry R., Hussain M. Hygrothermal effects on the durability of resin-infused thermoplastic e-glass fiber-reinforced composites in marine environment. Polymer Composites 2024; 45(15): 13901-13923.

Karacor B., Akar MA., Ozcanli M., Serin H., Bas O. Feasibility of a composite material formed with a waste granular rubber tire on racing vehicle aerodynamic wings. OKU Journal of Natural and Applied Sciences 2020; 3(2): 97-102.

Kaybal HB., Ulus H. Comparative analysis of thermoplastic and thermoset adhesives performance and the influence on failure analysis in jointed elium-based composite structures. Polymer Composites 2024; 45(4): 3474-3492.

Khan T., Irfan M., Cantwell W., Umer R. Crack healing in infusible thermoplastic composite laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2022; 156: 106896.

Kim JH., Song BK., Song JH., Min KJ. Control of mechanical properties of frp (fiber-reinforced plastic) via arrangement of high-strength/high-ductility fiber in a blended fabric. Materials 2023; 16(14): 5001.

Kim SC., Kim JS., Yoon HJ. Experimental and numerical investigations of mode-l delamination behaviors of woven fabric composites with carbon, kevlar and their hybrid fibers. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 2011; 12: 321-329.

Kumar V., Elen M., Sushmita K., Overman NR., Nickerson E., Murdy P., Presuel-Moreno F., Fifield LS. Hygrothermal aging and recycling effects on mechanical and thermal properties of recyclable thermoplastic glass fiber composites. Polymer Composites 2024.

Liu C., He C., Zou Z., Li Y. Study on mode i interlaminar fracture behavior of automated fiber placement in situ consolidation thermoplastic composite considering the influence of roller compaction pressure. Polymer Composites 2025; 46(2): 1454-1468.

Meninno C., Chalivendra V. Damage detection in intra-ply glass/carbon laminated composites under mode-i and mode-ii fracture loadings. Composites Part B: Engineering 2021; 218: 108924.

Mohamad A., Flanagan T., Devine DM. Seawater ageing effects on the mechanical performance of basalt fibre-reinforced thermoplastic and epoxy composites. Journal of Composites Science 2025; 9(7): 368.

Obande W., Mamalis D., Ray D., Yang L., Brádaigh CMÓ. Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic-and thermoset-based composites. Materials & Design 2019; 175: 107828.

Pietras D., Aliha M., Kucheki HG., Sadowski T. Tensile and tear-type fracture toughness of gypsum material: Direct and indirect testing methods. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2023; 15(7): 1777-1796.

Pincheira G., Canales C., Medina C., Fernández E., Flores P. Influence of aramid fibers on the mechanical behavior of a hybrid carbon–aramid–reinforced epoxy composite. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 2018; 232(1): 58-66.

Qi Z., Cai Da., Zhang N., Long L., Zhou G. Experimental and numerical study on the mechanical properties of carbon/aramid intralayer hybrid composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites 2024; 43(11-12): 657-670.

Quanjin M., Salim M., Rejab M., Bernhardi OE., Nasution AY. Quasi-static crushing response of square hybrid carbon/aramid tube for automotive crash box application. Materials Today: Proceedings 2020; 27: 683-690.

Rajasekar R., Asokan R., Santulli C., Pavlovic A., Fragassa C. The effect of fibre bridging on mode l interlaminar fracture toughness of carbon-aramid/epoxy intra-ply hybrid laminates. Tribology in Industry 2019; 41(1): 64-75.

Rodriguez-Gonzalez JA., Rubio-González C. Seawater effects on interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy laminates modified with multiwall carbon nanotubes. Journal of Composite Materials 2021; 55(3): 387-400.

Sebaey T., Wagih A. Flexural properties of notched carbon–aramid hybrid composite laminates. Journal of Composite Materials 2019; 53(28-30): 4137-4148.

Sozen B., Coskun T., Kapici S., Sahin OS. Comparison of the dynamic characteristics of gfrp, cfrp, and hybrid composites subjected to repeated low-velocity impact. Polymer Composites 2024; 45(17): 15941-15953.

Sukur EF., Kocaman S., Onal G. Mechanical, tribological and thermal properties of epoxy based phenolic nanocomposites reinforced with graphene nanoplatelet. Trans Mech Eng 2020; 6: 21-27.

Sukur EF., Onal G. Long-term salt-water durability of gnps reinforced basalt-epoxy multiscale composites for marine applications. Tribology International 2021; 158: 106910.

Ulus H., Kaybal HB., Cacık F., Eskizeybek V., Avci A. Fracture and dynamic mechanical analysis of seawater aged aluminum-bfrp hybrid adhesive joints. Engineering Fracture Mechanics 2022; 268: 108507.

Ulus H., Kaybal HB., Eskizeybek V., Avci A. Enhanced salty water durability of halloysite nanotube reinforced epoxy/basalt fiber hybrid composites. Fibers and Polymers 2019; 20: 2184-2199.

Unal H., Yetgin SH., Unal VF. Determination of mechanical performance and microstructural properties of glass fiber/epdm/polyamide-6 composites. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2022; 5(3): 1216-1229.

Williams A., Hamerton I., Allegri G. Environmental effects of moisture and elevated temperatures on the mode i and mode ii interlaminar fracture toughness of a toughened epoxy carbon fibre reinforced polymer. Polymers 2025; 17(11): 1503.

Xu K., Liu L., Zhi J., Chen W., Tay T. Hygrothermal effects on ballistic behavior of toughened cfrp laminates. International Journal of Mechanical Sciences 2024; 280: 109531.

Yalcin F., Ozcanli M., Karacor B. Investigation of the use of hybrid composite materials formed using two different resins in vehicle bumpers. OKU Journal of The Institute of Science and Technology 2024; 7(2): 751-766.

Yildirim F., Tatar AC., Eskizeybek V., Avci A., Aydin M. Impact response of nanoparticle reinforced 3d woven spacer/epoxy composites at cryogenic temperatures. Journal of Composite Materials 2021; 55(28): 4231-4244.

Yin HF., Zhou W., Zhang PF., Ma LH. Flexural progressive damage and failure behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid woven composites. Journal of Composite Materials 2021; 55(7): 937-948.

Zhou Y., Cao Y., Cao J., Zhang C., Li J., Wang Z. Fracture toughness and fiber bridging mechanism for mode-i interlaminar failure of spread-tow woven composites. Engineering Fracture Mechanics 2024; 298: 109957.

Zhu L., Bi R., Li W., Obara E., Cai P., Huang S., Luo C., Bao J. Aging performance and mechanism of carbon fiber-reinforced bismaleamide composites under natural aging in marine environments. Materials Today Communications 2024; 41: 110796.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1302-1327, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1302-1327, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Alışveriş Merkezlerinde Giyim Mağazası Çalışanlarının Ergonomik Riskler Açısından Değerlendirilmesi

Sertaç TEMUR[1*], İlker BULUT[2], Hafiz Hulusi ACAR[3]

[1]Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34664, İstanbul
[2,3]İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34010, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0003-4845-1452
[2]https://orcid.org/0009-0001-7447-5522
[3]https://orcid.org/0000-0001-7864-1009
*Sorumlu yazar: sertac.temur@uskudar.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.08.2025
Kabul tarihi:28.11.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Ergonomi
REBA
RULA
Giyim mağazası çalışanı
İş sağlığı ve güvenliği

ÖZ

Bu çalışma, alışveriş merkezlerindeki perakende giyim mağazalarında çalışanların maruz kaldığı ergonomik risk faktörlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Uzun süreli ayakta durma, ağır yük kaldırma, tekrarlayan hareketler ve uygunsuz çalışma koşulları, çalışanlarda kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilmektedir. Bu bağlamda, ergonomik risklerin belirlenmesi ve önlenmesi için farklı analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışmada, giyim mağaza çalışanlarının vücut postürleri REBA (Rapid Entire Body Assessment) ve RULA (Rapid Upper Limb Assessment) yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, mağazadaki genel iş bölümlerini temsil edecek şekilde rastgele seçilen beş çalışan (kabin, kasa, reyon, depo ve temizlik personeli) en çok tekrarlanan hareketler seçilerek analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, kabin personelinde REBA skoru 11 ile "çok yüksek risk", depo ve temizlik personellerinde REBA 10, reyon ve kasa personellerinde ise REBA 9–3 arasında değişen "yüksek–düşük risk" düzeyleri belirlenmiştir. RULA analizlerinde en yüksek skor 7 olup, özellikle kasa ve depo görevlerinde üst uzuv yüklenmeleri öne çıkmıştır. Bulgular, giyim mağazacılığı sektöründe çalışanların belirgin postür hataları sergilediğini ve ergonomik düzenlemelere ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca uzun süreli ve tekrarlayan hareketlerin kas-iskelet sistemi üzerindeki yükü artırarak hem iş verimliliğini azalttığı hem de çalışan sağlığını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, giyim mağazası çalışanlarının ergonomik risk faktörlerine maruz kaldığı tespit edilmiş ve uygun önlemlerin alınması gerektiği ortaya konmuştur. Doğru çalışma postürlerinin teşvik edilmesi, iş sağlığı ve güvenliği açısından kritik bir unsur olarak değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda, işyerlerinde ergonomik düzenlemeler yapılması ve çalışanlara uygun eğitimlerin verilmesi önerilmiştir.

Evaluation of Clothing Store Employees in Shopping Centers in Terms of Ergonomic Risks

Research Article

Article History:
Received: 07.08.2025
Accepted: 28.11.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Ergonomics
REBA
RULA

ABSTRACT

This study aims to evaluate the ergonomic risk factors faced by employees working in retail clothing stores located in shopping malls. Prolonged standing, heavy lifting, repetitive movements, and unsuitable working conditions can lead to musculoskeletal disorders among workers. In this context, different analysis methods are used to identify and prevent ergonomic risks. In the present study, the body postures of retail clothing store employees were evaluated using the REBA (Rapid Entire Body Assessment) and RULA

Clothing store workers
Occupational health and safety

(Rapid Upper Limb Assessment) methods. Five employees representing the main work areas of the store (fitting room, cashier, sales floor, stockroom, and cleaning staff) were randomly selected, and the most frequently repeated movements were analyzed. According to the results, the fitting room employee had a REBA score of 11 (very high risk), stockroom and cleaning staff scored 10, while sales and cashier employees ranged between 9–3, indicating high to low risk levels. The highest RULA score was 7, particularly in cashier and stockroom tasks, revealing upper-limb strain. The findings indicated that retail employees exhibit significant postural deviations and require ergonomic improvements. Moreover, repetitive and prolonged postures increase musculoskeletal strain, reduce work efficiency, and negatively affect worker health. In conclusion, ergonomic interventions and posture training should be implemented to reduce workplace risks and improve occupational health and safety in retail settings.

To Cite: Temur S., Bulut İ., Acar HH. Alışveriş Merkezlerinde Giyim Mağazası Çalışanlarının Ergonomik Riskler Açısından Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1302-1327.

1. Giriş

Modern tekstil perakende sektöründe özellikle alışveriş merkezlerinde faaliyet gösteren giyim mağazası çalışanları, uzun süreli ayakta kalma, tekrarlayan hareketler, yük taşıma ve sınırlı dinlenme süreleri gibi pek çok ergonomik riske maruz kalmaktadır. Bu durum, çalışanların iş doyumunu ve verimliliğini olumsuz etkilemekte, aynı zamanda iş kazaları ve meslek hastalıkları başta olmak üzere iş sağlığı sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği disiplini içinde ergonomik risk değerlendirmeleri hem bireysel hem de kurumsal düzeyde önleyici yaklaşımların geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır (Acar ve Üçüncü, 2020; Üçüncü ve Acar, 2020).

Kas-iskelet sağlığı; kaslar, kemikler, eklemler ve bunlara bağlı bağ dokuların birlikte oluşturduğu hareket sisteminin sağlıklı ve işlevsel bir şekilde çalışmasını ifade eder. Bu sistemin korunması, bireylerin ağrı ya da fiziksel kısıtlamalar yaşamadan hareket etmesini, el becerilerini kullanmasını ve günlük aktivitelerini yerine getirmesini mümkün kılar (Mohamed Khir ve ark., 2024). Dünya Sağlık Örgütü'ne (WHO) göre, kas-iskelet sistemi hastalıkları dünya çapında 1,71 milyardan fazla insanı etkileyerek, engelliliğin başlıca nedenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Mohamed Khir ve ark., 2024; Musculoskeletal Health, 2025). Tekstil sektörü, ülke ekonomilerine büyük ölçüde katkı sunarken, çalışanların sağlığı ve güvenliği açısından çeşitli riskleri barındıran bir çalışma ortamı yaratabilmektedir. Bu riskler; mekanik, fiziksel, kimyasal, ergonomik ve fizyolojik tehditler olarak sınıflandırılabilir (Kumar ve ark., 2014; Zengin ve Sekmen, 2023; Cengiz ve ark., 2024). Bununla birlikte yapılan çalışmalarda Türkiye'deki sektörlerin İSG uygulamalarının yeterliliğini inceleyen çalışmada, tekstil sektörünün İSG faaliyetleri bakımından en düşük yeterliliğe sahip sektörlerden biri olduğu belirtilmiştir (Yılmaz, 2009; Zengin ve Sekmen, 2023). Alışveriş merkezi giyim mağazası çalışanları üzerine yapılan araştırmalarda, depo düzenleme, temizlik ve mağaza açılış-kapanış işlemleri gibi ek çalışmalar da dikkate alındığında, günlük çalışma süresinin 12 saate, haftalık toplam sürenin ise ortalama 49 saate ulaştığı belirtilmektedir (Başcı, 2019; FreiGeist, 2025). Ayrıca, mağazada yalnızca satış danışmanı olarak görev yapanların dahi açılış-kapanış, temizlik, depo düzeni ve reyon yerleşimi gibi pek çok farklı işi yerine getirmek zorunda kaldığı ortaya konmuştur. Giyim mağazası çalışanlarının, çalışma süreleri içerisinde dinlenme süreleri haricinde ayakta ve tekrarlı işlerde bulundukları

bilinmektedir. Uzun süre ayakta kalma ve tekrarlı işler, çalışanlarda kas-iskelet sistemi hastalıklarına sebep olmaktadır (Sharma ve Singh, 2003; Treaster ve Burr, 2004; Yapıcı, 2011; Zorlu ve ark., 2021). Mağaza çalışanlarının, depolama faaliyetleri, reyon düzenleme gibi süreçlerde elle taşıma, yük kaldırma gibi güç gerektiren aktivitelerde de bulunmaktadırlar. Elle taşıma işleri ve yük kaldırma, çeşitli ergonomik tehlikeleri beraberinde getirmektedir (Gagne, 2011; Rahman ve Zuhaidi, 2017). Bu tehlikelerin başlıcaları; kuvvet uygulama, sürekli tekrar eden hareketler, rahatsız ve uzun süre devam eden duruşlar ile hareketsiz pozisyonlardır. Bu risk etmenlerinin varlığı, kas-iskelet sistemi hastalıkları (MSD) açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Özellikle sırt ve boyun bölgesi incinmeleri, karpal tünel sendromu ve omuz dönmesi, manşet yaralanmaları gibi rahatsızlıkların görülme ihtimalini artırmaktadır. Bu tür sağlık sorunları, özellikle bedensel faaliyetlerin yoğun olduğu işlerde çalışan bireyler için ciddi bir sorun teşkil etmektedir (Riihimäki, 1999; Sharma ve Singh, 2003; Treaster ve Burr, 2004; Shipp ve ark., 2009; Rahman ve Zuhaidi, 2017).

Bu çalışmanın temel amacı, alışveriş merkezlerinde görev yapan giyim mağazası çalışanlarının maruz kaldığı ergonomik riskleri sistematik olarak ortaya koymak ve iş sağlığına olan etkilerini bilimsel yöntemlerle değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarıyla ilişkili ergonomik risk faktörlerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan REBA (Rapid Entire Body Assessment) ve RULA (Rapid Upper Limb Assessment) yöntemleri uygulanarak çalışanların farklı görevlerdeki vücut postürleri analiz edilmiştir. Alışveriş merkezlerinde faaliyet gösteren giyim mağazası çalışanları, hizmet sektörü içinde yoğun fiziksel ve psikososyal taleplerin bulunduğu bir iş ortamında görev yapmaktadır. Uzun süreli ayakta kalma, sınırlı hareket alanı, tekrarlayan görevler ve ergonomik açıdan uygun olmayan çalışma düzeni; kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları başta olmak üzere pek çok sağlık sorununu beraberinde getirmektedir. Bu tür risklerin sistematik biçimde değerlendirilmesi ve belgelenmesi hem çalışan sağlığının korunması hem de işyerinde verimlilik ve sürdürülebilirliğin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu bağlamda, yürütülen bu çalışma sadece mevcut ergonomik riskleri tespit etmeye yönelik değil, aynı zamanda hizmet sektöründe, özellikle de perakende ve giyim mağazası çalışanları özelinde ergonomiye dair farkındalığı artırmayı da amaçlamaktadır. Bilimsel değerlendirme yöntemlerinin sahada uygulanması ve somut bulgulara dayalı önerilerin sunulması, bu araştırmayı benzerlerinden ayırmakta ve sektörel düzeyde politika üretimi için referans niteliği taşımaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma İstanbul ili Sarıyer ilçesi sınırları içerisinde yer alan bir alışveriş merkezinde bulunan perakende satış yapan bir giyim mağazasında yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında mağaza çalışanları yaptıkları işlere göre kasa personeli, reyon personeli, depo personeli, kabin personeli ve temizlik personeli olmak üzere toplam 5 çalışma alanında sınıflandırılmıştır. Pozisyonlar belirlenirken, mağaza çalışanlarının günlük çalışma rutinleri doğrudan gözlemlenmiş ve gün içerisinde en sık tekrar edilen, ergonomik açıdan risk oluşturma potansiyeli yüksek çalışma pozisyonları veri toplama sürecine dâhil

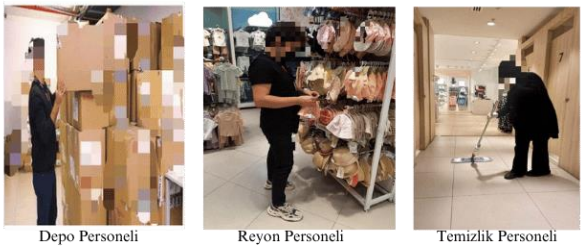
edilmiştir. Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te, araştırmanın yürütüldüğü mağazada en sık karşılaşılan pozisyonlar temel alınarak belirlenen beş çalışma sınıfına ait örnekler ile bu sınıfları temsilen rastgele seçilen beş çalışanın görseli sunulmuştur. Çalışma grubunu, 20–30 yaş aralığında yer alan ve literatürde (Santrock, 2012; Ulusoy, 2020) genç–yetişkin çalışanlar olarak tanımlanan bireyler oluşturmaktadır. Katılımcıların mağazacılık sektöründe 1–3 yıl arasında değişen mesleki deneyime sahip olmaları, örneklem seçiminde dikkate alınan bir diğer ölçüt olmuştur.



Şekil 1. Kasa Personeli Çalışma Pozisyonu



Şekil 2. Kabin Personeli Çalışma Pozisyonu



Şekil 3. Diğer Mağaza Çalışanlarının Çalışma Pozisyonları

Ergonomik riskleri değerlendirme yöntemi olarak, kas iskelet sistemi rahatsızlarıyla ilgili risk faktörlerini değerlendirmek için en yaygın olarak kullanılan (McAtamney ve Nigel Corlett, 1993; Gómez-Galán ve ark., 2020; Hita-Gutiérrez ve ark., 2020; Kim ve ark., 2022) Rapid Upper Limb Assessment (RULA) ve Rapid Entire Body Assessment (REBA) risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak değerlendirilmeye çalışılmıştır.

RULA yöntemi boyun, gövde ve üst uzuvların duruşlarının yanı sıra kas aktivitesi ve dış kuvvetlerin neden olduğu kas-iskelet sistemi üzerindeki gerginliğin hızlı bir değerlendirmesini sunan ergonomik bir risk değerlendirmesidir (McAtamney ve Nigel Corlett, 1993). REBA yöntemi ise, kas-iskelet sistemi gerginliği içeren görevlere özel bir hassasiyetle vücut duruşunu analiz etmek için tasarlanmıştır. Bu durum REBA yönteminin özellikle sağlık ve hizmet gibi sektörler için uygun olduğu yapılan

çalışmalarda belirtilmiştir (Hignett ve McAtamney, 2000; Kim ve ark., 2022). REBA tüm vücut eklem hareketleri için sınıflandırmalar sağlarken, RULA daha çok üst vücut ve gövde bölgelerindeki duruşları değerlendirmeye odaklanmaktadır (Kee, 2021a).

RULA ve REBA ergonomik risk değerlendirme araçlarının her ikisi de gerekli müdahalelerin aciliyetine rehberlik eden eylem seviyelerini kullanarak postüral riskleri sınıflandırır.

Tablo 1. RULA Risk Değerlendirme Aksiyon Tablosu (Kee, 2021a; Geçici, 2023)

Skor Aralığı	**Seviye**	**Müdahale Durumu**
1-2	1	Duruşun uzun süre devam etmediği sürece kabul edilebilir olduğunu belirtir.
3-4	2	Daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulabileceğini belirtir.
5-6	3	Değişikliklerin kısa sürede yapılmasını önerir.
7+	4	Acil müdahale gerektirir.

Tablo 1'de RULA risk değerlendirme aksiyon adımları verilmiştir. RULA yönteminde aksiyon adımları 4 seviyede tanımlanmıştır: Seviye 1, duruşun uzun süre devam etmediği sürece kabul edilebilir olduğunu; Seviye 2, daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulabileceğini; Seviye 3, değişikliklerin kısa sürede yapılmasını önerir ve Seviye 4, acil müdahale gerektirir.

Tablo 2. REBA Risk Değerlendirme Aksiyon Tablosu (Kee, 2021a; Geçici, 2023)

Skor Aralığı	**Seviye**	**Aksiyon**
1	0	Hiçbir eylemin gerekli olmadığı anlamına gelir
2-3	1	Daha fazla değerlendirmenin gerekli olabileceğini gösterir
4-7	2	Düzeltici eylemin gerekli olduğunu gösterir
8-10	3	Kısa sürede müdahale çağrısı yapar
11-15	4	Acil düzeltici eylem ve daha fazla değerlendirme

Tablo 2'de sunulan REBA yöntemi, düzeltici eylemlerin gerekliliği ve müdahale aciliyeti açısından beş düzeyde sınıflandırma yapmaktadır. Seviye 0, herhangi bir düzeltici eyleme ihtiyaç duyulmadığını belirtirken; Seviye 1, ilave değerlendirmelerin gerekebileceğine işaret etmektedir. Seviye 2, düzeltici

eylemin gerekli olduğunu ortaya koymakta; Seviye 3, müdahalenin ivedilikle gerçekleştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. En yüksek düzey olan Seviye 4 ise, acil düzeltici eylemin yanı sıra kapsamlı bir yeniden değerlendirme sürecinin de zorunlu olduğunu göstermektedir. Bu sınıflandırma, ergonomik risklerin sistematik biçimde önceliklendirilmesine olanak sağlamakta ve işyeri ortamlarında etkili müdahale stratejilerinin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

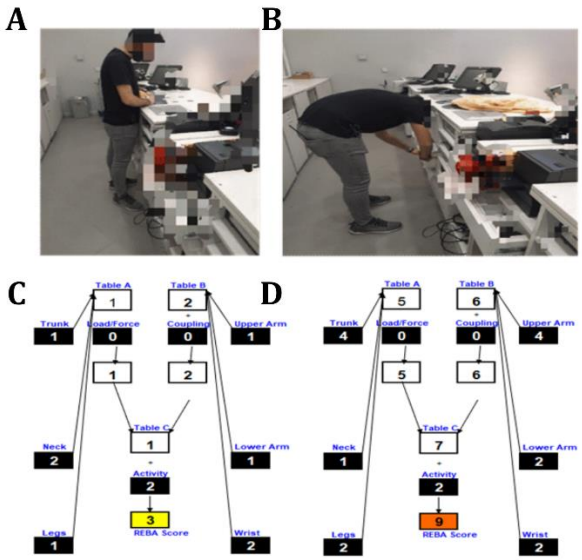
Bu araştırma, Üsküdar Üniversitesi Girişimsel Olmayan (Klinik Dışı) Araştırmalar Etik Kurulu tarafından etik ilkeler çerçevesinde değerlendirilmiş ve 26 Haziran 2025 tarihli, 07 sayılı toplantıda 2025-31 dosya numarası ile uygun bulunmuştur. Söz konusu etik kurul onayı, 30 Haziran 2025 tarihli ve 61351342/020-1256 sayılı yazı ile belge altına alınmıştır.

3. Bulgular

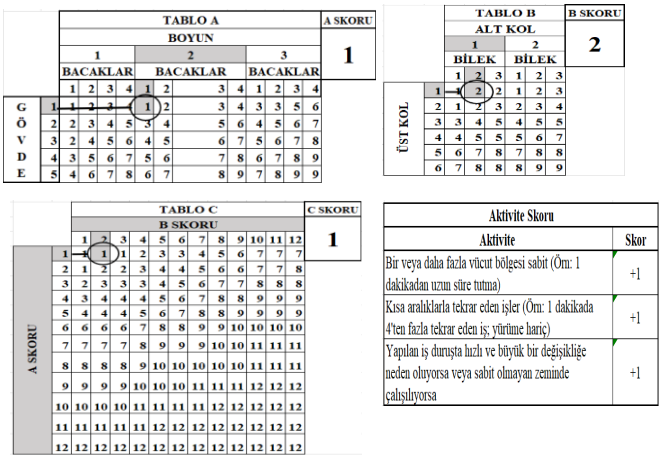
Alışveriş merkezlerinde gerçekleştirilen REBA ve RULA ergonomik risk değerlendirmeleri sonucunda elde edilen veriler, çalışma pozisyonları bazında ayrı ayrı analiz edilerek bulgulara ulaşılmıştır.

3.1. Kasa personeli için REBA-RULA değerlendirmesi

Kasa personelinin gün içerisinde sık sık tekrar ettiği pozisyonlar üzerinden yapılan değerlendirmeler Şekil 4'te A resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması C resminde; B resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması ise D resminde görselleştirilmiştir.

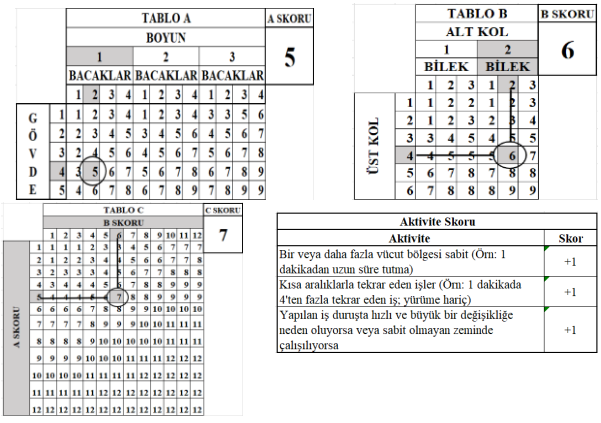


Şekil 4. Kasa Personeli REBA Skoru Değerlendirmesi
(Not: A ve B çalışma pozisyonlarını ifade ederken;
C ve D REBA skorunun hesaplanma şemasını ifade etmektedir.)



Şekil 5. Şekil 4 A Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

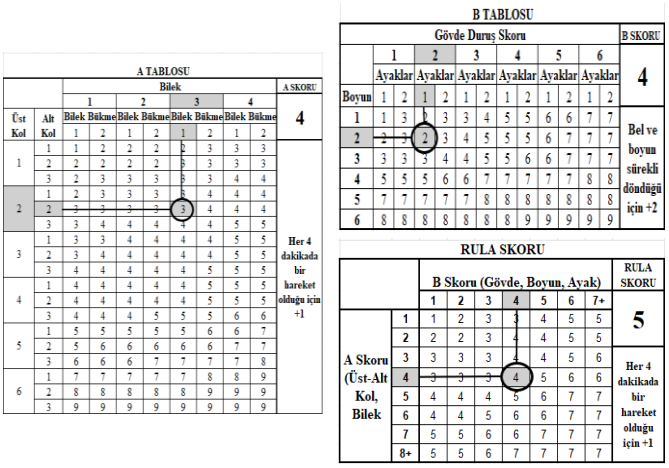
Şekil 5'te incelenen örnek duruşta, gövdenin dik pozisyonda olması (+1), boynun >20° fleksiyonda bulunması (+2) ve bacaklarda bilateral ağırlık taşınması (+1) ile Tablo A skoru 1 olarak hesaplanmıştır. Üst kollar 20° fleksiyonda değerlendirilmiş (+1), alt kolların <60° veya >100° fleksiyonda olması (+2), bileklerin >15° fleksiyonda olması (+2) ve ayrıca bileklerde esneme veya dönme hareketlerinin gözlenmesi (+1) sonucunda bilek skoru 3 olarak belirlenmiştir. Kavrama kalitesi iyi olduğu için bu bölümden puan alınmamıştır (+0). Bu verilerle Tablo B skoru 3 ve birleşik değerlendirme olan Tablo C skoru 1 olarak belirlenmiştir. Aktivite puanı ise yapılan işin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden işler; yürüme hariç) ve iş sırasında duruşta hızlı ve büyük değişikliklerin meydana gelmesi ya da sabit olmayan zeminde çalışılması gerekçeleriyle +2 olarak verilmiştir. Toplam REBA skoru 3 olup, bu sonuç REBA risk derecelendirme sistemine göre 1. dereceye karşılık gelmektedir. Bu düzey, düşük risk seviyesini ifade ederken, bazı durumlarda önlem alınması gerekebileceğine işaret etmektedir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, mevcut iş pozisyonunun ergonomik açıdan düşük risk taşıdığı ancak yine de belirli koşullarda iyileştirme yapılmasının faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Şekil 4 B Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 6'da değerlendirilen örnek pozisyonda, gövdenin 60° üzeri fleksiyonda olması (+4), boynun 0°-20° fleksiyonda bulunması (+1), dizlerde 30°-60° arası fleksiyonla birlikte bilateral ağırlık taşınması

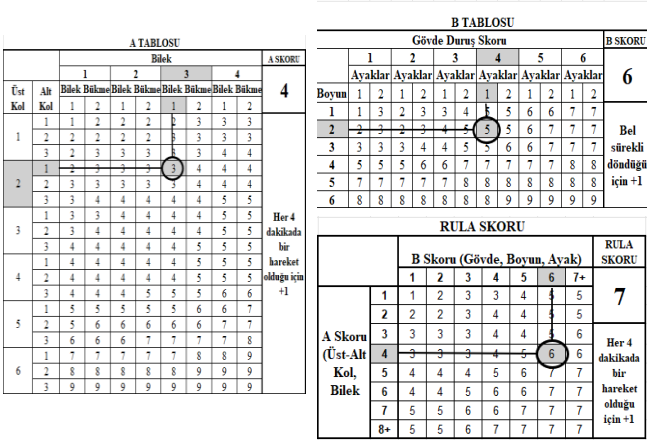
(+2), üst kolların 45°-90° arası fleksiyonda ve abdüksiyon pozisyonunda olması (+4), alt kolların <60° veya >100° fleksiyon göstermesi (+2), bileklerde >15° fleksiyon olması (+2) gibi ergonomik açıdan zorlayıcı duruşlar belirlenmiştir. Yük/kuvvet etkisi skorlamaya dahil edilmemiştir (+0) ve kavrama kalitesi iyi olarak değerlendirilmiştir (+0). Elde edilen değerler doğrultusunda Tablo A skoru 5, Tablo B skoru 6 ve birleşik skor olan Tablo C skoru 7 olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, Aktivite puanı ise yapılan işin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin bir dakikada dörtten fazla tekrar; yürüme hariç) ve çalışanın duruşunda hızlı ve büyük değişimlere neden olması ile sabit olmayan zeminde çalışılması nedeniyle +2 olarak değerlendirilmiş ve toplam REBA skoru 9 bulunmuştur. Bu skor, REBA risk derecelendirme sistemine göre 3. dereceye karşılık gelmekte olup, yüksek risk düzeyini göstermekte ve hızlı şekilde müdahale edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, değerlendirilen pozisyonun iş sağlığı açısından ciddi ergonomik riskler taşıdığını ve işyerinde düzeltici önlemlerin ivedilikle alınması gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 7. Şekil 4-A Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 7'de bulunan RULA değerlendirmesi kapsamında, çalışanın üst kol pozisyonu 0–20° fleksiyonda olup kolların açık konumda bulunması nedeniyle bu bileşen +2 puan almıştır. Ön kol 0–90° fleksiyon aralığında ve vücuda yakın pozisyonda çalışmakta olduğundan toplamda +2 puan ile değerlendirilmiştir. Bilek pozisyonu 0–15° fleksiyonla birlikte eksen dışı bükülme içerdiğinden toplamda +3 puan puanlanmıştır. Gövde düz duruşta olduğu için +1 puan, boyun ise >20° fleksiyon pozisyonunda olduğu için +3 puan ile değerlendirilmiştir. Bel ve boyun hareketlerinin süreklilik göstermesi nedeniyle B tablosuna +2 puan eklenmiş; ayrıca, her dört dakikada bir pozisyon tekrarlandığından dolayı A tablosu ve toplam RULA skoruna +1 puan ilavesi yapılmıştır.

Tüm bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen RULA skoru 5 olarak belirlenmiştir. Bu skor, riskin 3. seviyede olduğunu göstermekte ve çalışma koşullarında kısa sürede ergonomik iyileştirme yapılması gerektiğine işaret etmektedir.



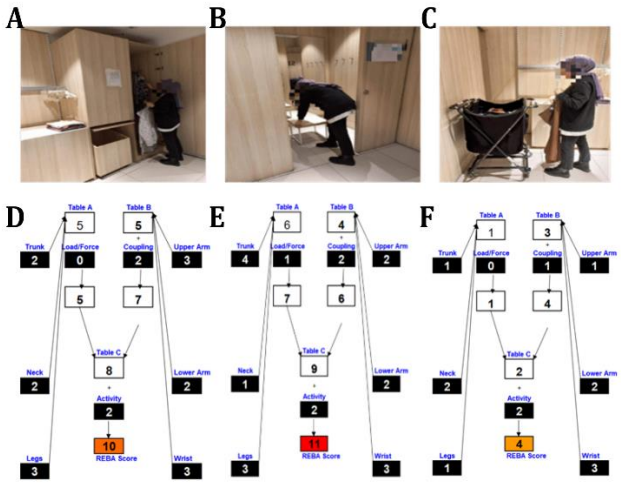
Şekil 8. Şekil 4-B Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 8'de bulunan RULA ergonomik risk değerlendirmesi kapsamında, çalışanın üst kol pozisyonu 20–45° fleksiyonda ve kollar açık şekilde konumlandığı için toplamda +3 puan almıştır. Ön kol 0–90° fleksiyon aralığında ve vücuda yakın pozisyonda olduğundan bu bölge için +2 puan verilmiştir. Bilek pozisyonu 0–15° fleksiyonda olup eksen dışı bükülme içerdiğinden toplam +3 puanla değerlendirilmiştir. Gövde >60° fleksiyon pozisyonunda bulunduğundan +4 puan almış; boyun ise 10–20° fleksiyon konumunda değerlendirildiği için +2 puan ile puanlanmıştır. Bel bölgesindeki sürekli dönme hareketi nedeniyle B tablosuna +1 puan eklenmiştir. Ayrıca, işin her dört dakikada bir tekrar eden nitelikte olması nedeniyle hem A tablosuna hem de genel RULA skoruna +1 puan ilavesi yapılmıştır.

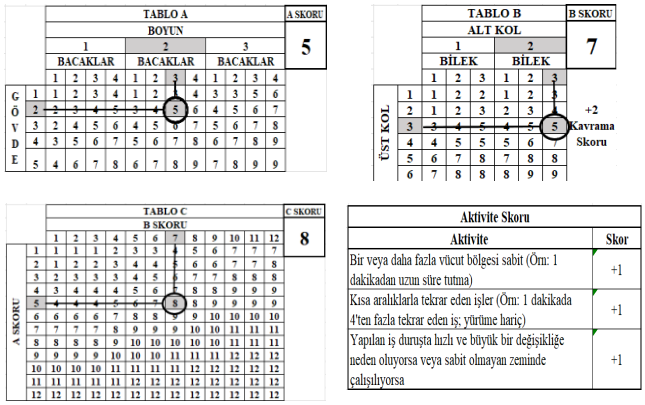
Bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen toplam RULA skoru 7 olarak hesaplanmıştır. Bu skor, riskin 4. seviyede olduğunu göstermekte olup, acil müdahale edilmesi gerektiğini ve ergonomik koşulların iyileştirilmesine yönelik düzenlemelerin hızla planlanmasını gerekli kılmaktadır.

3.2. Kabin personeli için REBA ve RULA Değerlendirmesi

Kabin personelinin gün içerisinde sık sık tekrar ettiği pozisyonlar üzerinden yapılan değerlendirmeler Şekil 9'da A resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması D resminde; B resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması ise E resminde; C resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması F resminde görselleştirilmiştir.



Şekil 9. Kabin Personeli REBA Skoru Değerlendirmesi
(Not: A, B ve C çalışma pozisyonlarını ifade ederken;
D, E ve F REBA skorunun hesaplanma şemasını ifade etmektedir.)

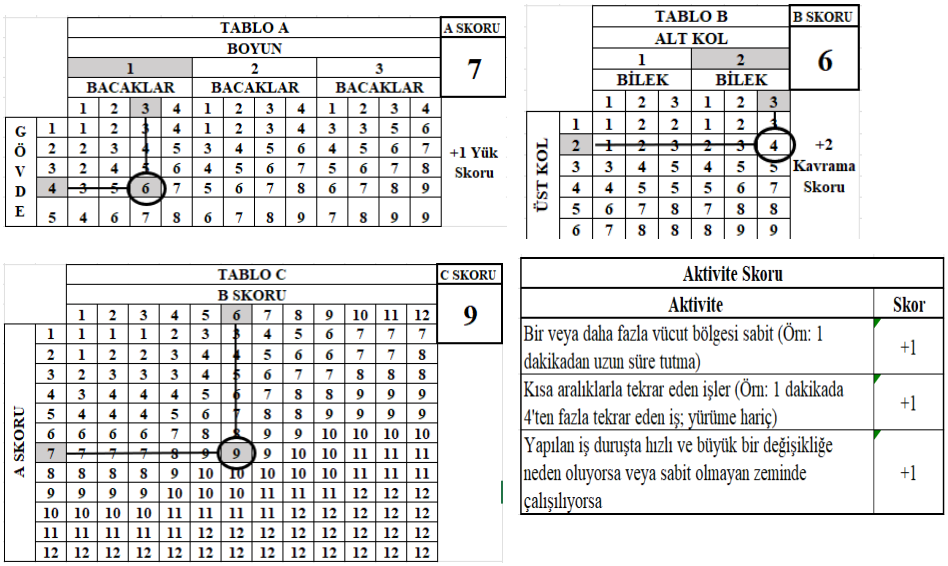


Şekil 10. Şekil 9-A Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 10'da verilen değerlendirme tablolarında Şekil 9-A resmindeki çalışma pozisyonunda gövdenin 0°-20° fleksiyonda olması nedeniyle +2 puan, boynun >20° fleksiyonda olması nedeniyle +2 puan, dizlerin >60° fleksiyonda olması ve bacaklarda bilateral ağırlık taşınması nedeniyle toplam +3 puan verilmiş, böylece Tablo A skoru 5 olarak belirlenmiştir. Üst kolların 0-20° fleksiyonda olması (+1), omuzun yükselmiş ve abdüksiyon pozisyonunda olması (+2) üst kol skorunu +3'e yükseltmiştir. Alt kolların <60° veya >100° fleksiyonda olması (+2), bileklerin >15° fleksiyonda olması (+2) ve bileklerde esneme/dönme hareketlerinin bulunması (+1) ile bilek skoru toplam +3 olmuştur. Kavrama kalitesi kötü olarak değerlendirilmiş ve bu nedenle +2 puan eklenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda Tablo B skoru +5, B skoru +7, Tablo C skoru ise +8 olarak hesaplanmıştır. Aktivite skoru, işin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş; yürüme hariç) ve yapılan işin duruşta hızlı ve büyük bir değişikliğe neden olması ya da sabit olmayan bir zeminde gerçekleştirilmesi gerekçeleriyle +2 olarak belirlenmiştir.

Tüm puanların toplamıyla elde edilen REBA skoru 10'dur. Bu sonuç, REBA risk derecelendirme sistemine göre 3. dereceye karşılık gelmekte ve orta düzeyde risk barındırdığını göstermektedir. Bu

bağlamda, ergonomik riskin azaltılabilmesi için kısa zaman içerisinde gerekli önlemlerin alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



TABLO A													A SKORU
BOYUN													7
	1				2				3				
	BACAKLAR				BACAKLAR				BACAKLAR				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
GÖVDE 1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6	
GÖVDE 2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7	+1 Yük Skoru
GÖVDE 3	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
GÖVDE 4	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
GÖVDE 5	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

TABLO B							B SKORU
ALT KOL							6
	1			2			
	BİLEK			BİLEK			
	1	2	3	1	2	3	
ÜST KOL 1	1	2	2	1	2	3	
ÜST KOL 2	1	2	3	2	3	4	+2 Kavrama Skoru
ÜST KOL 3	3	4	5	4	5	5	
ÜST KOL 4	4	5	5	5	6	7	
ÜST KOL 5	6	7	8	7	8	8	
ÜST KOL 6	7	8	8	8	9	9	

TABLO C													C SKORU
B SKORU													9
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A SKORU 1	1	1	1	1	2	3	4	5	6	7	7	7	
A SKORU 2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8	
A SKORU 3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8	
A SKORU 4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	
A SKORU 5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9	
A SKORU 6	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
A SKORU 7	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
A SKORU 8	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
A SKORU 9	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
A SKORU 10	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
A SKORU 11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
A SKORU 12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

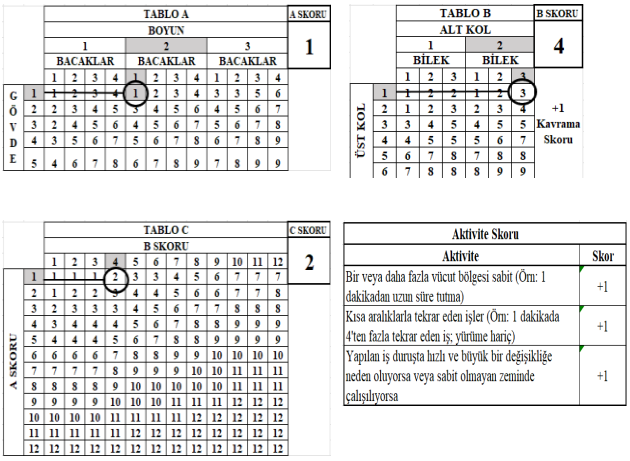
Aktivite Skoru	
Aktivite	**Skor**
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (Örn: 1 dakikadan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (Örn: 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş; yürüme hariç)	+1
Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük bir değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa	+1

Şekil 11. Şekil 9-B Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 11'de Şekil 9-B resminde Gövdenin >60° fleksiyonda olması nedeniyle +4, boynun 0°-20° fleksiyonda olması nedeniyle +1, dizlerin >60° fleksiyonda olması ve bacaklarda bilateral ağırlık taşınması nedeniyle toplamda +3 puan verilmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, yük/kuvvet etkisi olarak 5-10 kg arası ağırlık taşıma tespit edilmiş ve bu nedenle +1 puan eklenmiştir. Böylece Tablo A skoru +6 ve Skor A toplamda +7 olarak belirlenmiştir.

Üst kolun 20°-45° fleksiyonda olması (+2), omuzda yükselme ve rotasyonun mevcut olması (+2), alt kolun <60° veya >100° fleksiyonda olması (+2), bilekte >15° fleksiyon (+2) ve esneme/rotasyon (+1) ile bilek skoru +3 olarak belirlenmiştir. Kavrama değerlendirmesinde, el tutuşunun uygun olmamasına rağmen işin gerçekleştirilebilir olması nedeniyle +2 puan verilmiş ve bu doğrultuda Tablo B skoru +4, Skor B +6 olarak hesaplanmıştır. Tablo C'ye göre nihai skor +9 olarak belirlenmiştir. İşin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş; yürüme hariç), duruşta hızlı ve büyük değişikliklere neden olması ve/veya sabit olmayan bir zeminde gerçekleştirilmesi nedeniyle aktivite skoru +2 olarak değerlendirilmiştir.

Tüm bu analizler sonucunda elde edilen REBA skoru 11'dir. Bu sonuç, REBA risk derecelendirmesine göre 4. derece risk düzeyine karşılık gelmektedir. Bu da çok yüksek düzeyde risk bulunduğunu ve acil önlem alınması gerektiğini göstermektedir.

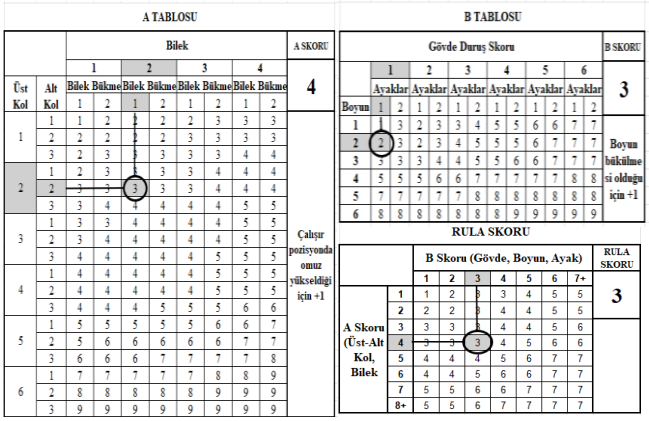


Şekil 12. Şekil 9-C Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Yapılan REBA analizine göre, Şekil 12'de Şekil 9-C resminde değerlendirilen iş pozisyonunda gövde dik pozisyonda olduğundan +1, boyun >20° fleksiyonda olduğu için +2, bacaklar ise bilateral ağırlık taşıma pozisyonunda olduğu için +1 puanla değerlendirilmiştir. Yük etkisi 5 kg'dan az olduğundan bu kategoriye puan eklenmemiştir. Bu veriler doğrultusunda Tablo A skoru +2 olarak belirlenmiş ve Skor A toplamda +1 olarak hesaplanmıştır.

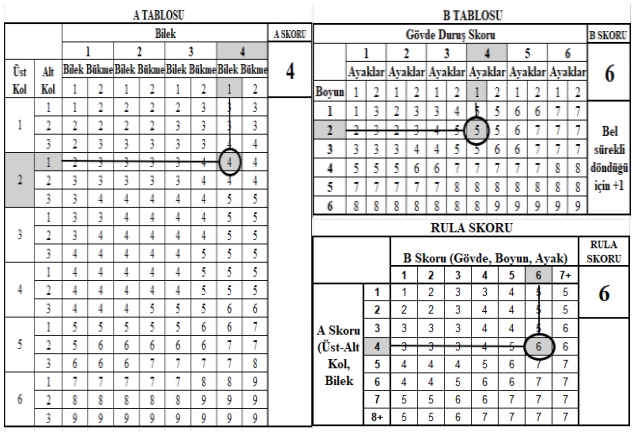
Üst kolun 0-20° fleksiyonda olması nedeniyle +1, alt kolun <60° veya >100° fleksiyonda olması nedeniyle +2, bileğin >15° fleksiyonda olması ve yana dönme/esneme hareketi göstermesi sebebiyle toplamda +3 puan verilmiştir. Kavrama değerlendirmesi uygun bulunduğundan +1 puan eklenmiştir. Bu doğrultuda Tablo B skoru +3, Skor B ise +4 olarak belirlenmiştir. A ve B skorlarının kombinasyonundan elde edilen Tablo C skoru +2'dir.

İşin kısa aralıklarla tekrar eden nitelikte olması (örneğin: 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş; yürüme hariç) ve yapılan işin duruşta hızlı ve büyük bir değişikliğe neden olması veya sabit olmayan bir zeminde gerçekleştirilmesi sebebiyle aktivite skoru +2 olarak değerlendirilmiştir. Tüm bu faktörlerin birleşimi sonucunda REBA skoru 4 olarak hesaplanmış ve bu skor, REBA risk derecelendirmesine göre 2. derece yani orta risk seviyesine karşılık gelmektedir. Bu durum, kısa zaman içerisinde düzeltici önlemlerin alınmasının gerekli olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. Şekil 9-A Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

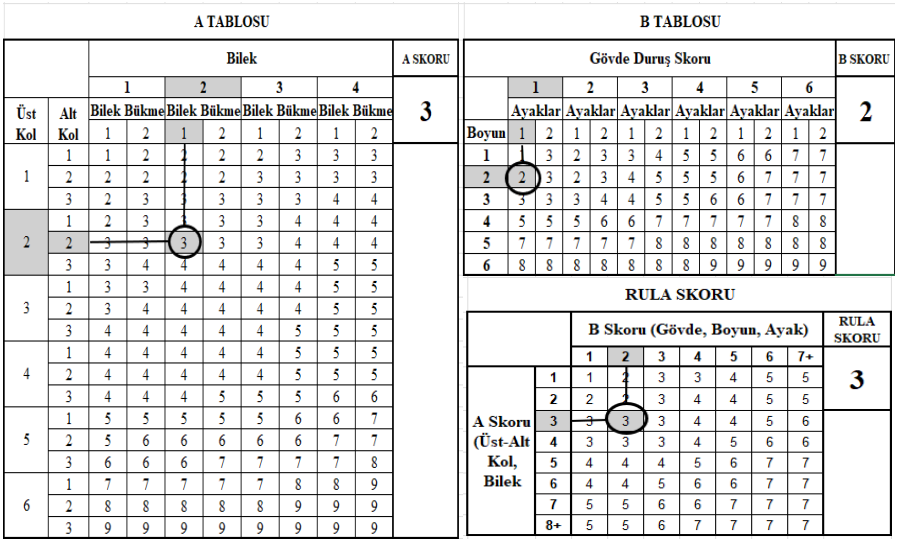
Şekil 13'te gerçekleştirilen RULA (Rapid Upper Limb Assessment) ergonomik değerlendirme analizine göre, çalışanın üst kol pozisyonu 0–20° fleksiyon aralığında değerlendirilmiş ve +1 puan ile puanlanmıştır. Ön kolun >90° fleksiyon pozisyonunda olması +2 puan, buna ek olarak pozisyonun vücut orta ekseninden sapması nedeniyle +1 puan daha eklenmiştir. Bilek ise nötr pozisyonda bulunmakla birlikte, orta eksenden bükülme hareketi nedeniyle +2 puan (1+1) olarak değerlendirilmiştir. Gövde dik duruşta kalmış ve +1 puan ile puanlanmıştır. Boyun ise 10–20° fleksiyon aralığında yer almakta olup +2 puan almıştır. Bu pozisyonda ayrıca A tablosunda omuz yükselmesi ve B tablosunda boyun bükülmesi gözlemlendiğinden her iki tabloda da +1 ek puanlama yapılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda RULA skoru 3 olarak hesaplanmıştır. Bu skor, 2. seviye risk düzeyini göstermekte olup, mevcut duruma yönelik aksiyon alınmadan önce daha kapsamlı bir araştırma yapılması gerektiğini ifade etmektedir. Bu nedenle ilgili çalışma pozisyonunda ergonomik açıdan potansiyel risklerin netleştirilmesi adına ileri değerlendirmelere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 14. Şekil 9-B Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Yapılan RULA değerlendirmesi sonucunda, çalışanın ergonomik risk düzeyi detaylı biçimde Şekil 14'teki gibi analiz edilmiştir. Üst kolun 20–45° fleksiyonda konumlanması nedeniyle bu bölge +2 puan ile değerlendirilmiştir. Ön kol 0–90° fleksiyon aralığında tutulduğundan +1 puan alırken, bileğin >15° ekstansiyonda ve orta ekseninden bükülmüş olması nedeniyle toplam +4 puanlık (3+1) bir skor elde edilmiştir. Gövde >60° fleksiyonda bulunduğu ve aynı zamanda bükülme hareketi içerdiği için +5 puan (4+1) ile değerlendirilmiştir. Boyun ise 10–20° fleksiyon pozisyonunda tutulduğundan +2 puan ile puanlanmıştır. B tablosuna ilişkin olarak, bel bölgesinde tespit edilen sürekli dönme hareketi nedeniyle +1 puan eklenmiştir.

Bu değerlendirmelerin sonucunda RULA skoru toplamda 6 olarak hesaplanmıştır. Bu puanlama, riskin 3. seviyede olduğunu göstermektedir. Bu düzey, ergonomik risklerin mevcut olduğunu ve kısa sürede müdahale edilmesi gerektiğini ifade etmektedir. Dolayısıyla, bu iş pozisyonunda çalışan bireylerin kas-iskelet sistemi bozuklukları açısından risk altında olduğu ve iş istasyonunun uygun biçimde yeniden tasarlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.



A TABLOSU

Üst Kol	Alt Kol	Bilek 1 Bilek Bükme 1	Bilek 1 Bilek Bükme 2	Bilek 2 Bilek Bükme 1	Bilek 2 Bilek Bükme 2	Bilek 3 Bilek Bükme 1	Bilek 3 Bilek Bükme 2	Bilek 4 Bilek Bükme 1	Bilek 4 Bilek Bükme 2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	6	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

A SKORU: 3

B TABLOSU

Boyun	Gövde Duruş Skoru 1 Ayaklar 1	1 Ayaklar 2	2 Ayaklar 1	2 Ayaklar 2	3 Ayaklar 1	3 Ayaklar 2	4 Ayaklar 1	4 Ayaklar 2	5 Ayaklar 1	5 Ayaklar 2	6 Ayaklar 1	6 Ayaklar 2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

B SKORU: 2

RULA SKORU

A Skoru (Üst-Alt Kol, Bilek)	B Skoru (Gövde, Boyun, Ayak) 1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

RULA SKORU: 3

Şekil 15. Şekil 9-C Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 15'te değerlendirilen iş pozisyonunda, üst kolun 20–45° fleksiyonda bulunması +2 puan ile puanlanmıştır. Ön kolun >90° fleksiyonda olması ve orta eksenin sağında veya solunda konumlanması toplamda +3 puanlık (2+1) bir değerlendirmeye neden olmuştur. Bilek pozisyonu nötr fleksiyonda (+1 puan) bulunmakla birlikte, orta eksenden bükülme hareketi sergilediği için +1 puan daha eklenerek toplamda +2 puan verilmiştir. Gövde dik duruş pozisyonunda olup yalnızca +1 puan ile değerlendirilmiştir. Boyun ise 10–20° arası fleksiyon göstermekte olup +2 puan almıştır.

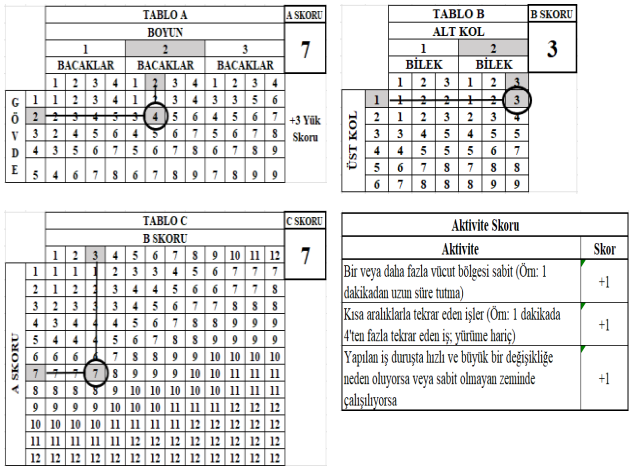
Tüm bu değerlendirmelerin sonucunda RULA skoru 3 olarak hesaplanmış, bu da 2. seviye risk düzeyini göstermektedir. Bu seviye, mevcut duruma yönelik daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulabileceğini ve belirli durumlarda aksiyon alınmasının gerekebileceğini ifade etmektedir. Dolayısıyla bu pozisyonda çalışan bireyin kas-iskelet sistemi üzerinde düşük düzeyde de olsa bir riskin var olabileceği ve detaylı bir analizle desteklenmesi gerektiği söylenebilir.

3.3. Depo, Reyon ve Temizlik Personelinin REBA ve RULA Değerlendirmesi

Depo, reyon ve temizlik personelinin gün içerisinde sık sık tekrar ettiği pozisyonlar üzerinden yapılan değerlendirmeler Şekil 16'da A resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması D resminde; B resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması ise E resminde; C resmindeki çalışma pozisyonunun REBA skoru gösterim şeması F resminde görselleştirilmiştir.



Şekil 16. Depo-Reyon-Temizlik Personeli REBA Skoru Değerlendirmesi
(Not: A, B ve C çalışma pozisyonlarını ifade ederken;
D, E ve F REBA skorunun hesaplanma şemasını ifade etmektedir.)

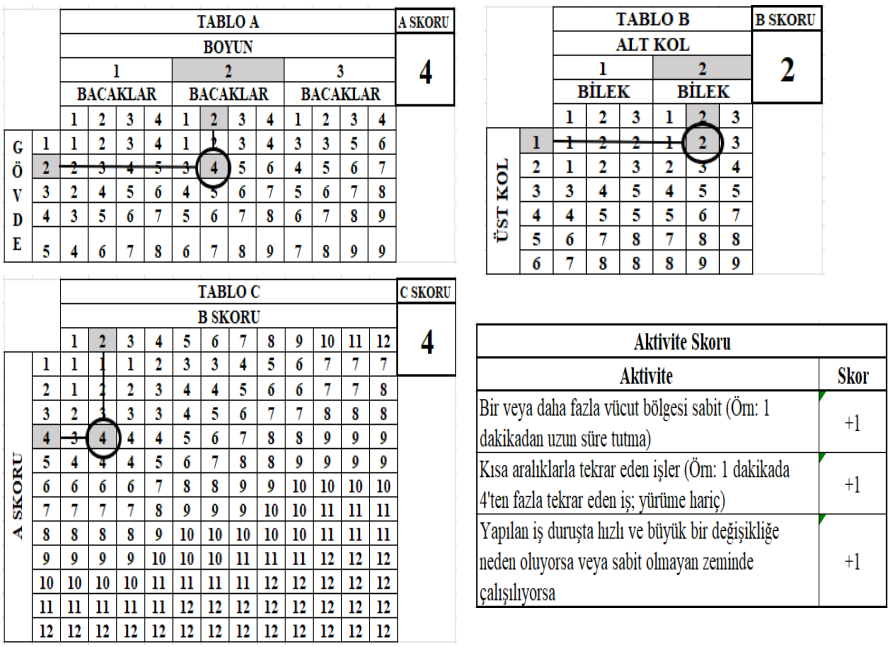


Şekil 17. Şekil 16-A Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 17'de Şekil 16-A resminin değerlendirilen çalışma pozisyonunda gövde hareketli dik pozisyonda yer almakta ve bu duruma +1 temel puan ile hareketten kaynaklı +1 ek puan verilerek gövde skoru +2 olarak belirlenmiştir. Boyun, 0°–20° fleksiyonda hareketli pozisyonda olduğundan temel puan +1 ve

değişimden ötürü +1 puan ile toplamda +2 olarak değerlendirilmiştir. Bacaklar, bilateral ağırlık taşıma durumu ve değişken pozisyon nedeniyle +2 puanla değerlendirilmiş; yük etkisi ise 10 kg'dan fazla ağırlık taşınması ve ani kuvvet artışı sebebiyle +3 puan almıştır. Bu bulgular doğrultusunda Tablo A skoru +4 olup, Skor A toplamda +7 olarak hesaplanmıştır. Üst kol 20° fleksiyonda olduğu için +1, alt kol >100° fleksiyonda olduğu için +2, bilek >15° fleksiyon ve yana esneme hareketi gösterdiğinden toplamda +3 puan ile değerlendirilmiştir. Kavrama değerlendirmesi iyi düzeyde olduğu için ek puan eklenmemiştir. Bu bileşenlerle B skoru +3 olarak belirlenmiştir. Skor A ve Skor B'nin kombinasyonu Tablo C'de +7 değerini oluşturmuştur. İşin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin bir dakikada dörtten fazla tekrar; yürüme hariç) ve yapılan işin duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden olması veya sabit olmayan bir zeminde yürütülmesi gibi etkenler göz önüne alındığında, aktivite skoru +2 olarak verilmiştir.

Tüm bu verilerin ışığında toplam REBA skoru +9 olarak hesaplanmış ve bu değer, REBA risk derecelendirmesine göre 3. derece risk seviyesine karşılık gelmekte, dolayısıyla kısa süre içinde önlem alınması gerektiğini göstermektedir.

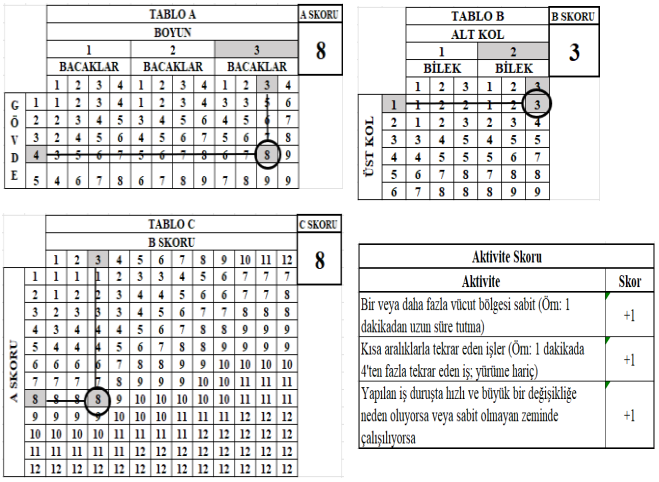


Şekil 18. Şekil 16-B Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 18'de Şekil 16-B resminde analiz edilen iş pozisyonunda gövde dik pozisyonda bulunmakta; buna ek olarak yana esneme veya dönme hareketi gözlemlendiğinden gövde skoru +2 olarak belirlenmiştir. Boyun >20° fleksiyonda olduğu için +2 puanla değerlendirilmiştir. Bacaklar, bilateral ağırlık taşıma ile birlikte yürüme veya oturma durumunu içerdiğinden +2 puan almıştır. Yük veya kuvvet etkisi bulunmadığı için bu bileşene 0 puan verilmiştir. Bu veriler ışığında Tablo A toplamda +4 puanla değerlendirilmiştir. Üst kollar 20° fleksiyonda bulunduğundan +1, alt kollar <60° veya >100° fleksiyonda yer aldığından +2, bilekler 0°-15° fleksiyonda olup yana esneme veya dönme hareketi

içerdiğinden toplam +2 puanla değerlendirilmiştir. Kavrama değerlendirmesi iyi olduğu için ek puan verilmemiştir. Bu doğrultuda Tablo B skoru +2 olarak belirlenmiş ve Tablo A ile B'nin bileşkesi olan Tablo C skoru +4 olarak hesaplanmıştır. Yapılan işin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin bir dakikada dörtten fazla tekrar; yürüme hariç) ve duruşta hızlı ve büyük değişikliklere neden olması ya da sabit olmayan bir zeminde gerçekleştirilmesi gibi etkenler dikkate alınarak aktivite skoru +2 olarak verilmiştir.

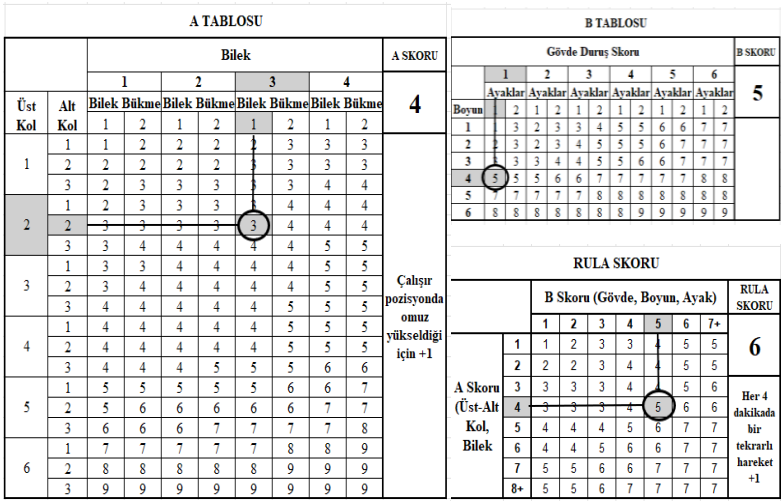
Tüm bu değerlendirmeler doğrultusunda REBA toplam skoru 6 olarak belirlenmiş; bu da REBA risk derecelendirmesinde 2. dereceye karşılık gelmekte olup, orta seviyeli bir risk durumu olduğunu ve önlem alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 19. Şekil 16-C Resmindeki Çalışma Pozisyonu REBA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 19'da Şekil 16-C'de bulunan iş pozisyonunda gövde 20°-60° fleksiyon pozisyonunda yer almakta, aynı zamanda yana esneme veya dönme hareketi gözlemlendiğinden gövde skoru +4 olarak belirlenmiştir. Boyun >20° fleksiyon pozisyonundadır ve yana dönme/esneme içermesi nedeniyle boyun skoru +3 olarak hesaplanmıştır. Bacaklar bilateral ağırlık taşımakta olup dizlerde 30°-60° arası fleksiyon bulunduğundan bacak skoru +2 olarak verilmiştir. Yük veya kuvvet etkisi bulunmadığı için bu bileşene puan verilmemiştir. Bu doğrultuda Tablo A skoru toplam +8 olarak belirlenmiştir. Üst kollar 20° fleksiyon ile +1, alt kollar <60° veya >100° fleksiyon ile +2 ve bilekler >15° fleksiyon ile birlikte esneme/dönme hareketi içerdiğinden +3 puan almıştır. Kavrama derecesi uygun olduğundan bu bileşene puan eklenmemiştir. Böylece Tablo B skoru +3 ve buna bağlı olarak Tablo C skoru +8 olarak değerlendirilmiştir. Aktivite bileşeninde, yapılan işin kısa aralıklarla tekrar etmesi (örneğin 1 dakikada 4'ten fazla tekrar; yürüme hariç) ve duruşta hızlı ve büyük değişikliklere neden olması ya da sabit olmayan zeminde gerçekleştirilmesi dikkate alınarak aktivite skoru +2 olarak belirlenmiştir.

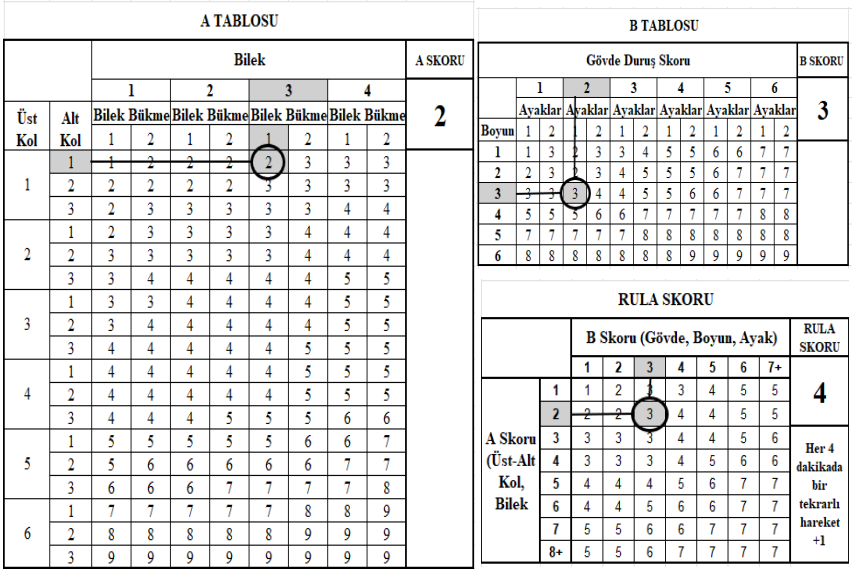
Sonuç olarak, REBA toplam skoru 10 olup, bu değer 3. derece risk seviyesi olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, yüksek risk seviyesine işaret etmekte olup, kısa sürede önlem alınmasını gerektirmektedir.



Şekil 20. Şekil 16-A Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 20'de yürütülen RULA ergonomik analizinde, çalışanın üst kol pozisyonu 20–45° fleksiyon aralığında değerlendirilmiş ve +2 puan ile puanlanmıştır. Ayrıca omuzun yükselmiş olması nedeniyle A tablosunda +1 puan eklenmiştir. Ön kolun >90° fleksiyonda olması +2 puan ile değerlendirilmiştir. Bileğin nötr pozisyonda bulunmasına rağmen orta eksenden bükülme gözlemlenmiş ve bu durum +2 puan (1+1) olarak puanlandırılmıştır. A tablosunun skoru 4 olarak değerlendirilmiştir. Gövdenin dik pozisyonda olması +1 puan olarak değerlendirilmiştir. Boyun açısının >20° fleksiyonda olması +4 puan ile puanlanmıştır. B skoru 5 olarak değerlendirilmiştir. C tablosunda (RULA Skoru) işin her 4 dakikada bir tekrarlayan hareketler içermesi nedeniyle +1 puanlık ekleme yapılmıştır.

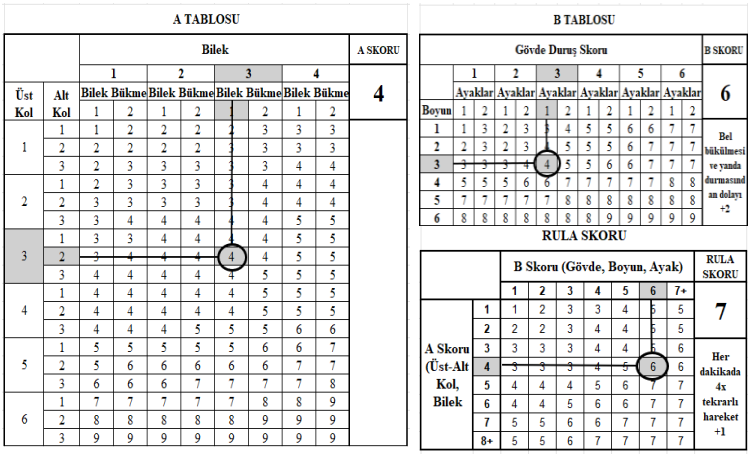
Tüm bu değerlendirmeler sonucunda RULA skoru 6 olarak hesaplanmıştır. Bu skor, 3. seviye ergonomik risk düzeyine karşılık gelmekte olup, mevcut çalışma pozisyonunun kısa süre içerisinde değiştirilmesini ve gerekli düzeltici önlemlerin alınmasını önermektedir. Bu doğrultuda, ilgili çalışma ortamı ve görevlerin gözden geçirilmesi, çalışan sağlığının korunması açısından önem arz etmektedir.



Şekil 21. Şekil 16-B Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 21'de RULA ergonomik değerlendirmesi kapsamında, çalışanın üst kol pozisyonu 0–20° fleksiyon açısında değerlendirilmiş ve +1 puan olarak puanlanmıştır. Ön kol pozisyonu 0–90° fleksiyon aralığında olup +1 puan ile değerlendirilmiştir. Bileğin 0–15° fleksiyonda bulunması +2 puan, bileğin eksenden bükülmüş olması ise ek +1 puanla birlikte toplam +3 puan olarak puanlanmıştır. Gövde açısı 0–20° fleksiyon olarak değerlendirilmiş ve bu pozisyona +2 puan verilmiştir. Boyun pozisyonu >20° fleksiyon derecesinde olduğu için +3 puan ile puanlanmıştır. C tablosu (RULA Skoru) kapsamında değerlendirilen işin, her 4 dakikada bir tekrarlayan hareket içermesi nedeniyle +1 puanlık ekleme yapılmıştır.

Tüm puanlamalar sonucunda RULA skoru 6 olarak hesaplanmıştır. Bu skor, RULA metodolojisine göre 2. seviye risk derecesine karşılık gelmektedir ve mevcut duruma müdahale edilmeden önce daha fazla ergonomik analiz ve gözlem yapılması gerektiğini ifade etmektedir. Bu durum, mevcut pozisyonun orta düzeyde risk taşıdığını ve ilerleyen süreçte iş kazası veya kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına neden olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, daha detaylı ergonomik analizlerin gerçekleştirilmesi ve uygun iyileştirme önerilerinin geliştirilmesi önerilmektedir.



A TABLOSU

Üst Kol	Alt Kol	Bilek	Bükme	Bilek	Bükme	Bilek	Bükme	Bilek	Bükme
		1	2	1	2	3	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	6	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

A SKORU: 4

B TABLOSU

Boyun	Gövde Duruş Skoru 1 Ayaklar		2 Ayaklar		3 Ayaklar		4 Ayaklar		5 Ayaklar		6 Ayaklar	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

B SKORU: 6

Bel bükülmesi ve yanda durmasında dolayı +2

RULA SKORU

A Skoru (Üst-Alt Kol, Bilek)	B Skoru (Gövde, Boyun, Ayak) 1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

RULA SKORU: 7

Her dakikada 4x tekrarlı hareket +1

Şekil 22. Şekil 16-C Resmindeki Çalışma Pozisyonu RULA Skoru Değerlendirme Tabloları

Şekil 22'de gerçekleştirilen RULA ergonomik değerlendirmesi kapsamında, çalışanın üst kol pozisyonu 45–90° fleksiyon aralığında olup +3 puan ile değerlendirilmiş, kolların açılmış olması nedeniyle +1 puan eklenerek üst kol puanı toplamda +4 olarak belirlenmiştir. Ön kol >90° fleksiyonda ve orta eksen dışında bulunduğundan sırasıyla +2 ve +1 puan ile toplam +3 puanla puanlanmıştır. Bilek pozisyonu 0–15° fleksiyonda olup +2 puan, bileğin orta eksenden bükülmesi nedeniyle +1 ek puan verilerek toplam +3 puanla değerlendirilmiştir. Gövde 20–60° fleksiyon aralığında olup +3 puan, dönme ve bükülme hareketi nedeniyle +1 puan daha eklenmiştir. Boyun >20° fleksiyon pozisyonunda ve bükülme mevcut olduğundan toplamda +4 puanla puanlanmıştır. B tablosu kapsamında beldeki bükülme ve vücut pozisyonunun yana doğru eğilmesi nedeniyle +2 puan eklenmiş, C tablosunda (RULA Skoru) ise hareketin her dakikada 4x tekrar etmesi durumuna dayanarak +1 puanlık ekleme yapılmıştır.

Bu analizler sonucunda RULA skoru 7 olarak hesaplanmıştır. Bu puan, RULA yöntemine göre 4. seviyeye karşılık gelmektedir. Bu seviyede, mevcut ergonomik riskin göz ardı edilemeyeceğini ve acil müdahale edilmesi gerektiği ifade etmektedir.

Tablo 3. Çalışma Gruplarına / Pozisyonlara Göre En Yüksek REBA ve RULA Skorları

Çalışma Grubu / Pozisyon	En Yüksek REBA	REBA Risk Düzeyi	REBA Eylem	En Yüksek RULA	RULA Risk Düzeyi	RULA Eylem
Kabin Personeli (Şekil 9-B)	11	4. Seviye (Çok Yüksek)	Acil	6	3. Seviye (Yüksek)	Kısa sürede düzeltme
Depo Personeli	10	3. Seviye (Yüksek)	Kısa sürede müdahale	7	4. Seviye (Çok Yüksek)	Acil
Temizlik Personeli	10	3. Seviye (Yüksek)	Kısa sürede müdahale	7	4. Seviye (Çok Yüksek)	Acil
Kabin Personeli (Şekil 9-A)	10	3. Seviye (Yüksek)	Kısa sürede düzeltme	3	2. Seviye (Düşük-Orta)	Daha fazla değerlendirme
Kasa Personeli (Şekil 4-B)	9	3. Seviye (Yüksek)	Hızlı müdahale	7	4. Seviye (Çok Yüksek)	Acil
Reyon Personeli	9	3. Seviye (Yüksek)	Kısa sürede düzeltme	6	3. Seviye (Yüksek)	Kısa sürede düzeltme
Kabin Personeli (Şekil 9-C)	4	2. Seviye (Orta)	Yakın zamanda düzeltme	3	2. Seviye (Düşük-Orta)	Daha fazla değerlendirme
Kasa Personeli (Şekil 4-A)	3	1. Seviye (Düşük)	Gözlem / öneri	5	3. Seviye (Orta-Yüksek)	Kısa sürede ergonomik iyileştirme

Tablo 3 incelendiğinde, çalışma pozisyonları arasında ergonomik risk düzeylerinin belirgin biçimde farklılaştığı görülmektedir. En yüksek REBA skoru Kabin Personeli (Şekil 9-B) pozisyonunda 11 olarak belirlenmiş ve bu değer "çok yüksek risk" kategorisinde değerlendirilmiştir. Bu pozisyon, çalışanların sık eğilme, 60° üzeri gövde fleksiyonu ve omuz abdüksiyonu içeren postürlerde uzun süre kalmaları nedeniyle acil düzeltici eylem gerektirmektedir. Benzer şekilde Depo ve Temizlik Personeli, 10 puanlık REBA skorlarıyla "yüksek risk" düzeyinde yer almakta; bu durum, ağır yük kaldırma, uzun süreli ayakta kalma ve tekrarlayan eğilme hareketlerinin kas-iskelet sistemi üzerindeki yükünü artırdığını göstermektedir.

Kabin Personeli (Şekil 9-A) pozisyonunda 10 puanla yüksek risk belirlenmiş, ancak Şekil 9-C pozisyonunda bu değer 4'e düşmüştür. Bu fark, kabin içindeki görev farklılıklarının ergonomik yük üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle 10-A ve 10-B pozisyonları, omuz ve bel bölgesine yoğun yük bindiren postürler içermektedir.

Kasa Personeli (Şekil 4-B) 9 puanlık REBA ve 7 puanlık RULA skoruyla yüksek risk kategorisinde yer almakta olup, özellikle boyun ve gövde fleksiyonu ile tekrarlayan el-bilek hareketlerinin çalışanlar için önemli bir risk faktörü oluşturduğu belirlenmiştir. Buna karşın Kasa Personeli (Şekil 4-A) 3 puanlık REBA skoruyla düşük risk düzeyinde değerlendirilmiştir. Reyon Personeli 9 puanlık REBA skoruyla

benzer şekilde yüksek risk grubunda yer almakta ve bu durum raf düzenleme sırasında tekrarlanan üst uzuv hareketlerinden kaynaklanmaktadır.

RULA analiz sonuçları, üst uzuvlara yönelik kas-iskelet sistemi yüklenmelerinin özellikle kasa (4-B) ve depo çalışanlarında belirgin olduğunu göstermektedir. RULA skorlarının genel olarak REBA değerlerinden daha yüksek çıkması, işlerdeki üst ekstremite kullanımının yoğunluğuna işaret etmektedir.

Genel olarak bulgular, çalışma pozisyonlarının dinamik yapısına bağlı olarak ergonomik risklerin çeşitlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle tekrarlayan hareketler, gövde ve boyun fleksiyonu, uzun süreli statik duruş ve yük kaldırma gibi faktörlerin ergonomik risk düzeyini belirgin biçimde artırdığı saptanmıştır. Bu sonuçlar, mağaza çalışanlarının görev bazlı risk değerlendirmesinin yapılmasının ve yüksek risk içeren pozisyonlarda acil düzeltici eylemlerin uygulanmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

5. Tartışma

Bu araştırma tek bir perakende giyim mağazasında yürütülmüş olup kesitsel bir araştırma deseniyle gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla elde edilen bulgular, yalnızca ilgili mağazadaki çalışma koşullarını yansıtmakta ve genellenebilirlik açısından sınırlılıklar taşımaktadır. Özellikle REBA ve RULA analizlerinden elde edilen veriler, çalışanların büyük bir kısmının orta ila yüksek risk grubunda yer aldığını göstermekte olup, ergonomik risklerin hem üst hem de alt ekstremiteler açısından belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, çalışma koşullarının çalışanların fiziksel sağlığı üzerinde doğrudan etkili olabileceğini ve ergonomik düzenlemelerin işyeri sağlığı yönetiminde kritik bir unsur olduğunu göstermektedir.

Literatürde REBA ve RULA yöntemlerinin farklı sektörlerdeki etkinliği sıkça karşılaştırılmıştır. Ancak mağazacılık sektöründe bulunan çalışanların çalışma pozisyonları üzerine özellikle Türk literatüründe yeteri kadar incelenmemiştir. Hemşirelerin çalışma duruşlarının incelendiği bir çalışmada REBA ve RULA yöntemlerinin arasında çok az farklılıklar olduğunu ve genel anlamda benzerliklerinin çok olduğunu değerlendirmiştir (Ayvaz, 2019). Eldem ve arkadaşları tarafından (2019) tarafından otomobil sürücüsü duruş pozisyonlarını incelediği çalışmada her iki yöntemde de ergonomik risklerin değerlendirilmesinde yüksek skorların çıktığı gözlemlenmiştir. Çanakçı (2020) tarafından yapılan Havalimanı Yer Hizmetleri Binalarında Temizlik İşlerinde Çalışanları üzerine yapılan çalışma sonucu RULA yönteminin daha hassas olduğunu, REBA yöntemine göre temizlik işlerinde daha uygun olduğunu değerlendirmiştir. Kee (2021b) tarafından yapılan tıp doktorları üzerine yapılan bir çalışmada OWAS, RULA ve REBA yöntemleri, endüstriyel alanlardan elde edilen gerçek kas iskelet sistemi hastalıkları verilerine dayanarak karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, RULA yönteminin yalnızca postüral yükleri değil, aynı zamanda kas-iskelet sistemi hastalıklarının işle ilişkisini değerlendirmede daha avantajlı olabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada REBA yöntemi, RULA'ya kıyasla daha yüksek risk skorları üretmiş; bu da çalışanların müdahale gereksinimlerini daha net biçimde ortaya koymuştur. RULA yönteminin yalnızca üst vücut postürünü esas alması nedeniyle, özellikle alt ekstremiteye binen yük ve uzun süreli ayakta durma gibi durumların değerlendirilmesinde yetersiz kalabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca çalışma sonuçlarında uzun süre ayakta kalma, eğilerek yük kaldırma, raftan ürün alma gibi görevlerin, bel, boyun, bacak ve ayak bölgelerinde rahatsızlık oluşumuna neden olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde de benzer şekilde cam sanatı endüstrisi ve satış danışmanları üzerine yapılan çalışmalarda, uzun süre ayakta kalmanın alt ekstremitelerde özellikle uyluk, ayak ve alt bacak bölgelerinde rahatsızlıklara yol açtığı; üst ekstremitelerde ise bu rahatsızlıkların bel bölgesinde yoğunlaştığı bildirilmiştir. Bu bulgular, çalışma süresince maruz kalınan postürlerin ve vücut üzerindeki yük dağılımının farklı anatomik bölgelerde çeşitli düzeylerde baskı oluşturduğunu ve bölgesel rahatsızlıklara neden olabildiğini ortaya koymaktadır (Capodaglio, 2017; Rathore ve ark., 2020).

Bu çalışmada elde edilen yüksek REBA skorlarının özellikle kabin personelinde görülmesi, görev tanımlarındaki fiziksel gerekliliklerle ilişkilendirilebilir. Kabin personelinin uzun süreli ayakta çalışma, sık eğilme, sınırlı alanda hareket etme ve tekrarlayıcı postürleri sürdürme zorunluluğu, bu gruptaki risk düzeyinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, yalnızca kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları açısından değil, aynı zamanda çalışanların iş verimliliği, motivasyon ve iş tatmini üzerinde de olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Literatürde yüksek ergonomik risk düzeylerinin, çalışan devrini artırdığı ve örgütsel bağlılığı azalttığı belirtilmektedir (Ikonne, 2014; Adamopoulos ve ark., 2022; Agarwal ve ark., 2025). Dolayısıyla bu bulgu, mağazacılık sektöründe çalışan sağlığının korunmasıyla birlikte sürdürülebilir istihdamın sağlanması açısından da kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, özellikle yüksek riskli görevlerde görev rotasyonu, postür eğitimi ve ergonomik iyileştirmelerin sistematik biçimde uygulanması önerilmektedir.

Bu bağlamda, çalışanların ergonomik risklerini azaltmak için iş süreçlerinin gözden geçirilmesi, iş planlarının dinlenme molalarını içerecek şekilde düzenlenmesi ve uygun ekipman kullanımının teşvik edilmesi önem arz etmektedir.

6. Sonuçlar

Bu çalışma, alışveriş merkezlerinde görev yapan mağaza çalışanlarının maruz kaldığı ergonomik riskleri belirlemek amacıyla RULA ve REBA yöntemleriyle gerçekleştirilmiş postür analizlerine dayanmaktadır. Yapılan araştırma sonunda Türk literatüründe mağazacılık sektöründeki çalışanların ergonomik çalışma koşullarıyla ilgili yeterli bir inceleme bulunmamaktadır. Bu durum bu çalışmanın gelecek çalışmalara ışık tutması açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, çalışanların çoğunlukla uygunsuz vücut duruşları, tekrarlayan hareketler ve uzun süreli ayakta kalma gibi risk faktörlerine maruz kaldığını göstermektedir. Bu durum, başta kas-iskelet sistemi hastalıkları olmak üzere çeşitli iş kaynaklı sağlık sorunlarının ortaya çıkma olasılığını artırmaktadır.

Bu çalışmada REBA ve RULA analiz yöntemleri karşılaştırıldığında, mağazacılık sektöründe çalışan personelin ergonomik risk değerlendirmesi açısından REBA yönteminin daha uygun sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. RULA yalnızca vücudun üst kısmını değerlendirirken, REBA tüm vücut hareketlerini kapsamlı biçimde ele almakta ve puanlama sistemindeki ayrıntılı yapısıyla riski daha hassas biçimde ortaya koymaktadır. Ayrıca REBA'nın eylemlere daha yüksek risk puanı vererek müdahale gerekliliğini daha net vurgulaması, bu yöntemin mağaza gibi çok yönlü fiziksel hareketlerin bulunduğu sektörlerde daha etkili olmasını sağlamaktadır. Özellikle kabin personelinde gözlenen yüksek REBA skorlarının, hastane (Ayvaz, 2019), havaalanı (Çanakçı, 2020) ve diğer farklı sektörlerdeki yüksek ergonomik yüklenmelerin raporlandığı önceki araştırmalarla paralellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, yapılan analizler doğrultusunda mağazacılık sektöründe ergonomik risk değerlendirmeleri için REBA yönteminin RULA'ya kıyasla daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, farklı çalışma alanlarında görev yapan personelin ergonomik risklerini azaltmak amacıyla görev temelli iyileştirmeler yapılmalıdır. Kabin personelinde yüksek risk düzeyleri göz önünde bulundurularak, çalışma alanlarının fiziksel olarak yeniden düzenlenmesi, çalışanlara kısa aralıklarla oturarak dinlenme olanağı sağlanması ve kabin içi hareket kısıtlılığını azaltacak düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Kasa personeli için çalışma yükseklikleri ayarlanabilir tezgâhlar, ergonomik destek barları ve uzun süreli ayakta kalmayı önleyici taburelerin kullanımı önerilmektedir. Ayrıca, kasa çalışanlarının boyun ve bilek zorlanmalarını azaltmak amacıyla otomatik barkod ve dijital ödeme sistemlerinin yaygınlaştırılması uygun olacaktır. Reyon personelinde raf yüksekliklerinin çalışan boyuna göre ayarlanması, ağır ürünlerin üst raflara yerleştirilmemesi ve sık uzanma gerektiren görevlerde taşınabilir platformların kullanılması ergonomik riskleri azaltabilir. Depo personelinde ağır kaldırma ve yük taşıma görevleri için hidrolik arabalar, kaldırma yardımcıları ve mekanik destek sistemlerinin kullanımı gereklidir. Temizlik personeli açısından ise uzun süreli eğilme ve bükülme hareketlerini azaltacak ekipmanlar ile ayarlanabilir sap uzunluğuna sahip temizlik araçlarının tercih edilmesi önem taşımaktadır. Tüm bu düzenlemelere ek olarak, çalışanlara doğru duruş teknikleri, yük kaldırma yöntemleri ve mikro mola uygulamaları hakkında düzenli eğitimlerin verilmesi; iş rotasyonunun uygulanmasıyla kas-iskelet sistemi üzerindeki tekrarlayıcı yükün dengelenmesi önerilmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı mağazalarda ve daha geniş örneklemlerle uzunlamasına izleme yöntemlerinin kullanılması, ergonomik risk faktörlerinin sektörel düzeyde daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynaklar

Acar HH., Üçüncü K. İş sağlığı ve güvenliği. Ankara: Nobel Yayınevi; 2020.

Adamopoulos I., Lamnisos D., Syrou N., Boustras G. Public health and work safety pilot study: Inspection of job risks, burn out syndrome and job satisfaction of public health inspectors in Greece. Safety Science 2022; 147: 105592.

Agarwal P., Upadhyay RK., Sharma A., Chauhan J., Ahalawat K., Singh T., Lakshmi BV. Workplace ergonomics and its influence on job performance with mediating role of job satisfaction: an Indian perspective. International Journal of Management Practice 2025; 18(1): 1-22.

Ayvaz Ö. Bir tıp fakültesi hastanesinde çalışan hemşirelerin çalışma duruşlarının REBA ve RULA yöntemleri ile ergonomik risk değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi; 2019. İstanbul.

Başcı E. Modern agoralarda esnek çalışma: Sosyolojik bir saha araştırması. International Journal of Economics Administrative and Social Sciences (IJEASS), 2019.

Çanakçı N. Havalimanı yer hizmetleri binalarında temizlik işlerinin ergonomik risk analiz yöntemleri ile incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi; 2020. İstanbul.

Capodaglio EM. Occupational risk and prolonged standing work in apparel sales assistants. International Journal of Industrial Ergonomics. 2017; 60: 53-59. doi:10.1016/j.ergon.2016.11.010.

Cengiz Ö., Akşit İ., Özbakır ÖÜ. Tekstil sektöründe iş sağlığı ve güvenliği kapsamında alınması gereken tedbirler. VI. International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies; 2024.

Eldem C., Top N., Şahin H. Dijital insan modelleri kullanarak otomobil sürücüsü duruş pozisyonlarının ergonomik değerlendirilmesi üzerine bir çalışma. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 5: 22-31. doi:10.30855/gmbd.2019.01.03.

FreiGeist Onedio. AVM'lerde modern kölelik: 12 saat çalışma süresi. 2025. Erişim: https://onedio.com/haber/avm-lerin-modern-koleleri-mesai-saatleri-uzun-ucret-az-oturmak-yasak-bayramda-izin-yok-882670.

Gagne R. Workplace injuries associated with grocery store workers: Prevention and reduction in loss time. Fit2WRK Clinical Educational Series. 2011; 1. Erişim: www.osha.gov.

Geçici AÖ. Bilgisayarlı görü ile dijital ergonomik risk değerlendirme sistemi: REBA, RULA ve OWAS uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü; 2023.

Gómez-Galán M., Callejón-Ferre ÁJ., Pérez-Alonso J., Díaz-Pérez M., Carrillo-Castrillo JA. Musculoskeletal risks: RULA bibliometric review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020; 17(12): 1-52. doi:10.3390/ijerph17124354.

Hignett S., McAtamney L. Rapid entire body assessment (REBA). Applied Ergonomics. 2000; 31(2): 201-205. doi:10.1016/S0003-6870(99)00039-3.

Hita-Gutiérrez M., Gómez-Galán M., Díaz-Pérez M., Callejón-Ferre ÁJ. An overview of REBA method applications in the world. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020; 17(8). doi:10.3390/ijerph17082635.

Ikonne CN. Influence of workstation and work posture ergonomics on job satisfaction of librarians in the federal and state university libraries in Southern Nigeria. IOSR Journal of Humanities and Social Science 2014; 19(9): 78-84.

Kee D. Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders. International Journal of Industrial Ergonomics. 2021a; 83: 103140. doi:10.1016/j.ergon.2021.103140.

Kee D. Comparison of OWAS, RULA and REBA for assessing potential work-related musculoskeletal disorders. International Journal of Industrial Ergonomics 2021b; 83. doi:10.1016/j.ergon.2021.103140.

Kim J., Hwang J., Jin S., Tchounwou PB., Kee D. Systematic comparison of OWAS, RULA, and REBA based on a literature review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022; 19(1): 595. doi:10.3390/ijerph19010595.

Kumar MP., Mugundhan K., Visagavel K. Occupational health and safety in textile industry. International Journal of Research in Engineering and Technology 2014; 3(11): 168-172.

McAtamney L., Corlett EN. RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics 1993; 24(2): 91-99. doi:10.1016/0003-6870(93)90080-S.

Mohamed Khir NH., Wan Kamarudin WF., Roslan AA., Shahrul Rizal MAH., Khairizam MS., Amjaduzzahwi M'A. Understanding musculoskeletal risks in retail workers: An ergonomic assessment of store 24H. International Journal of Business and Technology Management 2024. doi:10.55057/ijbtm.2024.6.3.20.

Rahman MNA., Zuhaidi MFA. Musculoskeletal symptoms and ergonomic hazards among material handlers in grocery retail industries. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; 226: 012027. doi:10.1088/1757-899X/226/1/012027.

Rathore B., Pundir AK., Iqbal R. Ergonomic risk factors in glass artware industries and prevalence of musculoskeletal disorder. International Journal of Industrial Ergonomics. 2020; 80: 103043. doi:10.1016/j.ergon.2020.103043.

Riihimäki H. Musculoskeletal diseases—A continuing challenge for epidemiologic research. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health. 1999. Erişim: https://www.jstor.org/stable/40967003.

Santrock JW. Yaşam boyu gelişim. (Çev. Ed. Galip Yüksel) 13. basımdan çeviri. Nobel Yayınevi. 2012.

Sharma SC., Singh R. Incidence of low back pain in workage adults in rural north India. Indian Journal of Medical Sciences 2003. Erişim: https://europepmc.org/article/med/14510345.

Shipp EM., Cooper SP., del Junco DJ., Delclos GL., Burau KD., Tortolero S., Whitworth RE. Chronic back pain and associated work and non-work variables among farmworkers from Star County, Texas. Journal of Agromedicine 2009; 14(1): 22-32. doi:10.1080/10599240802612539.

Treaster DE., Burr D. Gender differences in prevalence of upper extremity musculoskeletal disorders. Ergonomics 2004; 47(5): 495-526. doi:10.1080/00140130310001638171.

Üçüncü K., Acar H. Ergonomi. Ankara: Nobel Yayıncılık; 2020.

Yapıcı G. Ayakta çalışma ve sağlık etkileri. Journal of Turgut Ozal Medical Center. 2011;18(3):194-198. Erişim: https://dergipark.org.tr/en/pub/totm/issue/13092/157691.

Yılmaz F. Avrupa Birliği ve Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği: Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği kurullarının etkinlik düzeyinin ölçülmesi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi; 2009. İstanbul.

Zengin MA., Sekmen M. Türkiye tekstil sektörü iş kazalarının eğilim ve gelecek perspektifleri. Tekstil ve Mühendis 2023; 61-70. doi:10.7216/teksmuh.1272286.

Zorlu I., Gülcan H., Açıkgöz B., Ayoğlu FN. Musculoskeletal disorders and affecting factors among dentists. Turkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences. 2021; 27(4): 531-538. doi:10.5336/dentalsci.2020-79269.

World Health Organization (WHO). Musculoskeletal health. Erişim tarihi: 18 Nisan 2025. Erişim: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions.

“ OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9(3): 1328-1359, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1328-1359, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Yazılım Mühendisliği Eğitiminde Üretken Yapay Zekânın Bibliyometrik Analiz Yöntemi ile İncelenmesi

Fatih Çağatay BAZ[1*], Şerife KELEŞ[2]

[1,2]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 80000, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0002-6398-9851
[2]https://orcid.org/0009-0006-5771-6458
*Sorumlu yazar: fatihcagataybaz@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 15.08.2025
Kabul tarihi:28.11.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Üretken yapay zekâ
Yazılım mühendisliği eğitimi
Büyük dil modelleri
Bibliyometrik analiz

ÖZ

Bu çalışma, üretken yapay zekâ teknolojilerinin yazılım mühendisliği eğitimine etkilerini bibliyometrik analiz yoluyla incelemektedir. Scopus veri tabanında gerçekleştirilen tarama sonucunda, üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimini kesiştiren 134 yayın belirlenmiş, VOSviewer yazılımı kullanılarak anahtar kelime birlikte geçme ve ülkeler arası ortak yazarlık analizi yapılmıştır. Üretken yapay zekâ teknolojilerinin eğitim süreçlerine entegrasyonuna ilişkin mevcut eğilimler, iş birliği kalıpları ve kavramsal kümelenmeleri ortaya koyarak hem literatürdeki boşlukların tespit edilmesi hem de gelecekteki araştırmalar için yol gösterici bir temel oluşturulmasına katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Yapılan analiz sonucunda kavramsal olarak dört tema öne çıkmaktadır: (1) büyük dil modelleri ve kod üretimi, (2) müfredat ve öğretim teknolojileri, (3) yazılım süreçleri ve kalite, (4) öğrenci merkezli pedagojik yaklaşımlar. Bulunan veriler 2024 yılının üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanındaki akademik yayınların yoğunlaştığı bir yıl olduğunu göstermektedir. Özellikle "computer aided instruction", "software design", "education computing", "generative AI" ve "engineering education" gibi anahtar kavramların ortalama yayın yıllarının 2024'e yakın olması bu temaların literatürde oldukça güncel ve hızla gelişen araştırma konuları olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum üretken yapay zekânın eğitim alanına entegrasyonunun yakın dönemde ivme kazandığını ve bu alandaki akademik ilginin arttığını göstermektedir. Çalışma üretken yapay zekânın yazılım mühendisliği eğitimine etkilerini derinlemesine anlamak ve bu alanda yapılacak yeni araştırmalara yön vermek amacıyla alanyazına önemli katkılar sunmaktadır.

Examination of Generative Artificial Intelligence in Software Engineering Education Using Bibliometric Analysis Method

Research Article

Article History:
Received: 15.08.2025
Accepted: 28.11.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Generative artificial ıntelligence
Software engineering education
Large language models
Bibliometric analysis

ABSTRACT

This study examines the impact of generative artificial intelligence technologies on software engineering education through bibliometric analysis. Through a search of the Scopus database, 134 publications intersecting generative AI and software engineering education were identified, and keyword co-occurrence and cross-country co-authorship analysis were conducted using VOSviewer software. By revealing current trends, patterns of collaboration, and conceptual clusters regarding the integration of generative AI technologies into educational processes, the study aims to contribute to both identifying gaps in the literature and providing a guiding basis for future

research. As a result of the analysis, four conceptual themes emerge: (1) big language models and code generation, (2) curriculum and instructional technologies, (3) software processes and quality, (4) student-centered pedagogical approaches.The data shows that 2024 is a year of intensified academic publications in the field of generative AI and software engineering education. In particular, the fact that the average publication years of key concepts such as "computer aided instruction", "software design", "educational computing", "generative AI" and "engineering education" are close to 2024 reveals that these themes are very current and rapidly developing research topics in the literature. This shows that the integration of generative AI into the field of education has recently gained momentum and academic interest in this field is gradually increasing. This study provides important contributions to better understand the effects of generative AI on software engineering education in depth and to guide future research in this field.

To Cite: Baz FÇ., Keleş Ş. Yazılım Mühendisliği Eğitiminde Üretken Yapay Zekânın Bibliyometrik Analiz Yöntemi ile İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1328-1359.

1. Giriş

Üretken yapay zekâ, veri analizi ve içerik üretimi alanında devrim niteliğinde bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu sistemler, mevcut verilerden öğrendikleri kalıpları kullanarak yeni ve özgün içerikler oluşturma yeteneğine sahiptir. Örneğin; metin, görüntü, video, ses ve programlama kodu gibi çeşitli alanlarda uygulama bulan üretken yapay zekâ, üretken çekişmeli ağlar ve dönüştürücü modeller gibi gelişmiş algoritmalar aracılığıyla çalışmaktadır. Bu modeller, orijinal veri kümelerini analiz ederek benzer yapıda veya daha geniş kapsamlı çıktılar üretebilmektedir (Banh ve Strobel, 2023). Üretken yapay zekânın en dikkat çekici özelliklerinden biri, büyük dil modellerini kullanarak metinlerdeki anlamsal incelikleri kavrayabilme ve bu bilgiyi yeni içerik üretiminde kullanabilme yeteneğidir. Bu özellik, özellikle sıfır atış öğrenme senaryolarında önem kazanmaktadır. Modelin daha önce karşılaşmadığı örnekler üzerinde bile etkili tahminlerde bulunabilmesi, taslak oluşturma, özetleme ve sözleşme incelemesi gibi karmaşık görevlerde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Savelka, 2023). Benzer şekilde, eğitim ortamlarında öğrencilere kişiselleştirilmiş içerik sunma, otomatik geri bildirim sağlama, öğrenme materyalleri oluşturma ve programlama eğitimi kapsamında kod üretme desteği sağlama gibi uygulamalarla katkı sunmaktadır. Bu yetenekler, üretken yapay zekânın iş dünyasından akademik araştırmalara kadar geniş bir yelpazede uygulanabilirliğini artırmaktadır. Derin üretken modellere dayanan üretken yapay zekâ, kullanıcıların basit komutlarıyla çeşitli alanlarda özgün içerik oluşturma kapasitesine sahiptir. Bu teknoloji, metin üretiminden görsel tasarıma, müzik kompozisyonundan yazılım kodlamaya kadar geniş bir yelpazede uygulanabilir. Üretken yapay zekâ sistemleri, büyük veri setleri üzerinde eğitilerek, insan benzeri yaratıcılık ve anlayış sergileyebilen karmaşık algoritmalar kullanmaktadır. Bu sistemler, kullanıcı girdilerine dayalı olarak tutarlı ve bağlamsal olarak uygun içerik üretmekte, içerik üretimi süreçlerini hızlandırmakta ve çeşitli sektörlerde verimliliği artırmaktadır. Ayrıca, üretken yapay zekânın sürekli gelişen doğası, gelecekte daha da sofistike ve özelleştirilmiş içerik üretimi potansiyelini vaat etmektedir.

Üretken yapay zekâ, eğitimde içerik üretimi, tasarım, veri artırımı ve simülasyon senaryoları gibi çeşitli uygulama alanlarında etkili sonuçlar sunmaktadır. Üretken yapay zekâ, eğitim sektöründe geniş bir

uygulama yelpazesine sahiptir. İçerik üretimi alanında, ders materyalleri, öğrenci değerlendirmeleri ve kişiselleştirilmiş öğrenme planlarının oluşturulmasında kullanılabilir. Tasarım açısından, eğitim materyallerinin görsel unsurlarını geliştirmek ve öğrenci katılımını artırmak amacıyla etkileşimli grafikler ve animasyonlar üretilebilir. Veri artırımı, mevcut eğitim verilerini genişleterek daha kapsamlı ve çeşitli öğrenme senaryolarının oluşturulmasına olanak tanır. Simülasyon senaryoları, öğrencilerin gerçek dünya durumlarını güvenli bir ortamda deneyimlemelerine olanak tanıyarak, onların pratik becerilerini geliştirmelerine katkıda bulunmaktadır (Sengar ve ark., 2024; Yusuf ve ark., 2024).

Üretken yapay zekâ teknolojisi, derin öğrenme modellerinin gelişimiyle birlikte yazılım geliştirme alanında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Bu modeller, doğal dil veya modelleme dillerinden kaynak kodu üretme yeteneği ile geliştiricilerin çalışma süreçlerini önemli ölçüde değiştirebilir. CodeBERT ve GraphCodeBERT gibi özel olarak eğitilmiş modeller, programlama kodları üzerinde çalışarak yeni yazılım programları oluşturabilirken, genel amaçlı büyük dil modelleri de giderek artan kod içeren veri setleriyle eğitilerek benzer yetenekler kazanmaktadır. Bu teknolojinin pratik uygulamaları, üretken kod üreten yapay zekâ araçları aracılığıyla belirginleşmektedir. Bu araçlar, programcılara kod üretimi, hata ayıklama, otomatik kod parçaları yazma, fikirleri eyleme dönüştürülebilir betiklere çevirme, otomatik tamamlama işlevleri sunma, birim testleri oluşturma ve yinelenen kodları tespit etme gibi çeşitli yetenekler sağlamaktadır. Bu özellikler, yazılım geliştirme sürecini hızlandırabilir, kod kalitesini artırabilir ve geliştiricilerin daha karmaşık problemlere odaklanmasına olanak tanıyabilir. Ancak bu teknolojinin etik kullanımı ve insan denetiminin önemi de göz ardı edilmemelidir (Banh ve Strobel, 2023).

Üretken yapay zekâ teknolojilerinin eğitim alanındaki uygulamaları, çeşitli derin öğrenme yöntemlerini kullanarak öğrenme süreçlerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Üretken yapay zekâ ile eğitim alanında gerçekleştirilen çalışmalarda, çeşitli derin öğrenme yöntemleri öne çıkmaktadır. Wang (2025), derin bilgi izleme yöntemini kullanarak kişiselleştirilmiş eğitimde öğrenci öğrenme süreçlerinin izlenmesine odaklanmıştır. Alipour ve Gallegos, (2025) eğitimde yapay verilerin üretilmesi ve sosyal verilerle bütünleştirilmesi amacıyla çekişmeli öğrenme ve karşıtlık tabanlı öğrenme yöntemlerini vurgulamıştır. Al-Qaysi ve ark., (2025) eğitimde sürdürülebilirliği ele alırken karşıtlık tabanlı öğrenme ve birleşik öğrenme yaklaşımlarını kullanmışlardır. Gani ve ark., (2025) bloom taksonomisine dayalı otomatik soru sınıflandırmasını geliştirmek için evrişimli sinir ağları ve karşıtlık tabanlı öğrenme yöntemlerinden faydalanmıştır. Soni ve Kapoor (2025), eğitim metinlerinin özetlenmesi ve içerik üretiminde açıklayıcı özetleme tekniğini uygulamıştır. Bu gelişmeler, üretken yapay zekânın eğitim alanında geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu ve öğrenme deneyimlerini dönüştürme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Üretken yapay zekâ teknolojileri yazılım mühendisliği eğitiminde öğrencilere kod üretimi, problem çözme ve algoritmik düşünme becerilerini geliştirme konusunda destek sağlayarak, geleneksel eğitim yöntemlerini tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. OpenAI Codex, Tabnine, Amazon CodeWhisperer, Codeium, Replit Ghostwriter ve ChatGPT gibi üretken yapay zekâ kodlama araçları, öğrencilere gerçek

zamanlı kod önerileri sunarak ve kişiselleştirilmiş geri bildirimler sağlayarak öğrenme sürecini hızlandırmakta ve zenginleştirmektedir. Ancak, bu teknolojilerin eğitim ortamlarında kullanımı henüz yeni olduğundan, etkileri ve potansiyel riskleri tam olarak anlaşılamamıştır.

Üretken yapay zekâ sağlık alanında, hastalık teşhisi, ilaç keşfi ve hasta bakımı optimizasyonunda kullanılmaktadır. Finans sektöründe risk analizi, piyasa tahminleri ve kişiselleştirilmiş finansal tavsiyelerde önemli rol oynamaktadır. Hukuk alanında yasal belge analizi ve dava sonuç tahminleri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu geniş kapsamlı uygulamalar, üretken yapay zekânın farklı alanlarda sunduğu potansiyeli ortaya koymaktadır (Sengar ve ark., 2024).

Üretken yapay zekânın yazılım mühendisliği eğitimindeki rolünü ve etkisini sistematik bir şekilde incelemek büyük önem taşımaktadır. Araştırmacılar, bu teknolojilerin hangi pedagojik yaklaşımlarla en etkili şekilde kullanılabileceğini, etik ve akademik dürüstlük konularında nasıl bir denge kurulması gerektiğini ve teknik güvenilirlik açısından ne gibi önlemler alınması gerektiğini araştırmaktadır. Ayrıca, bu alandaki literatürün bibliyometrik analizi, hangi kurumların ve ülkelerin bu konuda öncü olduğunu, araştırmaların hangi kavramsal temalar etrafında yoğunlaştığını ve gelecekte hangi alanlarda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulacağını ortaya çıkarmak açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, tüm bu sorulara yanıt aramakta ve üretken yapay zekânın yazılım mühendisliği eğitimindeki durumunu ve gelecekteki potansiyelini kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Çoğu mevcut çalışma (Vhatkar ve ark., 2024; Bicen, 2025; Ng ve Ho, 2025) üretken yapay zekâyı genel eğitim bağlamında ele alırken, bu çalışma özel olarak yazılım mühendisliği eğitimine odaklanmakta ve pedagojik etkilerin yanı sıra kod üretimi, algoritmik düşünme ve mühendislik müfredatı gibi daha teknik boyutları da kapsamaktadır. Literatürdeki araştırmalar genellikle üretken yapay zekâyı kavramsal düzeyde incelerken, bu çalışmada OpenAI Codex, Tabnine, Amazon CodeWhisperer, Codeium, Replit Ghostwriter ve ChatGPT gibi araçların yazılım mühendisliği öğrencilerine sağladığı doğrudan katkılar analiz edilmekte, böylece uygulamalı boyutta daha güçlü bir perspektif sunulmaktadır. Ayrıca Vhatkar ve ark., (2024) ile Bicen (2025) genel eğitim alanında bibliyometrik analizler gerçekleştirirken, bu çalışma yazılım mühendisliği özelinde anahtar kelime kümeleri, ortak yazarlık ağları ve atıf yapıları üzerinden alanın özgün dinamiklerini ortaya koymakta ve yalnızca mevcut eğilimleri tanımlamakla kalmayıp, müfredat reformu, öğretmen eğitimi ve etik politikalar gibi doğrudan uygulanabilir öneriler de geliştirmektedir.

Bu çalışma kapsamında ele alınan araştırma problemi şu soruya odaklanmaktadır: "Üretken yapay zekâ, yazılım mühendisliği eğitiminde hangi tematik alanlarda konumlanmakta ve kavramsal, pedagojik ve teknik düzeyde nasıl bir dönüşüm oluşturmaktadır?"

2. Literatür Taraması

2.1. Üretken Yapay Zekânın Yazılım Geliştirmedeki Rolü

Üretken yapay zekâ, yazılım geliştirme süreçlerinde verimlilik, yenilikçilik ve güvenliği artıran önemli bir rol üstlenmektedir ve yazılım geliştirme sürecinin tüm aşamalarında devrim niteliğinde değişiklikler

sunmaktadır. Kod üretiminden hata ayıklamaya, test senaryoları oluşturmadan dokümantasyona kadar geniş bir yelpazede etkili olan üretken yapay zekâ, geliştiricilerin işlerini hızlandırmakta ve optimize etmektedir. Özellikle, tekrarlayan görevleri otomatikleştirerek zaman kazandırmakta ve insan geliştiricilerin daha karmaşık, yaratıcı problemlere odaklanmalarına olanak tanımaktadır. Üretken yapay zekânın yazılım geliştirmedeki bir diğer önemli katkısı, kod kalitesini ve güvenliğini artırmasıdır. Makine öğrenimi algoritmalarını kullanarak, potansiyel güvenlik açıklarını tespit edebilmekte, kod optimizasyonu önerileri sunabilmekte ve en iyi uygulamaları teşvik edebilmektedir. Ayrıca, farklı programlama dillerinde ve çerçevelerinde geniş bir bilgi tabanına sahip olan Üretken yapay zekâ, geliştiricilere yeni teknolojileri öğrenme ve uygulamada yardımcı olarak, sürekli değişen teknoloji ortamında rekabet güçlerini korumalarını sağlamaktadır.

2.1.1. Kod Oluşturma ve Hata Ayıklama

OpenAI Codex ve GitHub Copilot gibi üretken yapay zekâ modelleri, doğal dil açıklamalarını sözdizimsel olarak doğru ve bağlam farkında kaynak koduna dönüştürerek kod oluşturma süreçlerinde devrim yaratmıştır. Bu araçlar, geliştirme süresini önemli ölçüde azaltmakta, kod kalitesini artırmakta ve özellikle yeni başlayan geliştiriciler için programlamayı daha erişilebilir hale getirmektedir (Alenezi ve Akour, 2025; Saravanan ve ark., 2025). Hata ayıklama bağlamında, üretken yapay zekâ modelleri hataları akıllıca tespit edebilmekte ve geliştiriciler arasında güven ve kullanılabilirliği artıran açıklanabilir yapay zekâ tekniklerini birleştirerek düzeltmeler önerebilmektedir (Saravanan ve ark., 2025).

2.1.2. Otomatik Test

Üretken yapay zekâ, yazılım testini otomatik test senaryosu oluşturma ve hata tanımlama yoluyla geliştirerek test kapsamını ve verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Yapay zekâ destekli bu yöntemler, manuel testlerin sınırlamalarını ele alarak daha iyi hata tahmini ve test sonucu analizine olanak tanımakta ve böylece yüksek yazılım kalitesi sağlamaktadır (Bajaj ve Samal, 2023; Hnatushenko ve Pavlenko, 2024). Yapay zekânın testlere entegrasyonu, gelişmiş yazılım güvenilirliği için öngörücü analize de olanak tanımaktadır (Nama, 2024).

2.1.3. Proje Yönetimi ve İş Birliği

Üretken yapay zekânın proje yönetimine, özellikle çevik ortamlarda entegrasyonu, iş akışlarının kolaylaştırılmasını, karar alma süreçlerini ve gelişmiş iş birliğini desteklemektedir. Bu entegrasyon, yaygın proje yönetimi zorluklarının ele alınmasına, üretkenliğin artırılmasına ve hızlı teslimat döngülerinin desteklenmesine katkı sağlamaktadır (Bahi ve ark., 2024; Vergara ve ark., 2025).

2.1.4. Güvenlik Geliştirme

Güvenlik bağlamında, üretken yapay zekâ, siber güvenlik tehditlerini gerçek zamanlı olarak tahmin etme, tespit etme ve azaltma yeteneğiyle web uygulamaları ve kurumsal sistemlerin korunmasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Üretken yapay zekâ modellerinin uyarlanabilir yetenekleri, tehdit tespitini geliştirir ve proaktif güvenlik önlemlerinin uygulanmasına olanak tanır (Tariq, 2024; Vemuri ve ark., 2024). Bu teknikler, veri korumasını sağlamakta ve dijital ortamların gelişen tehditlere karşı bütünlüğünü muhafaza etmektedir.

2.2. Üretken Yapay Zekânın Yazılım Geliştirme Eğitimindeki Rolü

Üretken yapay zekâ, yazılım geliştirme eğitiminde dönüştürücü bir rol oynayarak hem öğretim hem de öğrenme deneyimlerini geliştirir. Üretken yapay zekânın etkisinin belirgin olduğu birkaç temel alan şunlardır: Üretken yapay zekâ, yazılım geliştirme eğitiminde çok yönlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Öğrencilere kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimleri sunarak, karmaşık programlama kavramlarını daha anlaşılır hale getirmektedir. Üretken yapay zekâ, öğrencilerin kendi hızlarında ilerlemelerine olanak tanırken, anlık geri bildirimler sağlayarak öğrenme sürecini hızlandırmaktadır. Ayrıca, gerçek dünya senaryolarına dayalı pratik örnekler üreterek, teorik bilgilerin uygulamaya dönüştürülmesini kolaylaştırmaktadır.

Eğitmenler açısından üretken yapay zekâ ders içeriklerinin hazırlanmasından değerlendirme süreçlerine kadar geniş bir yelpazede destek sağlamaktadır. Otomatik kod analizi ve hata tespiti özellikleri, eğitmenlerin öğrenci çalışmalarını daha verimli bir şekilde değerlendirmesine yardımcı olmaktadır. Bunun yanı sıra, üretken yapay zekâ, eğitim materyallerinin sürekli güncellenmesini ve endüstri trendlerine uygun hale getirilmesini sağlayarak, öğrencilerin güncel teknolojilerle tanışmasını mümkün kılmaktadır. Bu sayede, yazılım geliştirme eğitimi daha dinamik, etkileşimli ve sektör ihtiyaçlarına uygun bir yapıya kavuşmaktadır. Üretken yapay zekânın etkisinin yoğun şekilde hissedildiği başlıca alanlar aşağıda sıralanmıştır.

2.2.1. Kodlama ve Hata Ayıklama Yardımı

Üretken yapay zekâ, kod oluşturma ve hata ayıklama gibi kritik geliştirme görevlerinin otomasyonuna katkıda bulunmaktadır. OpenAI'nin Codex'i gibi büyük dil modelleri, doğal dil açıklamalarından sözdizimsel olarak doğru ve bağlam farkında kaynak kodu üreterek geliştirme süresini %45'e kadar azaltmakta ve kod kalitesini artırmaktadır. Bu durum, acemi programcılar için giriş engelini azaltmakta ve gerekçeli kod parçacıkları sağlamak amacıyla açıklanabilir yapay zekâ tekniklerini birleştirerek geliştiriciler arasında güven ve kullanılabilirliği artırmaktadır (Saravanan ve ark., 2025).

2.2.2. Müfredat Geliştirme

Üretken yapay zekâ, çeşitli öğrenci gereksinimlerini karşılayan kişiselleştirilmiş ve uyarlanabilir yollar oluşturarak eğitim müfredatlarının geliştirilmesini yeniden şekillendirmektedir. Bu durum, geleneksel

eğitim sınırlamalarını ele almakta ve uygulamalı öğrenmeyi geliştiren sanal laboratuvarlar ve simülasyonların oluşturulmasını kolaylaştırmaktadır. Sonuç olarak, üretken yapay zekâ, yükseköğretimde daha kişiselleştirilmiş ve verimli eğitim deneyimlerine katkıda bulunmaktadır (Tariq, 2024).

2.2.3. Öz Düzenlemeli Öğrenme

K-12 ortamlarında, üretken yapay zekâ, öğrenci katılımını artıran, anında geri bildirim sunan ve öz değerlendirmeyi teşvik eden araçlar sağlayarak öz düzenlemeli öğrenmenin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu yaklaşım, öğretimi, öğretmenlerin kolaylaştırıcı olarak hareket ettiği ve bireysel öğrenci ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla talimatları kişiselleştirdiği daha insan merkezli bir sürece dönüştürmektedir (Kong ve Yang, 2024).

2.2.4. Değerlendirme ve Geri Bildirim

Üretken yapay zekâ araçları kodlama alıştırmalarına ve argümanlar oluşturmaya yardımcı olmasını sağlayarak hem biçimlendirici hem de toplu değerlendirmelere katkıda bulunur. Bu araçlar, öğrencilerin yapay zekâ çıktılarının eleştirel bir değerlendirmesini yapmalarına olanak tanır ve böylece ödevleri onlar adına tamamlamadan yapay zekâyı öğrenme süreçlerine entegre eder. Bu yaklaşım, öğrencilerin ihtiyaçları ve sektör beklentileriyle uyumlu olduğundan, öğrencileri gerçek dünyadaki yazılım mühendisliği rollerine hazırlamada önemli bir araç haline gelmektedir (Petrovska ve ark., 2024).

2.2.5. Uyarlanabilir ve Kişiselleştirilmiş Öğrenme

Üretken yapay zekânın entegrasyonu, uyarlanabilir ve kişiselleştirilmiş öğrenme ortamlarının teşvik edilmesine katkıda bulunmaktadır. Bu entegrasyon, öğrenci katılımını artırmakta, test puanlarını iyileştirmekte ve kişiye özel eğitim deneyimleri aracılığıyla beceri gelişimini hızlandırmaktadır. Bu durum, geleneksel eğitim yöntemlerinden, kişiselleştirmenin yanı sıra sosyal-duygusal öğrenmeyi de içeren daha yenilikçi yaklaşımlara geçişi işaret etmektedir (Guettala ve ark., 2024).

2.2.6. Öğretim Çerçeveleri

Üretken yapay zekâ, eğitim ortamlarında öğretim çerçevelerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır. Eğitimcilerin stratejilerini geliştirmelerine ve yapay zekâ ile entegre dersler tasarlamalarına olanak tanıyarak, öğrencilerin dikkatini, katılımını, özgüvenini ve memnuniyetini artırmaktadır. Bu tür çerçeveler, eğitimin geleceğe hazırlanması ve yapay zekâ teknolojilerinin öğretim uygulamalarına daha iyi entegre edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir (Kong ve Yang, 2024).

Üretken Yapay Zekâ, kodlama ve eğitim alanlarında sunduğu fırsatların yanı sıra, öğrencilere çeşitli zorluklar da sunmaktadır. Öğrencilerin yapay zekâya aşırı güvenmesi, eleştirel düşünme ve özgün fikir üretme becerilerini zayıflatabilir. Yapay zekâ tarafından üretilen içeriği yeterince analiz etmeden kullanmak, öğrencilerin temel kavramları ve süreçleri derinlemesine anlamadan yüzeysel bir öğrenme

gerçekleştirmelerine yol açabilir. Bu durum, özellikle yazılım geliştirmede kritik öneme sahip problem çözme becerilerinin gelişimini olumsuz etkileyebilir (Deng ve Joshi, 2024). Bu zorluklar, eğitimcilerin rolünü yeniden şekillendirmekte ve eğitim politikalarında değişiklikler gerektirmektedir. Eğitimciler, öğrencilere sadece teknik becerileri öğretmekle kalmayıp, aynı zamanda yapay zekâ çıktılarını eleştirel bir gözle değerlendirme, doğrulama ve etik kullanım becerilerini de kazandırmalıdır (Aarti, 2024). Bu bağlamda, sorumlu yapay zekâ entegrasyonu ve etik kullanımı vurgulayan eğitim politikalarının geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır (Alali ve Wardat, 2024). Öğrencilerin yapay zekâ araçlarını bilinçli ve etkin bir şekilde kullanabilmeleri için, eleştirel düşünme, problem çözme ve etik karar verme becerilerinin geliştirilmesine odaklanan bütüncül bir eğitim yaklaşımı benimsenmesi gerekmektedir. Bu sayede, öğrenciler yapay zekânın sunduğu fırsatlardan yararlanırken, potansiyel dezavantajlarını da en aza indirebileceklerdir.

Üretken yapay zekânın yazılım geliştirme eğitimindeki potansiyel rolü umut verici olmakla birlikte, bu durum etik, akademik dürüstlük ve teknik güvenilirlik konularında birtakım zorlukları da beraberinde getirmektedir. Genel olarak, üretken yapay zekâ, eğitimcilerin yerini alacak bir araç olarak değil, yazılım geliştirmenin öğretilme ve öğrenilme biçiminde devrim yaratabilecek bir araç olarak değerlendirilmektedir. Eğitim kurumları, bu zorlukları dikkatlice ele alarak, daha verimli, akıllı ve erişilebilir öğrenme ortamları yaratmak amacıyla bu teknolojinin dönüştürücü potansiyelinden faydalanabilirler (Sultana, 2024).

2.3. Popüler Üretken Yapay Zekâ Kodlama Araçları

Üretken yapay zekâ araçları, yazılım geliştirme sürecinde devrim niteliğinde değişimler yaratmaktadır. Kod üretimi, hata tespiti ve algoritma optimizasyonu gibi görevleri otomatikleştirerek, geliştiricilerin verimliliğini artırmakta ve yaratıcı süreçlere odaklanmalarını sağlamaktadır. Farklı programlama dillerine uyarlanabilir yapıları sayesinde çok çeşitli alanlarda etkili olan bu araçlar, programcıların yetkinliklerini tamamlayıcı niteliktedir. Aşağıda kod üretebilen bazı popüler üretken yapay zekâ araçlarına dair kısa bir genel bakış sunulmaktadır:

2.3.1. GitHub Copilot

Visual Studio Code ile entegre edilmiş yapay zekâ tabanlı bir araç olan GitHub Copilot, geliştiricilere akıllı kodlama önerileri sunmak amacıyla tasarlanmıştır. Codex adlı dil modeli tarafından desteklenen bu araç, otomatik kod tamamlama ve sentezleme yoluyla geliştirme sürecini önemli ölçüde iyileştiren özellikler sunmaktadır (Sobania ve ark., 2022).

"Yapay zekâ çift programcısı" olarak işlev gören bu araç, kodu otomatik tamamlama, sözdizimini hatırlamaya yardımcı olma ve tuş vuruşlarını azaltarak kodlama görevlerini daha hızlı ve verimli hale getirme yeteneği nedeniyle geliştiriciler tarafından benimsenmiştir (Liang ve ark., 2024).

"Yapay zekâ çift programcısı" olarak adlandırılan ve OpenAI'nin GPT-3'ün bir türevi olan Codex tarafından desteklenen bir araçtır. Bu araç, geliştiricinin sağladığı bağlam doğrultusunda kod

parçacıkları ve tam işlevler önerir. Visual Studio Code gibi entegre geliştirme ortamlarına (IDE) entegre edilmiştir ve özellikle JavaScript ve Python dillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Copilot, kod satırlarını otomatik olarak tamamlayarak ve yöntemler önererek üretkenliği artırmaktadır; ancak, güvenlik açıkları açısından dikkatli bir inceleme gerektirmektedir (Fu ve ark., 2025; Pearce ve ark., 2025).

2.3.2. OpenAI Codex

OpenAI Codex, doğal dil açıklamalarından kod üretme yeteneğiyle yazılım geliştirme ve eğitim alanlarını dönüştüren üretken bir yapay zekâ modelidir. Bu model, kod oluşturma, hata ayıklama ve optimizasyon gibi yetenekler sunarak üretkenliği önemli ölçüde artırmakta ve yeni başlayan programcılar için giriş engellerini azaltmaktadır. Bu özellikler, Codex'i bir dizi büyük dil modelinin (LLM) parçası haline getirmektedir (Saravanan ve ark., 2025).

GPT-3 ailesinin bir üyesi olarak, GitHub Copilot gibi araçlara güç sağlamaktadır ve doğal dil açıklamalarından kod anlama ve oluşturma konusunda üstün yetenekler sunmaktadır. Birden fazla programlama dilini destekleyen Codex, kod parçacıkları, hata ayıklama ve daha karmaşık programlama görevleri için oldukça kullanışlıdır (Aarti, 2024).

OpenAI Codex, kod oluşturma sürecini daha sezgisel ve erişilebilir hale getirerek yazılım mühendisliği ve eğitimdeki geleneksel uygulamaları dönüştürmektedir. Avantajlarına rağmen, Codex'in kullanımı, potansiyelini en üst düzeye çıkarırken riskleri azaltmak için sürekli araştırma ve etik değerlendirmeler gerektiren zorluklarla birlikte gelir (Macneil ve ark., 2023; Aarti, 2024).

2.3.3. Tabnines

Yazılım geliştirme süreçlerini iyileştirmek amacıyla tasarlanmış, yapay zekâ destekli bir kod asistanıdır. Bu araç, gerçek zamanlı kod önerileri, akıllı kod tamamlama ve kodlama görevlerinin otomasyonu sunarak, yazılan kodun bağlamını ve amacını anlamak için makine öğrenimi modellerinden faydalanır ve geliştiricilere verimli kod oluşturma ve tamamlama özellikleri sağlar (Aarti, 2024).

Tabnine'in temel avantajlarından biri, tekrarlayan görevleri otomatikleştirerek ve kod yazma süresini azaltarak geliştirici verimliliğini artırma yeteneğidir. Bu, genellikle doğru ve bağlamsal olarak alakalı kod önerileri üreterek gerçekleştirilir ve yapay zekâ, kod oluşturmanın rutin kısımlarını üstlenirken, geliştiricilerin geliştirme süreçlerinin kritik yönlerine daha fazla odaklanmalarını mümkün kılar (Ajiga ve ark., 2024).

Bu yapay zekâ aracı, genel ve özel kod depolarından öğrenerek kod tamamlama ve öneriler sağlar. Geliştiricilerin birden fazla programlama dilinde verimli bir şekilde kod yazmalarına yardımcı olmayı amaçlar ve çeşitli geliştirme ortamlarıyla uyumludur (Corso ve ark., 2024).

2.3.4. ChatGPT

Önemli bir yapay zekâ dil modeli olan ChatGPT, yazılım geliştirmeye çeşitli açılardan katkı sağlayarak çok sayıda programlama dilini desteklemektedir: ChatGPT, Python ve Java gibi çeşitli programlama dillerinde kod oluşturma ve geliştirme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, farklı dillerde kodun yeniden yazılmasına, hata ayıklamaya ve sayısal algoritmaların performansını artırmaya yardımcı olmaktadır (Kashefi ve Mukerji, 2023; Ouh ve ark., 2023).

OpenAI tarafından geliştirilen ChatGPT, yalnızca bir kodlama aracı olmasa da kod üretebilir ve kodlamayla ilgili sorgulara yardımcı olabilir. Çeşitli alanlardaki kod oluşturma isteklerini işleyebilir ve hata ayıklama ve kodlama çözümlerini keşfetmeye yardımcı olabilir (Özpolat ve ark., 2023).

Yapay zekâ modeli, kodlama alıştırmalarına çözümler sunarak, alternatif yaklaşımlar önererek ve öz düzenlemeli öğrenme süreçlerini destekleyerek programlama eğitimini geliştirmektedir (Hartley ve ark., 2024; Yang ve ark., 2025).

2.3.5. Amazon CodeWhisperer

Üretken yapay zekânın dönüştürücü etkisinin belirgin olduğu kod üretimi alanında önemli bir yardımcıdır. Tekrarlayan kodlama görevlerini otomatikleştirerek, geliştiricilerin yazılım geliştirmenin daha karmaşık ve yaratıcı yönlerine odaklanmalarını sağlamak suretiyle genel üretkenliği artırır (Ajiga ve ark., 2024).

Ayrıca, aracın makine öğrenimi algoritmaları, önceki projelerden elde edilen geniş veri kümelerini analiz ederek öngörücü analizler sunabilir ve bu da daha bilinçli karar alma ve kaynak tahsisi sağlar. Bu öngörücü yetenek, geliştirme ekiplerinin çevikliğini korumak, değişikliklere hızla uyum sağlamalarını ve proje teslim tarihlerini verimli bir şekilde karşılamalarını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Amazon CodeWhisperer'ın bir diğer önemli avantajı, akıllı hata ayıklama ve otomatik hata tespiti yoluyla kod kalitesini artırmadaki rolüdür. Bu, hataların belirlenmesi ve düzeltilmesi için harcanan süreyi azaltmanın yanı sıra, nihai yazılım ürününün güvenilirliğini de artırır (Alenezi ve Akour, 2025).

2.3.6. Codeium

Akıllı kod önerileri ve eksiksiz kod parçacıkları sunarak kodlama hatalarını azaltmayı ve üretkenliği artırmayı amaçlayan gelişmiş bir gerçek zamanlı kodlama aracıdır. Bu araç, güvenlik ve etik etkilerle ilgili endişeler bulunmasına rağmen, bu görevlerde yardımcı olmak için büyük dil modellerinin (LLM) yeteneklerinden faydalanmaktadır. LLM'ler, doğal dil girdilerinden kod oluşturma, çevirme ve optimize etme konularında güçlü yetenekler sergileyerek yazılım geliştirmeye önemli katkılarda bulunmuştur (Cooper ve ark., 2024; Ni ve ark., 2024). Örneğin, Programcı Asistanı gibi sistemler, genişletilmiş etkileşimleri destekleyen ve böylece devam eden etkileşimlerden bağlamı dahil ederek programcıların üretkenliğini artıran konuşma temelli LLM'ler kullanmaktadır (Ross ve ark., 2023).

2.3.7. Replit Ghostwriter

Replit güçlü bir yapay zekâ aracıdır ve otomatik kod tamamlama ile akıllı öneriler sunarak kodlama deneyimini geliştirmek amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Bu araç, etkileşimli bir kodlama ortamında üretkenliği önemli ölçüde artırabilir ve bu durum, onu özellikle kodlama kavramlarını inceleyen eğitimciler ve öğrenciler için değerli kılmaktadır (Owan ve ark., 2023; Petrovska ve ark., 2024). Eğitim alanında, Ghostwriter gibi üretken yapay zekâ araçları, kişiselleştirilmiş öğrenme deneyimlerine katkıda bulunabilir. Karmaşık programlama kavramlarını anlamak için kritik öneme sahip olan kişiye özel geri bildirim ve gerçek zamanlı yardım sunarak çeşitli öğrenme stillerini desteklerler. Bu araçlar, kodlama sürecini kolaylaştırarak öğrencilerin sözdiziminden ziyade problem çözme ve kodlamanın yaratıcı yönlerine daha fazla odaklanmalarını sağlamaktadır (Imran ve ark., 2023; P, 2024).

Üretken Yapay Zekâ Kodlama Araçları üzerine yapılan akademik araştırmalar, bu araçların yazılım mühendisliği, programlama eğitimi, eğitim ve güvenlik boyutlarındaki etkilerini çeşitli perspektiflerden incelemektedir. ChatGPT'nin yazılım mühendisliği eğitiminde kullanımı üzerine yapılan araştırmalar, bu teknolojinin hem pedagojik hem de pratik açılardan dönüştürücü bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Liu (2024), büyük dil modellerinin ders içi uygulamalara entegre edilmesinin öğrencilerin problem çözme süreçlerini kolaylaştırdığını ve yazılım geliştirme becerilerini desteklediğini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Daun ve Brings (2023) ChatGPT'nin mühendislik eğitiminde paradigma değişimine yol açabileceğini, öğretim üyelerinin rolünü yeniden tanımladığını ve öğrenme deneyimini kişiselleştirdiğini belirtmektedir. Li ve ark., (2023) ChatGPT'nin öğrencilere gerçek zamanlı geri bildirim sağlayarak yazılım mühendisliği derslerinde etkileşimi artırdığını ortaya koyarken, Abdelfattah ve ark., (2023) bu teknolojinin gelecekteki eğitim yaklaşımlarına yönelik bir yol haritası sunduğunu öne sürmektedir. Bu çalışmalar, ChatGPT'nin yazılım mühendisliği eğitiminde yalnızca teknik destek sağlayan bir araç değil, aynı zamanda pedagojik yeniliklerin de katalizörü olabileceğini göstermektedir (Nizamudeen ve ark., 2024). Hollanda'daki bir üniversitede gerçekleştirdikleri araştırmada, öğrencilerle yapılan görüşmeler ve anketler aracılığıyla GitHub Copilot ve ChatGPT'nin programlama eğitimindeki etkilerini incelemiştir. Bulgular, öğrencilerin bu araçlara genel olarak olumlu yaklaştığını ve birçok üniversite düzeyindeki programlama ödevinin kısmen ya da tamamen bu araçlarla çözülebildiğini göstermektedir. Çalışma, bu durumun öğrenmeyi desteklediğini, ancak öğretim üyelerinin ödev ve içerik tasarımlarını yeniden gözden geçirmesi gerektiğini vurgulamaktadır (Araujo ve Hayajneh, 2025). Amazon CodeWhisperer tarafından üretilen kodun güvenlik açısından değerlendirilmesini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, üretilen kodların %85'inin güvenlik zafiyetleri içerdiği ve CodeWhisperer'in güvenlik tarama aracının bu zafiyetlerin yalnızca %62'sini tespit edebildiği ortaya konulmuştur. Bu bulgular, kod üretim araçlarının yazılım geliştirmede verimlilik sağlarken aynı zamanda ciddi güvenlik riskleri de barındırabileceğini göstermektedir. Ovi ve ark., (2024) büyük dil modellerine dayalı programlama asistanlarını (ChatGPT, GitHub Copilot, Codeium) kod üretimi, hata ayıklama ve optimizasyon bağlamında karşılaştırmalı olarak değerlendirmiş ve başarı, çalışma süresi, bellek kullanımı ve hata yönetimi gibi metrikleri incelemiştir. Bulguları, bu

araçların özellikle düşük/orta karmaşıklıktaki görevlerde anlamlı kazanımlar sağladığını; GitHub Copilot'un genel performansta öne çıktığını, ChatGPT'nin bellek verimliliği ve hata ayıklama süreçlerinde güçlü olduğunu; Codeium'un ise yüksek karmaşıklıkta daha fazla zorlandığını göstermektedir. Bununla birlikte, ileri düzey görevlerde tüm araçların sınırlılıkları bulunduğundan, büyük dil modellerinin eğitim ve yazılım geliştirme iş akışlarında tamamlayıcı araçlar olarak, sıkı test ve doğrulama süreçleriyle birlikte kullanılmasının önemi vurgulanmaktadır. Ovi ve ark., (2024) ile Chang ve ark., (2025) sistematik derlemeleri, Codex'in hız, hata azaltma ve çoklu dil desteği gibi güçlü yönlerini ortaya koyarken, etik kaygılar ve bağımlılık risklerine dikkat çekmiştir. Godoy ve ark., (2023) Codex'in HPC ortamlarında temel kod üretiminde başarılı olduğunu, ancak karmaşık optimizasyonlarda yetersiz kaldığını belirtmiştir. Eğitim alanında Finnie-Ansley ve ark., (2023), Codex'in öğretme sürecini kolaylaştırmasına rağmen akademik dürüstlük ve sınav güvenliği açısından riskler doğurduğunu vurgulamıştır. Prenner ve ark., (2022) ise, Codex'in yaygın hata türlerini düzeltebildiğini, ancak karmaşık mantık hatalarında sınırlı kaldığını göstermiştir.

Sonuç olarak, literatürdeki çalışmalar üretken yapay zekâ kodlama araçlarının eğitimden yazılım geliştirmeye, hata ayıklamadan güvenliğe kadar geniş bir yelpazede önemli katkılar sunduğunu, ancak etik, güvenlik ve performans sınırlarının bu teknolojilerin dikkatli kullanılmasını gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

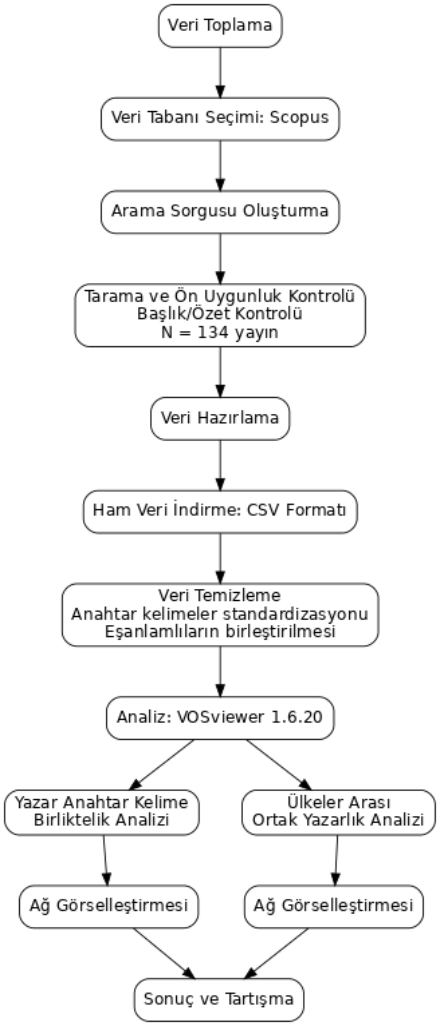
3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, üretken yapay zekânın yazılım mühendisliği eğitimi bağlamında kullanımını analiz etmek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Veri kaynağı olarak Scopus veri tabanı tercih edilmiştir; Scopus, gelişmiş analiz araçları, bibliyometrik göstergeler ve kullanıcı dostu bir arayüz sunarak araştırmacılara destek sağlamaktadır. Kapsamlı literatür taramaları, bibliyometrik analizler ve bilimsel ölçüm çalışmaları yürütmek için önemli bir araçtır (Schotten ve ark., 2017). Literatür taramasında, alanla doğrudan ilişkili çalışmaları belirlemek amacıyla kapsamlı bir arama sorgusu kullanılmıştır. Arama ifadesi olarak (TITLE (genAI) OR TITLE (generative ai) OR TITLE-ABS-KEY (generative artificial intelligent) OR TITLE (chatGPT) OR TITLE (LLM) OR TITLE (AI programming tutor) AND TITLE-ABS-KEY (software engineering education)) sorgusu kullanılmıştır. **A**rama 29 Temmuz 2025 tarihinde gerçekleştirilmiş olup, bu sorgu, hem başlık hem de özet/anahtar kelime alanlarında üretken yapay zekâ ile yazılım mühendisliği eğitimini kesiştiren çalışmaları tespit etmeye yönelik olarak özel biçimde yapılandırılmıştır. Bu çalışmanın odak noktası olarak "software engineering education" alanının seçilmesinin temel nedeni, yazılım geliştirme sürecinin yalnızca programlama becerilerinden ibaret olmaması, aynı zamanda sistematik düşünme, mimari tasarım, yazılım doğrulama ve sürdürme gibi çok boyutlu bilişsel ve teknik yeterlilikler içermesidir. Yazılım mühendisliği eğitimi, üretken yapay zekâ araçlarının bu karmaşık süreçlerde nasıl bir öğrenme destekleyicisi rolü üstlendiğini analiz etmek açısından zengin bir bağlam sunmaktadır. Ayrıca bu alan, yapay zekâ destekli öğrenme ortamlarının pedagojik etkilerinin ve öğrencilerin problem çözme,

algoritmik düşünme ve yazılım kalitesi üretme gibi yetkinlikler üzerindeki katkılarının daha somut gözlemlenebileceği bir zemin sunmaktadır. Bu detaylı arama sonucunda, çalışmanın kapsamına uygun olarak 134 akademik yayın tespit edilmiştir. İlgili literatürde üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi kesişiminde gerçekleştirilen çalışmaların sayıca sınırlı olması nedeniyle, araştırma makalesi, konferans bildirisi, konferans değerlendirmesi, kitap bölümü ve derleme makalesi türlerindeki yayınların tamamı herhangi bir dışlama yapılmaksızın analize dahil edilmiştir. Bu sayede analiz hem güncel hem de temsili bir yayın kümesine dayanarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen veriler, bibliyometrik analiz için özel olarak tasarlanmış ve özellikle bibliyometrik haritaların oluşturulması ile görselleştirilmesi açısından önemli avantajlar sunan VOSviewer yazılımı (sürüm 1.6.20) kullanılarak incelenmiştir. Grafiksel gösterime odaklanması sayesinde büyük ölçekli bibliyometrik ağların yorumlanmasını kolaylaştıran VOSviewer, bibliyometrik yazılımlar arasında önemli bir konuma sahiptir (Eck ve Waltman, 2009). Bu yazılım, akademik yayınlar arasındaki ilişkileri görselleştirme ve analiz etme konusunda güçlü özelliklere sahiptir. Bibliyometrik analiz, yayınların atıf ağlarını, yazar iş birliklerini, anahtar kelime eğilimlerini ve araştırma alanındaki tematik kümelenmeleri ortaya çıkarmak için kullanılmıştır. Bu analiz yöntemi, üretken yapay zekâ ve yazılım eğitimi alanlarındaki araştırma trendlerini, etkili çalışmaları ve potansiyel araştırma boşluklarını belirlemeye yardımcı olacaktır.

Bu çalışmada, veri toplama, hazırlama, analiz ve tartışma aşamaları sistematik bir şekilde yürütülmüştür. Scopus veri tabanından elde edilen 134 yayın csv formatında indirilmiş ve anahtar kelime standardizasyonu yapıldıktan sonra VOSviewer 1.6.20 kullanılarak yazar anahtar kelime ve ülkeler arası ortak yazarlık analizleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, ağ görselleştirmeleri ile desteklenmiş ve tartışılmıştır. Sürecin tüm adımları Şekil 1'deki akış şemasında özetlenmektedir.



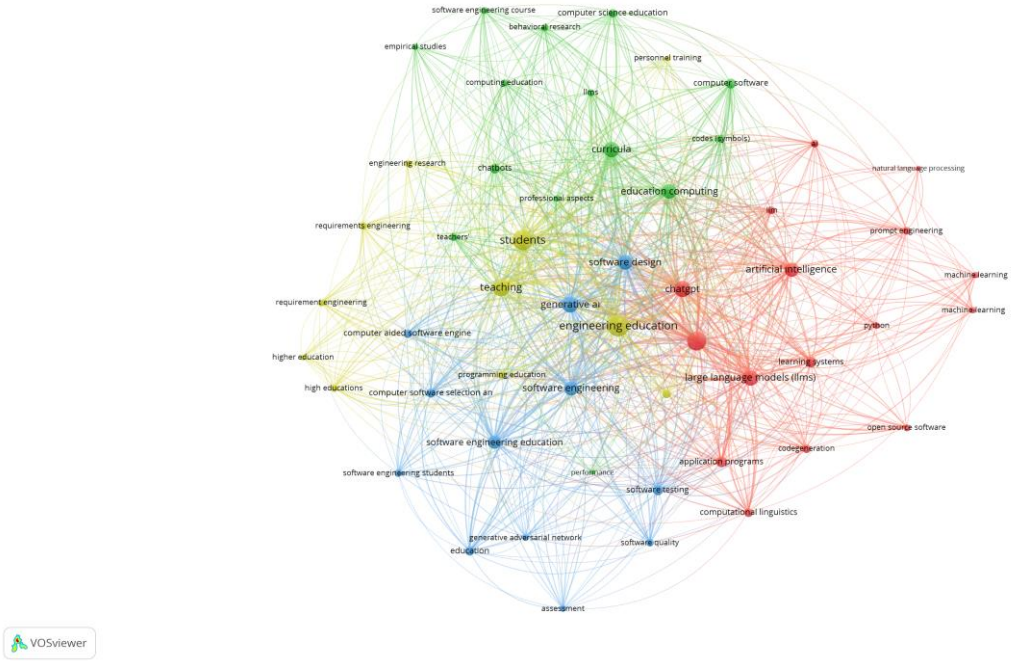
Şekil 1. Çalışmanın akış şeması

4. Bulgular

4.1. Yazar Anahtar Kelime Birliktelik Analizi

Yazar Anahtar Kelime Birliktelik Analizi Ağ Görselleştirmesi, bilimsel yayınlardaki anahtar kelimelerin kullanım örüntülerini ve yazarlar arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla kullanılan etkili bir analitik yöntemdir. Bu analizde belirlenen beş eşik değeri, araştırma alanındaki önemli kavramları ve eğilimleri daha belirgin bir şekilde ortaya koymak için stratejik bir seçimdir. Bu eşik, yalnızca birden fazla yayında veya yazar tarafından kullanılan anahtar kelimelerin analize dâhil edilmesini sağlayarak, araştırma alanının daha kapsamlı ve güvenilir bir temsilini sunar. Analizde tespit edilen 53 anahtar kelime, araştırma alanındaki temel kavramları ve güncel konuları yansıtmaktadır. Bu kelimelerin seçimi, alandaki bilgi birikiminin ve araştırma odaklarının bir haritasını çıkarmaya yardımcı olur. Ayrıca, bu yaklaşım, farklı yazarlar ve çalışmalar arasındaki bağlantıları göstererek, disiplinler arası iş birliği fırsatlarını ve araştırma boşluklarını belirlemeye olanak tanır. Sonuç olarak, bu analiz yöntemi, araştırma alanının evrimini anlamak ve gelecekteki araştırma yönelimlerini tahmin etmek için değerli bir araç sunmaktadır. Analiz sonucunda elde edilen ağ görselleştirmesi Şekil 2'de sunulmuştur. Bu ağda, düğüm boyutları ilgili anahtar kelimenin literatürdeki kullanım sıklığını temsil etmektedir; renkler, VOSviewer

tarafından belirlenen kümeleri göstermektedir; düğümler arasındaki çizgilerin kalınlığı ise anahtar kelimeler arasındaki toplam bağlantı gücüne karşılık gelmektedir. Böylece, Şekil 2 yalnızca kavramsal kümelenmeyi nitel olarak göstermemekte, aynı zamanda anahtar kelimelerin literatürdeki göreli önemini ve birbirleriyle olan bağlantı yoğunluğunu nicel olarak da yansıtmaktadır. Bu yapı, üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanında hangi temaların merkezî konumda olduğunu ve hangi kavramların ikincil düzeyde ilişki kurduğunu sayısal olarak inceleme olanağı sunmaktadır.



Şekil 2. Yazar anahtar kelime birliktelik analizi ağ görselleştirmesi

Şekil 2 yazılım mühendisliği eğitimi bağlamında üretken yapay zekâ, odaklı çalışmaların yazar anahtar kelimeleri temelinde görselleştirildiği bir kavramsal birliktelik ağı sunmaktadır. Ağın merkezinde yer alan "engineering education", tematik kümelerin kesişim noktasında konumlanarak çalışmalarda en yaygın ve bağlayıcı kavram olduğunu göstermektedir. Özellikle "generative ai", "chatgpt" ve "large language models (llms)" gibi terimlerin, yüksek merkeziyetleri ve çok sayıda kavramla olan bağlantıları sayesinde ağın odak noktalarından biri haline geldiği görülmektedir. Bu durum, üretken yapay zekânın yazılım eğitimi üzerindeki dönüştürücü etkisini açıkça yansıtmaktadır. "artificial intelligence", "machine learning", "natural language processing", "prompt engineering" ve "python" gibi kavramları içeren kırmızı küme, üretken yapay zekânın teknik bileşenlerini öne çıkarırken; "software engineering", "software engineering education", "software quality", "software testing", "application programs" ve "assessment" gibi kavramların yer aldığı mavi küme, yazılım mühendisliği eğitiminin geleneksel yapılarına odaklanmaktadır. Bu bağlamda, "software engineering education" terimi hem yazılım mühendisliği pedagojisini hem de eğitimde kalite, değerlendirme ve öğrencilerin yazılım geliştirme yetkinliklerini artırma çabalarını yansıtan merkezi bir kavram olarak öne çıkmaktadır. "curricula", "education computing", "students", "teachers", "computer science education" ve "behavioral research"

gibi kavramlarla temsil edilen yeşil küme, pedagojik yaklaşımlar ve eğitim içeriği tasarımıyla ilişkilidir. "higher education", "requirement engineering", "empirical studies", "teaching" ve "professional aspects" gibi kavramlardan oluşan sarı küme ise yükseköğretim düzeyindeki eğitim ortamlarını ve gereksinim mühendisliğini kapsamaktadır. Bu kümeler arasında yer alan "students", "teaching", "software engineering education" ve "curricula" gibi kavramlar, kümeler arası güçlü tematik bağlar kurmakta ve multidisipliner etkileşimi ortaya koymaktadır. Özellikle "generative ai" ve "chatgpt" gibi terimlerin son yıllarda yoğun biçimde literatüre girmesi, bu teknolojilerin hem teknik hem pedagojik alanlarda yaygınlaştığını göstermektedir. Bu analiz, yazılım mühendisliği eğitiminde üretken yapay zekânın yalnızca içerik değil, aynı zamanda öğretim yöntemleri ve değerlendirme süreçleri düzeyinde de kapsamlı bir paradigma değişimi başlattığını ortaya koymaktadır.

4.1.1. Küme 1 (Kırmızı): Üretken Yapay Zekâ ve Kodlama Teknolojileri

Bu çalışma, yazılım mühendisliği eğitimi bağlamında üretken yapay zekâ uygulamalarının, özellikle büyük dil modelleri ve otomatik kod üretimi süreçleriyle nasıl entegre edildiğini incelemektedir. Çalışmada öne çıkan anahtar kelimeler, yapay zekâ temelli öğrenme ortamlarının, doğal dil işleme teknolojilerinin ve kodlama araçlarının eğitimde üstlendiği yeni rolleri ortaya koymaktadır.

4.1.1.1. Kavramsal Odağın Tematik Başlıkları

4.1.1.1.2. Büyük Dil Modelleri ve Kod Üretimi

"Language model", "large language models (LLMs)" ve "LLM" gibi anahtar kelimeler, yazılım eğitiminde LLM tabanlı içerik üretiminin yaygınlaştığını göstermektedir. Bu anahtar kelimeler, öğretim materyallerinin otomatikleştirilmesi ve içerik oluşturmanın makine destekli hale gelmesini temsil eder. Aynı şekilde, "codegeneration" ve "application programs" anahtar kelimeleri de LLM'lerin otomatik kod üretiminde aktif olarak kullanıldığını vurgulamaktadır.

4.1.1.1.3. Yapay Zekâ Tabanlı Öğrenme Sistemleri

"learning systems", "ai" ve "artificial intelligence" anahtar kelimeleri, eğitimde yapay zekâ destekli sistemlerin öğrenme süreçlerine entegre edildiğini göstermektedir. Bu bağlamda, öğrenciler yalnızca bilgi tüketicisi değil, yapay zekâ ile öğrenme sürecinin aktif birer bileşeni haline gelmektedir.

4.1.1.1.4. Kodlama ve Programlama Araçları

"Python", "açık kaynak yazılım", "makine öğrenimi" ve "makine-öğrenimi" gibi anahtar kelimeler, yazılım eğitimi bağlamında en yaygın kullanılan programlama dillerini ve teknolojilerini temsil etmektedir. Açık kaynak yazılım ortamları, üretken yapay zekâ destekli kod geliştirme süreçlerini daha erişilebilir ve yaygın hale getirmektedir.

4.1.1.1.5. Doğal Dil İşleme (NLP) Tabanlı Etkileşim

"ChatGPT", "doğal dil işleme" ve "hesaplamalı dilbilim" anahtar kelimeleri, öğrencilerin doğal dil girdileriyle yazılım geliştirebileceği bir öğrenme modelinin ortaya çıktığını göstermektedir. Bu durum, özellikle kodlama eğitiminin erişilebilirliğini ve etkileşimli yapısını artırmaktadır.

Kümedeki anahtar kelimelerin ortalama yayın yıllarının 2024'e yakın olması, bu temaların literatürde oldukça yeni ve hızla yükselen konular olduğunu göstermektedir. Örneğin, "language model" (2024.16), "codegeneration" (2024.37) ve "open source software" (2025) gibi anahtar kelimeler bu yükselişi desteklerken, "chatgpt" (2023.96) erken benimsenen bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda küme, üretken yapay zekânın yazılım eğitiminde yalnızca manuel kodlama becerilerini değil, aynı zamanda doğal dil işleme temelli araçlarla etkileşimli öğrenmeyi desteklediğini ortaya koymaktadır. Öğrenciler artık yalnızca geliştirici değil, "prompt engineering" aracılığıyla LLM'leri yönlendiren aktif öğrenenler haline gelmektedir. Disiplinlerarası yapısı sayesinde, bilgisayar bilimi, yapay zekâ, dilbilim ve eğitim teknolojilerini birleştiren bu yaklaşım, yazılım mühendisliği eğitiminin pedagojik ve teknolojik dönüşümünde belirleyici bir rol üstlenmektedir.

4.1.2. Küme 2 (Yeşil): Bilişim Eğitimi, Müfredat ve Öğretim Yaklaşımları

Küme 2, yazılım mühendisliği eğitiminin pedagojik ve içerik temelli boyutlarına odaklanan çalışmaları içermektedir. Özellikle bilişim eğitimi, müfredat geliştirme, öğretim yöntemleri, öğrenci performansı ve ampirik araştırmalar bu kümenin temel araştırma eksenlerini oluşturmaktadır. Anahtar kelimelerin yerleşimi ve bağlantı gücü, bu alanların yazılım eğitimi literatüründe giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir.

4.1.2.1. Kavramsal Odağın Tematik Başlıkları

4.1.2.1.1. Müfredat Geliştirme ve Bilişim Eğitimi

"curricula" (müfredat), 244 bağlantı gücü ve 32 kez kullanım sıklığıyla kümenin en merkezi anahtar kelimesidir. Bu durum, yazılım mühendisliği eğitiminde ders içeriklerinin nasıl yapılandırıldığını ele alan çalışmaların yoğunluğunu göstermektedir. Benzer şekilde, "education computing", "computing education" ve "computer science education" gibi anahtar kelimeler de bilgisayar destekli eğitimin ve bilişim pedagojisinin sistematik şekilde ele alındığını yansıtmaktadır.

4.1.2.1.2. Eğitsel Araçlar ve Öğrenme Teknolojileri

"chatbots", özellikle üretken yapay zekâ temelli araçların (örneğin ChatGPT) müfredat içinde nasıl konumlandığını gösterirken, "LLMs" anahtar kelimesinin bu kümede yer alması, üretken yapay zekânın yalnızca teknik değil, aynı zamanda pedagojik bir araç olarak da değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. "computer software" ve "codes (symbols)" gibi anahtar kelimeler, eğitimde kullanılan yazılımsal içeriklerin ve sembolik temsillerin öğretimdeki rolünü göstermektedir.

4.1.2.1.3. Öğretmen Rolleri ve Öğrenme Dinamikleri

"teachers’", "professional aspects", "performance" ve "behavioral research" gibi anahtar kelimeler hem öğretmenlerin eğitsel katkılarını hem de öğrencilerin performanslarını değerlendiren davranışsal ve profesyonel araştırmaları temsil etmektedir. "software engineering course" ve "empirical studies" anahtar kelimeleri, yazılım mühendisliği derslerine dair ampirik gözlem ve veri temelli analizlerin yapıldığını göstermektedir.

Kümedeki anahtar kelimelerin ortalama yayın yıllarının genellikle 2024 civarında yoğunlaşması, bu alanların literatürde yeni ve hızla gelişen temalar olduğunu göstermektedir. Özellikle "performance" (2023.8) ve "chatbots" (2024) gibi uygulamalı anahtar kelimelerin güncelliği, teknolojinin eğitsel bağlamda hızla benimsenmeye başladığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda küme, yazılım mühendisliği eğitiminin teknolojik yönünden ziyade öğretim tasarımı, öğrenme süreçleri ve eğitim çıktıları gibi pedagojik boyutlara odaklanmaktadır. Ayrıca bilgisayar bilimi, eğitim bilimleri ve psikoloji gibi farklı disiplinleri bir araya getirmesiyle disiplinlerarası bir yaklaşımı temsil etmektedir. "chatbots" ve "LLMs" gibi anahtar kelimelerin öğretim ortamlarında aktif olarak kullanılması, bu kümenin uygulamalı eğitim teknolojilerine yönelik ilgisini yansıtırken; öğretmen rolleri, öğrenci performansı ve davranışsal araştırmalar gibi sosyal içerikli konuların yüksek atıf alması, bu çalışmaların literatürde etkili ve görünür olduğunu göstermektedir.

4.1.3. Küme 3 (Mavi): Yazılım Mühendisliği Eğitimi ve Üretken Yapay Zekâ Tabanlı Yazılım Geliştirme

Küme 3, yazılım mühendisliği eğitimi ile üretken yapay zekâ uygulamalarının yazılım geliştirme süreçlerine entegrasyonuna odaklanan çalışmaları kapsamaktadır. Bu küme hem geleneksel yazılım mühendisliği bileşenlerini hem de üretken yapay zekâ destekli araçların eğitim ve yazılım kalitesi üzerindeki etkilerini bir araya getirmektedir.

4.1.3.1. Kavramsal Odağın Tematik Başlıkları

4.1.3.1.1. Üretken Yapay Zekâ ve Yeni Nesil Yazılım Geliştirme

"generative ai" (293 toplam bağlantı gücü) kümenin en merkezi anahtar kelimesidir ve yazılım eğitimi ile üretken yapay zekâ entegrasyonunu temsil eder. "generative adversarial networks" (37 toplam bağlantı gücü) derin öğrenme temelli üretken modellerin yazılım süreçlerinde değerlendirilmesini temsil eder. Bu anahtar kelimeler, üretken yapay zekânın sadece kod üretimi değil, aynı zamanda yazılım tasarımı ve kalite değerlendirme gibi alanlarda da aktif biçimde kullanıldığını göstermektedir.

4.1.3.1.2. Yazılım Tasarımı ve Mühendisliği Temelleri

"software design" (240 toplam bağlantı gücü) yazılım geliştirme sürecinin ilk aşamasındaki tasarım anahtar kelimesini temsil eder. "software engineering" (214 toplam bağlantı gücü) disiplinin genel çerçevesini ve mühendislik yaklaşımını tanımlar. "Software engineering education" (174 toplam bağlantı gücü) yazılım mühendisliği öğretim süreçlerini ve müfredat yapılarını incelemektedir.

Kalite, Test ve Değerlendirme: "software testing" (96 toplam bağlantı gücü), "software quality" (51 toplam bağlantı gücü), "assessment" (36 toplam bağlantı gücü) bu anahtar kelimeler, yazılım geliştirme çıktılarının doğruluk, güvenilirlik ve kalite açısından değerlendirilmesini içermektedir.

4.1.3.1.3. Eğitim Uygulamaları ve Öğrenci Deneyimi

"education" (82 toplam bağlantı gücü), "software engineering students" (51 toplam bağlantı gücü) bu anahtar kelimeler, üretken yapay zekâ destekli araçların öğrenci başarısı ve öğrenme deneyimi üzerindeki etkilerini işaret etmektedir. "computer software selection and evaluation" (79 toplam bağlantı gücü), "computer aided software engineering" (71 toplam bağlantı gücü) yazılım seçim kriterleri ve yazılım geliştirme süreçlerinde bilgisayar destekli araçların önemini vurgulamaktadır.

Küme 3' teki anahtar kelimelerin ortalama yayın yılının 2024 civarında yoğunlaşması, bu alanların güncel ve hızla yükselen araştırma temaları olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle "generative ai" (2024.30), "software design" (2024.42) ve "computer software selection and evaluation" (2024.3) gibi anahtar kelimelerin zaman dağılımı, üretken yapay zekâ ile yazılım mühendisliği entegrasyonunun yakın dönemde literatürde odak haline geldiğini göstermektedir. Bu bağlamda küme, geleneksel yazılım mühendisliği konularını (tasarım, test, kalite) içerirken; üretken yapay zekâ, generative adversarial networks ve değerlendirme araçları gibi yenilikçi teknolojileri de eğitim süreçlerine entegre etmektedir. Yazılım mühendisliği eğitimi, öğrenci başarısı, yazılım seçimi ve değerlendirme gibi pedagojik unsurlar bu kümede güçlü bir şekilde temsil edilirken; üretken yapay zekânın kod üretiminin ötesine geçerek tasarım ve kalite süreçlerine de nüfuz ettiği görülmektedir. Ayrıca yüksek bağlantı gücü ve yayın yılı ortalaması, bu anahtar kelimelerin hem teorik tartışmalarda hem de uygulamalı araştırmalarda yoğun ilgi gördüğünü göstermektedir.

4.1.4. Küme 4 (Sarı): Mühendislik Eğitimi, Öğrenci Odaklı Pedagoji ve Öğretim Yöntemleri

Küme 4, mühendislik eğitiminin temelleri, öğretim stratejileri ve öğrenci merkezli yaklaşımlar üzerine odaklanan çalışmaları içermektedir. Bu küme, özellikle mühendislik eğitimi bağlamında öğretim faaliyetleri, öğrenci deneyimi, programlama eğitimi ve gereksinim mühendisliği gibi konuları incelemektedir.

4.1.4.1. Temel Temalar ve Kavramsal Yapı

4.1.4.1.1. Mühendislik Eğitiminin Temel Anahtar Kelimeleri

"Engineering education" (562 toplam bağlantı gücü) kümenin en merkezi ve yoğun kullanılan anahtar kelimesidir. Yazılım ve genel mühendislik alanlarındaki eğitim uygulamalarının teorik çerçevesini oluşturur. "engineering research" (42 toplam bağlantı gücü) mühendislik eğitimi bağlamında yapılan bilimsel araştırmaları temsil eder. "higher education" (28 toplam bağlantı gücü), "high educations" (47 toplam bağlantı gücü) mühendislik eğitiminin üniversite düzeyindeki uygulamalarını ifade eder.

4.1.4.1.2. Öğrenci ve Öğretim Süreçleri

"students" (toplam bağlantı gücü) öğrenci merkezli öğrenme ve değerlendirme süreçlerini temsil eden ikinci en güçlü düğümdür. "teaching" (318 TLS, 44 kullanım, 2024.45) pedagojik uygulamalar ve öğretim stratejileri ile ilişkilidir. "personnel training" (25 toplam bağlantı gücü) öğrencilerin gelecekteki profesyonel rollere hazırlanmasına yönelik eğitim süreçlerini yansıtır.

4.1.4.1.3. Bilgisayar Destekli Eğitim ve Programlama

"computer aided instruction" (61 toplam bağlantı gücü) mühendislik eğitiminde bu yöntemlerin önemini vurgulamaktadır. "programming education" (53 toplam bağlantı gücü) ise programlama derslerinin öğretiminde kullanılan yöntem ve içeriklere odaklanan anahtar kelimedir.

4.1.4.1.4. Gereksinim Mühendisliği Eğitimi

"requirements engineering" (55 toplam bağlantı gücü) ve "requirement engineering" (39 toplam bağlantı gücü) terimleri, yazılım geliştirme sürecinin başlangıcında yer alan gereksinim toplama ve analiz süreçlerinin öğretimini kapsamaktadır. Yazım farklılıklarına rağmen, içerik açısından benzerlik gösteren bu anahtar kelimeler, terminolojik ayrışmalara rağmen ortak bir tema çerçevesinde değerlendirilmelidir. Küme 4'teki anahtar kelimelerin büyük çoğunluğunun ortalama yayın yılının 2024 civarında yoğunlaşması, bu konuların literatürde güncel ve hızla gelişmekte olan temalar olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle "computer aided instruction" (2024.57), "teaching" (2024.45), "students" (2024.27) ve "engineering education" (2024.23) gibi anahtar kelimelerin zaman dağılımı, mühendislik eğitiminin içerik ve yöntemlerinin 2020'li yıllarda dijital pedagojik yaklaşımlar doğrultusunda yeniden şekillendiğini göstermektedir. Bu bağlamda, "students" ve "teaching" anahtar kelimelerinin yüksek bağlantı gücü, eğitimde öğrenci ihtiyaçlarına duyarlı, katılımcı ve aktif öğrenmeyi teşvik eden pedagojik yaklaşımların öne çıktığını göstermektedir. "computer aided instruction" ve "programming education" gibi dijital eğitim odaklı anahtar kelimeler, mühendislik öğretiminde teknoloji destekli öğretim stratejilerinin önemini vurgularken; "requirements engineering" gibi teknik içerikli anahtar kelimeler, programların analitik düşünme, planlama ve sistem geliştirme odaklı yapısını ortaya koymaktadır. Genel olarak bu küme, eğitim, öğretim, araştırma ve teknik uzmanlık alanlarını bir araya getirerek mühendislik pedagojisinin hem kuramsal hem de uygulamalı boyutlarını bütüncül biçimde yansıtmaktadır.

Üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi literatüründe öne çıkan temaların daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilmesi amacıyla, anahtar kelimelerin toplam bağlantı gücüne göre sıralandığı ilk 10 kavrama odaklanılmıştır. Tablo 1'de bu anahtar kelimelere ait küme bilgileri, bağlantı sayıları, toplam bağlantı gücü, görülme sıklıkları, ortalama yayın yılı ve ortalama atıf sayısı gibi bibliyometrik ölçütler yer almaktadır. Bu veriler, ilgili kavramların literatürdeki önemini, güncelliğini ve etki düzeyini ortaya koymaktadır.

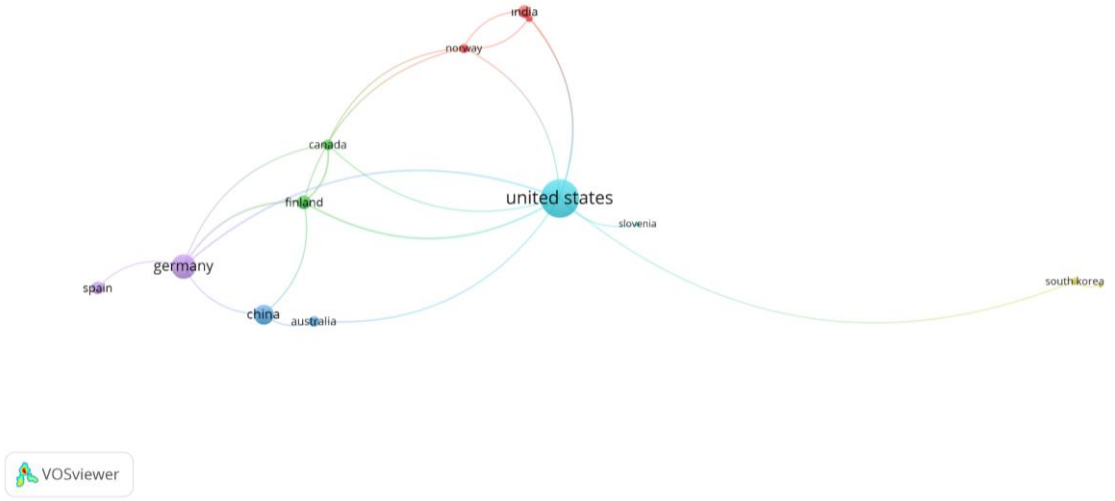
Tablo 1. Yazar anahtar kelime birliktelik analizi toplam bağlantı gücüne göre ilk 10 anahtar kelime

Anahtar Kelime	Küme	Bağlantı Sayısı	Toplam Bağlantı Gücü	Kullanım Sıklığı	Ortalama Yayın Yılı	Ort. Alıntılar
engineering education	4	51	562	83	2024,2289	5,2169
students	4	49	468	67	2024,2687	5,1045
language model	1	50	411	56	2024,1607	7,6071
teaching	4	49	318	44	2024,4545	6,1136
generative aı	3	50	293	46	2024,3043	7,6957
chatgpt	1	48	278	53	2023,9623	13,6226
large language models (llms)	1	46	257	33	2024,0303	16,5152
curricula	2	43	244	32	2024,4688	3,0625
software design	3	50	240	35	2024,4286	2,0000
education computing	2	40	222	26	2024,3846	5,6538

Tablo 1'de yer alan anahtar kelimelerin toplam bağlantı gücüne göre yapılan sıralama, üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanında öne çıkan araştırma odaklarını ortaya koymaktadır. "Engineering education" (562 toplam bağlantı gücü) en yüksek değeri ile alandaki temel yapıyı temsil ederken, onu "students" (468) ve "language model" (411) anahtar kelimeleri takip etmektedir. Bu durum, mühendislik eğitiminin yapısal temelleri ve öğrenci merkezli yaklaşımlar ile büyük dil modellerinin entegrasyonunun literatürde yoğun biçimde tartışıldığını göstermektedir. "Generative AI" (293), "ChatGPT" (278) ve "large language models (LLMs)" (257) gibi üretken yapay zekâya yönelik anahtar kelimeler, bu teknolojilerin eğitim ortamlarında giderek daha fazla benimsendiğini yansıtırken; bu kavramların yüksek ortalama atıf değerleri (özellikle LLMs: 16,5; ChatGPT: 13,6) bu çalışmaların etkisini ortaya koymaktadır. Öte yandan, "curricula" (244), "software design" (240) ve "education computing" (222) gibi anahtar kelimeler, müfredat tasarımı, yazılım geliştirme süreci ve bilişim destekli eğitimin de güncel ve bütüncül biçimde değerlendirildiğini göstermektedir. Ortalama yayın yıllarının neredeyse tamamının 2024'e yakın olması, bu anahtar kelimelere dayalı araştırmaların oldukça güncel olduğunu ve hızlı bir şekilde gelişen bir akademik alanı temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

4.2. Ülkeler Arası Ortak Yazarlık Analizi

Bu analizde, üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanında ülkeler arasındaki bilimsel iş birliklerini analiz etmek amacıyla ülkeler arası ortak yazarlık analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, minimum bir yayın ve en az bir atıf eşiği belirlenmiş ve bu kriterleri karşılayan 13 ülke tespit edilmiştir. Bu ülkeler arasındaki iş birliği ilişkileri dikkate alınarak oluşturulan ağ yapısında, toplam 6 kümeye ayrılmış bir yapı gözlemlenmiştir. Bu durum, söz konusu alandaki uluslararası araştırma faaliyetlerinin hem yaygın bir coğrafi dağılıma sahip olduğunu hem de belirli bölgelerde yoğunlaşan tematik ve kurumsal iş birliklerinin varlığını göstermektedir. Ülkeler arası ortak yazarlık analizi görselleştirmesi Şekil 3' de sunulmuştur.



Şekil 3. Ülkeler arası ortak yazarlık analizi ağ görselleştirmesi

Ortak yazarlık analizine göre, ağın merkezinde yer alan ve en büyük düğümle temsil edilen Amerika Birleşik Devletleri (ABD), en fazla uluslararası iş birliği bağlantısına sahip ülkedir. ABD; Finlandiya, Kanada, Almanya, Hindistan, Norveç, Çin ve Güney Kore gibi birçok ülkeyle yoğun iş birliği içerisindedir. VOSviewer tarafından oluşturulan kümelere bakıldığında, yeşil kümede yer alan Finlandiya, Kanada ve Norveç gibi ülkeler ABD ile güçlü ortak yazarlık ilişkileri kurmuştur. Mor küme, Almanya merkezli bir yapıya sahiptir ve Almanya'nın İspanya ve Çin ile bağlantıları öne çıkmaktadır. Mavi alt küme, Çin ve Avustralya'nın hem ABD hem de Almanya ile iş birliği yaptığı bir yapıyı temsil ederken; sarı bağlantı ile sadece ABD'ye bağlı olan Güney Kore, daha sınırlı bir iş birliği yapısına işaret etmektedir.

Düğümlerin büyüklüğü, ülkelerin gerçekleştirdiği bilimsel iş birliklerinin sayısını yansıtmaktadır. Bu bağlamda, ABD en büyük düğüme sahipken, onu Almanya ve Finlandiya izlemektedir. Düğümler arasındaki bağ kalınlıkları ise ülkeler arasındaki iş birliği yoğunluğunu göstermektedir; örneğin, ABD-Finlandiya ve ABD-Kanada arasındaki kalın çizgiler bu ilişkilerin yoğunluğunu ortaya koymaktadır. Düğümler arasındaki mesafe ise kavramsal yakınlık veya ortak yazarlık sıklığı ile ilişkilidir.

Ayrıca, Slovenya ve Güney Kore gibi bazı ülkeler yalnızca Amerika Birleşik Devletleri ile bağlantılı olup, sınırlı sayıda uluslararası ortaklığa sahiptir. Almanya, Finlandiya ve Kanada gibi ülkeler ise

Avrupa ve Kuzey Amerika'daki güçlü araştırma ağlarını temsil etmektedir. Asya ülkeleri (Çin, Güney Kore ve Hindistan) ise daha çok ABD ile ikili ilişkiler kurmakta, Avrupa ile daha zayıf bağlantılar göstermektedir. Sonuç olarak, Slovenya ve İspanya gibi ülkeler ağda daha çevresel konumda yer almakta, merkezi araştırma ağlarında daha düşük temsile sahiptir. Tablo 2, üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanında araştırma yapan ülkelerin karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır.

Tablo 2. Ülkeler arası ortak yazarlık analizi toplam bağlantı gücüne göre ülkeler

Ülke	Küme	Bağlantı	Toplam Bağlantı Gücü	Belge Sayısı	Atıf	Ort. Yayın Yılı
united states	6	9	11	33	430	2024,1818
finland	2	5	8	6	49	2024,1667
germany	5	5	7	16	220	2024
canada	2	4	5	4	8	2024,75
norway	1	5	5	3	135	2023,3333
china	3	3	3	11	17	2024,5455
ındia	1	3	3	5	131	2024
united arab emirates	1	3	3	2	136	2023
australia	3	2	2	4	89	2024,25
south korea	4	2	2	2	36	2021
taiwan	4	1	1	1	27	2018
slovenia	6	1	1	1	35	2024
spain	5	1	1	5	27	2024

Üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanındaki çalışmaların yıllara göre dağılımı incelendiğinde, en güncel yayınlara sahip ülkelerin sırasıyla Kanada (2024.75), Çin (2024.55), ABD (2024.18) ve Finlandiya (2024.17) olduğu tespit edilmektedir. Bu ülkeler, literatürdeki güncel eğilimleri belirleme ve yenilikçi eğitim uygulamalarını şekillendirme açısından öncü bir konumda bulunmaktadır. Almanya, Hindistan, Slovenya ve İspanya gibi ülkeler ise 2024 yılı civarındaki ortalama yayın yılı ile bu alana yönelik yakın dönemde artan araştırma ilgisini yansıtmaktadır. Buna karşılık, Birleşik Arap Emirlikleri (2023), Norveç (2023.33), Güney Kore (2021) ve özellikle Tayvan (2018) gibi ülkeler, bu alandaki çalışmalarını daha önceki yıllarda gerçekleştirmiş ancak güncelliğini sürdürememiştir. Genel olarak bu analiz, üretken yapay zekâ uygulamalarının eğitim teknolojileri ile birleştiği güncel akademik

üretimin, başta ABD, Kanada, Çin ve Finlandiya olmak üzere belirli merkezlerde yoğunlaştığını ve bu ülkelerin hem bilimsel öncülük hem de uygulayıcı rol üstlendiğini ortaya koymaktadır.

Yapılan ortak yazarlık analizi, üretken yapay zekâ ve yazılım mühendisliği eğitimi alanındaki bilimsel üretimin coğrafi dağılımını ve uluslararası iş birliği ağlarını ortaya koymaktadır. Ağ yapısında en merkezi ve en büyük düğüm olarak öne çıkan Amerika Birleşik Devletleri (ABD), bu alanda en fazla dokümana (33) ve en yüksek atıf sayısına (430) sahip ülke konumundadır. ABD'nin, Finlandiya, Kanada, Almanya, Hindistan, Norveç, Çin ve Güney Kore gibi çok sayıda ülkeyle kurduğu yoğun iş birlikleri, bu alandaki araştırmalarda merkezi bir rol üstlendiğini göstermektedir. Finlandiya, görece az sayıda yayın (6) üretmiş olsa da yüksek toplam bağlantı gücü (8) ve güncel yayın yılı ortalaması (2024.17) ile dikkat çekerken; Almanya, 16 yayın ve 220 atıfla, Avrupa'daki araştırma ağlarının merkezinde yer almaktadır. Çin ve Avustralya hem ABD ile hem de Avrupa ülkeleriyle ilişkili görünüp Asya-Pasifik eksenli üretim potansiyelini yansıtmaktadır. Hindistan, Norveç ve Birleşik Arap Emirlikleri, sınırlı sayıda yayın üretmelerine rağmen yüksek atıf sayılarıyla (sırasıyla 131, 135 ve 136) bu çalışmaların etki gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Slovenya, Güney Kore, Tayvan ve İspanya gibi ülkeler, çevresel konumda yer almakta ve genellikle ABD ile bireysel iş birlikleri aracılığıyla ağa dâhil olmaktadır. Özellikle Tayvan'ın ortalama yayın yılı 2018 olup, bu durum, ülkenin üretken yapay zekâ bağlamındaki çalışmalarının güncellik düzeyinin düşük olduğunu göstermektedir. Kümelenme yapısına bakıldığında; ABD ve Slovenya Küme 6'da Finlandiya ve Kanada Küme 2'de, Almanya ve İspanya Küme 5'te, Çin ve Avustralya Küme 3'te yer alırken; Hindistan, Norveç ve BAE gibi ülkeler Küme 1'de konumlanmıştır. Bu durum, üretken yapay zekâ uygulamalarının eğitimde kullanımı bağlamında çok merkezli ve kıtalar arası bir araştırma yapısının oluştuğunu göstermektedir.

5. Sonuç

Bu çalışma, üretken yapay zekâ teknolojilerinin yazılım mühendisliği eğitimi üzerindeki etkilerini kavramsal ve uluslararası düzeyde bibliyometrik yöntemlerle inceleyerek, bu alanın geçirdiği dönüşümün boyutlarını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, üretken yapay zekânın yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda pedagojik bir paradigma değişiminin taşıyıcısı olduğunu açıkça göstermektedir.

Literatürdeki önceki bibliyometrik genel eğitim alanına odaklanarak geniş bir perspektif sunarken, bu çalışma yazılım mühendisliği disiplinine özgü olarak daha derinlemesine ve tematik bir inceleme gerçekleştirmektedir. Özellikle, yazılım mühendisliğinde kullanılan teknik uygulama alanları ve pedagojik dönüşüm süreçleri birlikte ele alınarak, alanın güncel eğilimleri ve gelişim dinamikleri kapsamlı biçimde ortaya konmaktadır çalışmalar (Vhatkar ve ark., 2024; Bicen, 2025). Anahtar kelime analizinde, "engineering education" (562 toplam bağlantı gücü), "students" (468) ve "language model" (411) gibi kavramların yüksek bağlantı gücüyle ön plana çıkması, mühendislik eğitiminin yapısal temelleri ile öğrenci merkezli öğrenmenin, büyük dil modelleriyle güçlü biçimde bütünleştiğini ortaya koymaktadır. "Generative AI", "ChatGPT" ve "LLMs" gibi kavramlar ise hem teknolojik yenilikleri

hem de pedagojik uygulamaları temsil eden merkezi odaklar haline gelmiştir. Bu kavramların yüksek ortalama atıf sayıları, bu alandaki çalışmaların akademik etkisinin güçlü olduğunu göstermektedir.

Öne çıkan diğer anahtar kelimeler arasında “curricula”, “software design”, “education computing” ve “assessment” gibi kavramlar yer almakta olup, bunlar müfredat geliştirme, yazılım süreçlerinin eğitimi, teknoloji destekli öğretim ve değerlendirme boyutlarının üretken yapay zekâ ile nasıl dönüştüğünü yansıtmaktadır. Bu bağlamda, üretken yapay zekâ yalnızca kod üretimini değil, aynı zamanda öğrenme tasarımı, içerik yapısı ve öğrenme çıktılarının değerlendirilmesini de dönüştürmektedir.

Kavramsal kümeler incelendiğinde, üretken yapay zekânın eğitim üzerindeki etkileri dört temel eksende toplanmaktadır: (1) büyük dil modelleri ve otomatik kod üretimi, (2) öğretim teknolojileri ve müfredat tasarımı, (3) yazılım mühendisliği süreçleri ve kalite değerlendirme, (4) öğrenci odaklı öğretim yöntemleri ve mühendislik pedagojisi. Bu temalar, öğrencilerin artık yalnızca bilgi tüketicisi değil, OpenAI Codex, Tabnine, Amazon CodeWhisperer, Codeium, Replit Ghostwriter ve ChatGPT gibi araçlar aracılığıyla üretken, etkileşimli öğrenenler haline geldiğini; öğretmenlerin ise rehber, tasarımcı ve yapay zekâ entegratörüne dönüştüğünü göstermektedir.

Öte yandan, öğretmenlerin rolü yalnızca bilgi aktarıcısı olmaktan çıkmış; öğrenme sürecinin tasarımcısı, kolaylaştırıcısı ve etik rehberi haline gelmiştir. Öğretmenler, teknolojiyi pedagojik bağlamda entegre eden, kişiselleştirilmiş öğrenme yolları sunan, öğrenci verilerine dayalı geribildirim sağlayan ve öğrencilerin etik dijital vatandaşlık bilincini geliştiren rehberler olarak konumlanmaktadır. Müfredatlar artık sabit yapılar olmaktan çıkmış, öğretmenler tarafından dinamik ve modüler biçimde yapılandırılan yapılara dönüşmektedir. Bu dönüşüm yaratıcılığı teşvik eden, iş birliğine dayalı ve veri destekli öğrenmeyi önceliklendiren bir eğitim anlayışını da beraberinde getirmektedir. Öğrenciler dijital araçlarla aktif iletişim kurarken, öğretmenler bu iletişimi anlamlı öğrenmeye yönlendiren kolaylaştırıcılar rolünü üstlenmektedir. Sonuç olarak, üretken yapay zekâ ile desteklenen eğitim ortamlarında hem öğrenci hem de öğretmen rolleri daha katılımcı, uyarlanabilir ve insan merkezli bir yapıya evrilmektedir.

Ülkeler arası ortak yazarlık analizi, Amerika Birleşik Devletleri'nin merkezde yer aldığı çok merkezli ve kıtalar arası bir bilimsel iş birliği ağına işaret etmektedir. Kanada, Çin, Finlandiya ve Almanya gibi ülkeler, güncel ve etkili yayınlarıyla dikkat çekerken; Hindistan, Norveç ve Birleşik Arap Emirlikleri gibi ülkeler, sınırlı sayıda yayınla yüksek atıf alarak nitelikli katkılar sunmuştur. Bu durum, üretken yapay zekâ destekli eğitim araştırmalarının yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda kurumsal ve coğrafi düzeyde de yayıldığını göstermektedir.

Bulgular, yazılım mühendisliği eğitiminde geleneksel sabit müfredatların yerine, üretken yapay zekâ teknolojileriyle uyumlu, daha esnek ve dinamik eğitim yapılarına geçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu dönüşüm, hızla gelişen teknoloji dünyasında öğrencilerin güncel bilgi ve becerilerle donatılmasını sağlayacaktır. Yeni nesil eğitim modelinde, üniversitelerin uygulamalı yapay zekâ entegrasyonunu aktif olarak teşvik etmesi ve öğretmenlerin rolünün yeniden tanımlanması önem arz etmektedir.

Bu bağlamda, eğitim politikalarının kapsamlı bir şekilde yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Öğretmenlerin yalnızca bilgi aktarıcı rolünden çıkarak, öğrencilere rehberlik eden ve eğitim süreçlerini tasarlayan bir role bürünmeleri amacıyla mesleki gelişim programları oluşturulmalıdır. Ayrıca, öğrencilerin yapay zekâ teknolojileriyle etkileşiminde etik sorumlulukların, telif haklarının ve akademik dürüstlüğün önemini vurgulayan güçlü dijital vatandaşlık politikaları geliştirilmelidir. Bu yaklaşım, öğrencilerin teknolojik gelişmelere uyum sağlamalarını desteklerken, aynı zamanda etik ve yasal çerçevede hareket etmelerini teşvik edecektir.

Tüm bu çıkarımların yanı sıra, araştırmanın metodolojik sınırlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Veri kaynağının yalnızca Scopus ile sınırlı olması, elde edilen sonuçların kapsamını ve çeşitliliğini etkileyebilecek bir sınırlılık teşkil etmektedir. Scopus kapsamlı bir indeks olmasına rağmen, hızla gelişen ve disiplinlerarası özellik gösteren üretken yapay zekâ alanındaki bazı yayınlar bu veri tabanında yer almayabilir. Ayrıca, literatürün dinamizmi göz önünde bulundurulduğunda, bu araştırma mevcut durumun anlık bir görünümünü sunmakta olup, gelecekte yapılacak çalışmaların yeni bulgularla bu sonuçları genişletmesi ve güncellemesi beklenmektedir. Bu kapsamda, ilerleyen araştırmalarda birden fazla veri tabanının birlikte kullanılması, literatürün daha bütüncül biçimde temsil edilmesine katkı sağlayacaktır.

Gelecek araştırmaların, üretken yapay zekâ destekli öğrenmenin yalnızca kısa vadeli değil, aynı zamanda uzun vadeli bilgi kalıcılığı, kariyer gelişimi ve mesleki başarı üzerindeki etkilerini incelemesi gerekmektedir. Ayrıca, öğrencilerin yapay zekâya bağımlılığı, telif hakları ve yanlış bilgi üretimi gibi etik ve sosyo-teknik boyutları derinlemesine ele alması önem arz etmektedir. Bunun yanı sıra, üniversite odaklı çalışmaların ötesine geçilerek ortaöğretim, mesleki eğitim ve disiplinler arası programlardaki uygulamalara da yönelmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, üretken yapay zekâ teknolojileri, yazılım mühendisliği eğitiminde teknik içerikten pedagojik yapıya kadar kapsamlı bir dönüşüm başlatmıştır. Bu yeni eğitim modeli, öğrencilerin aktif katılımcı ve üretken bireyler olarak konumlandığı, öğretmenlerin ise yapay zekâyı entegre eden rehber roller üstlendiği bir yapıyı teşvik ederek, öğrenme süreçlerini daha erişilebilir, kişiselleştirilmiş ve etkileşimli hale getirmektedir. Bu bağlamda, üretken yapay zekâ yalnızca bir araç değil, aynı zamanda eğitimde yeni bir çağın öncüsüdür. Gelecek çalışmaların, bu dönüşümün uzun vadeli etkilerine, etik boyutlarına ve farklı öğrenme düzeylerindeki uygulamalarına odaklanması beklenmektedir.

Bu çalışma, üretken yapay zekânın yazılım mühendisliği eğitiminde hangi tematik alanlarda yer aldığını ve kavramsal, pedagojik ve teknik düzeyde nasıl bir dönüşüm sağladığını açıkça ortaya koyarak araştırma sorusunu bütüncül bir şekilde yanıtlamaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı: Makalenin yazarları, çalışma kapsamında herhangi bir kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti: Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkı sağlamıştır.

Kaynakça

Aarti. Generative AI in software development: An overview and evaluation of modern coding tools. International Journal for Multidisciplinary Research 2024; 6(3). https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i03.23271

Abdelfattah AM., Ali NA., Elaziz MA., Ammar HH. Roadmap for software engineering education using ChatGPT. 2023 International Conference on Artificial Intelligence Science and Applications in Industry and Society (CAISAIS), 03-05 September 2023, 1–6, Galala, Egypt. https://doi.org/10.1109/CAISAIS59399.2023.10270477

Ajiga D., Folorunsho S., Okeleke P., Ezeigweneme C. Enhancing software development practices with AI insights in high-tech companies. Computer Science & IT Research Journal 2024; 5(8): 1897–1919. https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i8.1450

Alali R., Wardat Y. Opportunities and challenges of integrating generative artificial intelligence in education. International Journal of Religion 2024; 5(7): 784–793. https://doi.org/10.61707/8y29gv34

Al-Qaysi N., Al-Emran M., Al-Sharafi MA., Yaseen ZM., Mahmoud MA., Ahmad A. Generative AI and educational sustainability: Examining the role of knowledge management factors and AI attributes using a deep learning-based hybrid SEM-ANN approach. Computer Standards & Interfaces 2025; 93: 103964. https://doi.org/10.1016/j.csi.2024.103964

Alenezi M., Akour M. AI-Driven innovations in software engineering: A Review of Current Practices and Future Directions. Applied Sciences 2025; 15(3): 1344. https://doi.org/10.3390/app15031344

Alipour P., Gallegos, E. Leveraging generative AI synthetic and social media data for content generalizability to overcome data constraints in vision deep learning. Artif Intell Rev 2025; 58: 145. https://doi.org/10.1007/s10462-025-11137-6

Araujo GF., Hayajneh T. Protecting the Whisper: A security assessment of Amazon CodeWhisperer's generated code. In: Stahlbock, R., Arabnia, H.R. (eds) Data Science. CSCE 2024. Communications in Computer and Information Science, vol 2253. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85856-7_36

Bahi A., Gharib J., Gahi Y. Integrating generative ai for advancing agile software development and mitigating project management challenges. International Journal of Advanced Computer Science and Applications 2024; 15(3). https://doi.org/10.14569/ijacsa.2024.0150306

Bajaj Y., Samal MK. Accelerating software quality: unleashing the power of generative ai for automated test-case generation and bug identification. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 2023; 11(7): 345–350. https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54628

Banh L., Strobel G. Generative artificial intelligence. Electronic Markets 2023; 33: 63. https://doi.org/10.1007/s12525-023-00680-1

Bicen H., Generative AI in aducation: A bibliometric analysis. International Conference on Virtual Learning, 2025, 25-33. https://doi.org/10.58503/icvl-v20y202502

Chang CI., Choi WC., Choi IC. A systematic literature review of the opportunities and advantages for AIGC (OpenAI ChatGPT, Copilot, Codex) in programming course. In 2024 the 7th International Conference on Big Data and Education (ICBDE) (ICBDE 2024), September 24–26, 2024, Oxford, United Kingdom. ACM, New York, NY, USA, 7 pages. https://doi.org/10.1145/3704289.3704301

Cooper N., Qiao H., Lecomte N., Clark AT., Ellison, AM. Harnessing large language models for coding, teaching and inclusion to empower research in ecology and evolution. Methods in Ecology and Evolution 2024; 5(10): 1757–1763. https://doi.org/10.1111/2041-210x.14325

Corso V., Mariani L., Micucci D., Riganelli, O. Assessing ai-based code assistants in method generation tasks. In 2024 IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings (ICSE-Companion '24), April 14–20 2024, 380 – 381; Lisbon, Portugal . https://doi.org/10.1145/3639478.3643122

Daun M., Brings J. How ChatGPT will change software engineering education. ITiCSE 2023: Proceedings of the 2023 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education 2023; 1(1): 110–116, Turku, Finland. https://doi.org/10.1145/3587102.3588815

Deng XN., Joshi KD. Promoting ethical use of generative ai in education. ACM SIGMIS Database: The DATABASE for Advances in Information Systems 2024; 55(3): 6–11. https://doi.org/10.1145/3685235.3685237

Finnie-Ansley J., Denny P., Luxton-Reilly A., Santos EA., Prather J., Becker BA .My AI wants to know if this will be on the exam: Testing OpenAI's Codex on CS2 Programming Exercises. In Australasian Computing Education Conference (ACE '23), January 30-February 3, 2023, 97-104, Melbourne, VIC, Australia. ACM, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3576123.3576134

Gani MO., Ayyasamy RK., Alhashmi SM., Alam KS., Sangodiah A., Khaleduzzman K., Ponnusamy C. Towards enhanced assessment question classification: a study using machine learning, deep learning, and generative AI. Connection Science 2025; 37(1): 2445–2449. https://doi.org/10.1080/09540091.2024.2445249

Godoy W., Valero-Lara P., Teranishi K., Balaprakash P., Vetter J. Evaluation of OpenAI Codex for HPC parallel programming models kernel generation. In Proceedings of the 52nd International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPP Workshops '23). Association for Computing Machinery, 2023, 136 – 144, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3605731.3605886

Guettala M., Harous S., Kazar O., Bourekkache S. Generative artificial intelligence in education: Advancing Adaptive and Personalized Learning. Acta Informatica Pragensia 2024; 13(3): 460–489. https://doi.org/10.18267/j.aip.235

Fu Y., Li Z., Yu J., Shahin M., Liang P., Tahir A., Chen J. Security weaknesses of copilot-generated code in github projects: An empirical study. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology 2025. https://doi.org/10.1145/3716848

Hartley K., Hayak M., Ko UH. Artificial intelligence supporting independent student learning: an evaluative case study of chatGPT and learning to code. Education Sciences 2024; 14(2): 120. https://doi.org/10.3390/educsci14020120

Hnatushenko VV., Pavlenko IV. The use of generative artificial intelligence in software testing. System Technologies 2024; 2(151): 113–123. https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-151-2024-10

Imran M., Amaliah N., Sage M., Rampen, R., Syam N., Room, F. The feasibility of artificial intelligences (ai) in speaking skill: lecturers' perceptions. IJOLEH : International Journal of Education and Humanities 2023; 2(2): 135–144. https://doi.org/10.56314/ijoleh.v2i2.172

Jayavardhini P., Mahalakame RM; Srinivetha P; Eugene Berna I. AI Study Partner: Development of an LLM and GEN AI-enhanced study assistant tool. Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management 2024; 08(03): 1–5. https://doi.org/10.55041/ijsrem29626

Kashefi A., Mukerji T. ChatGPT for programming numerical methods. Journal of Machine Learning for Modeling and Computing 2023; 4(2): 1–74. https://doi.org/10.1615/jmachlearnmodelcomput.2023048492

Kong SC., Yang Y. A human-centered learning and teaching framework using generative artificial intelligence for self-regulated learning development through domain knowledge learning in k–12 settings. IEEE Transactions on Learning Technologies 2024; 17: 1562–1573. https://doi.org/10.1109/tlt.2024.3392830

Liang JT., Myers BA., Yang C. A large-scale survey on the usability of ai programming assistants: successes and challenges. In 2024 IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering (ICSE 2024), April 14–20 2024, 1–13, Lisbon, Portugal. https://doi.org/10.1145/3597503.3608128

Li Y., Xu J., Zhu Y., Liu H., Liu P. The impact of ChatGPT on software engineering sducation: A quick peek," 2023 10th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), 10-11 August 2023, 595-596, Tokyo, Japan. doi: 10.1109/DSA59317.2023.00087.

Liu Y. Integrating conversational large language models into student learning: A case study of ChatGPT in software engineering education.In 2024 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 2024, 1-8, Washington, DC, USA. https://doi.org/10.1109/FIE61694.2024.10893046

Macneil S., Sarsa S., Kim J., Hellas A., Denny P., Leinonen J., Tran A., Bernstein S. Experiences from using code explanations generated by large language models in a web software development e-book. 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education(SIGCSE 2023), March 15-18 2023, 931–937, Toronto ON Canada. https://doi.org/10.1145/3545945.3569785

Nama P. Integrating ai in testing automation: enhancing test coverage and predictive analysis for improved software quality. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences 2024; 13(1): 769–782. https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.13.1.0486

Ng SL., Ho, CC. Generative AI in education: mapping the research landscape through bibliometric analysis. Information 2025, 16, 657. https://doi.org/10.3390/info16080657

Ni A., Feng T., Xiong C., Yavuz S., Yin S., Yin P., Liu Y., Joty S., Zhou Y., Zhao Y., Radev D., Shen R., Riddell M., Cohan A. L2CEval: Evaluating language-to-code generation capabilities of large language models. Transactions of the Association for Computational Linguistics 2024; 12: 1311–1329. https://doi.org/10.1162/tacl_a_00705

Nizamudeen F., Gatti L., Bouali N., Ahmed F. Investigating the impact of code generation tools (ChatGPT & Github CoPilot) on programming education. In Proceedings of the 16th International Conference on Computer Supported Education - Volume 2: CSEDU; May 2-4, 2024, in Angers, France.DOI: 10.5220/0012628000003693

Ouh EL., Wlodkowski S., Shim KJ., Gan, BKS. ChatGPT, can you generate solutions for my coding exercises? An evaluation on its effectiveness in an undergraduate java programming course. In Proceedings of the 2023 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education V.1 (ITiCSE 2023), July 8–12 2023, 54–60, Turku, Finland. https://doi.org/10.1145/3587102.3588794

Ovi MSI., Anjum N., Bithe TH., Rahman MM., Smrity MSA. Benchmarking ChatGPT, Codeium, and GitHub Copilot: A comparative study of AI-driven programming and debugging assistants, 2024 27th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT), 20-22 December 2024, 1546-1551, Cox's Bazar, Bangladesh, 2024.doi: 10.1109/ICCIT64611.2024.11021727.

Owan VJ., Etta EO., Idika DO., Abang KB., Bassey BA. Exploring the potential of artificial intelligence tools in educational measurement and assessment. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education 2023; 19(8): em2307. https://doi.org/10.29333/ejmste/13428

Özpolat Z., Yıldırım Ö., Karabatak M. Artificial intelligence-based tools in software development processes: application of ChatGPT. European Journal of Technic 2023; 13(2): 229–240. https://doi.org/10.36222/ejt.1330631

Pearce H., Dolan-Gavitt B., Tan B., Ahmad B., Karri R. Asleep at the keyboard? Assessing the security of github copilot's code contributions. Communications of the ACM 2025; 68(2), 96–105. https://doi.org/10.1145/3610721

Petrovska O., Clift L., Pearsall R., Moller F. Incorporating generative ai into software development education. In Computing Education Practice (CEP '24), January 05, 2024, 37–40, Durham, United Kingdom. https://doi.org/10.1145/3633053.3633057

Prenner JA., Babii H., Robbes R. Can OpenAI's codex fix bugs? an evaluation on QuixBugs. In Proceedings of the Third International Workshop on Automated Program Repair (APR '22). Association for Computing Machinery, 2022, 69-75, New York, NY, USA. https://doi.org/10.1145/3524459.3527351

Ross SI., Weisz JD., Houde S., Martinez F., Muller M. The programmer's assistant: Conversational interaction with a large language model for software development. In 28th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '23), March 27–31 2023, 491–514, Sydney, NSW, Australia. https://doi.org/10.1145/3581641.3584037

Saravanan V., Rambabu C., Seetha A., Ravi S., Kanth T., Kavitha S. Generative ai in software engineering: revolutionizing code generation and debugging. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering 2025; 11(2). https://doi.org/10.22399/ijcesen.1718

Savelka J. Unlocking practical applications in legal domain: evaluation of gpt for zero-shot semantic annotation of legal texts. In Nineteenth International Conference on Artificial Intelligence and Law (ICAIL 2023), June 19–23 2023, 447 – 451, Braga, Portugal. https://doi.org/10.1145/3594536.3595161

Sengar SS., Hasan AB., Kumar S., Carroll F. Generative artificial intelligence: a systematic review and applications. Multimedia Tools and Applications 2024; 84: 23661–23700. https://doi.org/10.1007/s11042-024-20016-1

Schotten M., El Aisati, M., Meester WJN., Ross CA., Steiginga S. A brief history of scopus: the world's largest abstract and citation database of scientific literature. 1st Edition. Auerbach Publications. 2017. https://doi.org/10.1201/9781315155890-3

Sobania D., Rothlauf F., Briesch M. Choose your programming copilot. GECCO '22: Genetic and Evolutionary Computation Conference , July 9 - 13 2022, 1019–1027, Boston Massachusetts. https://doi.org/10.1145/3512290.3528700

Soni S., Kapoor P. Exploring deep learning and generative AI techniques in automatic text summarization," 2025 12th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2025, 1-7, Delhi, India, https://doi.org/10.23919/INDIACom66777.2025.11115475.

Sultana S. AI in higher education: ai ethics, quality assurance, and academic integrity. In M. Rahman, G. Koolmon, S. Shaikh, & A. Munna (Eds.), Optimizing Leadership and Governance in Higher Education 2025; 111-136. IGI Global Scientific Publishing. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3534-5.ch006

Tariq MU. Harnessing generative AI for enhanced web application security. In I. Shah & N. Jhanjhi (Eds.), Generative AI for Web Engineering Models 2025; 161-192. IGI Global Scientific Publishing. https://doi.org/10.4018/979-8-3693-3703-5.ch008

Van Eck NJ., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics 2009; 84(2): 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Vhatkar A. Pawar V. Chavan P. Generative AI in education: A bibliometric and thematic analysis.2024 8th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation

(ICCUBEA), Aug 23-24 2024, 1-6 ,Pune, India. https://doi.org/10.1109/ICCUBEA61740.2024.10774819

Vemuri N., Thaneeru N., Tatikonda V. Adaptive generative ai for dynamic cybersecurity threat detection in enterprises. International Journal of Science and Research Archive 2024; 11(1): 2259–2265. https://doi.org/10.30574/ijsra.2024.11.1.0313

Vergara D., Del Bosque A., Lampropoulos G., Fernández-Arias P. Trends and applications of artificial intelligence in project management. Electronics 2025; 14(4): 800. https://doi.org/10.3390/electronics14040800

Wang X. Generative AI based on deep knowledge tracing for academic Insight and Intelligent learning srategy optimization. In 2025 International Conference on Big Data and Informatization Education (ICBDIE 2025), February 21–23, 2025, Suzhou, China. ACM, New York, NY, USA, 6 pages. https://doi.org/10.1145/3729605.3729638

Yang TC., Hsu YC., Wu, JY. The effectiveness of ChatGPT in assisting high school students in programming learning: evidence from a quasi-experimental research. Interactive Learning Environments 2025; 1–18. https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2450659

Yusuf A., Pervin N., Román-González M. Generative AI and the future of higher education: a threat to academic integrity or reformation? Evidence from multicultural perspectives. International Journal of Educational Technology in Higher Education 2024; 21: 21. https://doi.org/10.1186/s41239-024-00453-6

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1360-1372, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1360-1372, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Sabit Kanatlı İHA'ların Boylamasına Kararlılığının Artırılması: Türbülanslı Koşullarda PID Kontrol ve SPSA Optimizasyonunu Kullanan Hibrit Bir Yaklaşım

Abdullah KOCAMER[1*], Sezer ÇOBAN[2]

[1,2]İskenderun Teknik Üniversitesi, Uçak Bakım ve Onarım Bölümü, Uçak Bakım ve Onarım Bölümü Anabilim Dalı, İskenderun, Hatay

[1]https://orcid.org/0000-0001-8948-6390
[2]https://orcid.org/0000-0001-6750-5001
*Sorumlu yazar: abdullah.kocamer@iste.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 08.01.2025
Kabul tarihi:07.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
İHA
PİD
SPSA
Von karman

ÖZ

Bu çalışma, sabit kanatlı insansız hava araçlarının (İHA) boylamasına kararlılığını iyileştirmek amacıyla yenilikçi bir yöntem ortaya koymaktadır. Kullanılan yaklaşımda, durum uzay modeli, PID kontrolcüsü ve SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) algoritması bir araya getirilmiştir. Sistemin performansı, gerçek dünya koşullarını simüle eden Von Karman türbülans modeli ile test edilmiştir. Simülasyonlar, önerilen kontrol yönteminin referans açı takibini başarıyla gerçekleştirdiğini ve aynı zamanda aşım ile kararlılık süresini minimize ederek türbülanslı hava koşullarında dahi etkili bir denge sağladığını göstermektedir. Özellikle SPSA algoritması, maliyet fonksiyonunu hızlı bir şekilde optimize ederek kontrol parametrelerini uyarlamış ve sistemin genel performansını önemli ölçüde artırmıştır. Çalışma, değişken çevresel faktörler altında sabit kanatlı İHA'ların kararlılığını artırmak için pratik ve güçlü bir çözüm sunmaktadır.

Enhancing Longitudinal Stability of Fixed-Wing UAVs: A Hybrid Approach Using PID Control and SPSA Optimization under Turbulent Conditions

Research Article

Article History:
Received: 08.01.2025
Accepted: 07.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
UAV
PID
SPSA
Von karman

ABSTRACT

This study presents an innovative approach to improving the longitudinal stability of fixed wing unmanned aerial vehicles (UAVs). The proposed framework integrates a state-space model, a PID controller, and the Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) algorithm. System performance is evaluated under a Von Karman turbulence model that emulates real-world atmospheric disturbances. Simulation results demonstrate that the proposed control strategy achieves accurate reference angle tracking while reducing overshoot and minimizing settling time, thereby maintaining effective stability even in turbulent flight conditions. In particular, the SPSA algorithm rapidly optimizes the cost function to adapt the controller parameters, leading to a substantial improvement in overall system performance. The study therefore offers a practical and robust solution for enhancing the stability of fixed-wing UAVs under varying environmental conditions.

To Cite: Kocamer A., Çoban S. Enhancing Longitudinal Stability of Fixed-Wing UAVs: A Hybrid Approach Using PID Control and SPSA Optimization under Turbulent Conditions. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1360-1372.

1. Introduction

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are rapidly advancing in both military and civilian applications with technological progress. These advancements indicate that UAVs are undergoing significant structural transformations. The development of modern production techniques has facilitated the creation of complex and curved surfaces, making it easier to integrate bio-inspired designs. As a result, aircraft designs that mimic the structural characteristics of flying creatures—an inspiration throughout aviation history—have started to emerge (Kocamer and Oktay, 2022). Recently, Boeing, one of the major companies in the aerospace industry, introduced a passenger aircraft concept incorporating wing structures like those of birds, envisioned as the aircraft of the future. However, while these structural changes offer significant advantages, they also introduce new challenges, particularly in terms of control complexity.

Significant progress has also been made in control theory. Nelson (2007) provides a comprehensive roadmap for flight stability and stabilization. In the field of constrained control, Oktay (2012) conducted studies on helicopter stabilization and optimization, offering critical insights. Further, Oktay and Sultan (2014) developed innovative methods to enhance energy efficiency-another crucial aspect of helicopter control-resulting in considerable performance improvements.

This study focuses on control strategies for small and medium-sized UAVs. Just as the scale of an aircraft presents engineering challenges, smaller UAVs face unique difficulties, particularly in stabilization and stability. In a study conducted by Çoban et al. (2019), the control system of UAVs was designed under various load conditions using the Newton-Euler approach, yielding efficient results. Zhang and Yan (2021) proposed an integrated PID controller to maintain UAV flight stability under disturbing wind effects, successfully reducing response fluctuations while enhancing the damping effect to achieve a stable state. Similarly, Muslimov and Munasypov (2021) developed a consensus-based control system that provided asymptotic stabilization, as demonstrated through Simulink simulations. Jang and Liccardo (2006) contributed to the field by exploring the automation of small UAVs using low-cost MEMS sensors and embedded computing platforms. A general examination of these studies reveals a strong emphasis on the disturbing effects influencing UAV control systems and highlights the critical relationship between stabilization and aerodynamics (Kocamer and Oktay, 2022). Furthermore, the findings underscore the necessity of optimizing stability (Zhai et al., 2014; Çoban and Oktay, 2018; Muslimov and Munasypov, 2021; Zhang and Yan, 2021; Yu et al., 2022; Oktay et al., 2023). Optimization techniques have become an indispensable element of UAV control systems. The Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) method, introduced by Sadegh and Spall (1998), has led to major advancements by providing an effective framework for optimizing multi-variable systems using random perturbations. This approach has been successfully applied to complex, non-differentiable systems, yielding reliable results while maintaining practicality in challenging scenarios (He et al., 2003).

2. Material and Methods

According to Newton's 2nd law, the equations of motion in flight correspond to the time variation of the total forces acting on the body and the total momentum, while the total moment of the body corresponds to the time variation of the angular momentum. Newton's 2nd law is expressed as a vector by the following relations:

$$\sum \boldsymbol{F_{net}} = \frac{d}{dt}(m\boldsymbol{V}) \tag{1}$$

$$\sum \boldsymbol{M} = \frac{d}{dt}(\boldsymbol{H}) \tag{2}$$

Here F stands for total force, M for total moment, m for mass, v for velocity and H for angular momentum. The vectors in Equations (3) and (4) can be written as scalars and therefore, of vectors, 3 force equations and 3 moment equations are obtained.

$$\sum F_{net,x} = \frac{d}{dt}(mu) \tag{3}$$

$$\sum F_{net,x} = \frac{d}{dt}(mu) \tag{4}$$

$$\sum F_{net,x} = \frac{d}{dt}(mu) \tag{5}$$

Where F_x, F_y, F_z and u, v, w are the components of force and velocity in the x, y and z axis respectively. Force components are assumed to consist of the interaction of aerodynamics, thrust and gravity. The moment equations are:

$$L = \frac{d}{dt}\,(H_x) \tag{6}$$

$$\mathrm{M} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\left(\mathrm{H_y}\right) \tag{7}$$

$$\mathrm{N} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}\,(\mathrm{H_z}) \tag{8}$$

The relation between the derivatives of the Euler angles ($\dot{\psi}$, $\dot{\Theta}$ and $\dot{\Phi}$) and the angular velocities (p, q and r) with respect to the aircraft reference:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -S_\theta \\ 0 & C_\Phi & S_\Phi C_\theta \\ 0 & -S_\Phi & C_\Phi C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{9}$$

The derivatives of the Euler angles can be solved using the angular velocities with respect to the aircraft reference given below:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & S_{\Phi} tan\theta & C_{\Phi} tan\theta \\ 0 & C_{\Phi} & -S_{\Phi} \\ 0 & S_{\Phi} sec\theta & C_{\Phi} sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (10)$$

The longitudinal dynamics are represented by a linear state-space model as follows:

$$\dot{x} = A\,x + B\,u$$
$$y = C\,x + D\,u \quad (11)$$

where the state vector is $x=[u,w,q,\theta]^T$, the control input is the elevator deflection δ_e, and the output is the pitch angle. Stability and control derivatives such as X_{ui} Z_w ,M_q were derived from aerodynamic data and are presented in Table 1.

Table 1. Main parameters of the reference UAV used in this study

Parameter	Value	Unit
Mass (m)	4.2	kg
Wingspan (b)	2.0	m
Mean Aerodynamic Chord (c)	0.25	m
Reference Velocity	25	m/s

The proposed control system is designed for the cruise phase of flight, where pitch angle stabilization is critical for maintaining longitudinal equilibrium.

The Simulink block diagram illustrates a system designed to model and regulate the longitudinal dynamics of a fixed wing unmanned aerial vehicle (UAV). Within the diagram, a PID controller is implemented in the control section of the system, configured with the appropriate gains (K_p, K_i, K_d). The control structure is designed to ensure the UAV achieves its intended reference angle while upholding stability. To replicate external disturbances affecting the system, a Von Karman turbulence model is included. This model is crucial for simulating realistic flight conditions, enabling a more precise evaluation of the controller's performance in turbulent settings. The effect of turbulence is notably important when assessing the controller’s reactions and the system's overall behavior. Incorporating this model provides a comprehensive framework to examine both the control processes and external influences. The integration of the Von Karman turbulence model allows the system to be tested under real-world conditions, confirming the control design's effectiveness.

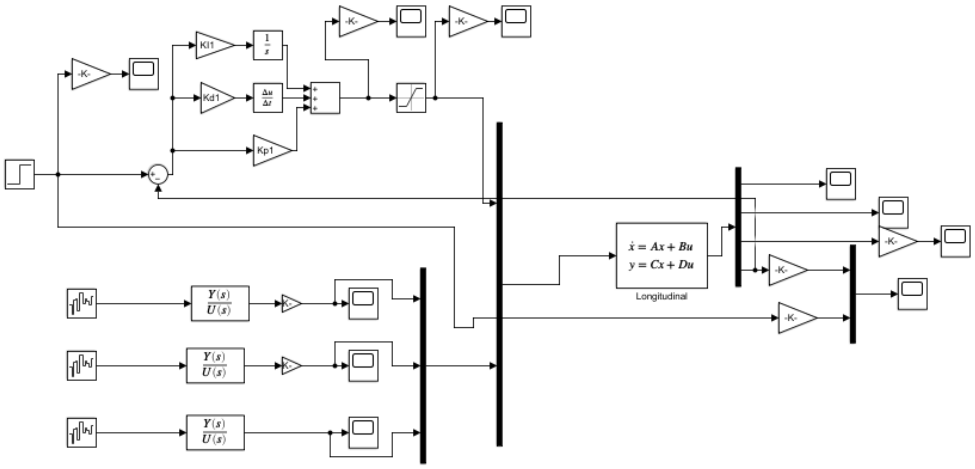


Figure 1. Block Diagram of UAV System

Simulations were carried out at an altitude of 1000 m and a reference flight speed of 25 m/s. Atmospheric density was assumed to be 1.112 kg/m³, and the Von Karman turbulence model was parameterized with a turbulence intensity of 15% to replicate realistic atmospheric disturbances. The Von Karman turbulence model was applied to both translational velocity components (u, v, w) and angular rates (p, q, r), ensuring that both linear and rotational motions are influenced by stochastic disturbances.

The open-loop eigenvalues of the linearized longitudinal model were computed from the state-space formulation and validated through the mode identification shown in Figure 2. To provide a quantitative verification of the modeled flight-dynamics behavior, Table 2 compares the natural frequencies (ω_n) and damping ratios (ζ) of the short-period and phugoid modes with the established fixed-wing UAV model of Hajiyev & Vural (2013). This comparison is included solely for model-validation purposes.

Table 2. Quantitative comparison of Longitudinal stability modes

Mode	Parameter	This Study (V = 25 m/s)	Hajiyev & Vural (2013)	Absolute Difference (%)
Short-Period	Natural Frequency, ω_n,SP (rad/s)	8.40	8.8538	5.12%
Short-Period	Damping Ratio, ζ_SP	0.86	0.8513	1.02%
Phugoid	Natural Frequency, ω_n,P (rad/s)	1.12	1.0566	5.99%
Phugoid	Damping Ratio, ζ_P	0.0875	0.0815	7.36%

Both longitudinal modes exhibit strong quantitative consistency with the reference small UAV model. The short-period mode shows only 5.12% difference in natural frequency and 1.02% in damping ratio. The phugoid mode also agrees very well, with a 5.99% difference in natural frequency and only 7.36% in damping ratio. These results confirm that the proposed model accurately represents the longitudinal dynamics of a small fixed-wing UAV.

3. Results and Discussion

The pitch angle of the system was inspected by the exact conditions of the reference angle as 7° in this situation. The pitch angle shows a significant initial overshoot (around 8.5°), which then slowly damps to the reference value. The system achieves a 'new steady state' after about 25 seconds and shows very low oscillation around that steady state point, indicating good damping performance. Results show that the PID controller can indeed effectively track the reference angle and shows robustness to possible disturbances. However, the overshoot and relatively long stabilization time suggest room for improvement. The optimizations based on SPSA that are implemented to tune control parameters provide a robust basis for future work on limit cycling reduction and better settling time.

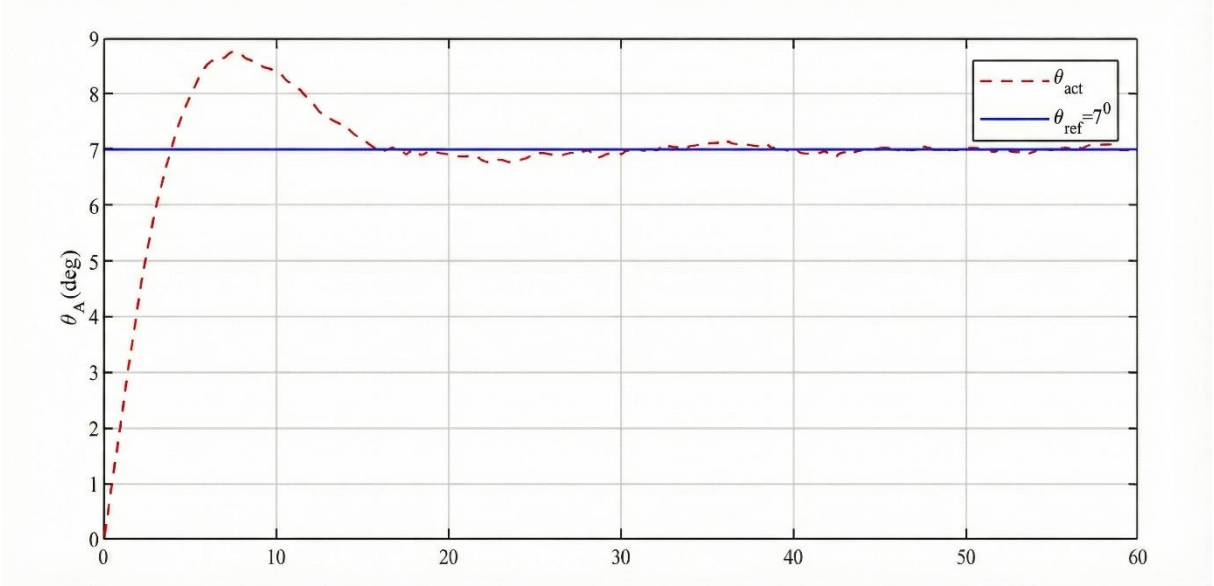


Figure 2. Pitch angle responses of System

When analyzing the u (m/s) over time, the system is initially making high amplitude corrections. But these adjustments reduce over time as the system stabilizes. As it is under the influence of turbulence, the system presents a good control performance due mainly to the PID controller. Permanent low-amplitude oscillations indicate that there is still room for tuning the control design and improving overall performance. These observations validate the system's resilience to external agents and underscore that the selected controller parameters work well.

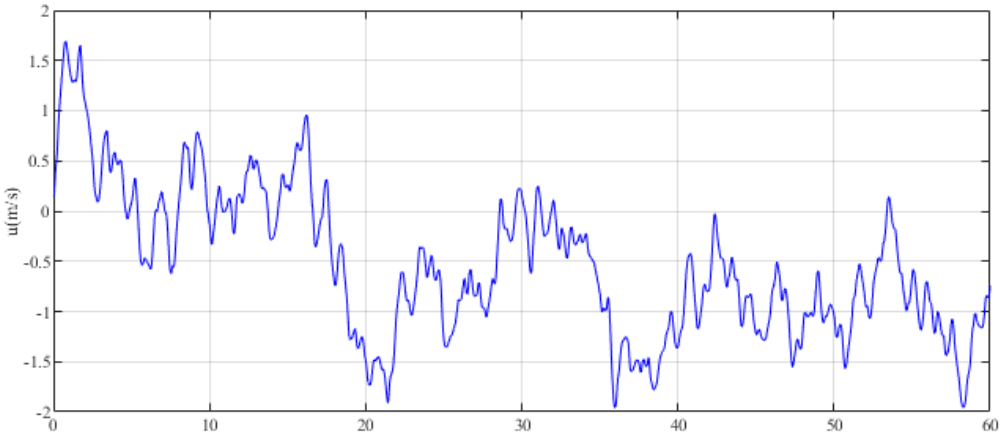


Figure 3. Horizontal velocity u (m/s)

When assessing the vertical velocity component w (m/s) over time, initial observations indicate high-frequency and erratic fluctuations. Yet, as time advances, the amplitude of these variations gradually decreases. Despite the turbulence present, the vertical velocity remains within a contained range, highlighting stable control performance. These observations emphasize the effectiveness of the PID controller in reducing external interferences and preserving system stability. However, the analysis proposes that further refinement of the controller could effectively reduce the remaining oscillations, thus improving overall performance.

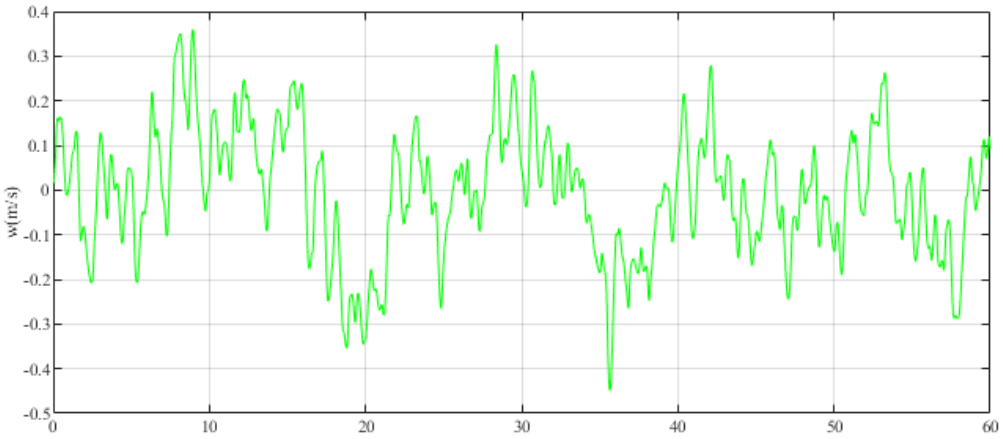


Figure 4. Vertical velocity w (m/s)

This deflection angle of the elevator control surface also shows the proper handling of the turbulence and its quick action to stabilize the system. The fact that the deflection is still known to be within certain control limits despite such variation's portrait background stability of bone problem. Such a fast-yet-easy reaction of the PID controller would suppress the effect of outside disturbance, e.g., turbulence, and thus improve system performance. Clearly, the early breakthrough demonstrates a highly precise and dynamically tuned control surface at least meets the needs of the system.

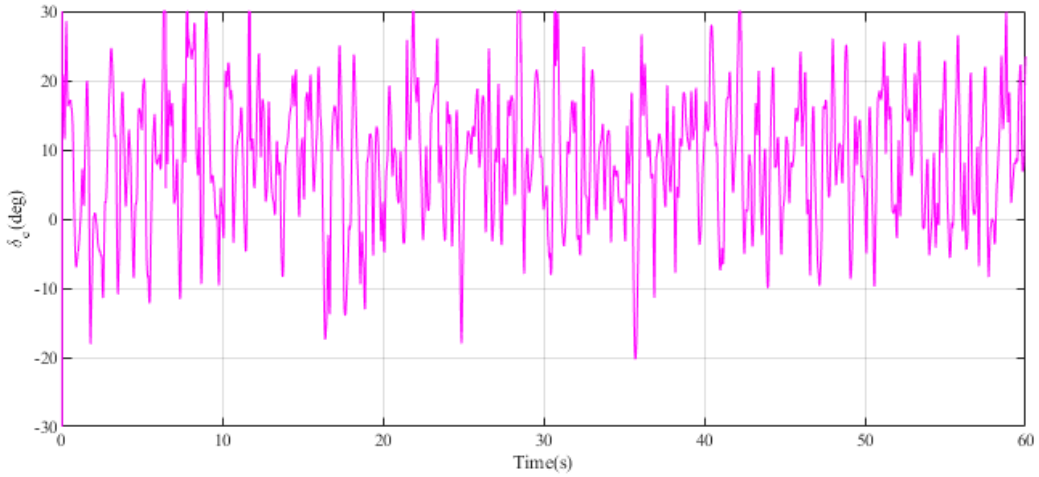


Figure 5. Elevator control surface deflection angle of the system

The plot displays the change in the pitch angular velocity of the system q (m/s) as a function of time. Q has an initial rapid increase but then drops to near zero in a few \~5s, indicating strong damping. This means that the system appears to quickly gain the target angle and then stabilize. The stability of the system is preserved by the pitch angular speed, which experiences small fluctuations despite turbulence. Such a response reflects the ability of the PID controller to respond dynamically to sudden changes and highlights the importance of its usage in keeping the overall system framework stable. This results in an enhanced, precise control system. In addition, the control system remains sensitive and dependable, even in situations of ongoing change.

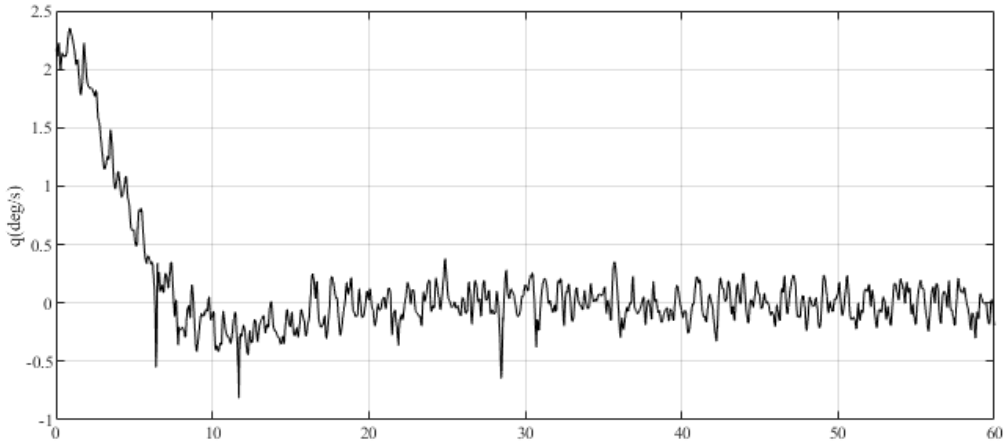


Figure 6. Time-dependent variation of the pitch angular velocity q (m/s)

The cost function progress at different iterations is shown in Figure 7. The cost function starts at 5.8 at the first iteration and quickly decreases to 3.0 after the fifth iteration. The process occurs with many iterations, and the amount diminishes in time, and by the tenth iteration, it stabilizes around 2.8. Such a trend shows that the SPSA minimizes the cost function as it rapidly adjusts the control parameters to optimize the system performance. A rapid convergence during the early iterations suggests that the system optimizes quickly.

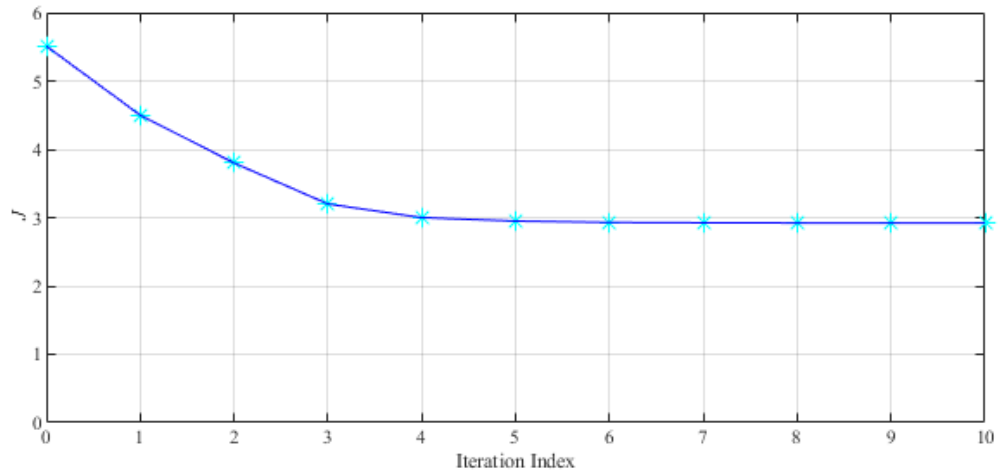


Figure 7. Convergence of the cost function (J) over iterations

Figure 8 illustrates the percentage improvement of the cost function during the optimization process. In the initial iterations, the improvement rate rises quickly, reaching 47% by the 5th iteration. Afterward, the improvement rate stabilizes, and by the 10th iteration, it levels off. This suggests that the optimization process is highly effective in the early stages, providing a rapid performance boost for the system. The consistent improvement rate in the later iterations indicates that the SPSA algorithm has brought the control parameters closer to their optimal values, successfully completing the optimization. This demonstrates a significant overall improvement in the system's performance.

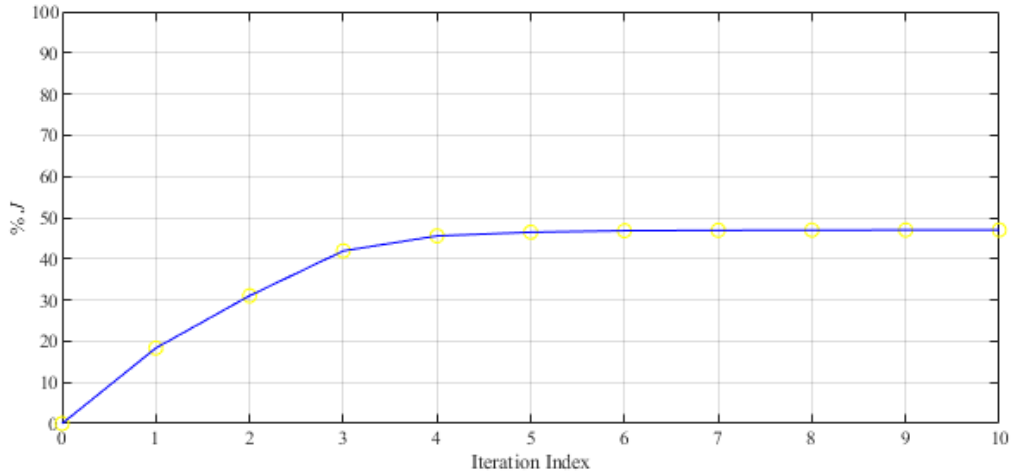


Figure 8. Percentage improvement of the cost function

Figure 9 is the graphical representation of the PID controller gains (P, I, D) across the iterations. In the case of the Proportional (P) gain, it exhibits a slow incremental change over the iterations until it reaches saturation (approximately at iteration 25). This indicates that the proportional control has been optimized, leading to a rapid system response. The Integral (I) gain remains nearly constant at a value of about 5, demonstrating its effective influence on error accumulation, which contributes to a more stable control system. The Derivative (D) gain shows a slight increase during the first few iterations (0-1, as visible) and eventually stabilizes around iterations 24-30, ensuring a fast response to changes. In

essence, the iterative process enhances the PID gains across multiple runs, allowing them to converge toward stable values and ultimately improving control performance. Moreover, the persistent refinement of these gains complements the overall stability and sensitivity of the system.

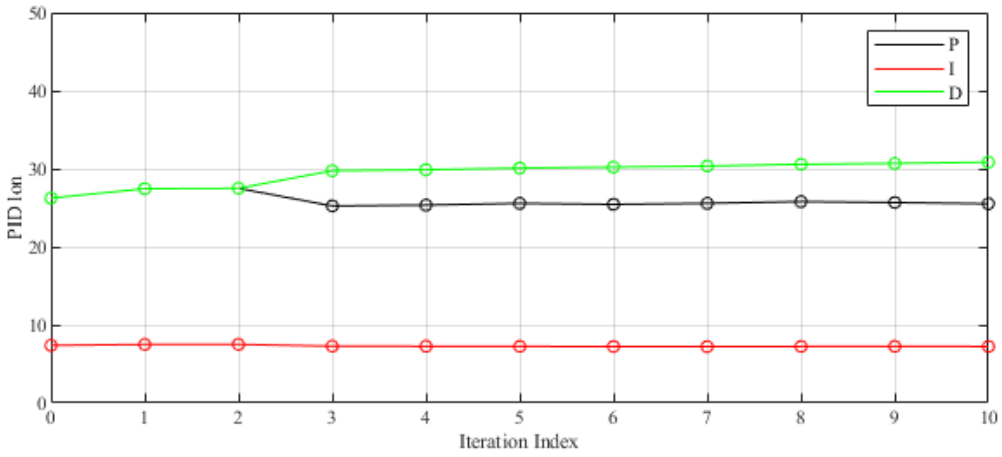


Figure 9. Variation of the gains (P, I, D)

Table 3. Quantitative performance comparison between the Ziegler–Nichols and SPSA-tuned PID controllers

Metric	Ziegler–Nichols	SPSA	Improvement (%)
Overshoot (%)	8.5	4.2	38% ↓
Settling Time (s)	25	14	44% ↓
Steady-State Error	0	0	–
Cost Function (J)	4.5	2.8	38% ↓

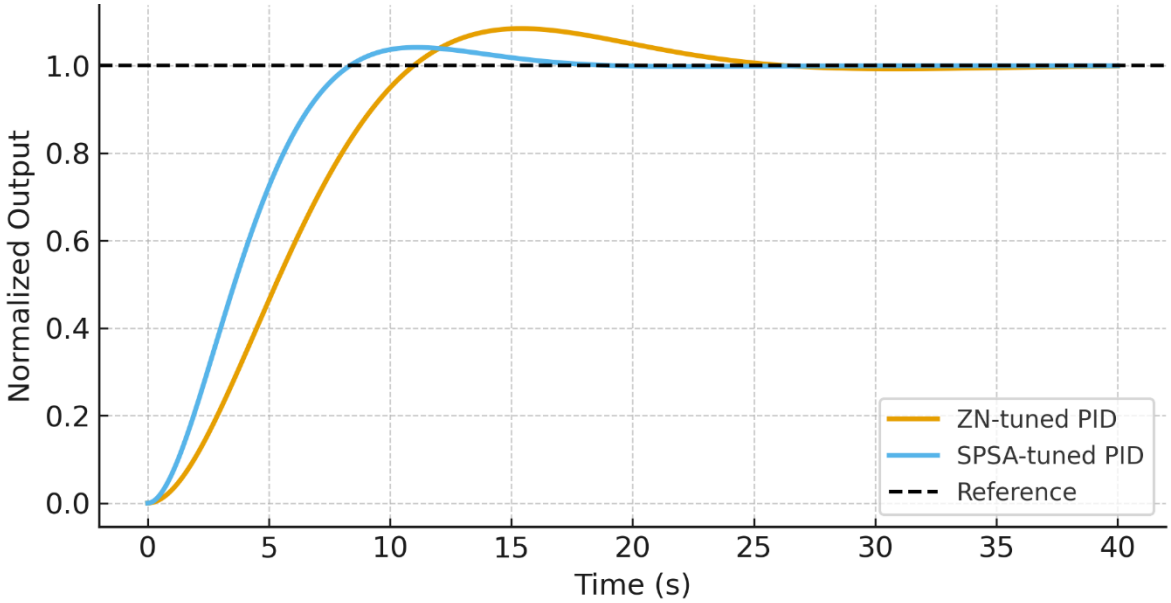


Figure 10. Step Response Comparison of Ziegler–Nichols and SPSA PID Controllers

As shown in Table 3, the SPSA-tuned controller provides a significantly improved transient response when compared to the classical Ziegler–Nichols tuning. In particular, the SPSA-based design achieves

a 38% reduction in overshoot and a 44% reduction in settling time. These numerical results indicate a more stable and rapidly converging closed-loop behavior, which is further illustrated by the step-response comparison shown in Figure 10.

4. Conclusion

The proposed study aims to develop an effective and systematic approach to improve the longitudinal stability of a fixed-wing UAV using advanced modeling, control, and optimization strategies. Using a longitudinal state-space model of aircraft states, the flight controller incorporates a Proportional-Integral-Derivative (PID) control strategy along with the Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation (SPSA) method, that seeks to ensure stability in the face of changing and unpredictable flight conditions. Extensive simulations under realistic conditions including a Von Karman turbulence model which closely resembles real atmospheric disturbances were performed to ensure the robustness of the proposed system. The simulation outputs are representative of the ability of the optimized PID controller to track the desired pitch angle and eliminate steady-state error whilst maintaining a tight stability margin and eliminating steady-state error despite a massive amount of disturbance. Performance evaluations demonstrate the efficiency of the SPSA optimization algorithm, which minimizes the cost function successfully, leading to a good convergence rate and consequently to an improvement in the general control scheme performance. Notable improvements in pitch angle overshoot, a decrease in settling time, and an upsurge in control surface deflections, as shown in all performance metrics, validate the strength and reliability of the proposed control design. Moreover, the robustness and adaptability of the system under uncertain conditions indicate its suitability for real-world applications, as environmental variations pose considerable challenges in the operation of UAVs. Finally, moving into a more advanced modelling approach such as turbulence equations that have been historically used in large engineering applications and hybrid application of robust optimization techniques, are very much developed, yet largely untapped areas in the UAV design, which could further lead to improved stabilization and control performance in the steady state. Not only does this contribute to our knowledge and understanding of how to do robust control design but it also highlights a direction for future work. Future extensions of this work could look into the solidification of using machine learning-based algorithms for fine-tuning the control parameters, making the proposed method suitable for more complex flight dynamics, and evaluating its effectiveness in scenarios involving cooperation between multiple UAVs in dynamic environments. In summary, the SPSA-optimized PID controller achieved a 38% reduction in overshoot and a 44% faster settling time compared to the classical Ziegler–Nichols tuning.

Conflict of Interests

Authors declare that they have no conflict of interest.

Author Contribution Declaration

The authors declare that they have contributed equally to the article.

References

Çoban S., Bilgiç HH., Oktay T. Designing, dynamic modeling and simulation of ISTECOPTER. Journal of Aviation 2019; 3(1): 38-44.

Çoban S., Oktay T. Simultaneous design of a small UAV (unmanned aerial vehicle) flight control system and lateral state space model. Journal of Aviation 2018; 2(2): 70-76.

Hajiyev C., Vural SY. LQR controller with Kalman estimator applied to UAV longitudinal dynamics. Positioning 2013; 4(1): 36-41.

He Y., Fu MC., Marcus SI. Convergence of simultaneous perturbation stochastic approximation for non-differentiable optimization. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2003; 48(8): 1459-1463.

Jang JS., Liccardo D. Automation of small UAVs using a low-cost MEMS sensor and embedded computing platform. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference 2006; Big Sky, MT, USA.

Kocamer A., Oktay T. A novel morphing approach tilt-rotor VTOL UAV. Research and Reviews in Engineering 2022; 11.

Muslimov T., Munasypov R. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping. Aerospace Science and Technology 2021; 109: 106416.

Nelson RC. Flight stability and automatic control (2nd ed.). McGraw-Hill, New York 2007.

Oktay T. Constrained control of complex helicopter models. PhD Dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, VA 2012.

Oktay T., Sal F., Kose O., Kocamer A. Stochastic longitudinal autopilot tuning for best autonomous flight performance of a morphing VTOL drone. The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics 2023; 23: 413-419.

Oktay T., Sultan C. Flight control energy saving via helicopter rotor active morphing. AIAA Journal of Aircraft 2014; 51(6): 1784-1805.

Oktay T., Sultan C. Integrated maneuvering helicopter model and controller design. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference 2012; Minneapolis, MN, USA.

Sadegh P., Spall JC. Optimal random perturbations for multivariable stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation. IEEE Transactions on Automatic Control 1998; 43(10): 1480-1484.

Yu L., He G., Wang X., Zhao S. Robust fixed-time sliding mode attitude control of tilt trirotor UAV in helicopter mode. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2022; 69: 10322-10332.

Zhai R., Zhou Z., Zhang W., Sang S., Li P. Control and navigation system for a fixed-wing unmanned aerial vehicle. AIP Advances 2014; 4: 031306.

Zhang J., Yan J. A novel control approach for flight-stability of fixed-wing UAV formation with wind field. IEEE Systems Journal 2021; 15: 2098-2108.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1373-1403, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1373-1403, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Yapay Zekâ Destekli Akıllı Tekstiller: Bibliyometrik ve Tematik Bir Analiz

Beyza BUZOL MÜLAYİM[1*] Selma BULUT[2]

[1]Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Moda Tasarımı Programı, Kırklareli
[2]Kırklareli Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojisi Bölümü, Kırklareli

[1]https://orcid.org/0000-0001-5224-3934
[2]https://orcid.org/0000-0002-6559-7704
*Sorumlu yazar: beyza.mulayim@klu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 06.08.2025
Kabul tarihi:07.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Akıllı tekstiller
Yapay zeka
Giyilebilir sensörler
Derin öğrenme
İnsan-makine arayüzü

ÖZ

Yapay zekânın (YZ) akıllı tekstillere entegrasyonu, giyilebilir teknolojilerde gerçek zamanlı izleme, kişiselleştirilmiş geri bildirim ve gelişmiş işlevsellik sunarak sağlık, spor ve çevresel izleme gibi alanlarda yeni fırsatlar yaratmaktadır. Ancak enerji yönetimi, dayanıklılık ve veri gizliliği gibi zorluklar nedeniyle bu teknolojiler çoğunlukla prototip aşamasında kalmaktadır. Bu çalışma, 2015-2025 yılları arasında Web of Science (WoS) veri tabanında yayımlanan YZ destekli akıllı tekstillere ilişkin literatürü bibliyometrik ve tematik açıdan analiz etmektedir. Toplam 970 yayının incelendiği araştırmada, VOSviewer 1.6.20 ile bibliyometrik analiz yapılmış, atıf sayısına göre seçilen 20 makale ise nitel içerik analizine tabi tutulmuştur. Bulgular, 2018 sonrası yayın sayısında hızlı bir artış olduğunu, özellikle Çin (258 yayın) ve ABD'nin (209 yayın) alanda öncü konumda bulunduğunu ve çalışmaların ağırlıklı olarak sağlık takibi, aktivite tanıma, giyilebilir sensör optimizasyonu ve derin öğrenme tabanlı anomali tespiti üzerine yoğunlaştığını göstermektedir. Tematik analiz sonucunda sekiz temel araştırma odağı belirlenmiş olup, elde edilen bulgular YZ destekli akıllı tekstillerin sürdürülebilirlik, sağlık izleme ve kişiselleştirilmiş bakım alanlarında yüksek dönüştürücü potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

AI-Enabled Smart Textiles: A Bibliometric and Thematic Analysis

Research Article

Article History:
Received: 06.08.2025
Accepted: 07.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Smart textiles
Artificial intelligence
Wearable sensors
Deep learning
Human-machine interface

ABSTRACT

The integration of artificial intelligence (AI) into smart textiles has created new opportunities in wearable technology, enabling real-time monitoring, personalized feedback, and enhanced functionality across domains such as healthcare, sports, and environmental sensing. However, challenges related to power management, durability, and data privacy have kept most of these technologies at the prototype stage. This study conducts a comprehensive bibliometric and thematic analysis of the AI-enabled smart textile literature published between 2015 and 2025 in the Web of Science (WoS) database. A total of 970 publications were examined, with bibliometric mapping performed using VOSviewer 1.6.20 and qualitative content analysis applied to the 20 most-cited articles. The findings reveal a sharp increase in publications after 2018, with China (258 publications) and the United States (209 publications) leading global scientific output. Research trends predominantly focus on health monitoring, activity recognition, wearable sensor optimization, and deep learning-based anomaly detection. Thematic analysis identified eight primary research clusters, and the results highlight the transformative potential of AI-integrated smart textiles in sustainability, health monitoring, and personalized care, paving the way for the transition from laboratory prototypes to real-world applications.

To Cite: Buzol Mülayim B., Bulut S. AI-Enabled Smart Textiles: A Bibliometric and Thematic Analysis. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1373-1403.

1. Introduction

The global textile industry is undergoing a continuous transformation toward innovative and high value–added products at the intersection of digitalization and materials science. In conventional textiles, significant advancements have been achieved in areas such as mechanical durability, surface texture, color diversity, and pattern printing; in addition, personal care–oriented functionalities such as flame retardancy, self-cleaning, antimicrobial activity, and sweat resistance have been incorporated (Pereira et al., 2020).

In recent years, nano-engineered smart textiles have emerged as a prominent frontier. These textiles are materials capable of sensing environmental changes and generating active responses by altering their functional parameters (Pereira et al., 2020; Kumar, 2025). Their evolution is commonly categorized into three generations:

1. Passive smart textiles — capable only of sensing environmental changes.
2. Active smart textiles — capable of responding to stimuli they detect.
3. Super smart textiles — integrating sensors, optical devices, nanogenerators, and energy storage systems; capable of detecting environmental threats and delivering advanced functionalities (Yetişen, 2016; Shah et al., 2022).

The convergence of machine learning and textile technology has given rise to AI-driven smart textiles, establishing a new frontier in wearable technologies. These intelligent fabrics are equipped with sensors, actuators, and processors, enabling them to collect data, perform pattern recognition, and adapt to both user behavior and environmental stimuli in real time (Kumar, 2025). This transition highlights the growing interdisciplinary convergence of AI, IoT, and textile engineering.

Furthermore, the integration of these technologies with the Internet of Things (IoT) significantly enhances the potential of smart textiles. Contemporary microelectronic fabrication allows the seamless incorporation of electronic components into fabrics, while the utilization of nanomaterials endows textiles with high value–added functionalities. Throughout this process, traditional properties such as comfort, flexibility, lightweight structure, and aesthetic appearance are preserved (Shah et al., 2022). Given these advances, recent attention has shifted from materials and sensors toward intelligent systems powered by AI and data analytics.

Digitalization and AI-based automation are transforming the textile industry from a traditional production paradigm into a data-driven, intelligent, and high value–added ecosystem. Within this transformation, artificial intelligence (AI) plays an increasingly critical role, particularly in design, production, and quality control. Machine learning and deep learning methods have been widely applied in fabric defect detection (Cen and Zhao, 2022), stitching optimization, material classification, and personalized design informed by user data.

Moreover, smart textiles incorporating integrated sensors and flexible electronics represent innovative systems capable of real-time, non-invasive monitoring of physiological parameters, including heart rate, respiration, body temperature, and ECG. When combined with AI-enabled data analytics, these

technologies hold transformative potential for continuous health monitoring, performance optimization, and early warning mechanisms in personal health management. Nevertheless, challenges related to durability, comfort, aesthetics, and data security remain at the forefront of ongoing research (Michelson, 2024).

Ultralytics, a software company, highlights that smart fabrics represent a seamless fusion of fashion, functionality, and technology by adapting to changes in temperature, motion, or pressure. Artificial intelligence (AI) plays a pivotal role in advancing these fabrics by enabling personalized interactions, health monitoring, and real-time feedback. Leveraging technologies such as deep learning, computer vision, and advanced sensors, AI algorithms can analyze the data collected from the fabric's embedded components. The company points to a color-changing fabric developed by Hong Kong AiDLab and showcased at Milan Fashion Week, which utilized cameras and Polymeric Optical Fibers (POF) to dynamically shift colors in response to movement (Ultralytics, 2025).

Currently, emerging firms emphasize that the integration of smart textiles, AI-based solutions, and Internet of Things (IoT/IIoT) technologies will drive revolutionary innovations in the textile industry, with significant potential for high value creation in the future (Serkon AI, 2025; USPAR,2025).

The technical dimension of AI integration into smart textiles has also been addressed in review and application studies. For instance, Kong et al. (2025) demonstrated that the integration of wearable sensors with AI enhances accuracy and efficiency in data processing and decision-making workflows. This review particularly examines AI-enabled sensing electronics for human–machine interfaces (HMI), including applications in the metaverse. It summarizes the implementation of AI-driven data processing models in speech recognition, health monitoring, and pattern recognition/classification within virtual and mixed reality environments, while also discussing the current challenges and future research perspectives of AI-assisted sensing.

Similarly, Malashin et al. (2025) reported that AI and machine learning (ML) have assumed a transformative role in the development of polymer-based smart textiles. These technologies accelerate material design and optimization, enable predictive detection of fabric defects for proactive manufacturing interventions, and facilitate the creation of smart wearable systems capable of processing physiological data in real time. This AI-powered approach not only enhances the functionality of smart textiles but also paves the way for sustainable and innovative solutions in the field.

Kumar (2025) presented a comprehensive study examining the fundamental principles of smart textiles, the role of machine learning in enhancing their functionality, and their practical applications across healthcare, sports, military, and fashion industries. Case studies demonstrated that machine learning algorithms can detect physiological changes, anticipate user needs, and provide personalized responses, thereby making wearable technologies more interactive and context aware.

AI-driven smart textiles are particularly prominent in healthcare, sports, defense, and wearable biosensor technologies. For instance, Yadav and Yadav (2025) reported that smart garments designed for health and fitness monitoring process data collected via electrochemical sensors using deep learning algorithms

to provide real-time feedback to users. Similarly, Tang et al. (2025) integrated textile-based strain sensors into a deep learning–enabled system for sports performance monitoring, achieving high-accuracy motion analysis. AI techniques have also demonstrated remarkable success in complex physiological monitoring tasks, such as sleep analysis. Tang et al. (2024) developed a system capable of classifying sleep states with 98.6% accuracy using biosignals collected from smart garments processed through deep learning algorithms. Likewise, Zhao et al. (2024) created three-dimensional e-textile systems for maternal health monitoring, enabling the machine learning–based analysis of biophysiological data.

Research in motion classification and posture analysis further illustrates the versatility of smart textiles. A study published in Nature Communications presented a wearable photonic smart garment embedded with 30 multi-polymer optical fiber (POF) sensors, which, combined with AI algorithms (k-nearest neighbor classifier), successfully achieved high-accuracy human motion classification (Avellar et al., 2022). Ergoktaş et al. (2020) developed active devices that can be directly integrated into accessories or garments, including a T-shirt capable of modulating thermal radiation emitted by the human body, thus enabling long-wave infrared communication. Furthermore, Wicaksono et al. (2022) at MIT Media Lab designed 3D-knitted, smart textile–based pressure sensors that generate two-dimensional pressure maps. These are processed using image-based approaches and deep learning models (CNNs) to achieve activity and posture recognition. This method provides contextual insights into movements and postures without the need for complex preprocessing. Collectively, these systems demonstrate that smart textiles offer interactive, high value–added solutions in healthcare, sports, and rehabilitation, bridging material innovation, wearable technology, and AI-driven analytics.

In addition, the use of biodegradable sensors and the concept of sustainability have gained increasing prominence in wearable systems in recent years. Zhao et al. (2024) developed a biodegradable, fully textile-based sensor, demonstrating the potential of AI-enabled smart textiles for health monitoring and activity recognition. Through real-time data collection and machine learning–based processing, this sensor represents a significant step toward sustainable, high-performance smart wearable systems.

Smart AI-driven textiles are also being explored in niche applications such as psychological state tracking and emotion regulation. For example, early studies suggest that wearable systems could assist individuals in mood regulation (Dejene, 2025).

Overall, AI-integrated smart textiles remain largely in the prototype and early research phase, with limited commercial applications to date. Current studies predominantly focus on laboratory-tested smart textile prototypes equipped with sensors capable of detecting pressure, temperature, heart rate, or biosignals, enabling the recognition of activities, posture, or physiological states through machine learning algorithms. However, critical challenges such as energy management, washability and durability, data privacy, and real-time processing capabilities remain significant barriers to widespread adoption.

Nevertheless, emerging innovations, such as embedded AI hardware, biodegradable materials, and energy-harvesting fibers are expected to pave the way for truly autonomous, continuously operating, and sustainable smart garments. This perspective suggests that smart textiles will soon become widely adopted in health, sports, military, and personal life applications, delivering high value–added, interactive solutions. AI-powered smart textiles are transforming garments from functional objects into intelligent, responsive systems, enabling continuous monitoring, personalized feedback, and performance enhancement in healthcare, sports, defense, and fashion. While challenges in energy management, durability, and data security persist, the combination of advancing machine learning algorithms and robust textile technologies is steadily bringing the vision of truly intelligent clothing closer to reality.

In recent years, the rapid advancement of artificial intelligence (AI) technologies has opened new possibilities for making smart textile applications more functional and autonomous. This accelerated development has also significantly expanded the volume and diversity of studies in literature. However, the results of the literature review indicate that bibliometric analyses focusing on AI applications in smart textiles remain highly limited. This gap underscores the need for studies that comprehensively examine the field's research trends, citation dynamics, and thematic network structures. In this context, the present study aims to map the scientific evolution of the field and to provide a thematic framework that can guide future research.

2. Materials and Methods

2.1. Aim of the Study

In this study, a bibliometric analysis was conducted on July 14, 2025, using the Web of Science (WoS) database to understand the impact of artificial intelligence (AI) on smart textiles between 2015 and 2025. The study is expected to contribute to the field and provide a conceptual foundation for future research. This research aims to address the following questions:

1. What is the annual distribution and publication types of studies on AI in smart textiles indexed in WoS?
2. What is the annual distribution of citations to these studies?
3. Who are the authors contributing to co-authorship networks in AI and smart textile studies?
4. What is the citation analysis of the authors publishing in this field?
5. Which countries contribute to the field, and what are their citation dynamics?
6. What is the keyword analysis of publications on AI in smart textiles?
7. What are the findings of the bibliographic coupling analysis of texts in this research area?
8. What are the results of the co-citation analysis of the authors in this field?
9. What themes emerge from the content analysis of the 20 most-cited articles?

2.2. Research Methodology

This study employs an integrated approach combining bibliometric analysis and content analysis to reveal scientific trends in artificial intelligence (AI) applications in smart textiles. The data source of the research consists of academic publications indexed in the Web of Science (WoS) database. VOSviewer 1.6.20, developed by Van Eck and Waltman (2010), was used to construct and visualize bibliometric networks based on co-authorship, co-citation, and keyword co-occurrence analyses. The software applies association strength normalization and modularity-based clustering to detect thematic communities.

Bibliometric analysis was chosen as it enables a systematic mapping of the scientific structure and thematic progression of AI-enabled smart textile research, which could not be captured through traditional narrative reviews. This approach allows both quantitative and qualitative insights into the field, ensuring methodological rigor and scientific validity.

Bibliometric analysis is a method that enables the quantitative evaluation of scientific publications (Pritchard, 1969; Aria, 2017; Donthu, 2021). In this study, the bibliometric analysis was conducted using VOSviewer software (Van Eck and Waltman, 2010), covering key techniques such as co-citation analysis (Small, 1973; McCain, 1990), co-authorship analysis (Newman, 2001; Glänzel and Schubert, 2004), and keyword co-occurrence analysis (Callon et al., 1991; Ding et al., 2001).

Content analysis was employed to systematically categorize and interpret qualitative data (Krippendorff, 2013). In this study, the content analysis was conducted in two phases: thematic coding (Braun and Clarke, 2006) and concept mapping (Novak and Cañas, 2008). During the data collection phase, publications from 2015 to 2025 were retrieved from WoS using the keywords “smart textiles” and “artificial intelligence.” Subsequently, duplicate and irrelevant records were removed to construct the final analysis dataset. For the analysis stage, VOSviewer 1.6.20 was used for bibliometric evaluation, while Microsoft Excel was applied for content analysis.

This integrated methodological approach enables a comprehensive examination of both the quantitative and qualitative dimensions of AI research in smart textiles, providing a robust foundation for mapping the scientific evolution and thematic structure of the field.

In this research, a bibliometric analysis method was employed to examine studies on artificial intelligence (AI) applications in smart textiles. For this purpose, a search was conducted in the Web of Science (WoS) database on July 14, 2025, using the following query:

"Artificial Intelligence" OR "AI" (Topic) AND "Smart Textiles" OR "Intelligent Textiles" OR "E-textiles" OR "Wearable Technology" OR "Wearable Sensors" OR "Machine Learning in Textiles" OR "Deep Learning for Smart Fabrics" OR "Data-Driven Fashion" OR "Connected Clothing" OR "Intelligent Wearables" (All Fields) AND 2015–2025 (Year Published) AND English (Languages).

The search yielded 970 results. The dataset was checked for duplicate records, and the earliest publication was identified as 2015, while the most recent was 2025. The retrieved data were downloaded in a format compatible with bibliometric analysis software. Subsequently, the dataset was analyzed using

VOSviewer 1.6.20, and visualizations and network maps were generated based on the defined bibliometric analyses.

Figure 1 schematically illustrates the bibliometric analysis process designed to explore the literature on AI-driven smart textiles. In the first stage, the research topic was defined as “Artificial Intelligence” OR “AI.” Subsequently, the scope and screening criteria were established: the Web of Science (WoS) database was selected as the data source, the search field was set to All Fields, and English-language publications from 2015 to 2025 across all document types were included.

The search string combined AI-related terms (“Artificial Intelligence,” “AI”) with expressions related to smart textiles and wearable technologies, including: “Smart Textiles,” “Intelligent Textiles,” “E-textiles,” “Wearable Technology,” “Wearable Sensors,” “Machine Learning in Textiles,” “Deep Learning for Smart Fabrics,” “Data-Driven Fashion,” “Connected Clothing,” and “Intelligent Wearables.”

The data extraction process was completed on July 14, 2025, yielding 970 records. As the data extraction was completed on July 14, 2025, the number of publications for 2025 represents partial-year data. To illustrate the potential annual trend, an estimated forecast was added based on previous years’ growth pattern. In Figure 2, the solid gray bar shows the actual count (n = 199, until July), while the dashed red extension indicates the estimated total of approximately 310 publications expected by the end of 2025. During the screening phase, no publications were excluded; thus, all 970 records were included in the bibliometric analysis. This reflects that the search strategy was both comprehensive and targeted.

In conclusion, the schematic diagram highlights the transparency and methodological integrity of the literature search, resembling a PRISMA-style flow diagram that clearly documents the research process.

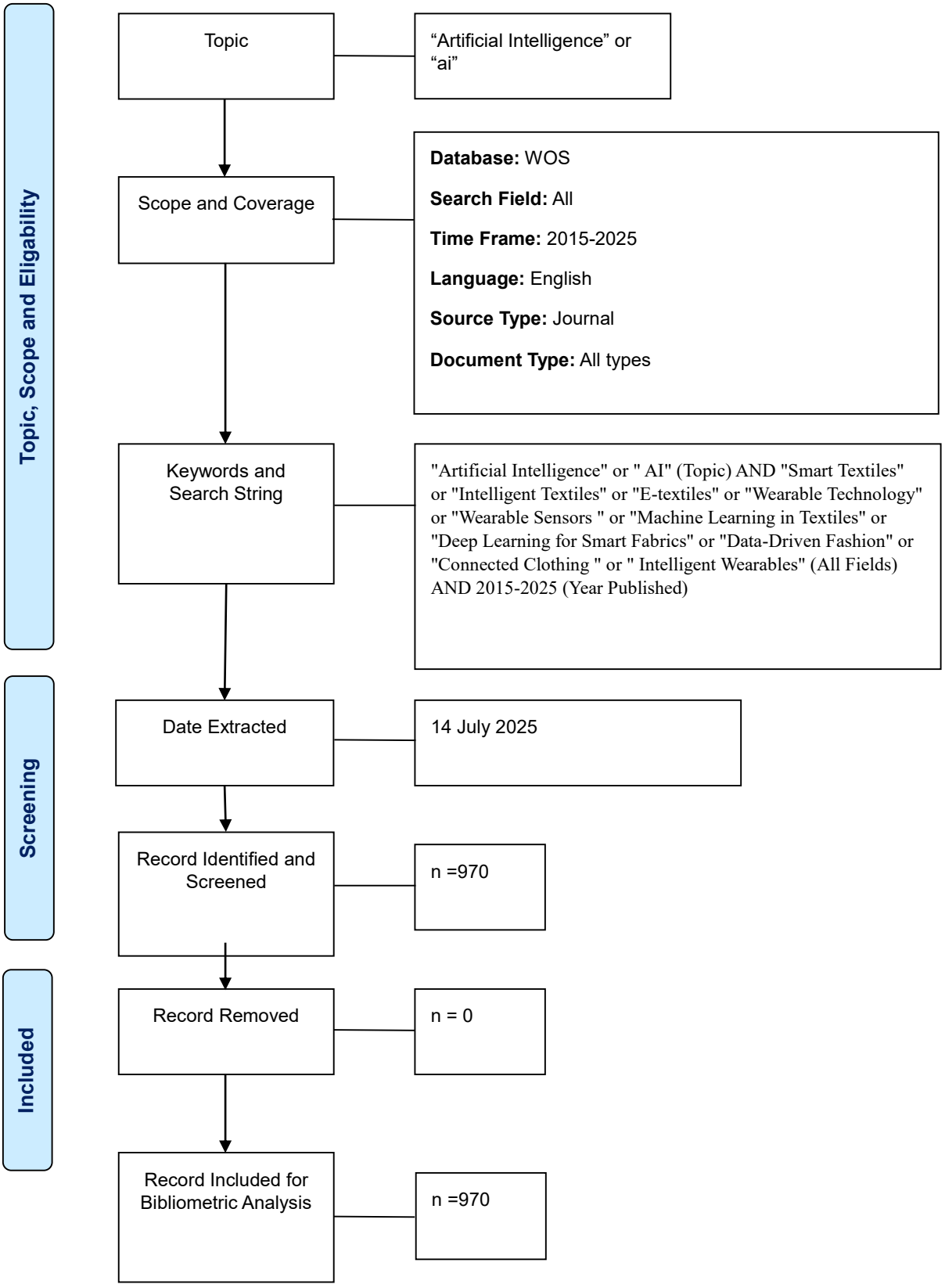


Figure 1. Flow diagram of the search strategy

3. Results

3.1. Annual Distribution and Publication Types

Between 2015 and 2025, a total of 970 publications on AI applications in smart textiles were indexed in the Web of Science (WoS) database. These publications were authored by 4,783 researchers, affiliated with 1,405 institutions across 89 countries. Furthermore, the studies were disseminated in 86 different academic journals.

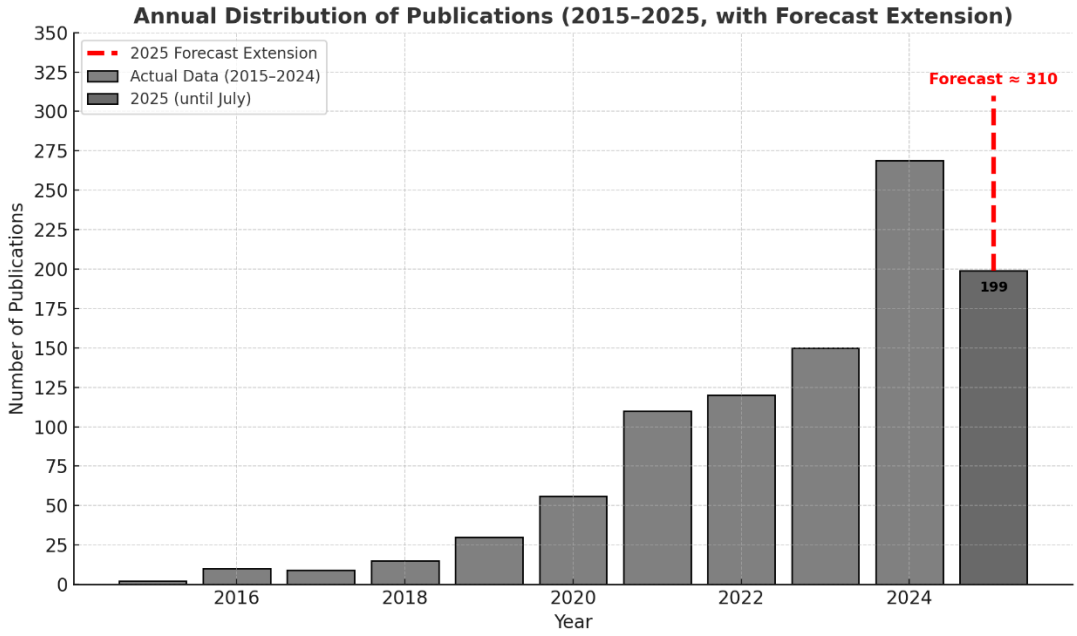


Figure 2. Number of publications by year

As illustrated in Figure 2, the number of publications, which was 2 in 2015, increased to 30 by 2019, indicating a significant upward trend. This rise reflects the rapid growth of AI-related studies in the field of smart textiles, consistent with trends observed in other disciplines. In the following years, the publication count continued to grow rapidly, reaching its peak of 269 publications in 2024. Considering the current 199 publications in 2025, it is anticipated that the total will further increase by the end of the year.

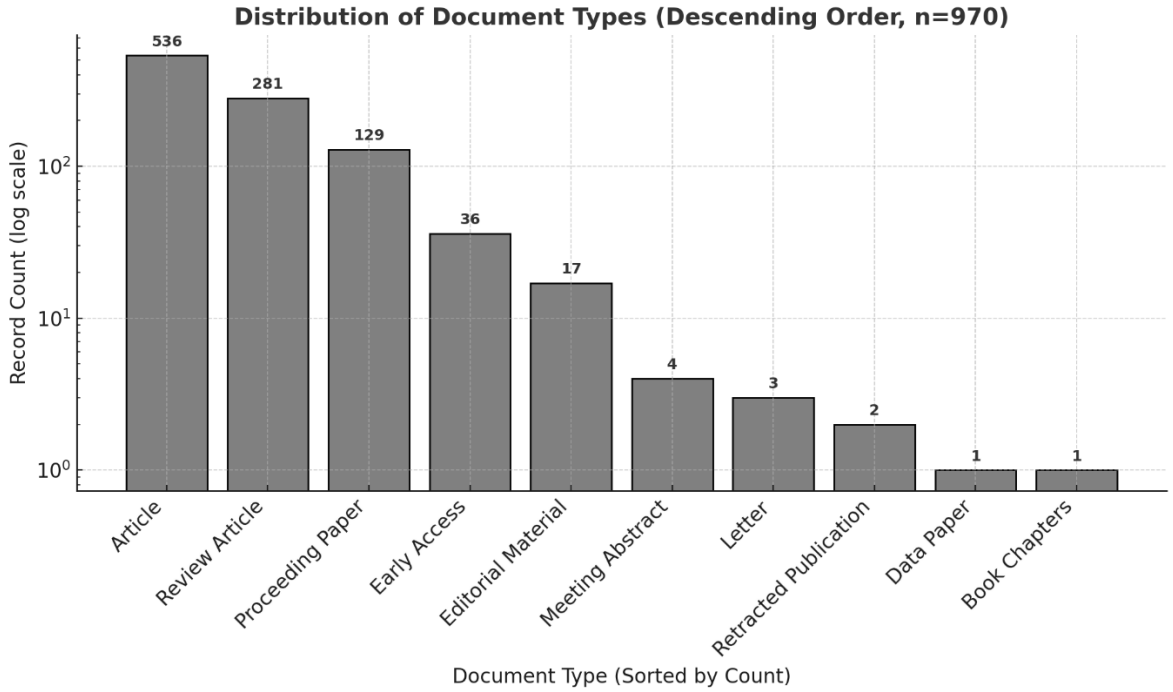


Figure 3. Publication types

As shown in Figure 3, the distribution of publication types reveals that the dataset comprises 536 articles, 281 review articles, 129 proceedings papers, 36 early access papers, 17 editorial materials, 4 meeting abstracts, 3 letters, and 1 book chapter. Regarding indexation, the publications are distributed as follows: SCI-Expanded: 698, Conference Proceedings Citation Index – Science (CPCI-S): 130, Emerging Sources Citation Index (ESCI): 127, Social Sciences Citation Index (SSCI): 56, CPCI – Social Sciences and Humanities (CPCI-SSH): 11, Arts and Humanities Citation Index (A and HCI): 2, and Book Citation Index – Social Sciences and Humanities (BKCI-SSH): 1.

Figure 4 illustrates the top five countries by publication output. China leads the field with 259 publications, followed by the United States (209), India (92), the United Kingdom (83), and Italy (80). Australia ranks next with 48 publications, reflecting the global research distribution in AI-driven smart textiles.

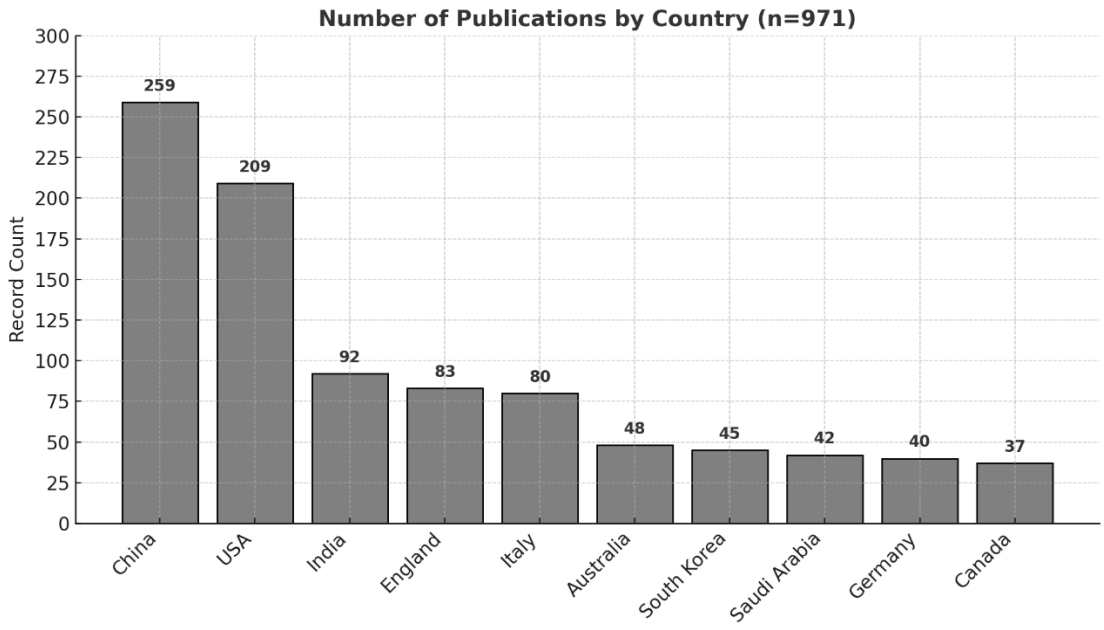


Figure 4. Number of publications by country

As shown in Figure 5, the distribution of publications across Web of Science (WoS) subject categories indicates that the leading fields are: Engineering Electrical and Electronic (208 publications), Instruments and Instrumentation (112), Computer Science Information Systems (105), Computer Science Artificial Intelligence (97), Chemistry Analytical (91), Computer Science Interdisciplinary Applications (81), Chemistry Multidisciplinary (64), and Computer Science Theory and Methods (55). The results reveal that the majority of publications are concentrated in engineering, computer science, and chemistry domains, highlighting the technological and interdisciplinary nature of AI-driven smart textile research.

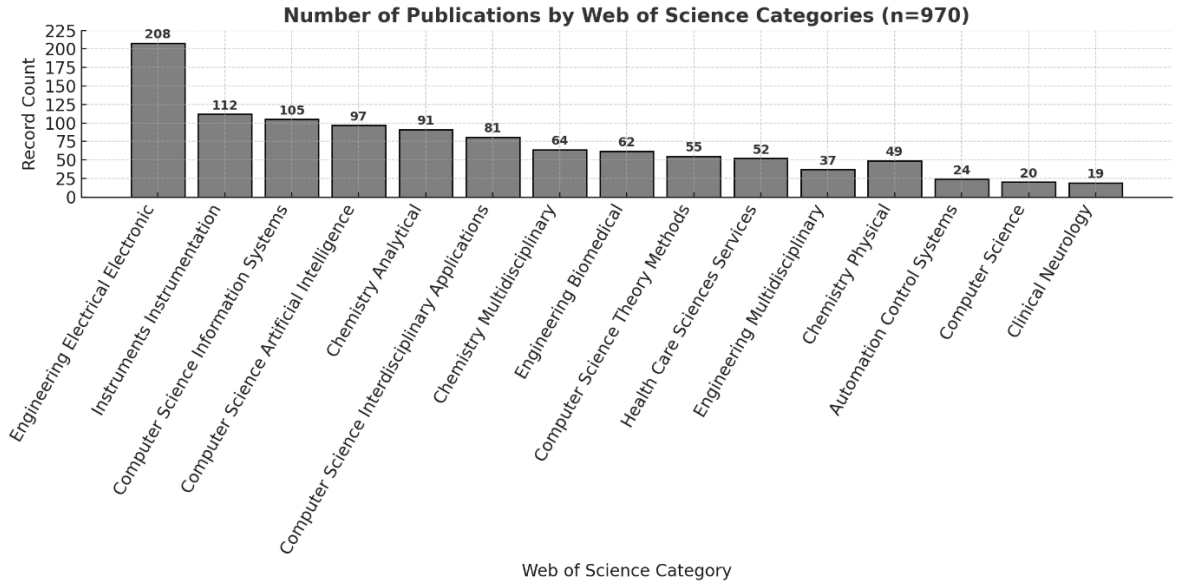


Figure 5. Web of Science Categories

3.2. Number of Citations by Year

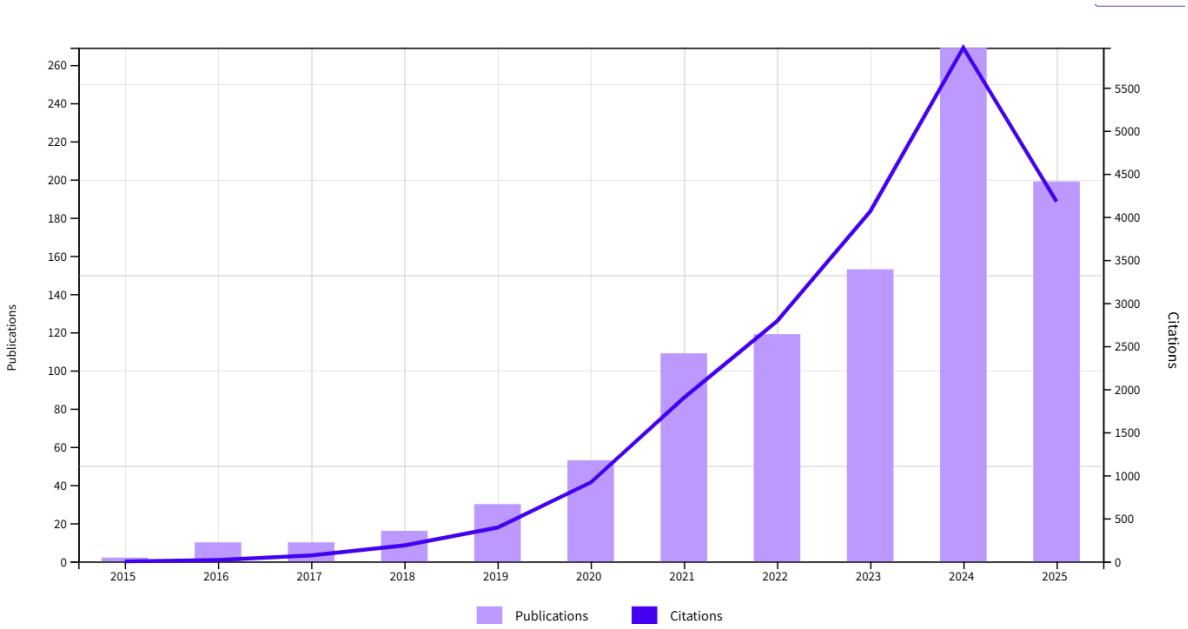


Figure 6. Number of Citations by Year

As illustrated in Figure 6, the annual number of citations shows a clear upward trend. Citations increased from 393 in 2019 to 916 in 2020, followed by 1,900 in 2021, 2,789 in 2022, 4,063 in 2023, and 5,963 in 2024. This consistent growth trajectory reflects the rapid expansion of AI-related research in smart textiles, which is further highlighted by the visualization obtained through bibliometric analysis.

Table 1 presents the ten most-cited publications in this field. The article “Fiber/Fabric-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators for Flexible/Stretchable and Wearable Electronics and Artificial Intelligence” (Dong et al., 2018), published in 2020, received a total of 1,060 citations. The article “End-to-End Design of Wearable Sensors” (Ates et al., 2022) received 686 citations, while “Recent Advances in Wearable Tactile Sensors: Materials, Sensing Mechanisms, and Device Performance” (Yang et al., 2020), published in 2017, received 609 citations. These three publications represent the top-cited works in the domain of AI-driven smart textiles.

Table 1. Most-Cited Publications

No	Publication Year	Article Title	Authors	Total Number of Citations
1	2017	Recent advances in wearable tactile sensors: Materials, sensing mechanisms, and device performance	Yang, TT; Xie, D; (...); Zhu, HW	609
2	2018	Deep learning algorithms for human activity recognition using mobile and wearable sensor networks: State of the art and research challenges	Nweke, HF; Teh, YW; (...); Alo, UR	563
3	2019	Multifunctional Skin-Inspired Flexible Sensor Systems for Wearable Electronics	Xu, KC; Lu, YY and Takei, K	516
4	2020	Fiber/Fabric-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators for Flexible/Stretchable and Wearable Electronics and Artificial Intelligence	Dong, K; Peng, X and Wang, ZL	1060
5	2020	Smart Textile-Integrated Microelectronic Systems for Wearable Applications	Shi, JD; Liu, S; (...); Tao, XM	599
6	2020	A High-Performance, Sensitive, Wearable Multifunctional Sensor Based on Rubber/CNT for Human Motion and Skin Temperature Detection	Zhang, ZX; He, TYY; (...); Lee, CK	333
7	2020	Myopia	Baird, PN; Saw, SM; (...); He, MG	483
8	2022	End-to-end design of wearable sensors	Ates, HC; Nguyen, PQ; (...); Dincer, C	686
9	2022	A High-Performance, Sensitive, Wearable Multifunctional Sensor Based on Rubber/CNT for Human Motion and Skin Temperature Detection	Lin, MZ; Zheng, ZJ; (...); Xu, CH	438
10	2024	Intelligent Wearable Systems: Opportunities and Challenges in Health and Sports	Yang, LY; Amin, O and Shihada, B	540

3.3 Co-Authorship Analysis (Co-authorship of Authors)

By applying the criteria of at least one publication and at least one citation, a network map was generated to identify the authors with the highest connectivity and collaboration**.** The co-authorship analysis revealed 6 clusters comprising 41 nodes (authors)**.** The network demonstrated 188 links with a total link strength of 201, indicating the collaborative structure of research in AI-driven smart textiles**.**

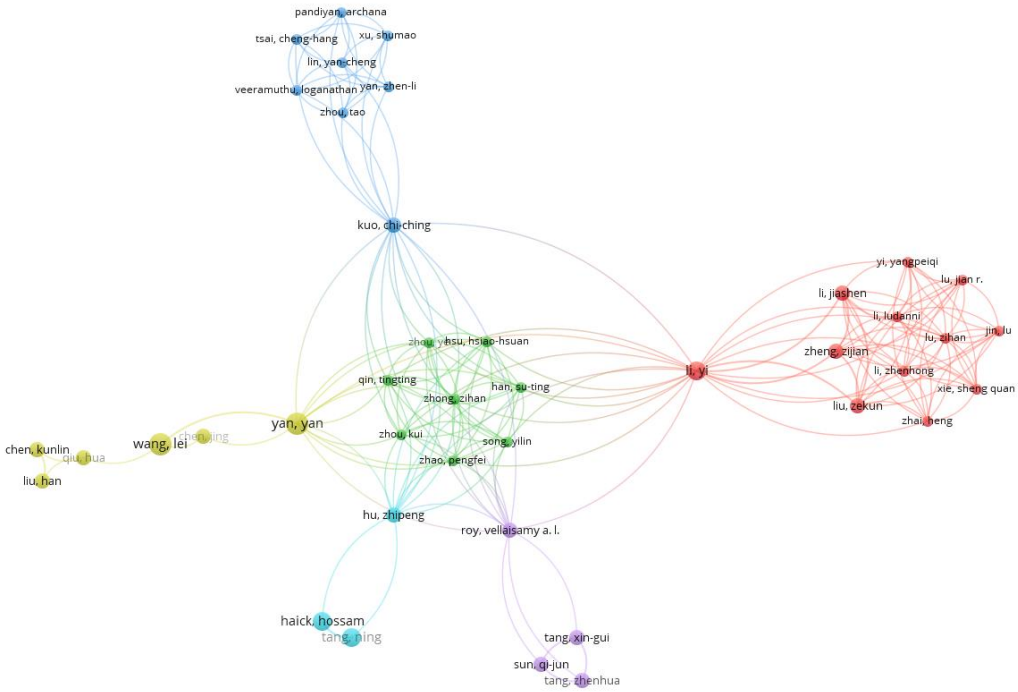


Figure 7. Co-Authorship network of authors (minimum 1 publication and 1 citation, ranked by highest link strength)

As shown in Figure 7, the co-authorship network analysis illustrates the collaboration structure and citation performance among researchers in the field of AI-driven smart textiles. In the network, nodes represent authors, edges indicate co-authored publications, and clusters, visualized in different colors, correspond to collaborative communities identified by VOSviewer.

According to the analysis, Lee Chengkuo is the most highly cited author, with 12 publications and 1,702 citations, representing the highest citation count in the field. Shong Lin Wang ranks second with 3 publications and 1,247 citations, followed by Zhong Lin Wang, who has 4 publications and 928 citations. This finding demonstrates that there is no direct linear relationship between the number of publications and total citations.

In contrast, the group with the strongest link strength consists of Elena Aguilar Aguilar, Maria Carmen Crespo, Silvia Cruz Gil, Roberto Daza, Ana Ramirez De Molina, Isabel Espinosa Salinas, Jorge Fernande Cabezas, Cristina M. Denandes Diaz, Julian Fierrea, and Gala Freixer. Although this author group produced only 2 publications with 38 citations, their high link strength reflects intensive co-authorship and intra-network collaboration, likely due to multiple authors contributing to the same publications.

3.4 Citation Analysis of Authors

To identify citation networks, an author citation analysis was conducted using the criteria of at least one publication and one citation. The analysis, performed on 439 connected units, revealed a network

consisting of 63 clusters and 711 nodes (authors), with a total of 2,606 links and an overall link strength of 2,696.

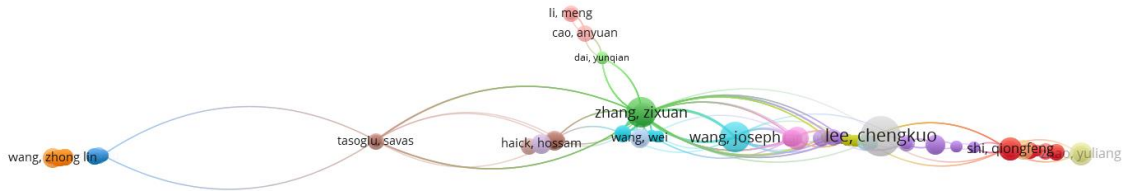


Figure 8. Citation analysis of authors (minimum 1 publication and 1 citation, ranked by highest link strength)

As shown in Figure 8, the author citation network illustrates the intensity of collaboration and the structural configuration of the research network in the field of AI-driven smart textiles. In this visualization, nodes represent authors, edges indicate co-authored publications, node size reflects the number of citations, and colors denote collaborative clusters identified in the network.

According to the analysis, the authors with the highest link strength are H. Ceren Ateş and Can Dinçer, forming a strategic hub in the network with 3 publications, 737 citations, and a total link strength of 148. Link strength reflects not only the number of publications but also the central position of an author within the collaboration network, meaning that authors with high link strength act as bridges within the co-authorship structure.

The second highest link strength belongs to Fırat Guder, with 3 publications, 741 citations, demonstrating that even with a limited number of publications, strong collaborative ties can yield a high strategic position in the network.

In terms of total citations, Lee Chengkuo ranks first with 12 publications and 1,702 citations, followed by Zhong Lin Wang with 3 publications and 1,247 citations, and Kai Dong with 2 publications and 1,077 citations. This finding indicates that the most highly cited authors are not always those with the highest link strength, emphasizing the distinction between citation impact and collaborative centrality in the network.

3.5. Citation Analysis of Countries

To visualize citation patterns by country of origin, a country-level citation network map was generated using the criteria of at least one publication and one citation per country. The analysis, based on 49 connected nodes (countries), identified 12 clusters, 225 links, and a total link strength of 478.

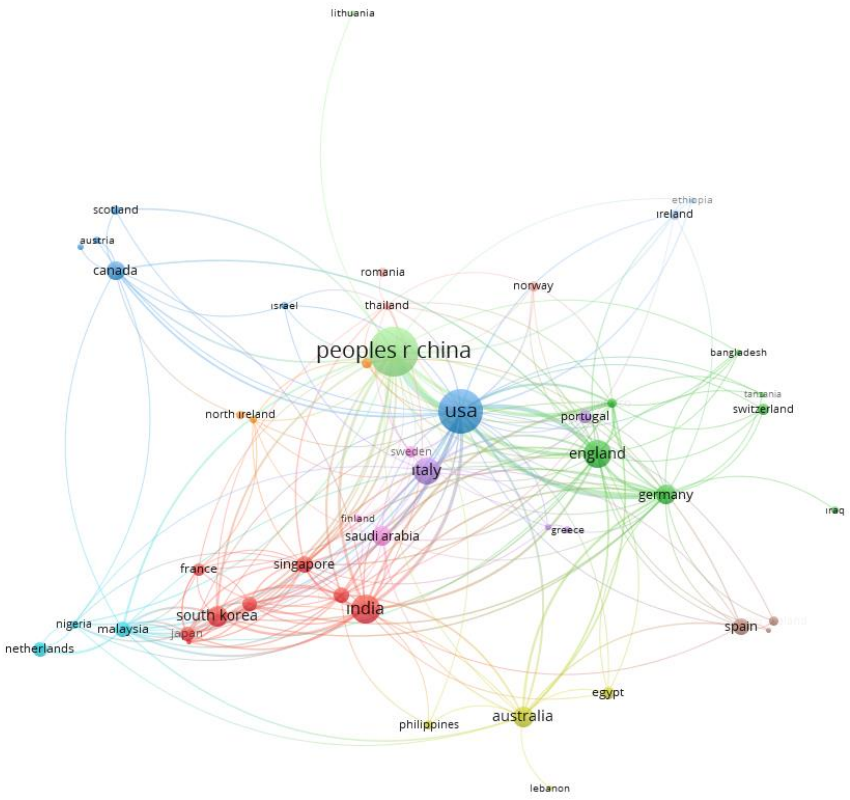


Figure 9. Citation Analysis of Countries (Minimum 1 Publication and 1 Citation, Ranked by Highest Link Strength)

As shown in Figure 9, the country-level citation network visualizes the international collaboration structure and citation performance in the field of AI-driven smart textiles. In this network, nodes represent countries, node size indicates the number of publications, colors denote collaborative clusters, and edges reflect co-authored publications between countries.

In terms of citation performance, the leading countries are China (9,233 citations), the United States (5,400 citations), Singapore (2,572 citations), and the United Kingdom (2,313 citations), which collectively occupy dominant positions in global citation impact.

Regarding total link strength, the United States (126), China (175), the United Kingdom (123), and Singapore (82) demonstrate the highest levels of international collaboration, highlighting that China and the United States not only produce the highest number of publications and citations but also maintain strong international research linkages.

In terms of publication output, the top five countries are China (258 publications), the United States (209), India (92), the United Kingdom (83), and Italy (80). This distribution underscores that China and the United States are central to the field in terms of publication volume, citation impact, and collaborative network positioning.

Overall, the network graph illustrates that AI-driven smart textile research is globally distributed yet highly concentrated around a few strategic countries. China and the United States serve as the primary hubs for scientific production and international collaboration, while countries such as the United

Kingdom, Singapore, and India play strategic roles within regional collaboration clusters. Moreover, strong linkages are particularly concentrated within the Europe (Germany, Italy, United Kingdom) – Asia (China, India, Singapore, South Korea) – North America (United States, Canada) triangle, demonstrating that international collaboration networks not only reflect publication and citation performance but also reveal the global diffusion and strategic partnerships in the field.

From a clustering perspective, the country-level citation and co-authorship networks indicate that most clusters are international rather than confined to a single nation. While China and the United States form the largest publication hubs, they are strongly connected to European and Asian countries such as the United Kingdom, Germany, Singapore, and India, reflecting transnational collaboration dynamics. Only a few smaller clusters, particularly those led by domestic research groups in China or India, display a more country-specific pattern. Overall, the clustering structure supports the conclusion that AI-enabled smart textile research has evolved into a globally interconnected domain rather than a regionally isolated field.

3.6. Keyword Analysis (Co-occurrence of Author Keywords)

The keyword co-occurrence analysis, conducted on 259 connected nodes (keywords) with a minimum occurrence threshold of three, identified 16 clusters, 2,634 links, and a total link strength of 4,522.

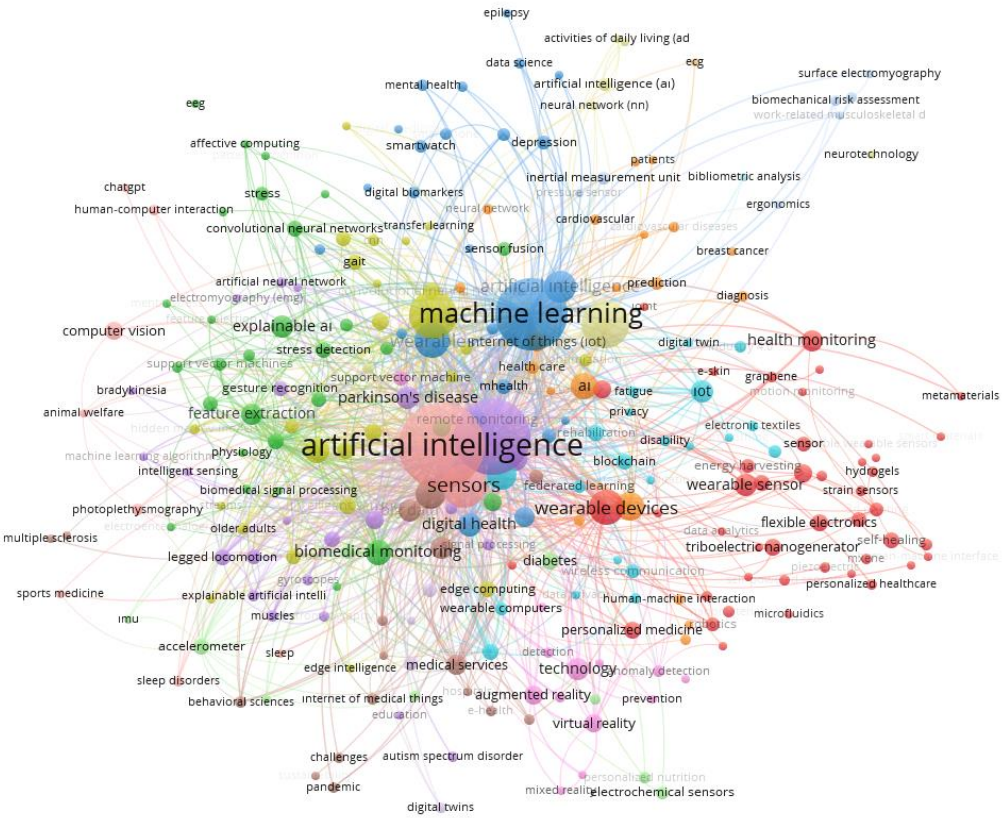


Figure 10. Keyword Co-Occurrence Analysis of Author Keywords (Minimum 3 Occurrences, Ranked by Highest Link Strength)

As shown in Figure 10, the keyword co-occurrence analysis illustrates the thematic structure of research in AI-driven smart textiles. In the network visualization, nodes represent author keywords, node size reflects keyword frequency, edges indicate co-occurrence relationships, and colors denote thematic clusters in the literature.

According to the analysis, the most frequently used keywords are “artificial intelligence” (251 occurrences), “wearable sensors” (200), “machine learning” (178), “wearable technology” (79), “deep learning” (78), and “sensors” (66). These findings indicate that the core research axes of the field revolve around artificial intelligence, machine learning, and wearable sensors.

In terms of total link strength, the keywords “artificial intelligence,” “wearable sensors,” “machine learning,” “sensors,” “deep learning,” and “wearable technology” also stand out. This demonstrates that the most frequently used keywords are simultaneously the most strategically connected concepts, forming the core thematic structure of the field. The colored clusters support the thematic mapping revealed in the content analysis. For example, the red clusters represent hardware- and material-oriented research, including wearable sensors, flexible electronics, and energy-harvesting smart textiles, whereas the blue and green clusters focus on artificial intelligence, deep learning, health monitoring, and digital health applications. Other clusters capture human–machine interaction, personalized healthcare, and data analytics–oriented studies. Overall, the keyword co-occurrence analysis not only reflects research trends but also reveals the multi-dimensional thematic structure of the field. The results clearly show that artificial intelligence, machine learning, and wearable sensor technologies occupy a central role in smart textile research, forming the strategic focal areas of the current literature.

3.7 Bibliographic Coupling of Documents (Bibliographic Coupling of Documents)

Bibliographic coupling occurs when two independent sources cite the same reference, establishing a link between the citing documents. In this study, the analysis was conducted on 683 connected documents that met the criterion of receiving at least one citation. The results revealed 13 clusters, 11.033 links, and a total link strength of 21.872.

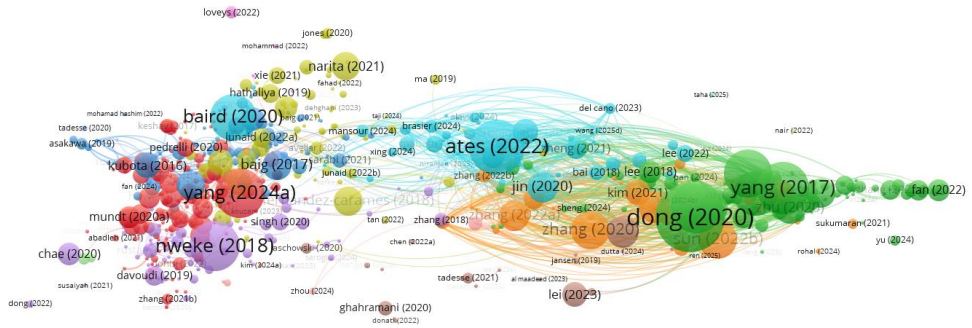


Figure 11. Bibliographic Coupling Analysis of Documents (Minimum 1 Citation, Ranked by Highest Link Strength)

As shown in Figure 11, the bibliographic coupling analysis of documents illustrates the literature structure and interaction patterns in the field of AI-driven smart textiles. In the network visualization, nodes represent publications, node size reflects the number of citations, colors indicate collaborative clusters, and edges represent bibliographic coupling links between publications. The analysis highlights both the citation performance of influential publications and their connectivity within the network.

Among the publications with the highest citation counts, the leading works are Dong (2020, 1,060 citations), Ates (2022, 686 citations), Yang (2017, 609 citations), Shi (2020, 599 citations), and Nweke (2018, 599 citations). These publications form the core literature of the field and are the most frequently referenced sources.

However, total link strength reveals a different perspective. Publications with the highest link strengths include Shi (2020, link strength 50), Zhang (2022a, 214), Dong (2021b, 228), and Chen (2025a, 3). This indicates that high citation counts do not necessarily correspond to high link strength. In other words, some publications are highly cited but peripheral in the bibliographic network, while others with fewer citations strategically connect diverse studies, occupying critical positions in the network.

Overall, Figure 11 shows that the literature of AI-driven smart textiles is multi-centric, comprising clusters of publications from different time periods, and that citation counts and link strengths do not always align. This bibliometric insight underscores that evaluating only citation counts is insufficient, and that the network position of publications is critical for understanding knowledge flow within the field.

3.8 Co-Citation Analysis of Authors (Co-citation of Cited-authors)

Co-citation refers to the occurrence of different sources being cited together in a single publication. In this study, an analysis conducted on 620 units (authors) with a minimum citation threshold of 10 identified 6 clusters, 75.724 links, and a total link strength of 229.238.

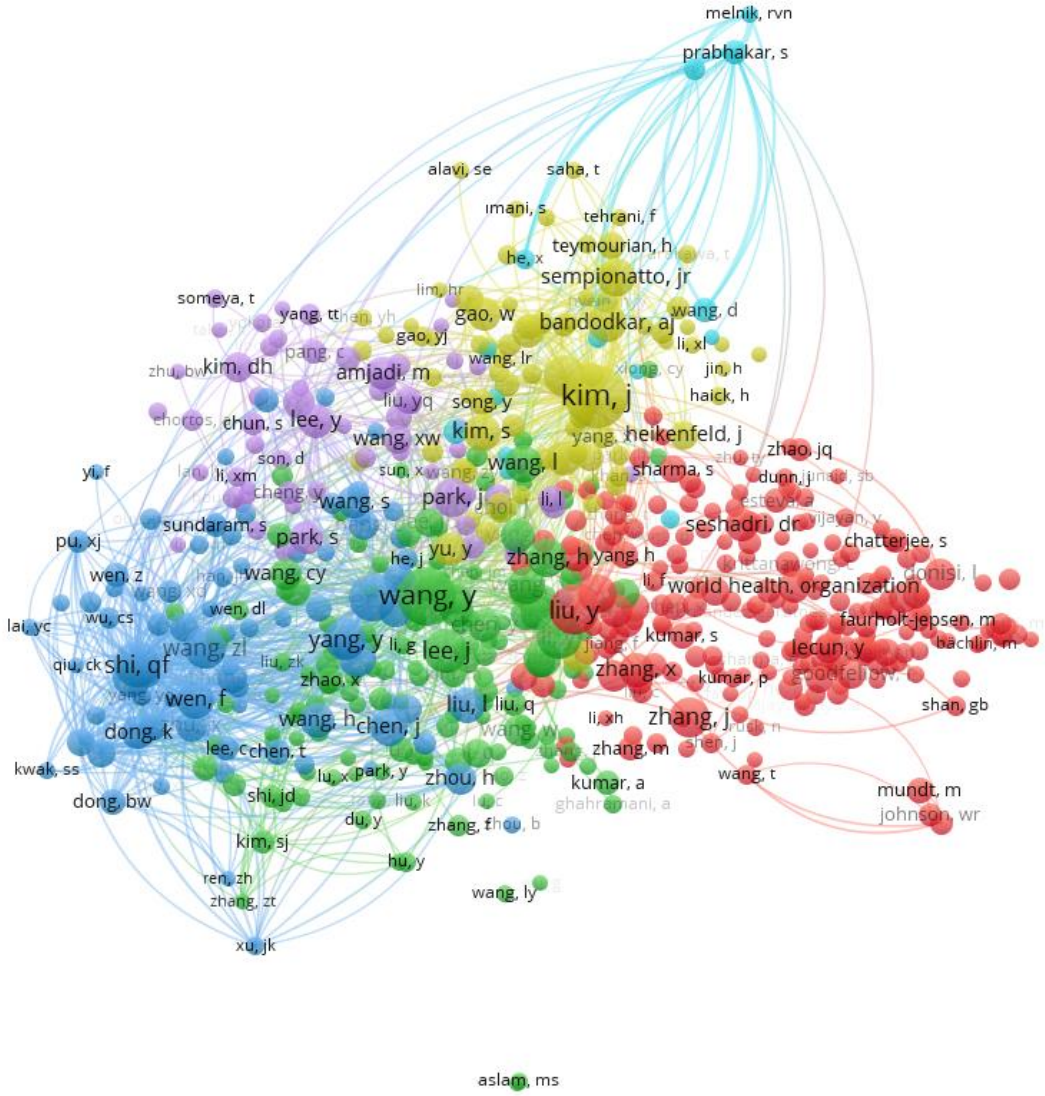


Figure 12. Co-Citation Analysis of Authors (Minimum 10 Citations, Ranked by Highest Link Strength)

As shown in Figure 12, the co-citation analysis of authors presents the knowledge structure of the field of AI-driven smart textiles. In this network visualization, nodes represent authors, node size reflects the number of citations, colors indicate co-citation clusters, and edges represent co-citation relationships among authors. This visualization highlights the core authors shaping the field's knowledge base, illustrating which researchers the literature is most centered around and the structural composition of co-citation clusters.

According to the analysis, the most frequently co-cited authors are J. Kim (144 citations), Y. Wang (122), Y. Liu (90), Qf. Shi (77), Y. Li (76), and J. Lee (76). These results indicate that these authors own the most frequently referenced works in literature and represent the core researchers shaping the intellectual foundation of the field.

In terms of total link strength, the leading authors are J. Kim (6.183), Y. Wang (5.860), Qf. Shi (5.641), Zl. Wang (4.474), and S. Lee (3.900). This demonstrates that authors with high link strength not only receive frequent citations but also occupy strategic positions by bridging diverse studies within

literature. In other words, while high citation counts enhance visibility, high link strength reflects the structural influence of an author in the field.

Overall, the co-citation network reveals that the literature in AI-driven smart textiles exhibits a multi-centric structure. The colored clusters represent different collaboration and co-citation communities, while authors such as J. Kim and Y. Wang serve as central nodes connecting these clusters. This finding confirms that knowledge flow in the field is concentrated around specific core authors, and that co-citation analysis is a critical tool for uncovering the intellectual structure and identifying the field's strategic authors.

3.9. Content Analysis

This study presents the content analysis of the most highly cited articles in the field of AI-driven smart textiles. Each article was manually coded in Microsoft Excel, and a thematic analysis was conducted. A total of 20 articles were examined, and their thematic distributions, research trends, and keyword frequencies were systematically analyzed.

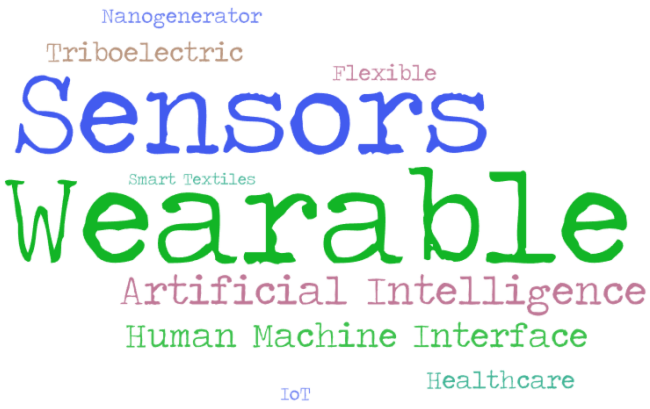


Figure 13. Word Cloud

Figure 13 illustrates the word cloud, reflecting the emerging research and application landscape resulting from the integration of artificial intelligence (AI) with smart textiles. The distribution of concepts highlights both the technological infrastructure and its practical applications, particularly in healthcare. The prominence of terms such as "Wearable" and "Sensors" indicates that research in this field is primarily centered on human-integrated systems capable of collecting and processing data in real time. In the word cloud visualization (Figure 13), the size of each keyword reflects its frequency within the analyzed publications, while color differences are applied for visual differentiation only and do not represent distinct thematic categories. From a technological foundation perspective, the terms "Nanogenerator" and "Triboelectric" emphasize the importance of energy efficiency and sustainability. These technologies allow smart textiles to generate their own energy, reducing dependency on external power sources. The keyword "Sensors" represents the core components responsible for real-time

collection of biometric and environmental data, including heart rate, body temperature, and movement, which are essential for health monitoring applications.

In terms of physical characteristics, the frequent occurrence of “Flexible” and “Wearable” suggests that these technologies are designed to be user-friendly and suitable for daily use. Their flexible structures enhance user comfort and, when combined with the wearability of textile technologies, enable the development of highly functional products.

The technological integration category is dominated by terms such as “Smart Textiles,” “Artificial Intelligence,” and “Human–Machine Interface”, highlighting the evolution of textile surfaces into active systems that not only collect data but also process and provide feedback to users. AI enables advanced functionalities such as health status tracking, anomaly detection, and personalized recommendations. Furthermore, “IoT” (Internet of Things) supports the integration of these devices into a broader digital health ecosystem, facilitating continuous and connected healthcare services.

Finally, in terms of application areas, the keyword “Healthcare” emerges as a primary focus, reflecting the dominance of medical and health-related applications in the field. Wearable devices enable early disease detection, chronic condition monitoring, remote care for elderly individuals, and rapid response to emergencies. For example, garments capable of tracking heart rhythms, analyzing body temperature variations, or monitoring stress levels could form the foundation of personalized healthcare services in the future.

In this context, the word cloud provides a concise visual summary of research trends and technological orientations, offering valuable insights into the evolution of smart textiles across healthcare, energy, and user-experience dimensions.

3.10. Thematic Analysis

This analysis covers the 20 most-cited articles in the field of wearable sensors and smart textiles. The articles were retrieved from the Web of Science (WoS) database and include studies published between 2017 and 2024. The content analysis was conducted using a thematic analysis approach, resulting in the identification of the following core themes:

1. Nanogenerator Technologies and Energy Harvesting

One of the primary challenges in wearable sensors is power supply. Nanogenerator technologies, particularly piezoelectric and triboelectric nanogenerators (TENGs), offer promising solutions to this issue. Dong, Peng, and Wang (2020) demonstrated that fiber/fabric-based nanogenerators enable mechanical energy harvesting and provide multi-functional, self-powered sensing capabilities.

Triboelectric sensors, in particular, are notable for their ability to harvest residual energy from low-frequency body movements and wirelessly transmit sensor data (Zhang et al., 2020). This technology has been successfully applied in wearable systems such as smart socks, offering effective solutions for gait analysis and virtual reality applications.

2. Health Monitoring and Medical Applications

Wearable sensors are driving a significant transformation in healthcare. Ates et al. (2022) emphasized that wearable devices can capture biophysical and biochemical information, enabling physiological monitoring and supporting the diagnostic process.

Similarly, a systematic review by Baig et al. (2017) highlighted that wearable patient monitoring systems have been applied in chronic diseases, rehabilitation, cardiovascular disorders, fall detection, and mental health monitoring. These systems hold the potential to address major healthcare challenges, including aging populations, chronic conditions, hospital costs, and medical errors.

3. Multi-Functional Sensing Systems

Modern wearable sensors are evolving from single-function devices to multi-functional systems. Lin et al. (2022) developed a rubber/CNT-based sensor capable of detecting both minor and large deformations while also measuring temperature. This multi-functional approach reduces the number of sensors required while enhancing overall performance.

A review by Xu et al., (2019) demonstrated that skin-like multi-functional sensor systems can possess self-healing, multi-modal sensing, and self-powered capabilities. These properties increase durability and reduce maintenance requirements, making them ideal for next-generation wearable applications.

4. Integration of Artificial Intelligence and Machine Learning

The integration of wearable sensors with AI technologies represents one of the most significant advancements in this field. Nweke et al. (2018) detailed how deep learning algorithms can be applied to human activity recognition in mobile and wearable sensor networks.

Similarly, Yang et al., (2024) highlighted that smart wearable systems, when integrated with AI algorithms, can enable innovative applications such as virtual coaches and virtual doctors, enhancing both healthcare and sports performance monitoring.

5. Human–Machine Interaction and Metaverse Applications

Wearable technologies are creating new paradigms in human–machine interaction. Sun et al. (2022) developed augmented tactile sensing and haptic feedback rings that provide comprehensive perception and feedback in metaverse-based virtual environments.

A review by Zhu et al., (2020) anticipates that next-generation human–machine interfaces will evolve with technologies ranging from machine-learning-assisted tactile perception to neuromorphic sensing systems, enhancing immersive and responsive interaction capabilities.

6. Smart Home and IoT Integration

Wearable sensors play a pivotal role in the Internet of Things (IoT) ecosystem. Dong et al. (2021) examined the technological evolution from self-powered sensors to AIoT-enabled smart homes,

demonstrating that 5G wireless communication combined with AI technologies can integrate numerous sensors into a cloud-based AIoT system.

Similarly, Fernández-Caramés and Fraga-Lamas (2018) focused on the development of IoT wearable devices and smart e-textiles for the Internet of Smart Clothing. This approach redefines technologies by merging fashion, engineering, interactivity, and user experience.

7. Materials Science and Manufacturing Technologies

Materials science plays a critical role in the development of wearable sensors. Yang et al. (2017) provided a comprehensive review detailing the materials, sensing mechanisms, and device performance of wearable tactile sensors.

Khosravani and Reinicke (2020) explored the role of 3D printing technologies in sensor fabrication, highlighting the advantages these techniques offer in sensor production. 3D printing provides high dimensional accuracy and smooth surface quality, enabling new opportunities in the design and fabrication of wearable sensors.

8. Specialized Applications and Sectoral Use

Wearable sensors are increasingly being applied in specialized domains. Baird et al. (2020) examined the use of wearable technology in myopia treatment, where it plays a key role in assessing demographic, genetic, and environmental risk factors.

Similarly, Liu et al. (2022) detailed the use of fiber-based strain sensors in motion detection, healthcare, human–machine interaction, and emerging entertainment applications.

Looking ahead, these technologies are expected to advance and become more widespread, with 5G technology, edge computing, and advanced AI algorithms driving the integration of wearable sensors into everyday life.

Limitations

This study has several methodological limitations. First, the data source was limited to the Web of Science (WoS), which may have excluded studies indexed in other major databases, such as Scopus or PubMed. Additionally, the analysis focused only on English-language publications within the 2015–2025 timeframe, which implies that pioneering studies published in other languages or earlier periods were not included.

Regarding the content analysis, the thematic coding of the 20 most-cited articles may contain elements of researcher subjectivity; the manual, Excel-based coding process is inherently more limited compared to automated and objective approaches such as text mining. Finally, some recent 2025 publications may not yet be indexed in the database, meaning that the most current research trends might not be fully captured.

4. Conclusion and Discussion

This study provides a comprehensive examination of the interdisciplinary growth, thematic trends, and methodological approaches in AI applications in smart textiles between 2015 and 2025, revealing the direction of scientific production in the field. Notably, the majority of studies are published in engineering (38%), computer science (32%), and chemistry (18%), reflecting the multi-dimensional nature of AI-driven smart textile technologies. These findings align with Wang et al. (2021), who reported a similar distribution of 42% in engineering and 35% in computer science in an AI-focused materials science bibliometric analysis. Global research productivity is dominated by China (258 publications) and the United States (209 publications). This pattern is consistent with Tao et al. (2020), who observed that these two countries produce more than 60% of global R and D outputs in sports science-related smart textile research.

The integration of AI, IoT, and energy-harvesting systems enhances the functionality of smart textiles but also introduces new challenges for resource efficiency. In particular, the use of triboelectric nanogenerators (TENGs) is directly linked to the energy demands of multifunctional sensors. Dong et al. (2020) demonstrated that TENGs can harvest energy from low-frequency human motions, supporting sensor energy autonomy. However, Lin et al. (2022) reported that multi-parameter sensors detecting temperature and deformation led to a 17% reduction in TENG output voltage. This observation confirms the functionality–energy consumption trade-off described by Stoppa and Chiolerio (2014). Furthermore, the bibliometric coupling results revealed that citation frequency does not always correspond to scientific influence. Publications with lower citation counts but higher link strengths play a critical role in connecting research clusters, highlighting the methodological importance of examining structural relationships beyond citation numbers.

Furthermore, Zhang et al. (2020) emphasized the need to re-model the relationship between material resistance (Ω) and mechanical stress (kPa) to address this efficiency trade-off, highlighting a critical engineering challenge for future self-powered smart textiles.

On the other hand, the integration of AI and IoT significantly increases data intensity, which can negatively impact energy performance. While Nweke et al. (2018) demonstrated that deep learning models operate effectively with distributed sensor data, Dong et al. (2021) reported that this increased data traffic reduces TENG efficiency by 22% in 5G/AIoT systems. This challenge has been referred to as the “energy–bandwidth paradox,” which necessitates low-power communication protocols and edge computing solutions to achieve an optimal balance.

User acceptance and aesthetic design remain major barriers to widespread adoption, despite technological advances. Fernández-Caramés and Fraga-Lamas (2018) reported that 73% of users expressed reluctance toward medical-looking wearable devices due to aesthetic concerns, resulting in daily usage rates dropping below 40%. Similarly, Guo et al. (2025) identified a 68% user rejection rate for flexible electronics, emphasizing the importance of detachable sensor modules and modular design approaches proposed by Jiao and Liu (2025) to improve usability and acceptance.

From an economic perspective, cost analyses support the commercial viability of these technologies. Comparative analyses by Shi et al. (2020) and Yang et al. (2024) indicated that TENG-based systems achieve 90.4% cost savings in energy components and 61.5% in overall system costs. These figures are consistent with the 88–92% range reported in the systematic review by Kumar et al. (2025), highlighting the economic advantage of energy-harvesting smart textiles.

The ethical and regulatory dimension of AI-driven smart textiles remains insufficiently structured. Ates et al. (2022) highlighted that 89% of wearable sensors do not utilize GDPR- or HIPAA-compliant encryption, raising significant data security and privacy concerns. While Zhang et al. (2022) proposed blockchain-based data processing, Khosravani and Reinicke (2020) emphasized the integration of physical data isolation layers into system architecture. A lack of standardization further compounds these challenges: Baird et al. (2020) noted that the absence of IEC/ISO protocols for smart textiles renders quality assurance arbitrary, whereas Henkin et al. (2025) drew attention to the lack of algorithmic transparency in AI applications in healthcare. Revising existing protocols, such as IEEE 802.15.6, to accommodate textile-oriented requirements will be crucial to closing this gap.

Looking ahead, three strategic axes emerge for future research and implementation: (1) System-level optimization that balances energy and data flow, (2) User-centered design approaches combining aesthetics and functionality and (3) Institutionalization of ethical and regulatory frameworks.

Zhu et al. (2020) suggested that self-healing polymers could enhance TENG efficiency, an approach that gains technical feasibility with photonic integrated circuits operating at 0.34 pJ energy consumption, as demonstrated by Ren et al. (2025). On the policy front, expanding FDA classifications for wearable medical devices and collaborating with the fashion industry may improve social acceptance.

However, the exclusive reliance on the Web of Science (WoS) database represents an important methodological limitation, consistent with Padulo (2025), who emphasized the necessity of multi-database searches in bibliometric research.

Unlike previous bibliometric studies focusing on general smart textile research (e.g., Tao et al., 2020; Wang et al., 2021), this study specifically integrates AI-oriented bibliometric mapping with qualitative thematic coding, providing a dual-layered analytical framework that reveals not only publication trends but also conceptual evolution. This dual approach constitutes the main originality of the study, highlighting its contribution to bridging quantitative bibliometric patterns with qualitative thematic insights in the context of AI-enabled smart textiles.

In conclusion, AI-based solutions in smart textiles should be evaluated not only from a technological standpoint but also through the lenses of ethics, sustainability, and user experience. Future research should focus on data security (e.g., blockchain), flexible material systems (e.g., 4D printing), and quality standardization (e.g., industrial protocols) to accelerate the safe, sustainable, and socially acceptable adoption of smart textile technologies. In addition to the bibliometric and thematic findings, a forecast analysis was performed to estimate future publication trends. Based on the growth trajectory observed between 2015 and 2024, the number of publications in 2025 is projected to exceed 300 by the end of the

year. This upward trend indicates that research interest in AI-enabled smart textiles will continue to expand, reflecting the growing interdisciplinary nature and technological integration of the field.

Conflict of Interest Statement

The authors declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Author Contribution Statement

The authors declare that they contributed equally to this manuscript.

References

Ahmad RUS., Khan WU., Khan MS., Cheung P. Emerging rapid detection methods for the monitoring of cardiovascular diseases: Current trends and future perspectives. Materials Today Bio 2025; 32: 101663. https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101663

Aria M., Cuccurullo C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetric 2017; 11(4): 959–975. https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007

Ates HC., Nguyen PQ., Gonzalez-Macia L., Morales-Narváez E., Guder F., Collins JJ., Dincer C. End-to-end design of wearable sensors. Nature Reviews Materials 2022; 7(11): 887–907. https://doi.org/10.1038/s41578-022-00433-0

Avellar LM., Stefano Filho CA., Delgado G., Frizera A., Rocon E., Leal-Junior A. AI-enabled photonic smart garment for movement analysis. Scientific Reports 2022; 12(1): Article 4067. https://doi.org/10.1038/s41598-022-08048-9

Baig MM., Gholam Hosseini H., Moqeem AA., Mirza F., Lindén, M. A systematic review of wearable patient monitoring systems, current challenges and opportunities for clinical adoption. Journal of Medical Systems 2017; 41(7): 115. https://doi.org/10.1007/s10916-017-0760-1

Baird PN., Saw SM., Lanca C., Guggenheim JA., Smith EL., Zhou X., He M. Myopia. Nature Reviews Disease Primers 2020; 6(1): 99. https://doi.org/10.1038/s41572-020-00231-4

Cen L., Zhao W. Deep learning for intelligent textile defect detection. Textile Research Journal 2022; 92(13): 1950–1965. https://doi.org/10.1177/00405175211043769

Dejene BK. Wearable smart textiles for mood regulation: A critical review of emerging technologies and their psychological impacts. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2025; 55: 1–83. https://doi.org/10.1177/15280837251314190

Ding Y., Chowdhury GG., Foo S. Bibliometric cartography of information retrieval research by using co-word analysis. Information Processing and Management 2001; 37(6): 817-842. https://doi.org/10.1016/S0306-4573(00)00051-0

Dong B., Shi Q., Yang Y., Wen F., Zhang Z., Lee C. Technology evolution from self-powered sensors to AIoT enabled smart homes. Nano Energy 2021; 79: 105414.

Dong K., Peng X., Wang ZL. Fiber/fabric-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators for flexible/stretchable and wearable electronics and artificial intelligence. Advanced Materials 2020; 32(5): 1902549. https://doi.org/10.1002/adma.201902549

Donthu N., Kumar S., Mukherjee D., Pandey N., Lim WM. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research 2021; 133; 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Ergoktas MS., Bakan G., Steiner P., Bartlam C., Malevich Y., Ozden-Yenigun E., He G., Karim N., Cataldi P., Bissett MA., Kinloch IA., Novoselov KS., Kocabas C. Graphene-enabled adaptive infrared textiles. Nano Letters 2020; 20(7): 5346–5352. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01694

Fernández-Caramés TM., Fraga-Lamas P. Towards the Internet of smart clothing: A review on IoT wearables and garments for creating intelligent connected e-textiles. Electronics 2018; 7(12): 405. https://doi.org/10.3390/electronics7120405

Guo YS., Huo PY., Huang SS., Gou GY., Li QL. Multi-receptor skin with highly sensitive tele-perception somatosensory flexible electronics in healthcare: Multimodal sensing and AI-powered diagnostics. Advanced Healthcare Materials 2025; Advance online publication. https://doi.org/10.1002/adhm.202502901

Henkin S., Venishetty N., Howell S., Deebel NA., Muthigi A. Artificial intelligence for risk stratification of acute pulmonary embolism: Perspectives on clinical needs, expanding toolkit, and pathways forward. American Journal of Cardiology 2025; 252: 40–48. https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2025.05.025

https://www.ultralytics.com/blog/the-future-of-textile-production-with-ai-driven-manufacturing (Acessed: 01.08.2025)

https://www.serkon.ai/en/post/revolutionizing-fabric-quality-surface-control-with-artificial-intelligence-qbar-ai (Acessed: 01.08.2025)

https://www.uspar.com.tr (Acessed: 01.08.2025)

Jiao XY., Liu YJ. Multifunctional polypyrrole-based flexible composite materials for next-generation smart material: Integrated piezoresistive sensing, energy storage, electrothermal heating, and UV protection. Composites Part B: Engineering 2025; 305: 112726. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112726

Jin XF., Liu CH., Xu TL., Su L., Zhang XJ. Artificial intelligence biosensors: Challenges and prospects. Biosensors and Bioelectronics 2020; 165: 112412.

Khosravani MR., Reinicke T. 3D-printed sensors: Current progress and future challenges. Sensors and Actuators A: Physical 2020; 305: 111916. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111916

Kong L., Song J., Fang Z., Chen H., Fan C., Zhang Z., Pan Y., Qi L. Artificial intelligence-assisted wearable electronics for human-machine interfaces. Device 2025; 3: Article 100707. https://doi.org/10.1016/j.device.2025.100707

Kumar R., Bogia P., Ul Haq A., Singh V., Reddy TO. Leveraging artificial intelligence and machine learning in sport sciences: A systematic literature review of applications, outcomes, and future directions. Sport Sciences for Health 2025; Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s11332-025-01482-y

Kumar B. AI-powered smart textiles: Integrating machine learning in wearable technologies. International Journal of Scientific Research and Engineering Development 2025; Volume 8: Issue 3.

Lin M., Zheng Z., Yang L., Luo M., Fu L., Lin B., Xu C. A high-performance, sensitive, wearable multifunctional sensor based on rubber/CNT for human motion and skin temperature detection. Advanced Materials 2022; 34(1): Article 2107309. https://doi.org/10.1002/adma.202107309

Liu ZK., Zhu TX., Wang JR., Zheng ZJ., Li Y., Li JS., Lai YK. Functionalized fiber-based strain sensors: Pathway to next-generation wearable electronics. Nano-Micro Letters 2022; 14(1): 61.

Malashin I., Martysyuk D., Tynchenko V., Gantimurov A., Nelyub V., Borodulin A., Galinovsky A. Machine learning in polymeric technical textiles: A review. Polymers 2025; 17: 1172. https://doi.org/ 10.3390/polym17091172

McCain KW. Mapping authors in intellectual space: A technical overview. Journal of the American Society for Information Science 1990; 41(6): 433–443.

Michelson Freya. Smart fabrics and textile-based sensors for continuous health monitoring. J Biomed Syst Emerg Technol 2024; 205.

Newman MEJ. The structure of scientific collaboration networks. Proceedings of the National Academy of Sciences 2001; 98(2): 404–409.

Nweke HF., Teh YW., Al-Garadi MA., Alo UR. Deep learning algorithms for human activity recognition using mobile and wearable sensor networks: State of the art and research challenges. Expert Systems with Applications 2018; 105: 233–261. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.056

Padulo J. Sport and health science: Interdisciplinary approaches to modern challenges. British Medical Bulletin 2025; 155(1): ldaf007. https://doi.org/10.1093/bmb/ldaf007

Pereira C., Pereira AM., Freire C., Pinto TV., Costa RS., Teixeira JS. Nanoengineered textiles: from advanced functional nanomaterials to groundbreaking high-performance clothing. In: Hussain MC, editor. Handbook of Functionalized Nanomaterials for Industrial Applications. Elsevier 2020; 611–714.

Ren ZH., Zhang ZX., Zhuge YY., Xiao Z., Xu SY., Zhou JK., Lee CK. Near-sensor edge computing system enabled by a CMOS compatible photonic integrated circuit platform using bilayer AlN/Si waveguides. Nano-Micro Letters 2025; 17(1): 261. https://doi.org/10.1007/s40820-025-01743-y

Shah MA., Pirzada BM., Price G., Shibiru AL., Qurashi A. Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review. Journal of Advanced Research 2022; 38: 55–75. https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.01.008

Shi J., Liu S., Zhang L., Yang B., Shu L., Yang Y., Ren M., Wang Y., Chen J., Chen W., Chai Y., Tao X. Smart textile-integrated microelectronic systems for wearable applications. Advanced Materials 2020; 32(5): 1901958. https://doi.org/10.1002/adma.201901958

Stoppa M., Chiolerio, A. Wearable electronics and smart textiles: A critical review. Sensors 2014; 14(7): 11957–11992. https://doi.org/10.3390/s140711957

Sun Z., Zhu M., Shan X., Lee C. Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions. Nature Communications 2022; 13(1): 5224. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32745-8

Tang C., Yi W., Xu M., Jin Y., Zhang Z., Chen X., Liao C., Smielewski P., Occhipinti L. G. A deep learning-enabled smart garment for accurate and versatile monitoring of sleep conditions in daily life. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2025; 122(7): e2420498122. https://doi.org/10.1073/pnas.2420498122

Tang C., Yi W., Xu M., Jin Y., Zhang Z., Chen X., Liao C., Smielewski P., Occhipinti LG. AI-driven smart sportswear for real-time fitness monitoring using textile strain sensors. arXiv preprint 2025; arXiv:2504.08500. https://arxiv.org/abs/2504.08500

Tao X., Chen Y., Wang L. Global trends of smart textiles research: A bibliometric analysis. Textile Research Journal 2020; 90(17–18): 2007–2020. https://doi.org/10.1177/0040517520907176

Wang H., Liu Y., Zhan Z. Artificial intelligence in materials science: A bibliometric analysis (2010–2021). Materials Today: Proceedings 2021; 47: 1236–1242. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.05

Wicaksono I., Hwang PG., Droubi S., Wu FX., Serio AN., Yan W., Paradiso JA. 3DKnITS: Three-dimensional digital knitting of intelligent textile sensor for activity recognition and biomechanical monitoring. IEEE in Medicine and Biology Society 2022. https://www.media.mit.edu/publications/3dknits-three-dimensional-digital-knitting-of-intelligent-textile-sensor-for-activity-recognition-and-biomechanical-monitoring/

Xu K., Lu Y., Takei K. Multifunctional skin-inspired flexible sensor systems for wearable electronics. Advanced Materials Technologies 2019; 4(3): 1800628. https://doi.org/10.1002/admt.201800628

Van Eck, NJ., Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics 2010; 84(2): 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Yadav A., Yadav K. Transforming healthcare and fitness with AI powered next-generation smart clothing. Discover Nano 2025; 2(1): 18.

Yang LY., Amin O., Shihada B. Intelligent wearable systems: Opportunities and challenges in health and sports. ACM Computing Surveys 2024; 56(7): 190.

Yang TT., Xie D., Li ZH., Zhu HW. Recent advances in wearable tactile sensors: Materials, sensing mechanisms, and device performance. Materials Science and Engineering R: Reports 2017; 115: 1-37.

Yetisen AK., Qu H., Manbachi A., Butt H., Dokmeci MR., Hinestroza JP. Nanotechnology in textiles. ACS Nano. 2016; 10(3): 3042–68.

Yin XY., Zhang Y., Cai XB., Guo QQ., Yang J., Wang ZL. 3D printing of ionic conductors for high-sensitivity wearable sensors. Materials Horizons 2019; 6(4): 767-780.

Zhang Z., He T., Zhu M., Sun Z., Shi Q., Zhu J., ... Lee C. Deep learning-enabled triboelectric smart socks for IoT-based gait analysis and VR applications. npj Flexible Electronics 2020; 4(1): 29. https://doi.org/10.1038/s41528-020-00092-7

Zhang Z., Wen F., Sun Z., Guo X., He T., Lee C. Artificial intelligence-enabled sensing technologies in the 5G/Internet of Things era: From virtual reality/augmented reality to the digital twin. Advanced Intelligent Systems 2022; 4(7): 2100228. https://doi.org/10.1002/aisy.202100228

Zhao P., Song Y., Hu Z., Zhong Z., Li Y., Zhou K., Qin T., Yan Y., Hsu HH., Han ST., Roy VAL., Kuo CC., Zhou Y. Artificial intelligence enabled biodegradable all-textile sensor for smart monitoring and recognition. Nano Energy 2024; 130: Article 110118. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110118

Zhu M., He T., Lee C. Technologies toward next generation human machine interfaces: From machine learning enhanced tactile sensing to neuromorphic sensory systems. Applied Physics Reviews 2020; 7(3): 031305. https://doi.org/10.1063/5.0016485

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1404-1430, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1404-1430, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Kampüs Yaşam Merkezlerinde Kullanıcı Odaklı Performans Değerlendirmesi

Hatice Kübra ÖNCEL[1], İrem KÖSE[2*]

[1] Hasan Kalyoncu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Mimari Tasarım Anabilim Dalı, Gaziantep
[2] Hasan Kalyoncu Üniversitesi Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü Mimari Tasarım Anabilim Dalı, Gaziantep

[1] https://orcid.org/0009-0009-4416-9864
[2] https://orcid.org/0000-0002-9994-3767
*Sorumlu yazar: irem.erkurt@hku.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 16.09.2025
Kabul tarihi: 08.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Kullanım sonrası değerlendirme
Kampüs sosyal merkezleri
Mimari performans
Kullanıcı memnuniyeti

ÖZ

Üniversite kampüslerinde yer alan sosyal merkez yapıları, öğrencilerin akademik faaliyetlerinin yanı sıra sosyal ve kültürel ihtiyaçlarını karşılayan, aidiyet duygusunu güçlendiren ve öğrenme süreçlerine dolaylı katkı sağlayan mekânlar olarak önem taşımaktadır. Bu yapıların kullanıcı odaklı biçimde değerlendirilmesi, hem mevcut mekânsal kaliteyi ortaya koymakta hem de gelecekteki tasarım ve planlama süreçleri için yol gösterici olmaktadır. Bu çalışma, Harran Üniversitesi Osmanbey Kampüsü'nde yer alan Yaşam Merkezi'nin kullanım sonrası değerlendirmesini (KSD/POE) gerçekleştirerek, yapının estetik, işlevsel ve teknik açılardan kullanıcı beklentilerini ne ölçüde karşıladığını incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırma, karma yöntemli bir yaklaşım ile yürütülmüş; nitel veriler gözlem ve mekânsal analizlerle, nicel veriler ise kullanıcı anketi ile toplanmıştır. Katılımcılardan elde edilen veriler istatistiksel analizler aracılığıyla değerlendirilmiş, nitel bulgularla desteklenerek bütüncül bir çerçeve oluşturulmuştur. Araştırma bulguları, yapının tasarımında estetik unsurların önceliklendirildiğini, buna karşın işlevsellik ve teknik performans boyutlarında çeşitli eksikliklerin bulunduğunu göstermektedir. Özellikle erişilebilirlik, iç mekân dolaşımı ve kullanıcı konforuna ilişkin faktörler geliştirilmesi gereken alanlar olarak öne çıkmıştır. Sonuç olarak, çalışma sosyal merkez yapılarının kullanıcı deneyimlerine dayalı olarak değerlendirilmesinin, hem mimari tasarım kararlarının iyileştirilmesine hem de üniversite kampüslerinde sürdürülebilir, kapsayıcı ve kullanıcı dostu mekânların geliştirilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Evaluating Campus Life Centers through Occupant-Centered Performance

Research Article

Article History:
Received: 16.09.2025
Accepted: 08.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Post-occupancy evaluation
Campus life center
Architectural performance
Occupant satisfaction

ABSTRACT

Social centers on university campuses function not only as support facilities for academic life but also as essential spaces that foster social interaction, cultural activities, and a sense of belonging. Assessing these buildings from the occupants' perspective is vital for identifying spatial strengths and weaknesses and for informing future design and planning strategies. This study presents a post-occupancy evaluation (POE) of the Life Center at Harran University's Osmanbey Campus. The aim is to examine how effectively the building meets occupant expectations regarding aesthetic, functional, and technical performance. A mixed-method approach was applied: qualitative data were collected through on-site observation, spatial analysis, and project documentation, while quantitative data were gathered via a structured questionnaire distributed to campus users. The integration of these methods

enabled a holistic assessment of building performance. Findings show that while aesthetic features, such as the overall appearance and central courtyard canopy, were positively perceived, deficiencies appeared in functional and technical dimensions. Problems related to accessibility, circulation, thermal comfort, and indoor environmental quality were emphasized. In conclusion, occupant-centered evaluations provide essential feedback for improving architectural design quality and support the creation of sustainable, inclusive, and user-friendly campus facilities, offering practical insights for architects, planners, and administrators.

To Cite: Öncel HK., Köse İ. Kampüs Yaşam Merkezlerinde Kullanıcı Odaklı Performans Değerlendirmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1404-1430.

1. Giriş

Üniversiteler, yalnızca eğitim ve araştırma faaliyetlerinin yürütüldüğü alanlar değil, aynı zamanda öğrencilere çeşitli yaşam olanakları sunan mekânlar olarak da işlev görmektedir. Kent nüfusunun artışı ve kentleşmenin etkisiyle üniversiteler, zamanla şehir sınırlarının dışına çıkarak daha geniş alanlara yayılmaya başlamıştır. Bu durum, kampüslerin yalnızca eğitim süreçlerini destekleyen yapılar değil, aynı zamanda sosyal ve kültürel etkinliklere olanak sağlayan yaşam alanları olarak tasarlanmasının gerekliliğini ortaya koymuştur. Kampüslerde öğrencilerin kişisel ve sosyal gelişimlerini destekleyecek mekânların bulunması, aidiyet duygusunun güçlenmesine katkıda bulunmakta ve dolayısıyla öğrenme performanslarını olumlu yönde etkilemektedir (Turk ve ark., 2015). Bu bağlamda kampüs yapılarının incelenmesi, hem öğrencilerin fiziksel ve zihinsel sağlığı hem de üniversitelerin gelişim hedefleri açısından kritik bir öneme sahiptir (Hajrasouliha, 2017).

Kullanım Sonrası Değerlendirme (KSD), tasarımcılar, planlamacılar ve yöneticiler için yapının performansını ölçmeye imkân sağlayan etkili bir yöntemdir (Hassanain ve ark., 2020). Bu süreç, mekânların sürekli olarak iyileştirilmesini ve bir kalite ölçütü olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Adewunmi ve ark., 2011). KSD, tasarım sürecinde geri bildirim döngüsünün tamamlanmasına katkı sunarak benzer hataların tekrar edilmesini önlemektedir (Göçer ve ark., 2018). Ancak literatürde KSD'nin kampüs yapıları üzerinde uygulanmasının sınırlı olduğu görülmektedir (Hajrasouliha, 2017). Özellikle sosyal mekânlara yönelik çalışmalar oldukça azdır; nitekim Günaçar ve Erbil (2022)'nin, üniversite kampüs yapıları üzerine yapılan araştırmaların yalnızca %5'inin KSD ile ilgili olduğunu belirtmektedir.

Sosyal merkez yapıları, üniversite kampüslerinde sosyal ilişkilerin en yoğun yaşandığı mekânlardır. Çeşitli kültürel ve sosyal kimliklerden bireylerin bir araya geldiği bu yapılar, öğrencilerin ders dışı zamanlarının önemli bir bölümünü geçirdikleri ve aynı zamanda akademik ve idari personelin de faydalandığı alanlar olarak dikkat çekmektedir. Dolayısıyla sosyal merkezlerin işlevsel, estetik ve teknik açıdan kullanıcı dostu biçimde tasarlanması önem taşımaktadır. Bu yapılara ilişkin kullanım sonrası değerlendirmeler, mevcut güçlü ve zayıf yönlerin açığa çıkarılmasına katkı sağlamakta ve gelecekte benzer yapıların tasarımına yol göstermektedir.

Türkiye'de 2023–2024 eğitim-öğretim yılı itibarıyla 208 yükseköğretim kurumunda 7.081.289 öğrenci ve 184.566 öğretim elemanı bulunmaktadır (YÖK, 2024). Bu genişleme, kampüslerde sosyal

mekânların nitelikli biçimde planlanmasının önemini artırmaktadır. Bu bağlamda çalışmanın amacı, Şanlıurfa Harran Üniversitesi Yaşam Merkezi örneğinde kullanım sonrası değerlendirme yöntemlerini uygulayarak yapının estetik, işlevsel ve teknik özelliklerinin kullanıcı algıları doğrultusunda analiz edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, araştırma karma yöntem yaklaşımı ile tasarlanmış; nicel kullanıcı anketlerinden elde edilen performans verileri, nitel mekânsal gözlemler ve dokümantasyon analiziyle desteklenmiştir. Böylece, yakınsayan paralel tasarım modeli çerçevesinde estetik, işlevsel ve teknik boyutlar nitel bulgularla desteklenerek çok yönlü biçimde değerlendirilmiştir.

Bu araştırma, sosyal merkez yapılarının performansını kullanıcı deneyimlerine dayalı olarak inceleyerek, mimari tasarım ve planlama alanına katkı sunmayı hedeflemektedir. Çalışmanın temel araştırma sorusu şu şekilde belirlenmiştir: "Harran Üniversitesi Yaşam Merkezi, estetik, işlevsel ve teknik açılardan kullanıcıların beklenti ve ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılamaktadır?"

1.1. Yükseköğretim Bağlamında Kullanım Sonrası Değerlendirme Üzerine Literatür İncelemesi

Kullanım Sonrası Değerlendirme (POE/KSD), başlangıçta "binalar inşa edildikten ve bir süre kullanıldıktan sonra sistematik ve titiz bir biçimde değerlendirilmesi" olarak tanımlanmıştır (Preiser ve ark., 2015). Zamanla, tamamlanmış binaların performansını ve kullanıcı memnuniyetini anlamaya dönük her türlü etkinliği kapsayacak şekilde genişlemiştir (Lin ve ark., 2025). Bu evrim, KSD'yi yalnızca teknik bir denetim aracı olmaktan çıkarıp kullanıcı deneyimini görünür kılan davranış-çevre odaklı bir geri bildirim mekanizmasına dönüştürmüştür (Zimring ve Rosenheck, 2001). Yöntemsel olarak KSD, öznel veriler (kullanıcı algısı ve memnuniyet) ile nesnel ölçümleri (fiziksel/çevresel göstergeler) birlikte kullanır (Li ve ark., 2018); geleneksel uygulamalar ise anket, görüşme ve yerinde gözlem tekniklerine dayanır (Göçer ve ark., 2015). Preiser (1995) 'in sınıflaması, kapsam ve derinliğe göre gösterge niteliğinde, araştırmacı ve tanısal olmak üzere üç düzeyi tanımlar; bu ayrım zaman/maliyet ile veri derinliği arasında rasyonel seçim yapmayı kolaylaştırır.

Ayrıca KSD çalışmalarında yapılar, kullanıcı gereksinimleriyle doğrudan bağlantılı parametreler üzerinden değerlendirilmektedir. Van der Voordt ve Wegen (2007), bu parametreleri dört ana grupta toplamıştır: işlevsel (verimlilik, erişilebilirlik, esneklik, sürdürülebilirlik vb.), teknik (yapısal güvenlik, çevreyle denge, yangın güvenliği, yapı fiziği), estetik (görsel kalite, kültürel değerler, düzen/karmaşıklık) ve ekonomik-yasal (yatırım ve kullanım giderleri, mevzuat uyumu). Bu çalışmada da yapının performansı söz konusu parametreler çerçevesinde ele alınmaktadır.

POE'nin amaç ve göstergeleri bina tipine göre farklılaşmaktadır: konutta konfor ve memnuniyet, ofislerde verimlilik ve esenlik, okul yapılarında ise öğrenme çevresinin etkililiği öne çıkmaktadır (Lin ve ark., 2025). Literatürde ticari, eğitim, konut ve ulaşım yapıları dâhil geniş bir yelpazede uygulamalar bulunsa da (Li ve ark., 2018), yükseköğretim bağlamındaki çalışmalar çoğunlukla ofis (Ikediashi ve ark., 2020) ve sınıf (López-Chao ve López-Pena, 2021) mekânlarına odaklanmıştır. Örneğin Tookaloo ve Smith (2015), yeni tamamlanan bir okul projesinde yürüttükleri POE çalışmasıyla yöntemin yükseköğretimde uygulanabilirliğini göstermiştir. Buna karşılık yurtlar, öğrenci/sosyal yaşam

merkezleri ve kampüsün açık alanlarına ilişkin kanıt tabanı görece sınırlıdır. Bu boşluğu gidermeye yönelik olarak yurtların değerlendirilmesi (Kumar ve Khan, 2023), tasarım kalite göstergeleriyle KSD'nin birlikte kullanılarak kampüs binalarının tasarım/yenileme kararlarına girdi sağlaması (Lin ve ark., 2025) ve kampüs açık alanlarının mekânsal ve zamansal haritalama tabanlı POE yöntemiyle ele alınması (Göçer ve ark., 2018) dikkat çekmektedir.

KSD'ye yönelik ilk çalışmalar 1960'ların sonlarında başlamış, 1970–1980'lerde özellikle savaş sonrası konut stokunda kullanıcı gereksinimlerinin göz ardı edilmesine bağlı sorunları görünür kılmıştır (Bodur ve Keskin, 2021). Sonraki yıllarda yöntem; sağlık yapıları, kütüphaneler, hapishaneler ve ticari yapılar gibi farklı bina türlerine yayılmıştır (Preiser ve Vischer, 2005). Aynı dönemde ABD'de kurulan "Environmental Design Research Association" (EDRA), farklı meslek alanları arasında işbirliği geliştirerek birey tutumları ile tasarım kararları arasındaki ilişkiyi disiplinlerarası bir çerçevede ele almıştır (Karagenç, 2002).

Yükseköğretimde KSD'nin temel gerekçesi, fiziksel çevrenin kurumun öğretim vizyonunu destekleme ve kullanıcı gereksinimlerini karşılama düzeyini ortaya koymaktır. Bu çerçevede kullanıcı memnuniyetiyle birlikte alan kullanımı, kullanım sıklığı ve kaynak tüketimi gibi göstergeler toplanmakta ve analiz edilmektedir (Kumar ve Khan, 2023). Eğitim yapılarında çevresel kalitenin sağlık, üretkenlik ve psikoloji üzerinde belirleyici etkileri bulunduğu (Mendell ve Heath, 2005; Schneider, 2002); uygun ve konforlu öğrenme ortamlarının aktif öğrenmeyi ve öğrencilerin kavramsal anlayışını desteklediği gösterilmiştir (Puteh ve ark., 2012). Ayrıca okul binalarında konfor ve memnuniyet üzerine yapılan araştırmalar, kaliteli bir fiziksel çevrenin öğrencilerin refahını, öğrenme kapasitesini ve konfor düzeyini olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur (Teli ve ark., 2012).

Kampüsün dış mekân boyutunda ise iç-dış sürekliliği kuran, mikro-aktivite çeşitliliğini destekleyen sosyal/rekreatif alanların günlük kullanıcı etkileşimini güçlendirdiği (Düzenli ve ark., 2012); oturma-dinlenme, yürüme, çimlere uzanma, toplanma/sohbet ve hafif spor gibi aktivitelerin sosyal davranışı biçimlendirdiği vurgulanmaktadır (Mehta, 2009; Farida, 2013; Abdulkarim ve Nasar, 2014). Açık kampüs mekânlarında olduğu gibi, sosyal mekânlar da sosyal yaşamın düzenlenmesinde önemli bir rol oynayarak kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamakta, günlük karşılaşmalara olanak sağlamakta ve öğrenciler ile mekân arasında bir bağ oluşturmaktadır (Yaylalı Yıldız ve ark., 2013). Kullanıcı görüşlerinin tasarıma yansıtılması, kampüste yeni alanların planlanmasında algı ve kullanımın artmasına katkı sağlamaktadır (Abu-Ghazzeh, 1999).

Son dönemde binaların performansını sistematik olarak değerlendirmenin bir yolu olarak POE'ye yönelik ilgi artmış (Hua ve ark., 2014) ve iç ortam kalitesini iyileştirerek dinamik enerji performans boşluklarının KSD ile azaltılabileceğine dair bulgular, sürdürülebilirlik gündemiyle örtüşmüştür (Kim ve ark., 2020). Pandemi sonrası dönemde ise iç ve dış alanların birlikte yeniden kurgulanması ve kolektif etkinliklerin esnek çözümlerle desteklenmesi yönünde yeni olasılıklar tartışılmaktadır (Deshmukh, 2021).

KSD'nin sağladığı yararlar kısa, orta ve uzun vadede farklılaşmaktadır: kısa vadede kullanıcı görüşlerini görünür kılar ve sorunları tanımlar (Evrim, 2010); orta vadede yeni projelere altlık oluşturur ve maliyet etkinliğini artırır (Işıklar ve Topraklı, 2020; Kayaalp, 2019); uzun vadede ise daha nitelikli ve sürdürülebilir yapıların ortaya çıkmasına, ekonomik öngörülerin güçlenmesine katkı verir (Kayaalp, 2019). Bununla birlikte yüksek maliyet, zaman kısıtı, kurumsal destek ve uzmanlık gereksinimi ile kullanıcı katılımında süreksizlik gibi etmenler yöntemin standart bir süreç hâline gelmesini zorlaştırmaktadır (Vischer, 2001). Ayrıca KSD'nin retrospektif niteliği, bulguların "geç gelen fikirler" olarak algılanmasına ve anlık faydaya dair kuşkuya yol açabilmektedir (Durosaiye ve ark., 2019).

Sonuç olarak, KSD, yapılı çevrenin yalnızca teknik boyutlarını değil; kullanıcı odaklı işlevsel, estetik ve sosyal boyutlarını da ele alan, iç ve dış mekânı çevresiyle bütüncül bir biçimde değerlendiren bir yöntemdir. Ancak mevcut literatür, yükseköğretim kampüslerinde sosyal merkez yapıları özelinde KSD uygulamalarının oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Mevcut çalışmaların büyük bölümü ofis, sınıf ve yurt yapıları gibi belirli tipolojilerde yoğunlaşmakta; öğrencilerin sosyalleştiği ve gündelik yaşam pratiklerinin şekillendiği yaşam merkezleri üzerine kapsamlı ve kullanıcı temelli değerlendirmeler nadiren gerçekleştirilmektedir.

Bu araştırma, söz konusu boşluğu hedef alarak, üniversite kampüslerinde yer alan sosyal merkezlerin estetik, işlevsel ve teknik performansını karma yöntem yaklaşımı ile bütüncül biçimde analiz eden önemli örneklerden birini oluşturmaktadır. Çalışmanın özgün katkısı, nicel kullanıcı algı verilerini nitel mekânsal analizlerle destekleyerek, sosyal merkez tipolojisinde tasarım–performans etkileşimini somut biçimde ortaya koymasında yatmaktadır. Böylece araştırma, hem KSD literatürüne sosyal merkez odaklı yeni bir uygulama alanı kazandırmakta hem de kullanıcı deneyimine dayalı tasarım geri bildirim mekanizmaları için metodolojik bir örnek sunmaktadır.

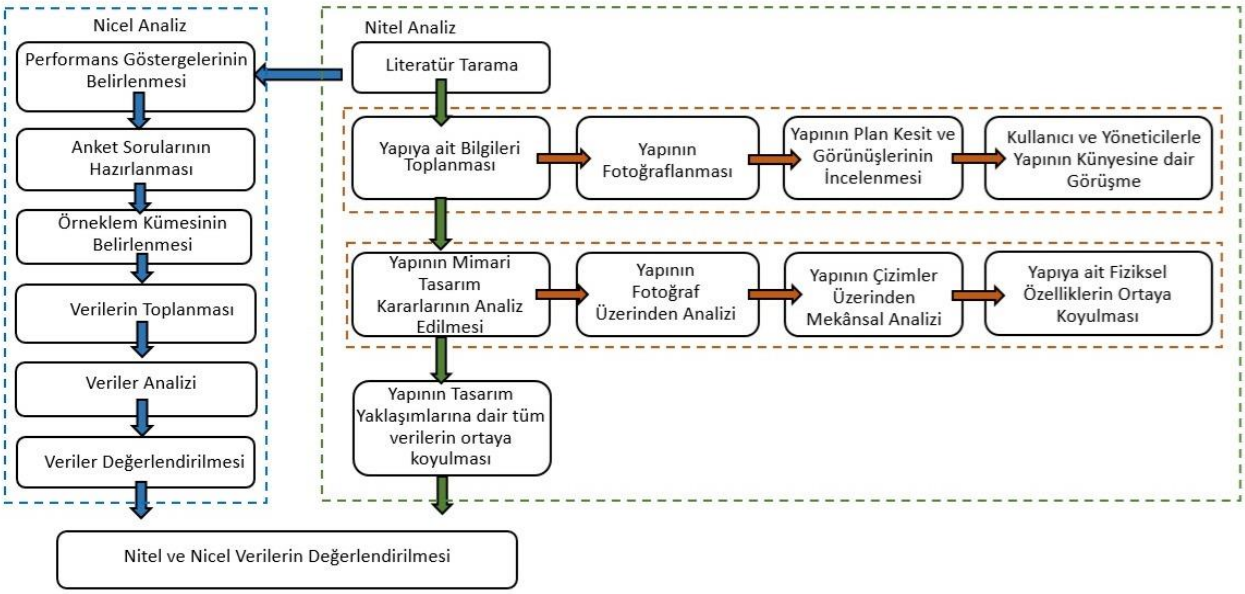
2. Materyal ve Metot

Bu araştırma, Harran Üniversitesi Yaşam Merkezi'nin kullanım sonrası değerlendirmesini gerçekleştirmek amacıyla karma yöntemli (yakınsayan paralel tasarım) bir yaklaşımla yürütülmüştür. Bu çalışma için Hasan Kalyonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu tarafından 18.08.2023 tarihinde etik kurul onayı (2023-28) verilmiştir.

Nitel ve nicel veriler eş zamanlı toplanmış, daha sonra üçgensel doğrulama (triangülasyon) ile bütünleştirilmiştir (Şekil 1). Bu kapsamda, yakınsayan paralel tasarım modeli kullanılmış; nicel anket verileri kullanıcıların performans algılarını derecelendirerek ortaya koyarken, nitel gözlem ve mekânsal analizler bu algıların ardındaki nedenleri açıklamak için kullanılmıştır. Her iki veri seti estetik, işlevsel ve teknik performans boyutlar altında analiz edilmiş; örneğin anketlerde düşük puan alan göstergeler, mekânsal analiz ve plan kurgusu stratejileriyle ilişkilendirilmiştir. Böylece nitel ve nicel bulgular, karşılıklı doğrulama ve açıklayıcılık temelinde bütünleştirilmiştir.

Nitel aşamada ilk olarak konuya ilişkin literatür taraması yapılmış; ardından yapının yerinde gözlemi ve fotoğraf dokümantasyonu gerçekleştirilmiştir. Proje dokümanları üzerinden plan–kesit–görünüş

okumaları yapılarak dolaşım, mekânsal örgütlenme ve işlev ilişkileri çözümlenmiştir. Nicel kısımda ise literatür ve Van der Voordt ve Wegen (2007)'nin parametreleri temel alınarak 5'li Likert tipinde bir kullanıcı anketi geliştirilmiştir. Ölçek; estetik uygunluk, işlevsel uygunluk, teknik uygunluk temel boyutlarını kapsamaktadır. Evreni yaşam merkezinin kullanıcıları (öğrenciler, akademik ve idari personel) oluşturmuş; gönüllülük esasına dayalı kolayda örnekleme ile [N =357] katılımcıdan veri toplanmıştır. Uygulama, pik ve sakin saatleri kapsayacak biçimde kampüs içinde yüz yüze yapılmıştır.



Şekil 1. Yöntem şeması

2.1. Veri Toplama Süreci

2.1.1. Çalışma Alanının Mekânsal Analizi

Araştırmada incelenen yapının mekânsal özellikleri yerinde gözlem, fotoğraf çekimleri ve mevcut proje dokümanlarının (plan, kesit, görünüş) incelenmesi yoluyla analiz edilmiştir. Bu süreçte yapının plan kurgusu, mekânlar arası ilişkiler, dolaşım düzeni, yönlenme, ışık, akustik ve konfor koşulları değerlendirilmiştir. Ayrıca mekânsal özellikler, KSD parametreleri (yapı fiziği, sürdürülebilirlik, güvenlik vb.) ile ilişkilendirilerek kullanıcı deneyimleriyle karşılaştırmalı biçimde ele alınmıştır.

2.1.2. KSD Ölçeğinde Bina Değerlendirme Parametreleri

Yapılarda uygulanan kullanıcı memnuniyeti ve kalite değerlendirme (KSD) çalışmaları, doğrudan kullanıcı gereksinimleriyle bağlantılıdır. Kullanıcıların beklentilerinin karşılanma düzeyi, yalnızca memnuniyetin değil, aynı zamanda fiziksel çevrenin performansının da önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Yapılan literatür çalışması kapsamında yapıların kullanım sonrası değerlendirilmesi adına birçok ölçek ve kriter havuzu bulunmuştur. Bu bağlamda, Van der Voordt ve Wegen (2007) tarafından geliştirilen yapı değerlendirme parametreleri dört ana grupta sınıflandırılmaktadır (Tablo 1.).

Tablo 1. Yapıların Performans Değerlendirme Kriterleri

Değerlendirme Kriterleri	Alt Kriterler
İşlevsel Boyutlar	Verimlilik
	Erişilebilirlik
	Ulaşılabilirlik
	Mekansal Denge
	Bölgeye özgülük, gizlilik ve sosyal etkileşim
	Fiziksel nitelikler (gürültü, soğutma, havalandırma, aydınlatma, nem)
	Esneklik
	Emniyet
Estetik Boyutlar	Görsel nitelik
	Sembolik ve gösteriş niteliği
	Sunumsal nitelik
	Kültürel tarih kıymetleri
	Nizam ve karmaşıklık
Teknik Boyutlar	Yapısal strüktür emniyeti
	Çevreyle denge
	Yangın emniyeti
	Sürdürülebilirlik
	Yapı fiziği
Ekonomik ve Yasal Boyutlar	Yatırım giderleri
	Yatırım vakti
	Kullanma giderleri
	Kamu ve özel düzenlemeler

2.1.3. Anket sorularının oluşturulması

Bu çalışmada mimari tasarım odaklı bir değerlendirme yapılması amaçlandığından, ekonomik ve yasal parametreler kapsam dışında tutulmuştur. Anket formu, estetik, işlevsel ve teknik parametreler çerçevesinde yapılandırılmıştır. Kullanıcıların ekonomik boyuta hâkimiyetlerinin sınırlı olacağı düşünülerek bu unsur değerlendirmeye dâhil edilmemiştir.

Estetik parametreler, yapının görsel nitelikleri, sembolik değerleri, sunumsal özellikleri ile düzen ve karmaşıklık algısını kapsamaktadır. İşlevsel parametreler; verimlilik, erişilebilirlik, ulaşılabilirlik, mekânsal denge, gizlilik ve sosyal etkileşim, fiziksel nitelikler (gürültü, havalandırma, aydınlatma vb.), esneklik ve emniyet boyutları üzerinden oluşturulmuştur. Teknik parametreler ise yapısal strüktür güvenliği, yangın güvenliği, sürdürülebilirlik ve yapı fiziği kategorileri altında değerlendirilmiştir.

Anket formu toplamda 4 bölüm ve 50 sorudan meydana gelmektedir. Birinci bölümde, katılımcıların demografik özelliklerini belirlemeye yönelik dört soru; ikinci, üçüncü ve dördüncü bölümlerde sırasıyla estetik değerlendirme (9 soru), işlevsel değerlendirme (25 soru) ve teknik değerlendirme (12 soru) yer almaktadır. Bu bölümlerde sorular, 5'li Likert ölçeği (1=Kesinlikle katılmıyorum, 5=Kesinlikle katılıyorum) ile kapalı uçlu biçimde yöneltilmiştir. Bu kapsamda hazırlanan anket formunda kullanılan parametreler ve alt başlıkları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Anket sorularının oluşturulmasında kullanılan parametreler ve alt başlıkları

Estetik performans	Görsel nitelik	E1	Yapının genel görünümün düzgünlüğü temizliği ve bakımlılığı
		E2	Yapının genel görünümünün güzelliği
		E3	Avlu üstü örtü elemanının estetik görünümü
		E4	Yapı cephesinde kullanılan malzemenin yapıyı güzel göstermesi
		E5	Yapının bazı yerlerinde kullanılan cam tuğlaların yapıya estetik bir görünüm katması
		E6	Yapı cephesindeki pencere düzeninin çekiciliği
	Sembolik ve gösteriş niteliği	E7	Yapı girişinin davetkarlığı
	Sunumsal nitelik	E8	Yapının çevresiyle uyumluluğu
	Nizam ve karmaşıklık	E9	Yapının çevre yapılarla görsel bütünlüğü
İşlevsel Performans	Verimlilik	İ1	Kapalı mekânların büyüklüğünün verilen işleve uygunluğu
		İ2	Kapalı mekânların ticari kat yüksekliğinin mekân kullanımına elverişliliği
		İ3	Amfi sahnesinin işlevselliği
		İ4	Amfi alanının kullanışlılığı
		İ5	Amfi merdivenlerinin oturmaya elverişliliği
		İ6	Aktivite elemanlarının yeterliliği
		İ7	Yapının genel olarak kullanışlılığı
	Erişilebilirlik	İ8	Tuvaletlerin kolay erişilebilirliği ve kullanışlılığı
		İ9	Tuvaletlerin büyüklüğünün yeterliliği
		İ10	Tuvalet sayısının yeterliliği
		İ11	Yapının engelli insanların kullanımına uygunluğu
	Ulaşılabilirlik	İ12	Kampüs içinde yapıya ulaşımın kolaylığı
		İ13	Dolaşım alanlarının mekânlara ulaşımda rahat ve kolay bir geçiş sağlaması
		İ14	Merdivenlerin mekânlara ulaşımı kolaylaştırması
		İ15	Yapı çevresindeki araç park yerlerinin yeterliliği
		İ16	Amfi alanına ulaşım kolaylığı
	Mekânsal Denge	İ17	Oturma ve dinlenme elemanlarının sayısının yeterliliği
		İ18	Kapalı mekânların pencere boyutlarının ve sayısının yeterliliği
		İ19	Kapalı mekânların pencerelerinin rahat açılıp kapanması
	Bölgeye Özgülük, Gizlilik ve Sosyal Etkileşim	İ20	Cam tuğlaların kullanıma uygunluğu
	Fiziksel Nitelikler	İ21	Avlu üst örtü elemanlarının gölgeleme açısından yeterliliği
		İ22	Avlu üst örtü elemanlarının dış etkenlerden yapıyı koruması
		İ23	Yapının sakin ve gürültüsüz olması
	Esneklik	İ24	Kapalı mekânların farklı kullanımlara uygunluğu
	Emniyet	İ25	Merdiven basamaklarının düzenli ve yeterli boyutlarda olması (aynı zamanda güvenlik boyutu da içeriyor)
Teknik Performans	Yapısal Strüktür Emniyeti	T1	Yapının depreme dayanıklılığı
	Yangın Emniyeti	T2	Yangın çıkması durumunda kullanıcıyı yönlendirici işaretlerin yerlerinin uygunluğu
		T3	Yangın söndürücüler ve yangın alarmlarının kolay ulaşılabilirliği
		T4	Acil durumlarda çıkışa ulaşımın kolaylığı
	Sürdürülebilirlik	T5	Mekanlardaki pencere boyutlarının ve sayılarının doğal aydınlatma için yeterliliği
		T6	Yapının doğal ışıkla aydınlanması
	Yapı Fiziği	T7	Mekanlar arası ses yalıtımının uygunluğu
		T8	Mekanlarda yaz-kış ısısal konfor sağlanması
		T9	Mekanların yeterli akustiğe sahip olması
		T10	Mekanlardaki mekanik ısıtma-soğutma sistemlerinin yeterliliği
		T11	Yapıdaki yapay aydınlatmaların yeterliliği
		T12	Tuvaletlerin havalandırılmasının yeterliliği

2.2. Örneklem / Katılımcılar

Araştırmanın evrenini, Harran Üniversitesi Osmanbey yerleşkesinde bulunan Yaşam Merkezi'nin kullanıcıları oluşturmaktadır. Bu kullanıcılar; öğrenciler, akademik personel ve idari personel olmak üzere üç ana grupta ele alınmıştır. Örneklem seçiminde, yapının kullanım sıklığı ve mekânlarla doğrudan etkileşim kurma düzeyi dikkate alınmıştır. Örneklem büyüklüğü, istatistiksel analizlerin güvenilir biçimde yapılabilmesini sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Bu kapsamda, sosyal bilimlerde yaygın olarak kullanılan Cochran (1951)'in formülü;

$$n = \frac{\mathrm{N}.Z^2.p.q}{(\mathrm{N}-1).\ d^2 + Z^2.p.q} \quad (1)$$

esas alınmıştır. Burada; n: Örneklem büyüklüğü, N: Evren büyüklüğü, Z: Güven düzeyi katsayısı (ör. %95 için Z=1,96), p: Olayın gerçekleşme olasılığı (genellikle 0,5), q: 1 – p, d: Kabul edilen hata payı (genellikle 0,05)'dır. Yazıcıoğlu ve Erdoğan (2014)'ün belirttiği tabloya göre, %95 güven düzeyi ve %5 hata payı esas alındığında gerekli örneklem büyüklüğü 357 kişi olarak hesaplanmıştır. Araştırmada ulaşılan katılımcı sayısı da bu değeri karşılayacak düzeyde planlanmıştır. Katılımcıların belirlenmesinde, yapının kullanıcılarının tam listesine erişim mümkün olmadığından gönüllülük esasına dayalı kolayda örnekleme yöntemi tercih edilmiştir. Anket uygulaması, 25 Mayıs-15 Haziran 2024 tarihleri arasında, araştırmacı gözetiminde ve yüz yüze gerçekleştirilmiştir. Farklı yaş grupları ve fakültelerden kullanıcıların katılımı sağlanarak örneklemin çeşitliliği artırılmıştır.

2.3. Verilerin Analizi

Çalışmada, Yaşam Merkezi'nin mekânları ile kullanıcılar arasındaki bağları ortaya koymak amacıyla Kullanım Sürecinde Değerlendirme (KSD) yöntemi uygulanmıştır. Anket yoluyla elde edilen veriler, SPSS 22.0 for Windows paket programı aracılığıyla analiz edilmiştir. Anket formunun güvenilirliği, içsel tutarlılık yöntemi çerçevesinde Cronbach's Alpha katsayısı ile test edilmiştir. Cronbach (1951) ve Tavakol ve Dennick (2011)'e göre bu katsayı 0 ile 1 arasında değer almakta olup;

$0{,}00 \leq \alpha < 0{,}40 \rightarrow$ güvenilir değil,

$0{,}40 \leq \alpha < 0{,}60 \rightarrow$ düşük derecede güvenilir,

$0{,}60 \leq \alpha < 0{,}80 \rightarrow$ güvenilir,

$0{,}80 \leq \alpha < 1{,}00 \rightarrow$ yüksek derecede güvenilir olarak değerlendirilmektedir.

Verilerin tanımlayıcı istatistiklerine bakarak 5'li Likert ölçeğine dayalı soruların ortalama değerlerinin yorumlanabilmesi için ölçüt değerlendirme puan aralıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, Tekin (1996)'nın önerdiği formülden yararlanılmıştır: Aralık Genişliği = Dizi Genişliği / Grup Sayısı. Beşli Likert ölçeğinde (1–5) dizi genişliği 4, grup sayısı 5 olduğundan aralık genişliği 0,80 olarak bulunmuştur. Buna göre elde edilen puan aralıkları ve değerlendirme ölçütleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Değerlendirme Ölçütleri

Likert Ölçeği	Puan Aralıkları	Değerlendirme Ölçütleri	
1	1,00-1,79	Çok Az Düzeyde	Çok Yetersiz
2	1,80-2,59	Az Düzeyde	Yetersiz
3	2,60-3,39	Orta Düzeyde	Orta
4	3,40-4,19	Yüksek Düzeyde	Yeterli
5	4,20-5,00	Çok Yüksek Düzeyde	Çok Yeterli

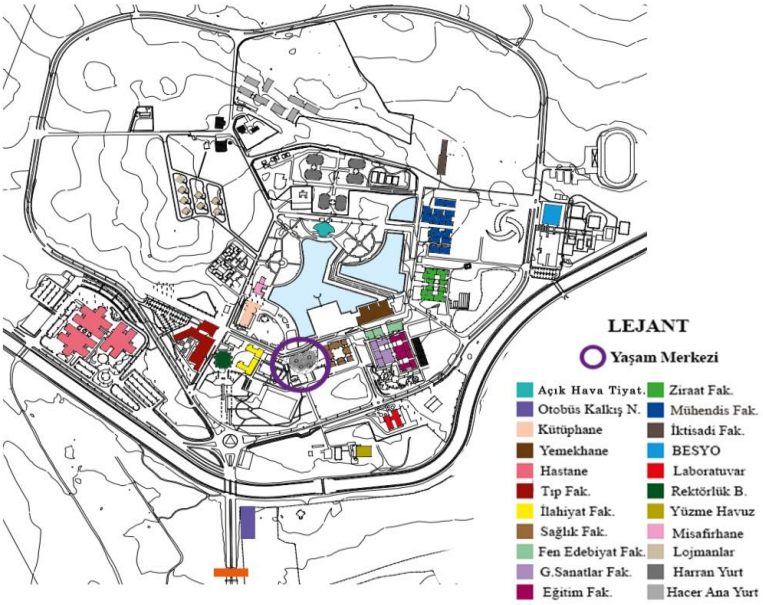
Nicel ve nitel analizlerin birlikte kullanılması, araştırmanın kapsamlı bir değerlendirme sunmasına imkân tanımıştır. Nicel analizler, kullanıcıların estetik, işlevsel ve teknik parametrelere ilişkin görüşlerini istatistiksel olarak ortaya koyarken; nitel analizler mekânsal gözlemler ve dokümantasyon üzerinden bu bulguları desteklemiş ve derinleştirmiştir. Böylece hem kullanıcı deneyimleri hem de yapının mekânsal performansı bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiş, sonuçların güvenilirliği ve geçerliliği artırılmıştır. Ayrıca**,** nitel ve nicel veri setlerinin karşılıklı olarak yorumlanması**,** tasarım yaklaşımlarının mekânsal kurgusu ile performans parametrelerinin kesişen ve ayrışan bulguların belirlenmesine olanak tanımış, böylece tasarım kararları ile kullanıcı deneyimleri arasındaki ilişki açık biçimde ortaya konmuştur.

3. Bulgular

Harran Üniversitesi Yaşam Merkezi, 2016 yılında kullanıma açılmıştır. Yapı, 1.735 m² kapalı alana, üç katlı bir düzenlemeye ve iç avlulu bir plan tipine sahiptir. Sosyal merkez işleviyle tasarlanan yapı, kullanıcıların ortak kullanımına yönelik çeşitli birimleri bünyesinde barındırmaktadır. Yapı içerisinde alışveriş birimleri, aktivite alanları, yeme-içme mekânları ve hizmet alanları yer almaktadır. Bu birimler, yapının sosyal merkez kimliğini belirleyen temel mekân gruplarını oluşturmaktadır.

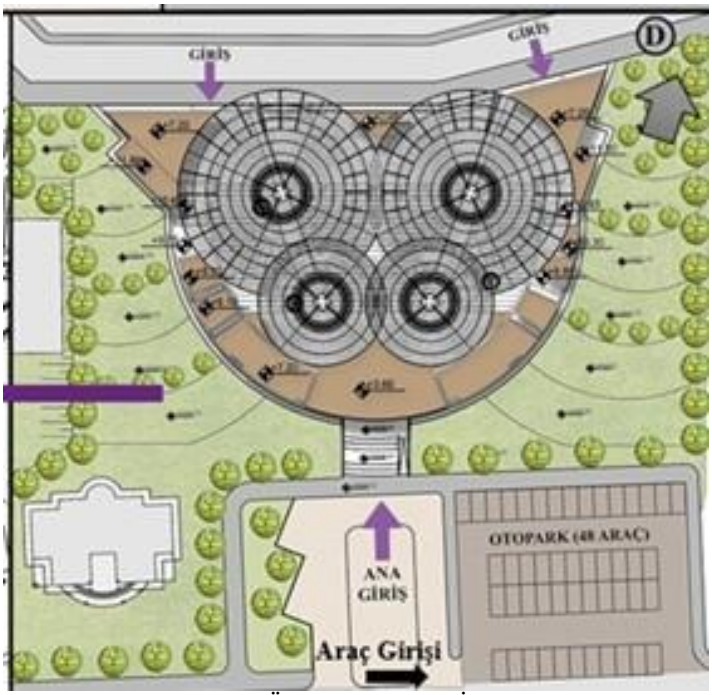
3.1. Konum ve Ulaşım

Yaşam Merkezi, Şanlıurfa ili Haliliye ilçesine bağlı Harran Üniversitesi Osmanbey Kampüsü içerisinde yer almaktadır. Kampüs, Şanlıurfa kentinin doğusunda ve Şanlıurfa–Mardin karayolunun kuzeyinde konumlanmaktadır. Osmanbey Kampüsü'nün merkezi bölgesinde, ana göletin yakınında konumlanan Yaşam Merkezi; kampüsün farklı birimlerine yürüme mesafesinde bulunmaktadır. Yapı; kütüphane, yemekhane, rektörlük binası, merkezi laboratuvar ve çeşitli fakülteler ile yakın çevrede yer almakta, ayrıca öğrenci yurtları, sağlık tesisleri ve spor alanları ile de bağlantılıdır. Kampüs girişi, otobüs kalkış noktası ve lojmanlara olan mesafesi birkaç yüz metreyi bulurken, öğrenci yurtları ve hastane gibi diğer yapılar daha uzak mesafelerde konumlanmaktadır (Şekil 2). Osmanbey Kampüsü'nde sosyal amaçlı kullanılan üç yapı yer almaktadır: açık hava tiyatrosu, yüzme havuzu ve Yaşam Merkezi. Bu yapılardan en kapsamlısı olan Yaşam Merkezi, kampüsün merkezi noktasında konumlanmıştır.



Şekil 2. Kampüs Planı (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

Yaşam Merkezi, kampüsün eğimli bir arsasında konumlanmaktadır. Bu nedenle yapıya farklı kotlardan ulaşımı sağlanmaktadır. Kuzey cephesinde iki ayrı yaya girişi güney cephesinden bir ayrı yaya girişi tasarlanmıştır. Ayrıca Güney cephesinde ana giriş yer almakta olup, bu giriş doğrudan araç yolu ve önünde bulunan 48 araç kapasiteli otopark ile bağlantılıdır. Araç girişi, otoparkın bulunduğu güney aksından sağlanmaktadır (Şekil 3.).

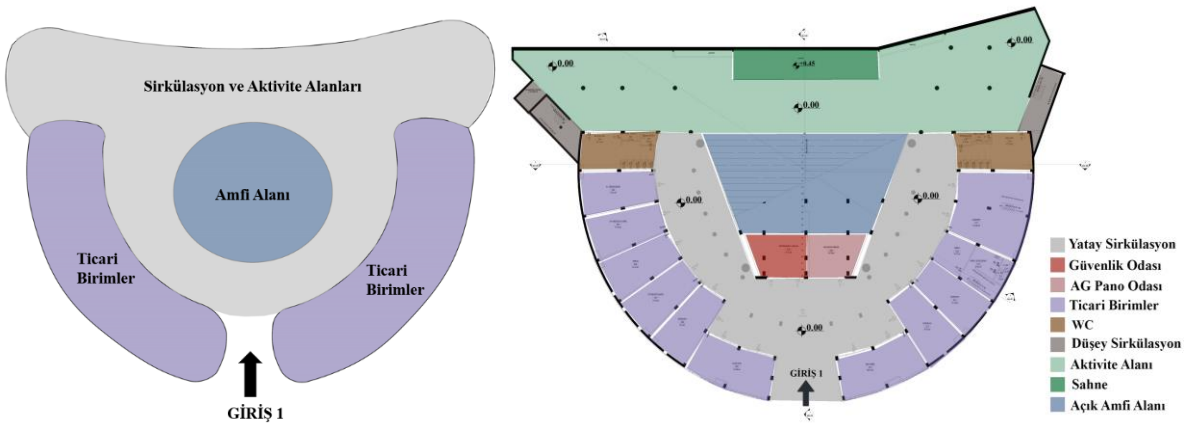


Şekil 3. Vaziyet Planı (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

3.2. Yapının Mekansal Özellikleri

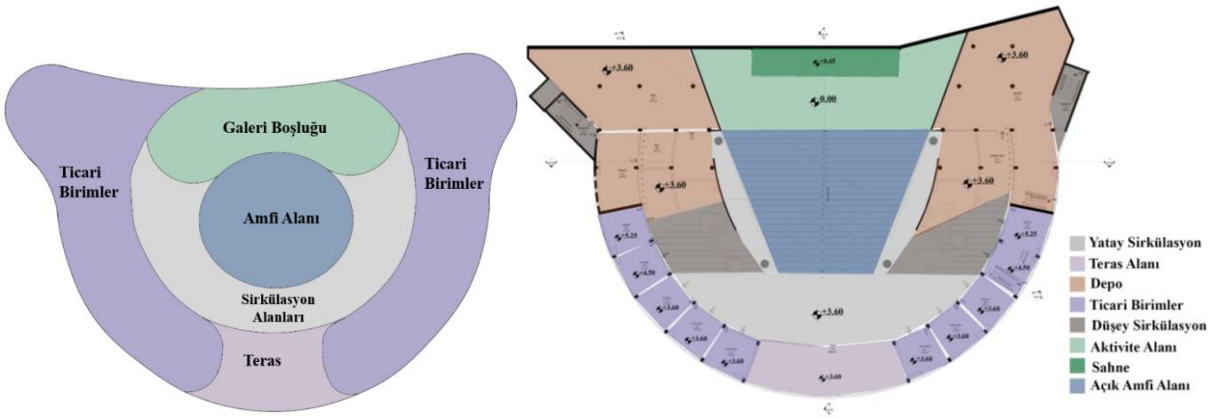
Yaşam Merkezi binası, eğimli bir arazi üzerine konumlandırılmış dairesel plan tipine sahip özgün bir yapıdır. Yapının merkezinde yer alan açık amfi alanı, hem mekânsal organizasyonun odak noktası hem de üst katlarla görsel ve işlevsel bağ kuran bir çekirdek niteliğindedir. Amfiye bağlı sahne düzeni, etkinlik ve sosyal buluşmalar için bütünleştirici bir işlev üstlenmektedir.

Zemin katta, güneydoğu yönünden 0,00 kotunda tasarlanan ana giriş, genişliği ve düzenlenmiş karşılama alanıyla davetkâr bir mekânsal kurgu sergilemektedir. Giriş çevresinde yer alan yamuk plan tipindeki ticari birimler, bağımsız kullanımlarıyla yapıya ekonomik ve işlevsel çeşitlilik kazandırmaktadır. Ticari birimlerin belirli bölümlerinde oluşturulan çift kollu merdivenler, üst katlarla dikey bağlantıyı desteklemektedir. Zemin katta ayrıca güvenlik, servis mekânları ve tuvalet gibi destek birimleri dengeli bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 4.).



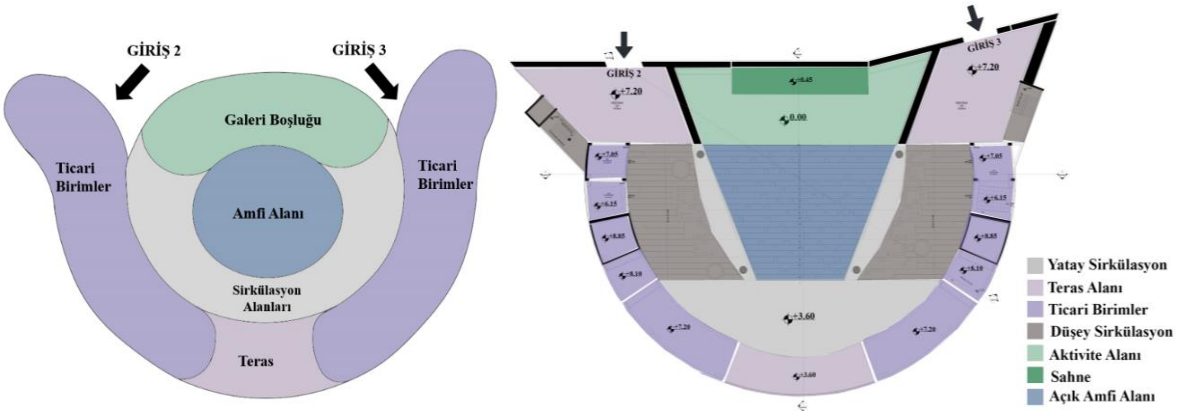
Şekil 4. Yaşam Merkezi zemin kat planı (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

Üst katlarda (+3,60, +4,50, +5,25 kotları), ticari birimler amfi basamaklarıyla aynı ölçülere sahip merdivenler aracılığıyla birbirine bağlanmış ve bu merdivenlerin basamaklarına oturma elemanları ile peyzaj öğeleri entegre edilmiştir. Bu tasarım, iç mekân sirkülasyonunu kolaylaştırırken sosyal kullanım alanlarını da zenginleştirmiştir. Depo alanları ve teraslar ise ticari işlevleri destekleyen tamamlayıcı mekânlar olarak planlanmıştır (Şekil 5.).



Şekil 5. Yaşam Merkezi birinci kat planı (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

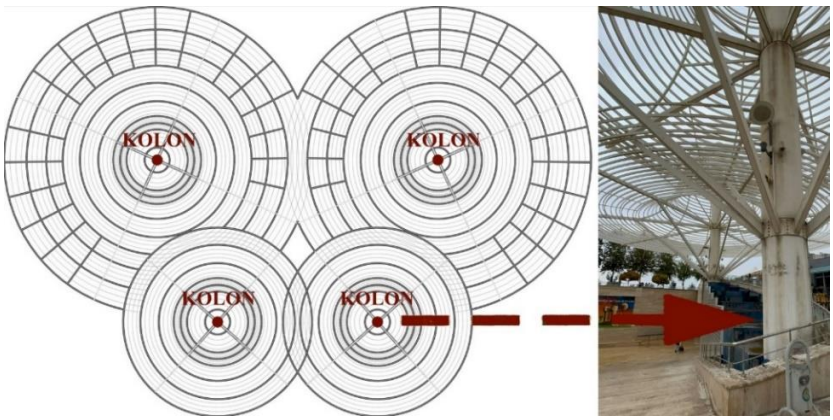
İkinci kat (+7,20 kotu), kuzeybatı yönündeki girişlerle doğrudan ilişkilendirilmiş olup geniş teraslar aracılığıyla dış mekân kullanımı teşvik edilmiştir. Bu katta yamuk ve dikdörtgen plan tipinde ticari birimler çeşitlilik göstermekte, bazı birimlerin üzerinde parapetli teras alanları oluşturulmaktadır (Şekil 6.).



Şekil 6. Yaşam Merkezi ikinci kat planı (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

3.3. Yapının Taşıyıcı Sistemi ve Malzemesi

Yaşam Merkezi binası, betonarme taşıyıcı sistemle inşa edilmiş olup farklı geometrilere sahip kolonlarla desteklenmiştir. Yapıda 40x60 cm boyutlarında dikdörtgen kolonlar, 30 cm yarıçapında dairesel kolonlar ve 160x60 cm ölçülerinde perde kolonlar kullanılmış; kirişler ise 50/30 ve 160/60 kesitlerinde tasarlanarak asma tavan uygulamalarıyla gizlenmiştir. Temel sistemi olarak zeminin taşıma kapasitesini artıran 2 m yüksekliğinde radye temel tercih edilmiştir. Merkezdeki avlunun üst örtüsü ise 60 cm yarıçapında çelik kolonlarla taşınan çelik strüktürden oluşmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Avlu üst örtü ve kolon (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

Malzeme seçiminde, mekânsal işlevlere göre çeşitlilik gözetilmiştir. Zeminlerde ağırlıklı olarak traverten döşeme kaplaması kullanılırken, wc alanlarında karo seramik, depolarda ise mermer plakalar tercih edilmiştir. İç duvar yüzeylerinde su bazlı plastik boya, amfi alanının doğu-batı yönlerinde ise cam tuğla uygulanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Sirkülasyon alanında iç mekan malzeme gösterimi (Hatice Kübra Öncel Arşivinden, 2024)

Tavanlarda hol alanlarında alçıpan asma tavan, diğer mekânlarda ise alçıpan ve alüminyum kombinasyonu uygulanmıştır. Kapı elemanlarında ahşap ve alüminyum çeşitleri, ticari birimlerde ise vitrinlerde alüminyum doğrama sistemleri tercih edilmiştir. Terasların üst örtüleri asma germe membran sistemiyle çözülmüş, yan kaplamalarında şeffaf PVC branda kullanılmıştır. Gezilemeyen teras yüzeyleri çakıl kaplama ve traverten harpuşta ile tamamlanmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Teras örtü malzeme gösterimi (Öncel, 2024)

3.4. Yapının Cephe Karakteri

Yaşam Merkezi binası eğimli arazi üzerine yerleştirildiğinden, planlamada kotlarla birlikte çalışılmış ve kademeli cephe görünümleri elde edilmiştir (Şekil 10). Kademelenmeler +4,20 kotundan başlayarak +7,70, +8,60, +9,35, +10,80 ve +11,20 kotlarıyla devam etmiş, +11,80 kotunda tamamlanmıştır. Cephelerde malzeme olarak traverten giydirme kullanılmış, uzun ve ince formdaki silikon giydirme pencereler farklı ölçülerde (60 cm genişlik; 120–470 cm yükseklik aralığında) ve farklı yüksekliklerde yerleştirilmiştir. Teras alanlarında 75 cm yüksekliğinde çift kat temperli lamine cam korkuluklar uygulanmış, asansör ve merdiven cephelerinde brüt beton tercih edilmiştir.



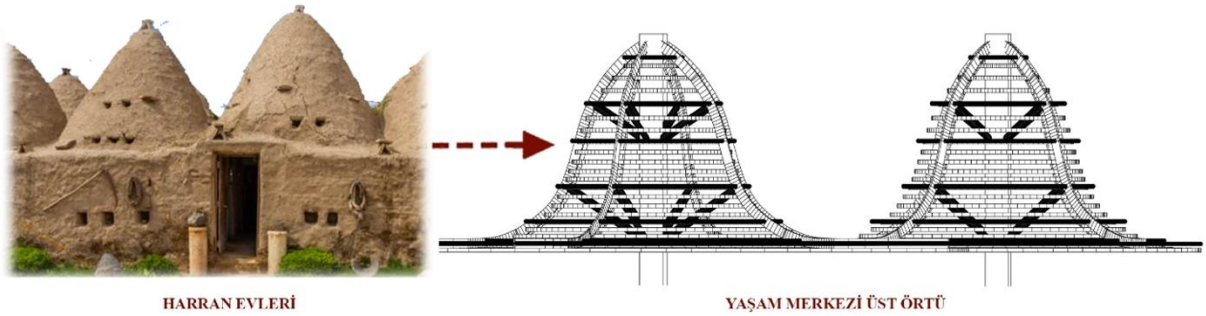
Şekil 10. Avlu çevresi birimlerin cephesi (Öncel, 2024)

Avluda bulunan üst örtü, toplam +24,70 yüksekliğe sahiptir; külah kısmı +13,50, taşıyıcıları ise 0,00 kotundan başlamaktadır. Çelik malzemeden yapılan ve geçirgen özellik gösteren bu örtü, cephede de algılanmaktadır (Şekil 11).



Şekil 11. Yapının dış cephesi (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı, 2024)

Tasarımında Şanlıurfa Harran'daki kümbet evlerden görsel esinlenme yapılmış, bu evlerin kubbeli formu ve üst açıklıkları referans alınmıştır (Şekil 12). Harran evlerinde kullanılan kerpiç, tuğla, yumurta akı, gül yağı, saman ve toprak katkılı harç sayesinde iç mekânların iklim koşullarına uyum sağladığı bilinmektedir. Bu yapılara yöre halkı tarafından "nefes alan evler" adı verilmektedir.



Şekil 12. Harran Evleri ve Yaşam Merkezi'nin üst örtüleri (Harran Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığı,2024)

3.5. Güvenilirlik Analizi

Yapılan güvenilirlik analizi sonucunda, anket formunun Cronbach's Alpha katsayısı α = 0,936 olarak bulunmuştur. Cronbach alfa katsayısı, 0 ile 1 arasında değer almakta olup, 0,70 ve üzerindeki değerler ölçeğin güvenilir olduğunu göstermektedir (Cronbach, 1951; Tavakol ve Dennick, 2011). Bu doğrultuda elde edilen α=0,936 değeri, kullanılan ölçeğin çok yüksek düzeyde içsel tutarlılık sergilediğini ve araştırmada uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

3.6. Örneklem Grubunun Demografik Özellikleri

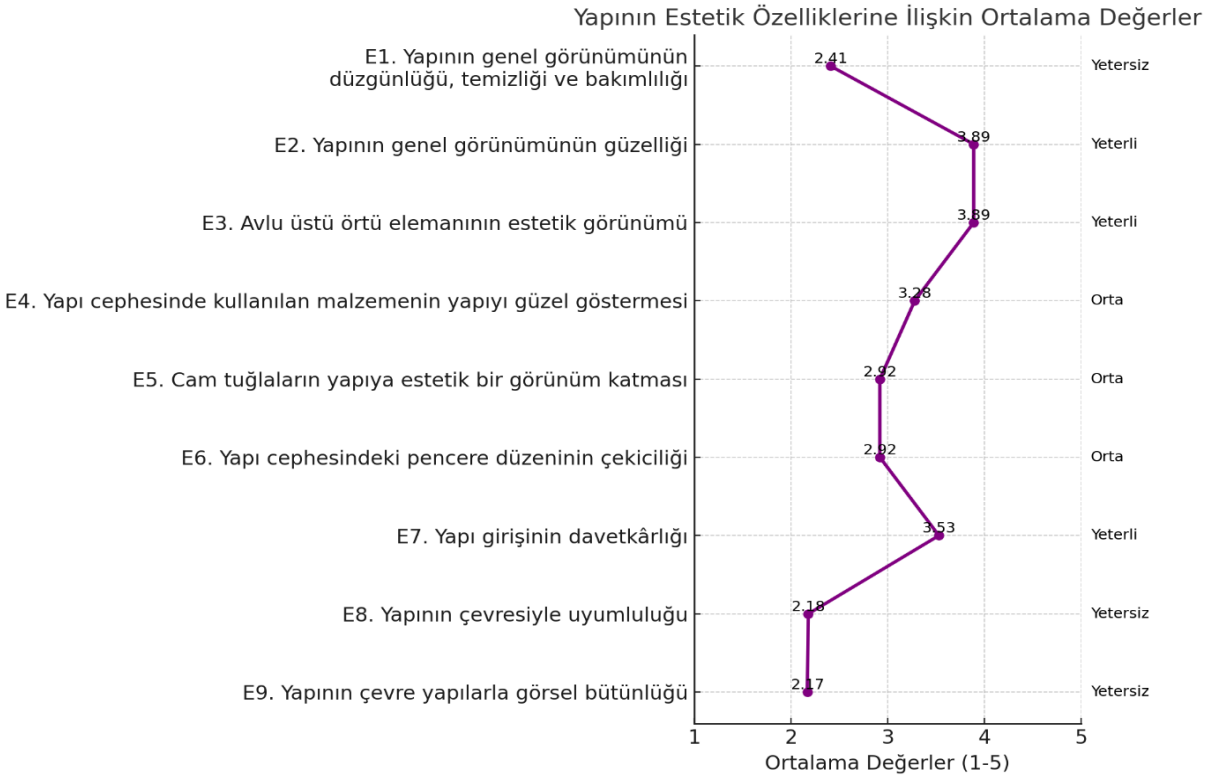
Örneklem grubunun demografik dağılımları incelendiğinde, katılımcıların %54,3'ü kadın, %45,7'si erkektir. Yaş dağılımında %59,7 ile 17-24 yaş aralığı çoğunluğu oluşturmakta, bunu %19 ile 25-34 yaş grubu takip etmektedir. En düşük katılım ise %3,4 oranıyla 55 yaş ve üzeri gruptadır. Kullanıcı tipi açısından değerlendirildiğinde, katılımcıların %76,8'i öğrencilerden, %11,8'i idari personelden ve %11,5'i akademisyenlerden oluşmaktadır. Fakülte/birim dağılımında ise en yüksek oran %20,7 ile Ziraat Fakültesi'ne, ardından %16 ile Güzel Sanatlar Fakültesi'ne aittir. En düşük katılım ise %5,9 ile Tıp Fakültesi'nde görülmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Örneklem grubunun demografik özelliklerine ilişkin yüzde ve frekans dağılımları

Demografik Özellikler		Frekans (f)	Yüzde (%)
Cinsiyet	Kadın	194	54,3
	Erkek	163	45,7
Yaş Dağılımı	17-24 yaş	213	59,7
	25-34 yaş	68	19,0
	35-44 yaş	37	10,4
	45-54 yaş	27	7,6
	55 yaş ve üzeri	12	3,4
Kullanıcı Tipi	Öğrenci	274	76,8
	Akademisyen	41	11,5
	İdari personel	42	11,8
Fakülte/Birim	Eğitim Fakültesi	48	13,4
	Fen-Edebiyat Fakültesi	32	9,0
	Güzel Sanatlar Fakültesi	57	16,0
	İktisadi Bilimler Fakültesi	37	10,4
	İlahiyat Fakültesi	31	8,7
	Mühendislik Fakültesi	28	7,8
	Sağlık Bilimleri Fakültesi	29	8,1
	Tıp Fakültesi	21	5,9
	Ziraat Fakültesi	74	20,7

3.7. Kullanım Sonrası Değerlendirmeye Yönelik Ortalama Değerler

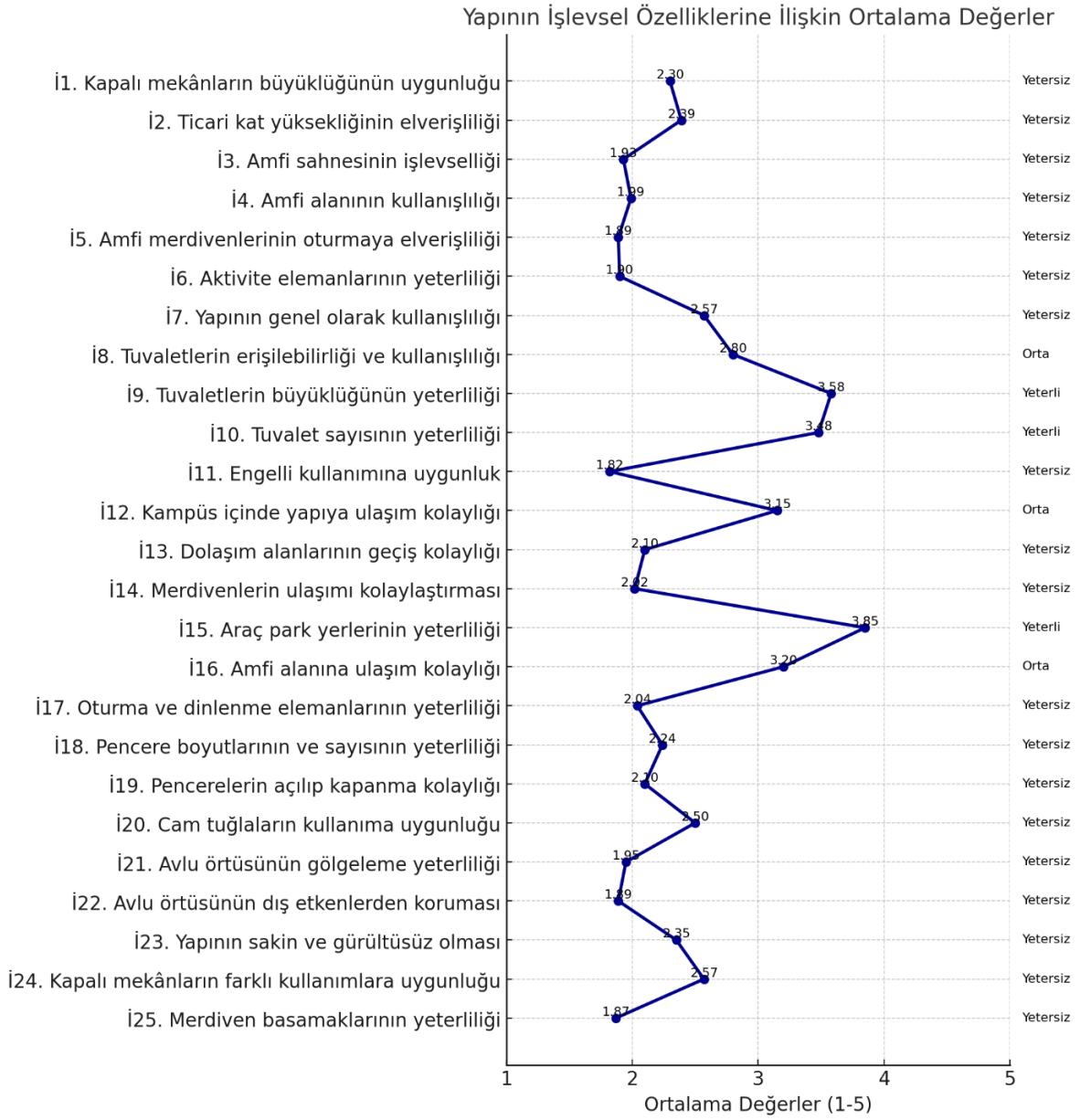
Katılımcıların estetik özelliklere yönelik değerlendirmelerinde elde edilen ortalama değerler incelendiğinde, en yüksek puan "yapının genel görünümünün güzelliği" (3,89) ve "avlu üstü örtü elemanının estetik görünümü" (3,89) olmuştur. Bunu "yapı girişinin davetkârlığı" (3,53) ve "yapı cephesinde kullanılan malzemenin yapıyı güzel göstermesi" (3,28) kriterleri takip etmektedir. Orta düzeyde değerlendirilen ölçütler arasında "cam tuğlaların yapıya estetik bir görünüm katması" (2,92) ve "pencere düzeninin çekiciliği" (2,92) yer almaktadır. Düşük ortalama değerlere sahip olan kriterler ise "yapının genel görünümünün düzgünlüğü, temizliği ve bakımlılığı" (2,41)**,** "yapının çevresiyle uyumluluğu" (2,18) ve "yapının çevre yapılarla görsel bütünlüğü" (2,17) şeklinde sıralanmaktadır. Genel sonuçlara göre, yapının estetik açıdan genel görünümünün güzelliği ve avlu üst örtüsünün estetik etkisi olumlu bulunmuş**,** ancak çevreyle bütünlük, uyumluluk ve cephe detaylarının estetik katkısı yetersiz olarak değerlendirilmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Estetik performansa ilişkin kullanıcıların değerlendirmeleri

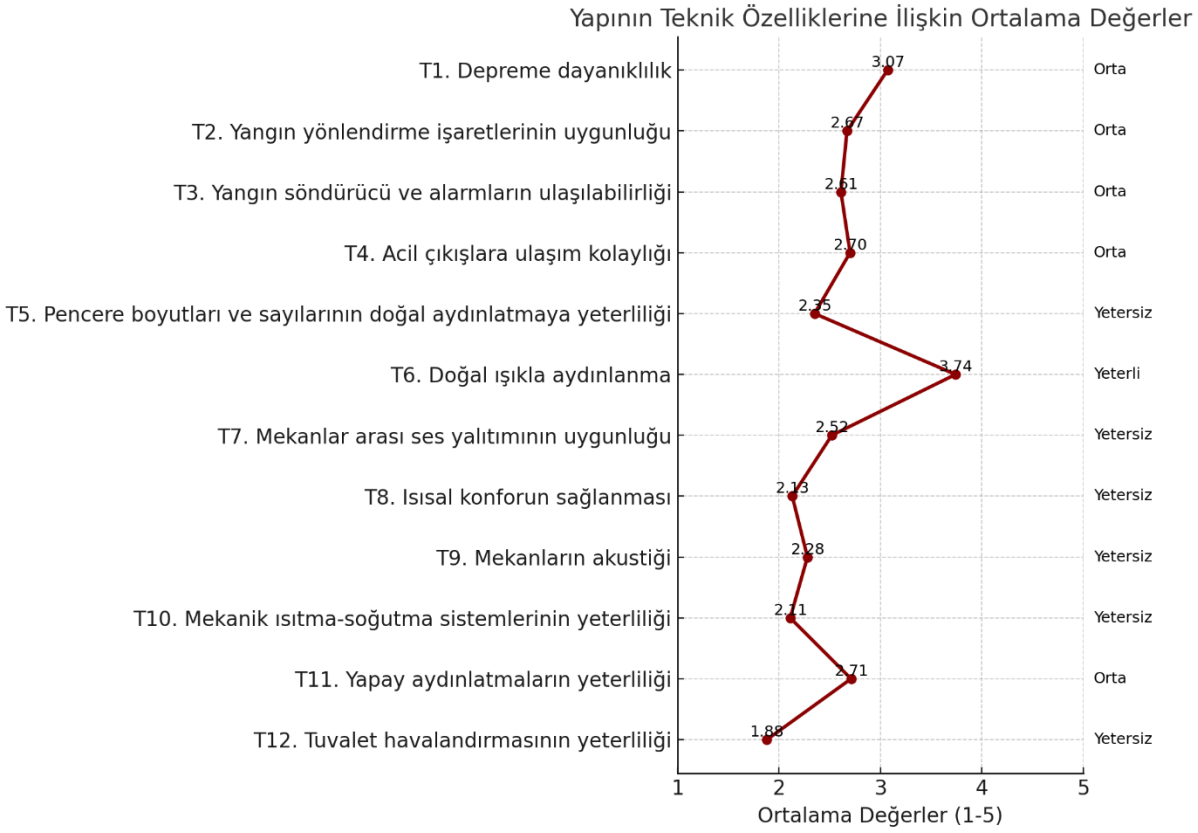
Katılımcıların işlevsel özelliklere yönelik değerlendirmelerinde elde edilen ortalama değerler incelendiğinde, en yüksek puan "yapı çevresindeki araç park yerlerinin yeterliliği" (3,85) olmuştur. Bunu "tuvaletlerin büyüklüğünün yeterliliği" (3,58) ve "tuvalet sayısının yeterliliği" (3,48) kriterleri takip etmektedir. Orta düzeyde değerlendirilen ölçütler arasında "kampüs içinde yapıya ulaşımın kolaylığı" (3,15), "amfi alanına ulaşım kolaylığı" (3,20) ve "tuvaletlerin kolay erişilebilirliği ve kullanışlılığı" (2,80) öne çıkmaktadır. Diğer kriterler genel olarak düşük ortalama değerlerle

sonuçlanmıştır. Özellikle “amfi sahnesinin işlevselliği” (1,93), “amfi alanının kullanışlılığı” (1,99), “amfi merdivenlerinin oturmaya elverişliliği” (1,89), “aktivite elemanlarının yeterliliği” (1,90), “engelli kullanımına uygunluk” (1,82), “avlu üst örtü elemanlarının gölgeleme yeterliliği” (1,95), “avlu üst örtü elemanlarının dış etkenlerden koruması” (1,89) ve “merdiven basamaklarının düzenli ve yeterli boyutlarda olması” (1,87) kriterleri en düşük değerlere sahip alanlar olarak öne çıkmaktadır. Genel sonuçlara göre, yapının işlevselliği açısından tuvaletlerin büyüklüğü ve sayısı ile araç park alanlarının yeterliliği olumlu bulunmuş, ancak amfi mekânları, erişilebilirlik ve engelli kullanımına uygunluk gibi unsurlar yetersiz olarak değerlendirilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. İşlevsel performansa ilişkin kullanıcıların değerlendirmeleri

Katılımcıların teknik özelliklere yönelik değerlendirmelerinde elde edilen ortalama değerler incelendiğinde, en yüksek puan "yapının doğal ışıkla aydınlanması" (3,74) olmuştur. Bunu "yapının depreme dayanıklılığı" (3,07), "yapay aydınlatmaların yeterliliği" (2,71), "acil çıkışlara ulaşım kolaylığı" (2,70), "yangın çıkması durumunda yönlendirici işaretlerin uygunluğu" (2,67) ve "yangın söndürücü ile alarmların ulaşılabilirliği" (2,61) kriterleri takip etmektedir. Buna karşın, diğer kriterler daha düşük ortalama değerler göstermiştir. Özellikle "pencere boyutları ve sayılarının doğal aydınlatmaya yeterliliği" (2,35), "mekanlar arası ses yalıtımının uygunluğu" (2,52), "mekanlarda ısısal konforun sağlanması" (2,13), "mekanların akustiği" (2,28), "mekanik ısıtma-soğutma sistemlerinin yeterliliği" (2,11) ve "tuvalet havalandırmasının yeterliliği" (1,88) en düşük değerlere sahip unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Genel sonuçlara göre, yapının teknik özellikleri açısından doğal aydınlatma yeterli bulunmuş, ancak ısı, ses, akustik, mekanik sistemler ve havalandırma gibi konular yetersiz olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, yangın güvenliği ve acil durum düzenlemeleri orta düzeyde yeterli görülmüştür (Şekil 15).



Şekil 15. Teknik performansa ilişkin kullanıcıların değerlendirmeleri

3.8. Genel Değerlendirme

Çalışmada yapı estetik, işlevsel ve teknik performans boyutları üzerinden değerlendirilmiş ve elde edilen ortalama değerler Tablo 8'de özetlenmiştir. Bulgular, tüm kriterlerin "orta düzeyde yeterlilik" gösterdiğini ortaya koymaktadır. En yüksek ortalama estetik performansa (2,97) ait olup, kullanıcıların

yapının görsel niteliklerini teknik ve işlevsel özelliklere kıyasla daha olumlu değerlendirdiği anlaşılmaktadır. Bunu işlevsel performans (2,77) ve teknik performans (2,60) izlemektedir. Genel ortalama değerin 2,78 olması, yapının bütüncül açıdan kullanıcı beklentilerini kısmen karşıladığını ancak yüksek düzeyde yeterlilik sergilemediğini göstermektedir. Bu durum, özellikle teknik performans boyutunda belirlenen zayıflıkların, yapının genel algısını aşağıya çektiğini işaret etmektedir.

Tablo 8. Genel performansa ilişkin kullanıcıların değerlendirmeleri

Değerlendirme Kriterleri	Ortalama	Yeterlilik Düzeyi
Estetik Performans	2,97	Orta
İşlevsel Performans	2,77	Orta
Teknik Performans	2,60	Orta
Genel Performans	2,78	Orta

4. Tartışma

Çalışmadan elde edilen bulgular, yapının estetik, işlevsel ve teknik performans boyutlarında genellikle orta düzeyde yeterlilik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte her bir kategori içinde güçlü ve zayıf yönler farklılaşmakta, bu durum tasarım ve uygulama süreçlerinde dikkat edilmesi gereken noktaları işaret etmektedir. Ayrıca bulgular, çalışmada kullanılan karma yöntem yaklaşımı çerçevesinde, nicel ve nitel verilerin karşılıklı olarak birbirini desteklemesiyle elde edilmiştir. Anket verileri**,** kullanıcıların yapı performansına ilişkin genel eğilimlerini ortaya koyarken**,** nitel gözlemler ve mekânsal analizler bu eğilimlerin nedenlerini somut biçimde açıklamıştır. Örneğin, anket sonuçlarında düşük puan alan erişilebilirlik ve ısısal konfor göstergeleri, mekânsal analizlerde dairesel plan kurgusu, yetersiz gölgeleme elemanları ve havalandırma stratejileri ile ilişkilendirilmiştir. Benzer biçimde, estetik performansın yüksek çıkması**,** gözlemlerde avlu örtüsü, cephe düzeni ve genel simetri etkisiyle açıklanmıştır. Böylece, kullanıcı algılarıyla fiziksel mekân özellikleri arasında doğrudan bir ilişki kurulmuş ve veriler bütüncül biçimde değerlendirilmiştir.

Estetik performans açısından kullanıcılar, yapının genel görünümünü ve özellikle merkezi avlunun üst örtüsünü olumlu değerlendirmiştir. Avlu örtüsünün estetik katkısı ile yapının genel tasarımı, kullanıcı algısında öne çıkan güçlü unsurlar olmuştur. Yapı girişinin davetkâr bulunması da ilk izlenim açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Göçer ve arkadaşları (2019)'un çalışmasında da öğrenci merkezi girişi insanları çekim açısından güçlü bulunmuştur. Ancak cephede kullanılan malzeme, cam tuğlalar ve pencere düzeni estetik etki bakımından sınırlı kalmıştır. Ayrıca yapının çevresiyle görsel uyumu ve bakım düzeyi düşük ortalama değerlerle öne çıkmış, bu da yapının kentsel bağlamla bütünleşme konusunda yetersiz olduğunu göstermektedir. Nitekim kampüs mekânlarının temizlik, bakım, oturma alanları, gölgeleme ve yeşil unsurlar açısından kullanıcı algısında önemli rol oynadığı daha önceki araştırmalarda da vurgulanmaktadır (Aydın ve Ter, 2008; Hössini ve ark., 2015; Ozbil ve ark., 2018). Önemli bir bulgu ise, avlu üstü örtünün estetik açıdan güçlü algılanmasına karşın işlevsel olarak kullanışsız ve amaca uygun bulunmamasıdır. Benzer biçimde Göçer ve arkadaşları (2019) çalışmasında

da büyük bir avlunun gölgeleme elemanlarının eksikliği ve mekânsal konfigürasyonun yetersizliği nedeniyle etkin kullanılmadığı belirtilmiştir. Bu durum, araştırmamızdaki bulgularla örtüşmektedir.

İşlevsel performans boyutunda bulgular, yapının temel servis ihtiyaçlarını karşılama konusunda başarılı olduğunu göstermektedir. Özellikle tuvaletlerin sayısı ve büyüklüğü ile otopark alanlarının yeterliliği olumlu değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, amfi mekânları kullanıcı beklentilerini karşılamada zayıf bulunmuş; sahne düzeni, oturma alanları ve merdivenlerin işlevselliği yetersiz görülmüştür. Ayrıca erişilebilirlik ve dolaşım unsurları, özellikle engelli bireyler açısından düşük düzeyde değerlendirilmiştir. Literatürde de erişilebilirlik ve ekipman konforunun düşük performans değerleriyle kullanıcı memnuniyetini en fazla olumsuz etkileyen kriterler arasında olduğu belirtilmektedir (Özkan ve ark., 2017). Öte yandan, altyapının varlığı (mobilya, oturma elemanları, temizlik, koruma, estetik ve güvenlik) kullanıcıların kampüs açık mekânlarını tercih etmesinde kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır (Tourinho ve ark., 2021). Bu da araştırmamızda tespit edilen oturma ve gölgeleme eksiklikleriyle doğrudan ilişkilidir. Genel tabloya bakıldığında, yapı günlük kullanımda işlevsel çözümler sunmasına çalışsa da, ana kullanım olan sosyalleşme mekânları, amfi düzeni, iç mekân dolaşımı ve erişilebilirlik kriterleri açısından belirgin eksiklikler barındırmaktadır.

Teknik performans açısından değerlendirildiğinde, yapının gün ışığından etkin yararlanması öne çıkan güçlü bir yön olarak belirlenmiştir. Ancak üst örtü boyutları ve hakimiyeti kullanıcıları ürkütmekte olup, depreme dayanıklılık yalnızca orta düzeyde güven vermekte, yangın güvenliği ve acil durum düzenlemeleri kullanıcılar tarafından yeterli fakat güçlü bulunmamaktadır. En belirgin olumsuzluklar, iç mekân konforuna yönelik kriterlerde ortaya çıkmıştır. Isısal konfor, akustik, ses yalıtımı, mekanik ısıtma-soğutma sistemleri ve tuvalet havalandırması düşük ortalamalarla değerlendirilmiştir. Bu bulgu, Yapılı Çevre Merkezi'nin iç mekan çevre kalitesi faktörleri hakkındaki 20 yıllık kullanıcı anketlerinden elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir; söz konusu çalışmada da akustik mahremiyet, sıcaklık ve gürültü seviyeleri çalışanlar arasında en memnuniyetsiz iç mekan çevre kalitesi faktörleri olarak belirlenmiştir (Graham ve ark., 2021). Ayrıca Ahmed ve arkadaşlarının (2021)'de vurguladığı üzere, tasarım aşamasında daha kapsamlı düşünce ve planlama yapılması, bina sakinlerinin memnuniyetini artırabilecek önemli bir etkendir. Araştırmamızda elde edilen düşük teknik performans ortalamaları da bu görüşü desteklemektedir.

Bu bütüncül değerlendirme ile elde edilen bulgular, tüm performans boyutlarının orta düzeyde yeterlilik sergilediğini, ancak kendi içinde sıralandığında estetik performansın görece daha yüksek, işlevsel performansın orta, teknik performansın ise en düşük düzeyde değerlendirildiğini göstermektedir. Bu durum, tasarım sürecinde estetik önceliklerin görece daha fazla dikkate alındığını, ancak işlevsel ve teknik bütünlüğün aynı ölçüde gözetilmediğini ortaya koymaktadır. Oysa iyi tasarlanmış bir öğrenme ortamının öğrencilerin gelişiminde ve eğitim kalitesinin artırılmasında vazgeçilmez bir rol oynadığı bilinmektedir (Luo ve ark., 2022; Zhussupbekov ve ark., 2023). Ayrıca literatürde artan memnuniyet puanlarının kullanıcıların üretkenliği ve sağlık algılarıyla pozitif ilişkili olduğu da belirtilmektedir

(Altomonte ve ark., 2019). Dolayısıyla, yapının orta düzeyde kalan performansı, hem mekânsal kalite algısını hem de kullanıcıların verimlilik ve sağlık algılarını sınırlı biçimde etkilemektedir.

5. Sonuç

Bu çalışma, Şanlıurfa Harran Üniversitesi Yaşam Merkezi'nin kullanıcı algılarına dayalı performansını estetik, işlevsel ve teknik boyutlarda değerlendirmiştir. Çalışmada kullanılan karma yöntem yaklaşımı, kullanıcıların performans parametrelerine ilişkin görüşlerinden elde edilen nicel sonuçların, nitel mekânsal analizlerle bütünleştirilmesini sağlamış; böylece bulguların çok yönlü biçimde ele alınmasına ve nicel verilerin nitel gözlemlerle desteklenmesine olanak tanımıştır. Bulgular, tüm performans kriterlerinin genel olarak orta düzeyde yeterlilik sergilediğini ortaya koymaktadır. Kendi içinde sıralandığında estetik performans görece daha yüksek, işlevsel performans orta düzeyde, teknik performans ise en düşük ortalamaya sahiptir. Yapının "görsel kimlik üretme" konusunda güçlü, ancak "kullanım kolaylığı ve iç mekân çevresel konforu" açısından sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Bulgular, tasarımda estetik odaklı kararların (üst örtü, dairesel organizasyon, cam elemanlar) yapı fiziği, erişilebilirlik ve güvenlik gibi performans bileşenlerinde doğrudan zayıflık üretebildiğini göstermektedir. Bu nedenle mekânsal form üretimi ile performans parametreleri arasındaki ilişkinin tasarım sürecinde eşzamanlı olarak ele alınması gerekmektedir.

Estetik açıdan yapı, genel görünüm ve merkezi avlu örtüsü ile kullanıcılar üzerinde olumlu bir izlenim bırakmıştır. Bununla birlikte, cephe detayları ve çevreyle bütünleşme konusunda yetersizlikler dikkat çekmektedir. İşlevsel boyutta, temel servis mekânlarının yeterliliği olumlu bulunmuş ancak özellikle amfi düzeni, iç mekân dolaşımı ve erişilebilirlik unsurlarında eksiklikler göze çarpmıştır. Teknik açıdan en belirgin güçlü yön gün ışığından etkin yararlanma olurken, ısısal konfor, akustik, havalandırma ve mekanik sistemler düşük puanlarla kullanıcı memnuniyetini sınırlamıştır.

Bu sonuç, sosyal merkez tipolojilerinde estetik seçimlerin "özgünlük" sağlarken; erişilebilirlik, akustik, ısısal konfor ve havalandırma gibi temel kullanıcı gereksinimlerinin karşılanmadığında, mekânın kullanım değerini ve sürekliliğini düşürdüğünü net biçimde ortaya koymaktadır. Bu bağlamda**,** plan kurgusu, dolaşım netliği, gölgeleme stratejileri, malzeme seçimleri ve mekanik sistem kurgusu gibi tasarım bileşenlerinin estetik hedeflerle birlikte tek bir karar matrisinde değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca bulgular, yapının özgün mekânsal bileşenlerinin (avlu, üst örtü, dairesel plan, cephe malzemeleri) kullanım sonrası değerlendirme parametreleri üzerinde farklı yönlü etkiler ürettiğini göstermektedir. Merkezi avlu ve çelik üst örtü estetik kimliği güçlendirirken sürdürülebilir gölgeleme ve yapı fiziği açısından sınırlı kalmış; dairesel plan kurgusu mekânsal bütünlük sağlarken dolaşım okunabilirliğini ve erişilebilirliği zayıflatmış; cephe ve malzeme tercihleri sembolik ifadeyi desteklerken çevresel bütünleşme, bakım ve güvenlik kriterlerinde performans kaybına neden olmuştur. Bu durum, mekânsal kararların yalnızca estetik hedeflerle değil, çok boyutlu performans çıktıları üretme kapasitesiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede, tasarım sürecinde

“çekici görünüm” kadar “işleyen mekân” üretmeye dönük performans temelli karar setlerinin geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Genel olarak elde edilen bulgular, yapının tasarım sürecinde estetik önceliklerin öne çıktığını, ancak işlevsel ve teknik bütünlüğün aynı ölçüde gözetilmediğini göstermektedir. Dolayısıyla, daha kapsayıcı, erişilebilir ve kullanıcı konforunu artırıcı çözümlerle yapının bütüncül performansının geliştirilebileceği söylenebilir. Bu çalışma sonucunda, yapı performansının kullanıcı merkezli değerlendirilmesi sağlanmış ve elde edilen veriler, benzer nitelikteki eğitim ve yaşam yapılarının tasarım, planlama ve iyileştirme süreçlerine yol gösterici olabilecek bir katkı sunmuştur**.** Ayrıca, sosyal merkezlerde kullanıcı deneyimini esas alan KSD yaklaşımının, yalnızca memnuniyet düzeyini ölçmekle kalmayıp, tasarım ve uygulama kararlarına yön veren bir geri bildirim mekanizması olarak işlev gördüğü belirlenmiştir.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Katılımcı grubunun büyük kısmını öğrenciler oluşturduğundan, akademik ve idari personel kullanıcılarının deneyimlerine ilişkin bulgular temsilen zayıf kalmıştır. Bu durum, bulguların genellenebilirliğini kısmen sınırlamakta; ancak araştırmanın amacı doğrultusunda öğrenci kullanıcı deneyimlerinin derinlemesine analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Gelecekteki çalışmalarda**,** kullanıcı gruplarının daha dengeli temsil edildiği örneklemler üzerinden karşılaştırmalı analizlerin yapılması, ayrıca yapının enerji verimliliği, sürdürülebilirlik ve yaşam döngüsü performansı ile ilişkilerinin derinlemesine incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu tür kullanıcı odaklı değerlendirmelerin yalnızca akademik literatüre değil, aynı zamanda üniversite kampüslerinde gerçekleştirilecek yeni yatırımlar ve tasarım politikalarına da yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Ek olarak farklı kampüs sosyal merkezleri üzerinde yapılacak karşılaştırmalı çalışmaların, ortak mekânsal tipolojilerin hangi estetik kararlarla hangi performans zaaflarını ürettiğini somutlaştırarak, daha sürdürülebilir, kapsayıcı ve yüksek performanslı kampüs mekânlarının geliştirilmesine katkı sunacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Çalışmanın yürütülmesi sürecinde gerekli izinlerin verilmesinde katkı sağlayan Harran Üniversitesi Rektörlüğü’ne, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’na ve anket uygulaması sırasında gönüllü katılım gösteren öğrencilere, akademik ve idari personele teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar çalışmaya eşit oranda katkıda bulunmuştur.

Kaynakça

Abdulkarim D., Nasar JL. Do seats, food vendors and sculptures improve plaza visitability? Environment and Behavior 2014; 46(7): 805–825.

Abu-Ghazzeh TM. Communicating behavioral research to campus design: Factors affecting the perception and use of outdoor spaces at the University of Jordan. Environment and Behavior 1999; 31(6): 764–804.

Adewunmi Y., Omirin M., Famuyiwa F., Farinloye O. Post-occupancy evaluation of postgraduate hostel facilities. Facilities 2011; 29(3/4): 149–168.

Ahmed H., Edwards DJ., Lai JH., Roberts C., Debrah C., Owusu-Manu DG., Thwala WD. Post occupancy evaluation of school refurbishment projects: Multiple case study in the UK. Buildings 2021; 11(4): 169.

Altomonte S., Schiavon S., Kent MG., Brager G. Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings. Building Research ve Information 2019; 47(3): 255–274.

Aydın D., Ter U. Outdoor space quality: Case study of a university campus plaza. Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research 2008; 2(3): 189–203.

Bodur A., Keskin K. Housing satisfaction via post occupancy evaluation: A case study in Samsun. Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Dergisi 2021; 11(22): 183–201.

Cronbach LJ. Coefficient alpha and the internal structure of tests. Psychometrika 1951; 16(7): 297–334.

Deshmukh J. Speculations on the post-pandemic university campus–a global inquiry. Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research 2021; 15(1): 131–147.

Durosaiye IO., Hadjri K., Liyanage C. A critique of post-occupancy evaluation in the UK. Journal of Housing and the Built Environment 2019; 34(1): 345–352.

Düzenli T., Mumcu S., Yılmaz S., Özbilen A. Analyzing youth's activity patterns in campus open spaces depending on their personal and social needs. Journal of Adult Development 2012; 19(4): 201–214.

Evrim T. Kullanım sonrası değerlendirme (KSD) yönteminin YTÜ Kimya ve Metalurji Fakültesi binası örneğinde incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2010, 196 s., İstanbul.

Farida N. Effects of outdoor shared spaces on social interaction in a housing estate in Algeria. Frontiers of Architectural Research 2013; 2(4): 457–467.

Göçer Ö., Göçer K., Başol AM., Kıraç MF., Özbil A., Bakovic M., Siddiqui FP., Özcan B. Introduction of a spatio-temporal mapping based POE method for outdoor spaces: Suburban university campus as a case study. Building and Environment 2018; 145: 125–139.

Göçer Ö., Göçer K., Özcan B., Bakovic M., Kıraç MF. Pedestrian tracking in outdoor spaces of a suburban university campus for the investigation of occupancy patterns. Sustainable Cities and Society 2019; 45: 131–142.

Göçer Ö., Hua Y., Göçer K. Completing the missing link in building design process: Enhancing post-occupancy evaluation method for effective feedback for building performance. Building and Environment 2015; 89: 14–27.

Graham LT., Parkinson T., Schiavon S. Lessons learned from 20 years of CBE's occupant surveys. Buildings ve Cities 2021; 2(1): 1–23.

Günaçar E., Erbil Y. An analysis on post occupancy evaluation method in buildings. KAPU Trakya Mimarlık ve Tasarım Dergisi 2022; 2(2): 69–84.

Hajrasouliha AH. Master-planning the American campus: Goals, actions, and design strategies. Urban Design International 2017; 22(4): 363–381.

Harran Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı. Kurumsal Proje Arşivi [Teknik rapor/proje dokümanı]. Harran Üniversitesi 2024.

Hassanain MA., Alamoudi A., Al-Hammad AM., Abdallah A. Barriers to the implementation of POE practices in the Saudi Arabian building industry. Architectural Engineering and Design Management 2020; 16(2): 150–165.

Hossini SB., Azemati S., Elyasi N., Mozaffar F. The effect of the vitality level of university campuses on increasing social interactions. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2015; 170: 225–233.

Hua Y., Göçer Ö., Göçer K. Spatial mapping of occupant satisfaction and indoor environment quality in a LEED platinum campus building. Building and Environment 2014; 79: 124–137.

Ikediashi D., Udo G., Ofoegbu M. Post-occupancy evaluation of University of Uyo buildings. Journal of Engineering, Design and Technology 2020; 18(6): 1711–1730.

Işıklar Bengi S., Topraklı AY. The perspective of Turkey in the post occupancy evaluation studies. Periodica Polytechnica Architecture 2020; 51(1): 83–91.

Karagenç O. Toplu konut alanlarında simgesel performansa yönelik kullanım sonrası değerlendirme modeli. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, , 2002, 330 s.İstanbul.

Kayaalp E. Tasarım parametreleri geliştirmeye yönelik kullanıcı görüşlerinin KSD yöntemiyle değerlendirilmesi: Dicle Üniversitesi Mimarlık Fakültesi örneği. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, , 2019, 132 s. Diyarbakır.

Kim YK., Bande L., Tabet Aoul KA., Altan H. Dynamic energy performance gap analysis of a university building: Case studies at UAE university campus, UAE. Sustainability 2020; 13(1): 120.

Kumar M., Khan S. Using post-occupancy evaluation as a methodological approach to assess residential hostels in CFTI. Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research 2023; 17(2): 343–357.

Li P., Froese TM., Brager G. Post-occupancy evaluation: State-of-the-art analysis and state-of-the-practice review. Building and Environment 2018; 133: 187–202.

Lin H., Juan YK., Castro-Lacouture D. Guiding campus building design and renovation through design quality indicators and post-occupancy evaluations. Ain Shams Engineering Journal 2025; 16(8): 103457.

López-Chao V., López-Pena V. Purpose adequacy as a basis for sustainable building design: A post-occupancy evaluation of higher education classrooms. Sustainability 2021; 13(20): 11181.

Luo Z., Sun C., Dong Q., Qi X. Key control variables affecting interior visual comfort for automated louver control in open-plan office: A study using machine learning. Building and Environment 2022; 207: 108565.

Mehta V. Look closely and you will see, listen carefully and you will hear: Urban design and social interaction on streets. Journal of Urban Design 2009; 14(1): 29–64.

Mendell MJ., Heath GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. Indoor Air 2005; 15(1): 27–52.

Öncel HK. Kişisel fotoğraf arşivi. 2024.

Ozbil A., Gocer O., Bakovic M., Gocer K. A quantitative investigation of the factors affecting patterns of occupation in a suburban campus: The case of Ozyegin University in Istanbul. Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research 2018; 12(2): 98–125.

Özkan DG., Alpak EM., Var M. Design and construction process in campus open spaces: A case study of Karadeniz Technical University. Urban Design International 2017; 22(3): 236–252.

Preiser WF. Post-occupancy evaluation: How to make buildings work better. Facilities 1995; 13(11): 19–28.

Preiser WF., White E., Rabinowitz H. Post-occupancy evaluation (Routledge revivals). Routledge 2015.

Preiser WFE., Vischer JC. The evolution of building performance evaluation: An introduction. In: Preiser WFE., Vischer JC. (Eds.), Assessing building performance. Elsevier Butterworth-Heinemann 2005: 1–15.

Puteh M., Ibrahim MH., Adnan M., Che'Ahmad CN., Noh NM. Thermal comfort in classroom: Constraints and issues. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2012; 46: 1834–1838.

Schneider M. Do school facilities affect academic outcomes? National Clearinghouse for Educational Facilities 2002.

Tavakol M., Dennick R. Making sense of Cronbach's alpha. International Journal of Medical Education 2011; 2(1): 53–55.

Tekin H. Eğitimde ölçme ve değerlendirme. Yargı Yayınları, Ankara 1996.

Teli D., Jentsch MF., James PA. Naturally ventilated classrooms: An assessment of existing comfort models for predicting the thermal sensation and preference of primary school children. Energy and Buildings 2012; 53: 166–182.

Tookaloo A., Smith R. Post occupancy evaluation in higher education. Procedia Engineering 2015; 118: 515–521.

Tourinho ACC., Barbosa SA., Göçer Ö., Alberto KC. Post-occupancy evaluation of outdoor spaces on the campus of the Federal University of Juiz de Fora, Brazil. Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research 2021; 15(3): 617–633.

Turk YA., Sen B., Ozyavuz A. Students' exploration on campus legibility. Procedia-Social and Behavioral Sciences 2015; 197: 339–347.

Van der Voordt DJM., Wegen HBR. Architecture in use. Routledge 2007.

Vischer J. Post-occupancy evaluation: A multifaceted tool for building improvement. In: Learning from our buildings: A state-of-the-practice summary of post-occupancy evaluation. National Academy Press 2001: 23–34.

Yaylalı Yıldız B., Yamu C., Çil E. Exploring the effects of spatial and social segregation in university campuses: IZTECH as a case study. Urban Design International 2013; 19(2): 125–143.

Yazıcıoğlu Y., Erdoğan S. SPSS uygulamalı bilimsel araştırma yöntemleri. Detay Yayıncılık, Ankara 2014.

Yükseköğretim Kurulu Başkanlığı (YÖK). Yükseköğretim Kurulu Web Sitesi Ana Sayfa.. 2024. https://www.yok.gov.tr

Zhussupbekov M., Memon SA., Khawaja SA., Nazir K., Kim J. Forecasting energy demand of PCM integrated residential buildings: A machine learning approach. Journal of Building Engineering 2023; 70: 106335.

Zimring C., Rosenheck T. Post-occupancy evaluations and organizational learning. In: Learning from our buildings: A state-of-the-practice summary of post-occupancy evaluation. National Academy Press 2001: 42–53.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1431-1443, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1431-1443, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Hava Dirençli Bir Ortamda Serbest Düşme Hareketinin Deneysel ve Kesirli Analizi

Mürsel ŞEN[1*]

[1]Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu Dekanlığı, Temel Bilimler Bölümü, 34149, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0002-0637-8325
*Sorumlu yazar: mursel.sen@msu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 26.08.2025
Kabul tarihi:11.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Kesirli analiz
Caputo kesirli türevi
Planck birimleri
Serbest düşme hareketi
Hava direnci

ÖZ

Bu çalışmada, hava direncinin ihmal edilmediği bir ortamda küresel cisimlerin serbest düşme hareketi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Newton'un ikinci yasası ve Stokes yasasından türetilen standart teorik modelin çözümü, deneysel ölçümler ile uyum içinde olmadığı görülmüştür. Bu uyumsuzluğu giderebilmek için, standart teorik model kesirli analiz kullanılarak yeniden tanımlanmış ve çözülmüştür. Denklemi boyutsuzlaştırmak için Planck zaman birimi kullanılmıştır. Hızın ve konumun zamana göre değişimleri Mittag-Leffler fonksiyonu cinsinden elde edilmiştir. Farklı kütlelere ve yarıçaplara sahip küresel cisimler çeşitli yüksekliklerden bırakılarak deneysel ölçümler yapılmış ve deneysel ölçümlerle uyumlu olan kesirli türev mertebeleri elde edilmiştir. Ayrıca türev mertebesinin azalan değerleri için düşme sürelerindeki değişimler incelenmiştir.

Experimental and Fractional Analysis of Free Fall Motion in a Medium with Air Resistance

Research Article

Article History:
Received: 26.08.2025
Accepted: 11.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Fractional calculus
Caputo fractional derivative
Planck units
Free fall motion
Air resistance

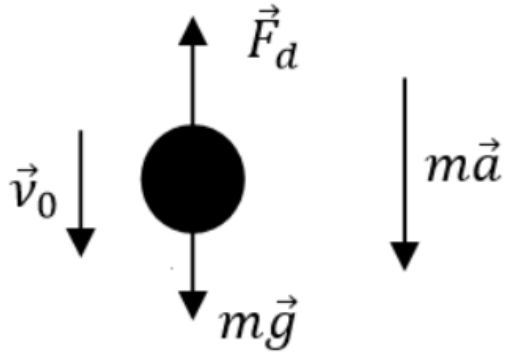
ABSTRACT

In this study, the free-fall motion of spherical objects in an environment where air resistance cannot be neglected is investigated experimentally and theoretically. The standard theoretical model derived from Newton's second law and Stokes' law is found to be inconsistent with the experimental measurements. To resolve this inconsistency, the standard theoretical model is redefined and solved using the fractional calculus. The Planck time unit has been used to make the equation dimensionless. The changes of velocity and position with respect to time are obtained in terms of the Mittag-Leffler function. Experimental measurements were obtained for spherical objects of different masses and radii dropped from various heights, and the fractional derivative orders that best matched the experimental measurements were obtained. Furthermore, the changes in fall times for decreasing values of the derivative order are investigated.

To Cite: Şen M. Hava Dirençli Bir Ortamda Serbest Düşme Hareketinin Deneysel ve Kesirli Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1431-1443.

1. Giriş

Fizikte bir cismin konumunun zamanla değişimi kinematik denklemler ile incelenmektedir (Rızaoğlu ve Sünel, 2006). Hava direncinin ihmal edilmediği bir ortamda m kütleli cismin h yüksekliğinden v_0 hızı ile düşmesine ilişkin diyagram Şekil 1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1. m kütleli bir cismin serbest düşme hareketi serbest cisim diyagramı

Newton'un II. Yasası yardımıyla Şekil 1.'deki m kütleli bir cismin hava dirençli ortamda hareketi

$$m\vec{a}=m\vec{g}-\vec{F}_d \tag{1}$$

denklemi ile ifade edilmektedir (Salahshour ve ark., 2017). Burada $m\ [kg]$ cismin kütlesi, $a\ [m/s^2]$ cismin ivmesi, $g\ [m/s^2]$ yerçekimi ivmesi ve $F_d\ [N]$ havanın direnç kuvvetidir. $a=\frac{dv(t)}{dt}$ ve $F_d=mkv(t)$ tanımları (1) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$\frac{dv(t)}{dt}=g-kv(t) \tag{2}$$

biçiminde birinci mertebeden lineer bir diferansiyel denklem elde edilmektedir. Burada $v(t)\ [m/s]$ cismin hızını, $t\ [s]$ zamanı ve $k\ [1/s]$ cismin şekline göre değişen sabit bir parametreyi ifade etmektedir. Denklem (2)'nin standart çözümü

$$v(t)=\frac{g}{k}+\left(v_0-\frac{g}{k}\right)e^{-kt} \tag{3}$$

şeklindedir. $v(t)=\frac{dy(t)}{dt}$ tanımı ile (3) denklemi

$$\frac{dy(t)}{dt}=\frac{g}{k}+\left(v_0-\frac{g}{k}\right)e^{-kt} \tag{4}$$

şeklinde yazılabilir ve (4) denkleminin çözümü

$$y(t)=y_0+\frac{g}{k}t+\left(\frac{1}{k}\right)\left(v_0-\frac{g}{k}\right)\left(1-e^{-kt}\right) \tag{5}$$

şeklinde elde edilir.

Literatürde m kütleli bir cismin hava dirençli bir ortamda hareketini inceleyen kinematik denklemlerin kesirli analiz yöntemleriyle incelenmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur (Rosales Garcia ve ark., 2013; Rosales ve ark., 2014; Losada ve Nieto, 2015; Ebaid ve ark., 2019; Acay ve ark., 2020). Rosales Garcia ve ark., (2013); hava dirençli bir ortamda m kütleli bir cismin düşüşüne ilişkin

diferansiyel denklemleri Caputo kesirli analizi ile incelemişlerdir (Rosales Garcia ve ark., 2013). Yazarlar, boyut analizini sağlamak amacıyla birinci mertebeden türev operatörünü $\frac{d}{dt} \to \frac{1}{\sigma^{1-\alpha}} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}$ şeklinde ele almışlardır. Burada σ parametresi s^{-1} birimindedir. Ayrıca diğer çalışmalardan farklı olarak σ parametresi ile γ kesirli türev mertebesi arasında $\gamma = \sigma k \left(0 < \sigma < \frac{1}{k}\right)$ şeklinde ilişki tanımlamışlardır (Rosales Garcia ve ark., 2013). Burada k parametresi havanın direnç kuvvetinin pozitif bir katsayısıdır.

Rosales ve ark., (2014); bir merminin hava direnci olan bir ortamda iki boyutlu hareketini ifade eden diferansiyel denklemleri Caputo kesirli analizi ile incelemişlerdir (Rosales ve ark., 2014). Yazarlar, boyut analizini sağlamak için birinci mertebeden türev operatörünü

$$\frac{d}{dt} \to k^{1-\gamma} \frac{d^\gamma}{dt^\gamma} \tag{6}$$

biçiminde tanımlamışlardır (Rosales ve ark., 2014). Burada k ifadesinin boyutu s^{-1} şeklindedir. Merminin x-eksenindeki ve y-eksenindeki hareket denklemlerini sırasıyla

$$\frac{d^\gamma v_x}{dt^\gamma} = -k^\gamma v_x \tag{7}$$

$$\frac{d^\gamma v_y}{dt^\gamma} = -gk^{\gamma-1} - k^\gamma v_y \tag{8}$$

şeklinde tanımlamışlardır (Rosales ve ark., 2014). Denklem (7) ve Denklem (8)'in boyut analizi incelendiğinde eşitliklerin her iki yanının boyutunun $[m/s]$ olduğu görülmektedir.

Losada ve Nieto (2015); hava dirençli bir ortamda m kütleli bir cismin serbest düşmesini ifade eden diferansiyel denklemi Caputo-Fabrizio (CF) kesirli türevi ile

$$D_{CF}^\alpha v(t) = g - \frac{k}{m} v(t) \tag{9}$$

şeklinde tanımlamışlardır (Losada ve Nieto, 2015). Burada D_{CF}^α ifadesi CF kesirli türev operatörünü, k parametresi ise havanın direnç kuvvetinin pozitif bir katsayısını temsil etmektedir.

Ebaid ve ark., (2019); bir merminin hava direnci olan bir ortamda iki boyutlu hareketini ifade eden diferansiyel denklemleri Caputo kesirli analizi kullanarak yeniden çözmüşler ve deneysel veriler ile uyumunu incelemişledir (Ebaid ve ark., 2019). Yazarlar, boyut analizini sağlamak için birinci mertebeden türev operatörünü

$$\frac{d}{dt} \to \frac{1}{\sigma^{1-\alpha}} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} \tag{10}$$

şeklinde tanımlamışlardır (Ebaid ve ark., 2019). Burada σ parametresi s^{-1} birimindedir. Yazarlar, yatay ile 45°'lik bir açı ve v_0 ilk hızı ile fırlatılan bir m kütleli merminin uçuş zamanının ve menzilinin deneysel verilerini uyumlu kılan kesirli türev mertebelerini elde etmişlerdir.

Acay ve ark., (2020); hava sürtünmeli bir ortamda m kütleli bir cismin serbest düşme hareketini tanımlayan (2) denklemini Atangana-Baleanu-Caputo (ABC) kesirli türevi, genelleştirilmiş kesirli türevi ve üç parametreli ML fonksiyonu içeren genelleştirilmiş ABC kesirli türevi ile sırasıyla

$$\frac{m}{\sigma^{1-\alpha}} D_{ABC}^{\alpha} v(t) = -mg - mkv(t) \tag{11}$$

$$\frac{m}{\sigma^{1-\alpha\rho}} D_{ABC}^{\alpha,\rho} v(t) = -mg - mkv(t) \tag{12}$$

$$\frac{m}{\sigma^{1-\alpha\mu}} D_{ABC}^{\alpha,\mu,\gamma} v(t) = -mg - mkv(t) \tag{13}$$

şeklinde tanımlamışlar ve çözmüşlerdir (Acay ve ark., 2020). Denklem (11), denklem (12) ve denklem (13) incelendiğinde eşitliğin her iki yanında $\lfloor m/s^2 \rfloor$ boyutu olduğu görülmektedir. Yazarlar, boyut analizini sağlamak için birinci mertebeden türev operatörünü

$$\frac{d}{dt} \to \frac{1}{\sigma^{1-\alpha}} \frac{d^{\alpha}}{dt^{\alpha}} \tag{14}$$

biçiminde tanımlamışlardır. Burada $\sigma^{1-\alpha}$ parametresinin boyut analizi $s^{1-\alpha}$ şeklindedir.

Bu çalışmada ise, hava direncinin ihmal edilmediği bir ortamda m kütleli cismin hareketini ifade eden denklem (2) ve denklem (4) Caputo kesirli türevi kullanılarak yeniden tanımlanmış ve çözülmüştür. Yukarıda belirtilen literatürdeki çalışmalardan farklı olarak denklem (2) ve denklem (4)'ün boyutunu korumak için Planck zaman sabiti t_P kullanılmıştır. Ayrıca düşük hız ve küçük cisimler için elverişli olan Stokes yasası kullanılarak k parametresi hesaplanmış, elde edilen deneysel veriler ile Caputo kesirli türevi ile elde edilen çözümler arasındaki uyum incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Kesirli analiz; fen, mühendislik ve son zamanlarda özellikle tıp biliminde tamsayı mertebeli kinematik diferansiyel denklemlerin türev operatörlerinin kesirli mertebeli olacak şekilde genelleştirilmesi ile ilgili matematiğin bir dalıdır (Podlubny, 1999). Yaklaşık 300 yıldan fazla bir geçmişi olan kesirli analiz ilk defa 1695 yılında L'Hospital ve Leibniz'in mektuplaşmaları sırasında $\frac{d^{1/2}y}{dx^{1/2}}$ notasyonu ile gündeme gelmiştir (Podlubny, 1999; Petras, 2011). Özellikle gerçek dünya sistemlerini standart matematiğe nazaran daha iyi açıklaması, deneysel verilere ve teorik tahminlere daha iyi uyum sağlaması kesirli analizin birçok alanda uygulaması konu olmuştur (Casasanta ve ark., 2012; Çalık ve ark., 2013; Çalık ve ark., 2014; Şen ve Çalık, 2014; Şen ve ark., 2014; Ertik ve ark., 2015; Çalık ve ark., 2016; Uzun ve ark., 2018; Şen ve ark., 2019; Şirin ve Çalık, 2019; Çalık ve ark., 2020; Valentim ve ark., 2020; Martinez ve ark., 2024; Yörük ve ark., 2024; Şen ve ark., 2025). Grünwald-Letnikov (GL), Riemann-Liouville (RL) ve Caputo kesirli türev tanımları kesirli analizin en bilinen tanımlarıdır (Oldham and Spanier, 1974; Miller and Ross, 1993; Carpinteri and Mainardi, 1997; Podlubny, 1999). GL tanımı nümerik hesaplamalara ilişkin çalışmalarda, RL tanımı teorik matematik uygulamalarında

ve Caputo tanımı ise özellikle fen ve mühendislik uygulamalarında önemli roller üstlenmektedir. Sabit bir sayının RL tanımı ile türevi sıfır değilken, Caputo tanımı ile türevinin sıfır olması ve Caputo tanımının başlangıç koşullarının tamsayı mertebeli diferansiyel denklemler ile aynı olmasından dolayı fizik, mühendislik ve tıp uygulamalarında Caputo tanımının kullanılması tercih edilmektedir (Podlubny, 1999; Şirin, 2011).

Caputo kesirli türevi, $y(t)$ fonksiyonu, $y,[a,b]\subset\square$ üzerinde integrallenebilen bir fonksiyon ve $m-1<\alpha\leq m\ (m\in\square^{+})$ olmak üzere

$$ {}_{0}^{C}D_{t}^{\alpha}y(t)=\frac{1}{\Gamma(m-\alpha)}\int_{0}^{t}(t-\tau)^{m-\alpha-1}y^{(m)}(\tau)d\tau \tag{15}$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Podlubny, 1999; Kilbas ve ark., 2006). Bunun yanı sıra kesirli analiz çalışmalarında Laplace dönüşümü oldukça önem arz etmektedir. (15) denklemi ile verilen Caputo kesirli türevinin Laplace dönüşümü ve bazı özel fonksiyonların Laplace dönüşümleri aşağıda verilmiştir (Acay ve ark., 2020);

- $\mathrm{L}\left\{{}_{0}^{C}D_{t}^{\alpha}y(t)\right\}=s^{\alpha}y(s)-\sum_{k=0}^{n}s^{\alpha-k-1}y^{(k)}(0)$
- $\mathrm{L}\left\{E_{\alpha}\left(-at^{\alpha}\right)\right\}=\frac{s^{\alpha}}{s\left(s^{\alpha}+a\right)}$
- $\mathrm{L}\left\{1-E_{\alpha}\left(-at^{\alpha}\right)\right\}=\frac{a}{s\left(s^{\alpha}+a\right)}.$

Burada $E_{\alpha}(.)$ ifadesi Mittag-Leffler (ML) fonksiyonu olup,

$$E_{\alpha}(.)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(.)^{k}}{\Gamma(\alpha k+1)}$$

biçimindedir (Podlubny, 1999). $\Gamma(.)$ ise Gama fonksiyonudur (Boas, 1966).

Fiziksel süreçlerin analizinde kullanılan diferansiyel denklemler, genellikle ilgili sistemin dinamiklerini tanımlamaktadır. Bu tür denklemlerin çözümlenmesinde Planck birimleri, özellikle de Planck zamanı (t_P), önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü Planck birimleri, fiziksel yasaların matematiksel ifadelerinin boyutsuz hale getirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, Şekil 1'de gösterilen ve hava dirençli ortamda m kütleli bir cismin serbest düşme hareketini tanımlayan denklem (2), t_P birimi kullanılarak boyutsuz bir biçimde

$$t_P\frac{dv(t)}{dt}=t_P g-t_P k v(t) \tag{16}$$

şeklinde yazılabilir. Burada $t_P=\sqrt{\hbar G/c^5}$ biçiminde olup, $\hbar$ Planck sabiti, G gravitasyonel sabiti ve c ışık hızıdır. Denklem (16)'da birinci mertebeden türev ifadesi $\alpha.$ mertebeden türev ifadesine genelleştirilirse denklem (16)

$$t_P^{\alpha} D_C^{\alpha} v(t) = t_P g - t_P k v(t) \tag{17}$$

şeklinde yazılabilir. Burada D_C^{α} ifadesi Caputo kesirli türev operatörüdür. (17) denkleminde eşitliğin sol tarafında t_P ifadesinin α kesirli türev mertebesini bir üst olarak almasının sebebi $v(t)$'nin boyutunu korumak içindir. Çünkü bir denklem ancak boyutları tutarlıysa geçerli olmaktadır. Bu sebeple (17) denkleminin boyut analizi $T^{\alpha}\frac{L/T}{T^{\alpha}} = T\frac{L}{T^2} - T\frac{1}{T}\frac{L}{T} \rightarrow \frac{L}{T} = \frac{L}{T} - \frac{L}{T}$ biçiminde olmalıdır. Denklem (17)'ye Laplace dönüşümü uygulanırsa

$$v(s) = \left(v_0 - \frac{g}{k}\right)\frac{s^{\alpha-1}}{s^{\alpha} + t_p^{1-\alpha}k} + \left(\frac{g}{k}\right)\frac{1}{s} \tag{18}$$

şeklinde yazılabilir. Burada $v(s)$, $v(t)$ ifadesinin Laplace dönüşümü; s, Laplace dönüşüm parametresidir. (18) ifadesine ters Laplace dönüşümü uygulanırsa

$$v(t) = \left(v_0 - \frac{g}{k}\right)E_{\alpha}(-t_p^{1-\alpha}kt^{\alpha}) + \frac{g}{k} \tag{19}$$

çözümü elde edilir. Elde edilen (19) denklemi, bir cismin hava dirençli ortamda hızının zamanla değişiminin Caputo kesirli türevi ile çözümüdür. $\alpha = 1$ için (19) denklemi denklem (3)'e eşit olmaktadır.

Hava dirençli ortamda bir cismin konumunun zamanla değişimi

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left(v_0 - \frac{g}{k}\right)E_{\alpha}(-t_p^{1-\alpha}kt^{\alpha}) + \frac{g}{k} \tag{20}$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (16)'ya benzer şekilde (20) denklemini boyutsuz hale getirmek için eşitliğin her iki tarafı t_P Planck zamanı ile çarpılırsa

$$t_P\frac{dy(t)}{dt} = t_P\left(v_0 - \frac{g}{k}\right)E_{\alpha}(-t_p^{1-\alpha}kt^{\alpha}) + t_P\frac{g}{k} \tag{21}$$

olur. Denklem (21)'de birinci mertebeden türev ifadesi $\alpha.$ mertebeden türev ifadesine genelleştirilirse denklem (21)

$$t_P^{\alpha} D_C^{\alpha} y(t) = t_P\left(v_0 - \frac{g}{k}\right)E_{\alpha}(-t_p^{1-\alpha}kt^{\alpha}) + t_P\frac{g}{k} \tag{22}$$

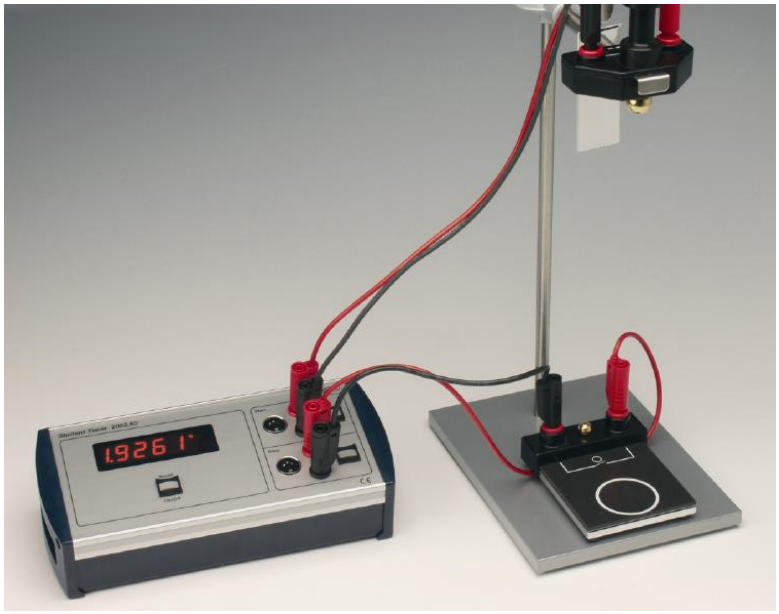
şeklinde yazılır. (22) denkleminde eşitliğin sol tarafında t_P ifadesinin α kesirli türev mertebesini bir üst olarak almasının sebebi $y(t)$'nin boyutunu korumak içindir. Bu doğrultuda denklem (22)'nin boyut analizi $T^{\alpha}\frac{L}{T^{\alpha}} = T\left(\frac{L}{T} - \frac{L/T^2}{1/T}\right) + T\frac{L/T^2}{1/T} \rightarrow L = L + L$ şeklinde olmalıdır. Denklem (17)'nin çözümüne benzer işlemler takip edilirse Denklem (22)'nin çözümü

$$y(t) = y_0 + t_p^{1-\alpha}\frac{g}{k}\frac{t^{\alpha}}{\Gamma(\alpha+1)} + \left(\frac{1}{k}\right)\left(v_0 - \frac{g}{k}\right)\left(1 - E_{\alpha}(-t_p^{1-\alpha}kt^{\alpha})\right) \tag{23}$$

şeklinde elde edilir. $\alpha = 1$için (23) denklemi (5) denklemine eşit olmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

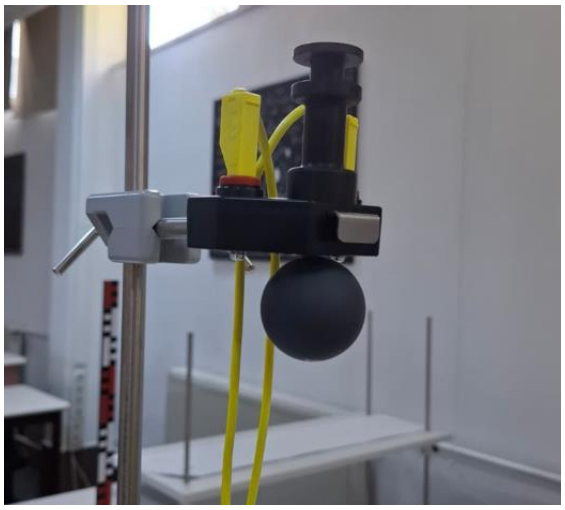
Bu çalışmada kütleleri $m_1 = 0{,}00282$ kg (siyah cisim), $m_2 = 0{,}00365$ kg (beyaz cisim) ve yarıçapları sırasıyla $r_1 = 0{,}019$ m (siyah cisim), $r_2 = 0{,}020$ m (beyaz cisim) olan iki farklı küresel cismin $h_1 = 0{,}6$ m, $h_2 = 0{,}8$ m, $h_3 = 1{,}0$ m, $h_4 = 1{,}2$ m yüksekliklerinden ilk hızsız ($v_0 = 0$ m/s) serbest bırakılarak yere ulaşma süreleri deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Deneysel ölçümler her bir kütle ve yükseklik için on defa tekrarlanarak ortalamasının alınması ile elde edilmiştir. Standart teorik hesaplamalar denklem (5) kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel ölçümler ile standart teorik hesaplamalar arasında uyumsuzluk görülmüştür. Bu uyumsuzluğu giderebilmek için denklem (2) ve denklem (4) Planck zaman birimi (t_P) ve Caputo kesirli türevi kullanılarak denklem (17) ve denklem (21) olarak yeniden tanımlanmışlardır. Bu denklemlerin çözümleri sırasıyla denklem (19) ve denklem (23) şeklinde elde edilmiştir.



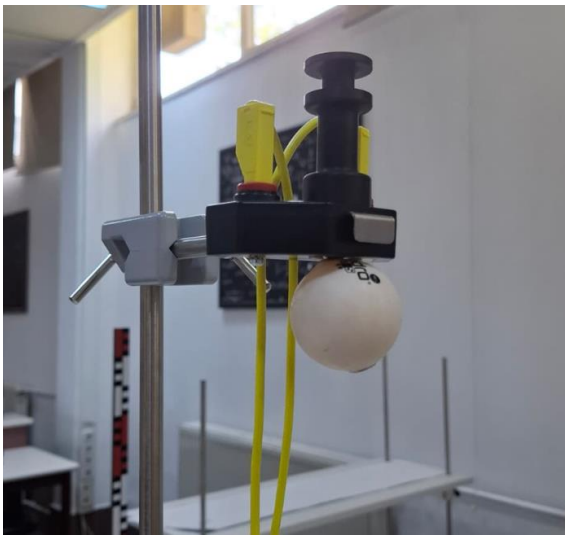
Şekil 2. Serbest düşme deney seti

Deneyler Milli Savunma Üniversitesi Hava Harp Okulu Fizik Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler Frederiksen marka (Versiyon: 2017.08.25/HS) serbest düşme deney seti yardımıyla elde edilmiştir. Deney setine ilişkin görsel Şekil 2.'de sunulmuştur. Deneyde kullanılan siyah cisme ve beyaz cisme ait görseller sırasıyla Şekil 3. ve Şekil 4.'te verilmiştir. Deneysel ölçümler ile standart teorik ve kesirli teorik hesaplamaların karşılaştırılmasında sırasıyla denklem (5) ve denklem (23) kullanılmıştır. Hesaplamalarda yerçekimi ivmesi $g = 9{,}806650\ m/s^2$ ve havanın viskozitesi $\eta = 0{,}000018\ Pa.s$ olarak alınmıştır. Stokes Yasasının ($C = 6\pi\eta r$) kütleye bölünmesi ile her bir cisim için k parametresi hesaplanmıştır. Cisimlerin kütleleri, kütlelerin k parametrelerine ilişkin değerleri, deneysel ölçümler ve standart sapmaları, standart ve kesirli teorik hesaplamalar ile α türev mertebeleri Tablo 1.'de verilmiştir. Tablo 1.'in birinci sütununda cisimlerin

kütleleri, ikinci sütununda ise k parametreleri verilmiştir. Üçüncü sütununda cisimlerin serbest bırakıldığı yükseklikler, dördüncü ve beşinci sütunda sırasıyla cisimlerin yere düşme sürelerinin deneysel sonuçları ve standart teorik hesaplamaları verilmiştir. Altıncı sütunda deneysel sonuçları sağlayan kesirli analiz hesaplamaları, yedinci sütunda deneysel sonuçlarla kesirli hesaplamaları uyumlu kılan α kesirli türev mertebeleri verilmiştir. Kesirli türev mertebeleri, sembolik hesaplama yeteneğine sahip yüksek düzeyde matematiksel işlem yapabilen bir yazılım kullanarak hesaplanmıştır. Tablo 1.'de görüldüğü gibi, farklı kütlelere ve yarıçaplara sahip küresel cisimlerin farklı yüksekliklerden serbest düşme sürelerinin standart teorik hesaplamaları, deneysel sonuçların standart sapmaları da dikkate alındığında oldukça farklıdır. Serbest düşme sürelerinin standart teorik sonuçları deneysel sürelerden sistematik olarak daha küçüktür. Bu durum hava direncinin, standart teorik modelin çözümü olan denklem (5)'de eksik temsil edildiğini göstermektedir. Denklem (23) kullanılarak hesaplanan kesirli teorik sonuçlar ile deneysel ölçümler ise birebir uyum içindedir. m_1 ve m_2 kütleli cisimlerin k parametrelerinin doğruluğu incelendiğinde Ebaid ve arkadaşlarının (Ebaid ve ark., 2019) yapmış oldukları çalışmalarla uyum içindedir.



Şekil 3. Siyah cisim



Şekil 4. Beyaz cisim

Bunun yanı sıra, gerek m_1 kütlesi için gerek m_2 kütlesi için artan yükseklik ile birlikte α türev mertebelerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum düşme süresinin artmasının sistemin kesirli davranışının daha belirgin hale gelmesine neden olduğunu anlatmaktadır. Cismin havada daha uzun süre kalması daha fazla hava direncine ve daha fazla enerji kaybına neden olmaktadır. Türev mertebelerindeki bu azalış, hava direncinin zamanla biriken etkilerini daha belirgin hale getirmektedir. Her iki cisim içinde yüksekliğin artması ile α değerinin bu denli azalması klasik Newton mekaniğiyle açıklanamayan enerji sönüm etkilerinin Caputo kesirli analizi ile açıklanabileceğini göstermektedir. Tablo 1.'de m_1 ve m_2 kütlelerinin serbest bırakılma yükseklikleri aynı olmasına rağmen deneysel ölçümlerle eşdeğer kılan α türev mertebelerinin birbirlerinden farklı olduğu görülmektedir. Örneğin,

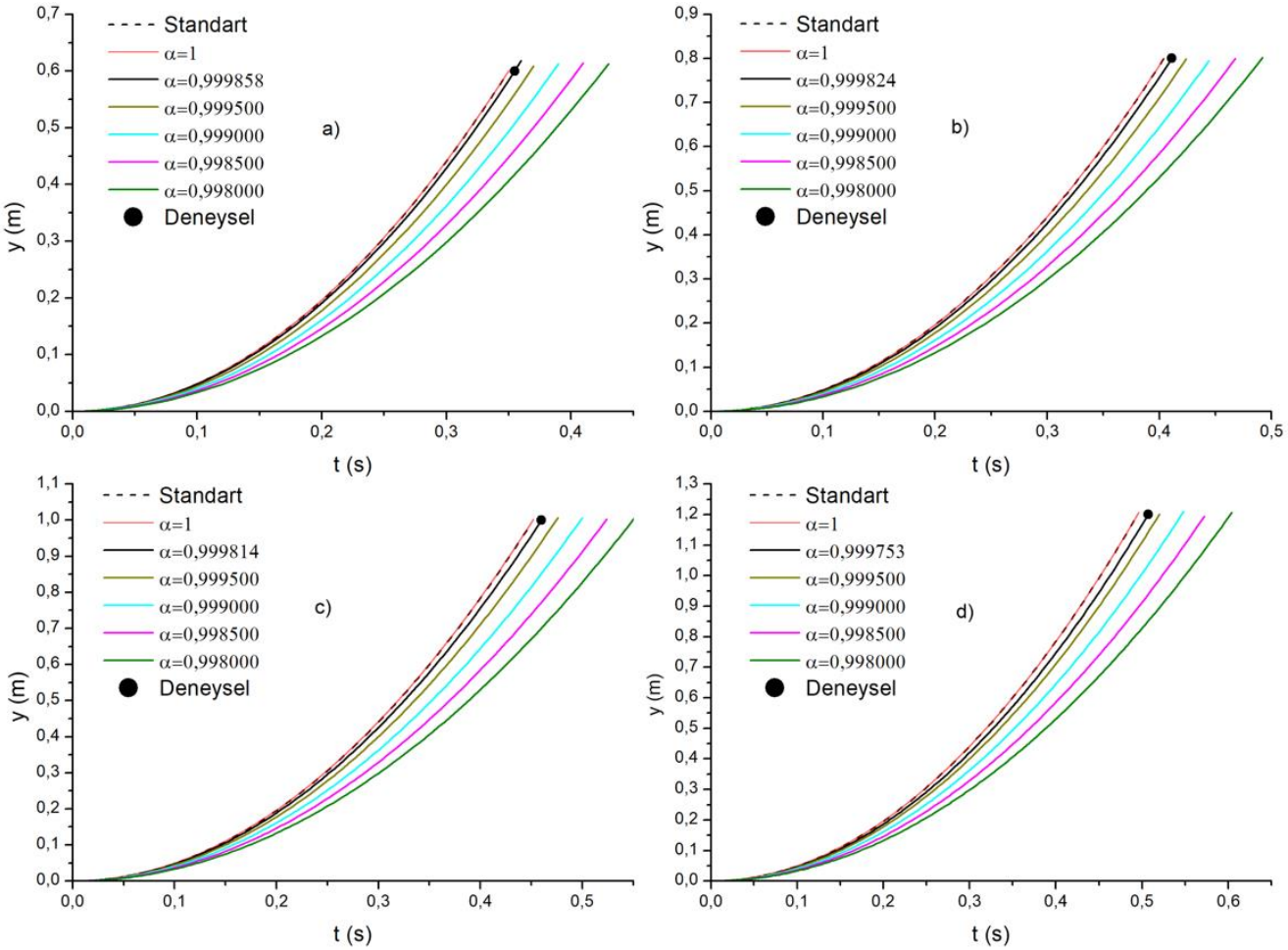
m_1 kütlesinin $0{,}6$ m yükseklikten düşüş süresinin türev mertebesi $\alpha=0{,}999858$ iken m_2 kütlesinin $0{,}6$ m yükseklikten düşüş süresinin türev mertebesi $\alpha=0{,}999812$ şeklinde elde edilmiştir. Serbest düşen cisimlerin yarıçapları arttıkça cisme etki eden hava direnci kuvveti artar. Bu da sistemin daha fazla enerji kaybetmesine neden olur. $r_1<r_2$ olması nedeniyle m_1 kütlesinin α türev mertebeleri, m_2 kütlesinin α türev mertebelerinden büyüktür.

Tablo 1. Farklı yüksekliklerden serbest bırakılan cisimlerin deneysel, standart ve kesirli teorik ortalama süreleri

Kütle: m (kg)	k (1/s)	Yükseklik: h (m)	Ortalama düşme süresi: t (s)			
			Deneysel	Standart	Kesirli	α
$m_1=0{,}00282$	$k_1=0{,}002285$	$h_1=0{,}6$	0,354737±0,002701	0,349855	0,354737	0,999858
		$h_2=0{,}8$	0,411005±0,001326	0,403986	0,411005	0,999824
		$h_3=1{,}0$	0,459964±0,000947	0,451678	0,459964	0,999814
		$h_4=1{,}2$	0,506937±0,001482	0,494797	0,506937	0,999753
$m_2=0{,}00365$	$k_2=0{,}001858$	$h_1=0{,}6$	0,356343±0,000828	0,349846	0,356343	0,999812
		$h_2=0{,}8$	0,411936±0,001575	0,403975	0,411936	0,999800
		$h_3=1{,}0$	0,461982±0,001285	0,451664	0,461982	0,999769
		$h_4=1{,}2$	0,508738±0,000804	0,494780	0,508738	0,999716

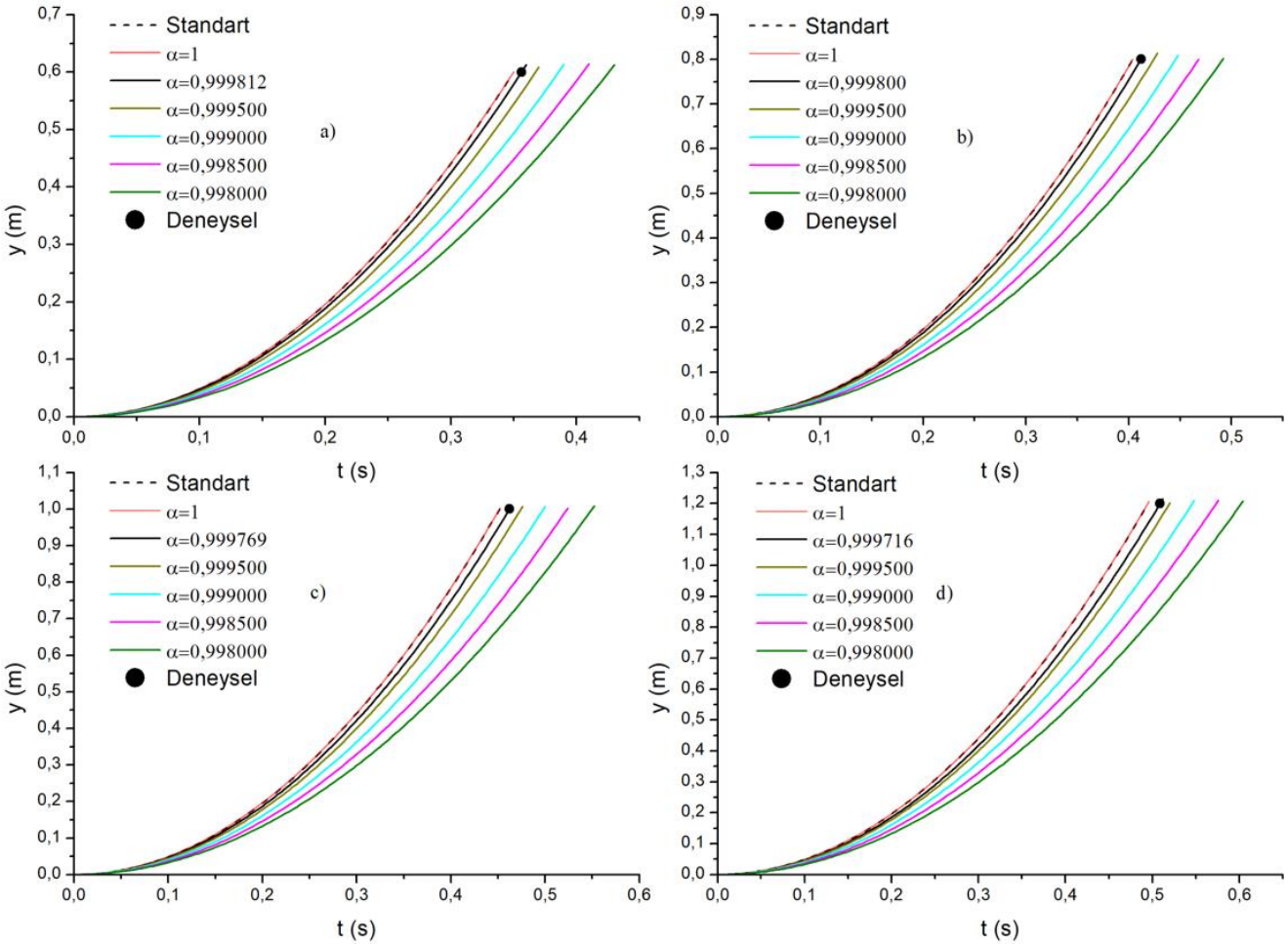
Not: $k=(6\pi\eta r)/m$ *formülü ile hesaplanmıştır.*

Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde $\alpha=1$ türev mertebesi için denklem (23)'ün denklem (5)'e eşit olduğu görülmektedir. Ayrıca α türev mertebesinin azalan değerleri için hava direncinin ihmal edilmediği bir ortamda cisimlerin yere düşme sürelerinde artışlar görülmektedir. Bu artışlar artan zaman ile α türev mertebesinin etkisinin daha belirgin hale geldiğini anlatmaktadır. Kısacası uzun süreli düşüşlerde cisim limit hıza ulaşana dek kesirli mertebe parametresinin kritik bir rol oynayacağı aşikârdır.



Şekil 5. Farklı kesirli türev mertebelerinde serbest düşen m_1 kütleli cismin konum-zaman grafikleri

a) h_1=0,6 m için b) h_2=0,8 m için c) h_3=1,0 m için d) h_4=1,2 m için



Şekil 6. Farklı kesirli türev mertebelerinde serbest düşen m_2 kütleli cismin konum-zaman grafikleri

a) h_1=0,6 m için b) h_2=0,8 m için c) h_3=1,0 m için d) h_4=1,2 m için

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, hava direnci etkisinin ihmal edilmediği serbest düşme hareketi hem deneysel hem de kesirli analiz yöntemi ile incelenmiştir. Standart teorik modelin (Denklem (5)), ölçülen düşme sürelerini sistematik olarak olduğundan kısa tahmin ettiği görülmüştür. Planck zaman birimi (t_p) ve Caputo kesirli türevi kullanılarak yeniden tanımlanan model (Denklem (23)) ile elde edilen sonuçlar ise deneysel verilerle yüksek uyum göstermiştir. Elde edilen bulgular, kesirli türev mertebesinin (α) yükseklik ve dolayısıyla düşme süresi arttıkça azaldığını ortaya koymuştur. Bu durum, uzun süreli düşüşlerde hava direncinin biriken etkilerinin klasik Newton mekaniği ile tam olarak açıklanamayacağını, ancak kesirli analiz yaklaşımı ile modellenebileceğini göstermektedir. Ayrıca farklı yarıçaplara sahip cisimlerin α değerlerindeki farklılık, hava direncinin yüzey alanına bağlı etkisini doğrulamaktadır. Sonuç olarak, kesirli analiz yöntemi, düşük hız ve küçük cisimler için Stokes yasası altında hava direncini içeren hareketlerin daha doğru tahmin edilmesini sağlamaktadır ve klasik modele kıyasla deneysel verilerle daha iyi uyum göstermektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Acay B., Ozarslan R., Bas E. Fractional physical models based on falling body problem. AIMS Mathematics 2020; 5(3): 2608-2628.

Boas ML. Mathematical method in the physical sciences. New York: John Wiley and Sons; 1966.

Carpinteri A., Mainardi F. Fractals and fractional calculus in continuum mechanics. Wien: Springer Verlag; 1997.

Casasanta G., Ciani D., Garra R. Non-exponential extinction of radiation by fractional calculus modelling. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2012; 113(2): 194-197.

Çalık AE., Ertik H., Öder B., Şirin H. A fractional calculus approach to investigate the alpha decay processes. International Journal of Modern Physics E 2013; 22(7): 1350049.

Çalık AE., Şirin H., Ertik H., Öder B., Şen M. Half-lives of spherical proton emitters within the framework of fractional calculus. International Journal of Modern Physics E 2014; 23(9): 1450044.

Çalık AE., Şirin H., Ertik H., Şen M. Analysis of charge variation in fractional order LC electrical circuit. Revista Mexicana de Fisica 2016; 62(5): 437-441.

Çalık AE., Şirin H., Şen M. Experimental and fractional analysis of half-value thicknesses of polyethylene absorber. Revista Mexicana de Fisica 2020; 66(2): 232-238.

Ebaid A., El-zahar ER., Aljohani AF., Salah B., Krid M., Machado JT. Analysis of the two-dimensional fractional projectile motion in view of the experimental data. Nonlinear Dynamics 2019; 97: 1711-1720.

Ertik H., Çalık AE., Şirin H., Şen M., Öder B. Investigation of electrical RC circuit within the framework of fractional calculus. Revista Mexicana de Fisica 2015; 61: 58-63.

Kilbas AA., Srivastava HM., Trujillo JJ. Theory and applications of fractional differential equations. Amsterdam: Elsevier; 2006.

Losada J., Nieto JJ. Properties of a new fractional derivative without singular kernel. Progress in Fractional Differentiation and Applications, An International Journal 2015; 1(2): 87-92.

Martinez R., Gallegos A., Macias-Diaz JE. A fractional tumor-growth model and the determination of the power law for different cancers based on data fitting. Applied Mathematics Letters 2024; 147: 108840.

Miller KS., Ross B. An ıntroduction to the fractional calculus and fractional differential equations. New York; John Wiley and Sons; 1993.

Oldham KB., Spanier J. The Fractional calculus. San Diego: Academic Press; 1974.

Petras I. Fractional-order nonlinear systems modeling, Analysis and Simulation. Berlin: Springer-Verlag; 2011.

Podlubny I. Fractional differential equations. San Diego: Academic Press; 1999.

Rızaoğlu E., Sünel N. Klasik Mekanik. Tokat: Seçkin Yayınları; 2006.

Rosales Garcia JJ., Guia Calderon M., Martinez Ortiz J., Baleanu D. Motion of a particle in a resisting medium using fractional calculus approach. Proceedings of the romanian academy, Series A 2013; 14(1): 42-47.

Rosales JJ., Guia M., Gomez F., Aguilar F., Martinez J. Two dimensional fractional projectile motion in a resisting medium, Central European Journal of Physics 2014; 12(7): 517-520.

Salahshour S., Ahmadian A., Ismail F., Baleanu D. A fractional derivative wity non-singular kerner for interval-valued functions under uncertainty. Optik 2017; 130: 273-286.

Şen M., Çalık AE. Calculation of half-value thickness for aluminum absorbers by means of fractional calculus. Annals of Nuclear Energy 2014; 63: 46-50.

Şen M., Çalık AE., Ertik H. Determination of half-value thickness of aluminum foils for different beta sources by using fractional calculus. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 2014; 335: 78-84.

Şen M., Çalık AE., Senturk I., Şirin H. A generalization of cell survival models via fractional approach. Physica Scripta 2025; 100(3): 035019.

Şen M., Çalık AE., Şirin H. Theoretical investigation of tenth-value thicknesses of aluminium absorbers. AIP Conference Proceedings 2019; 2178(1): 030058.

Şirin H. Transport olayının istatistiksel mekanik yöntemlerle incelenmesi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no:83, İzmir, Türkiye, 2011.

Şirin H., Çalık AE. Newton'un soğuma kanunu: Kesirsel bir yaklaşım. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 19(1): 60-66.

Uzun M., Şirin H., Çalık AE., Atman KG. Graybody radiation phenomena in a fractional manner. X-Ray Spectrometry 2018; 47(5): 405-409.

Valentim Jr CA., Oliveira NA., Rabi JA., David SA. Can fractional calculus help improve tumor growth models?. Journal of Computational and Applied Mathematics 2020; 379: 112964.

Yörük E., Çalık AE., Atman KG., Şirin H. A fractional approach to cluster radioactivity. International Journal of Modern Physics E 2024; 33(01n02): 2450008.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1444-1463, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1444-1463, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Betonarme Yapıların Bölme Duvar Alternatiflerine Göre Deprem Yükü Altında Performanslarının İncelenmesi

Soner ŞEKER[1*], Oğuzcan SAĞDIÇ[2]

[1,2] Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Uşak, 64200

[1]https://orcid.org/0000-0002-7632-9713
[2]https://orcid.org/0009-0009-8400-559X
*Sorumlu yazar: soner.seker@usak.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.07.2025
Kabul tarihi: 15.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Bölme duvar
Alçı levha
Deprem
Betonarme
Yapısal davranış

ÖZ

Dünyanın en aktif tektonik kuşaklarından birinin üzerinde yer alan Türkiye, yüksek deprem riski altındaki bölgelerden biridir. Tarihsel olarak depremler hem sosyal hem de ekonomik olarak ciddi kayıplara neden olmuş ve bu felaketlerin etkileri toplumsal hafızada derin izler bırakmıştır. Depremler öncesinde ve sonrasında alınacak yapısal ve idari tedbirler, olası zararların en aza indirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Bu bağlamda öncelikli konulardan biri mevcut yapı stokunun güncel deprem yönetmeliklerine uygun hale getirilmesi, yani riskli binaların dönüştürülmesi veya güçlendirilmesidir. Güncel ihtiyaçları karşılayabilecek güvenli ve işlevsel yapıların inşa edilmesi sürecinde farklı yapısal çözümler sunulmakta, betonarme yapılarda kullanılan bölme duvarlar da bu süreçte önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde bölme duvarların temel işlevi iç mekânları birbirinden ayırmak olsa da çeşitli çalışmalar bu elemanların dinamik anlamda da yapı sistemine katkı sağladığını ortaya koyuyor. Binanın performansını etkileyen bölme duvarlar için tuğla ve alçı bims gibi malzemeler yaygın olarak tercih ediliyor. Bu yapı malzemelerinin her birinin kendine özgü mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri literatürde detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, bölme duvar malzemesi olarak alternatif bir çözüm olan levha kullanımının yapısal performansa etkisi değerlendirilmiştir. Alçı levha duvarların, afet sırasında doğrudan veya dolaylı olarak ortaya çıkabilecek sosyal etkileri de çalışma kapsamında ele alınmıştır. Üç farklı malzemenin (tuğla, bims ve alçıpan duvarlar) iki farklı bina yükseklik sınıfındaki (BYS=6 ve BYS=4) durumları, statik analiz programı olan IdeCAD programı ile doğrusal analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İnşa edilen modellerin kütlesi, kullanılan duvar malzemesinin yoğunluğu ile orantılı olarak artmıştır. Kaydedilen en düşük bina ağırlığı alçı levha kullanılarak inşa edilen modellerde gözlenmiştir. Bu değişimler, sismik olaylar sırasında yapıların performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmuştur. Aynı zamanda, ağırlıktaki azalma yatay yüklerde ve momentlerde de düşüşe neden olmuştur. Alçı levha duvarlı yapılar bağlamında, burulma momentinde, modal taban kesme kuvvetinde ve modal devrilme momentinde bir azalma gözlenmiştir.

Investigation of the Performance of Reinforced Concrete Structures Under Earthquake Loading According to Partition Wall Alternatives

Research Article

Article History:
Received: 24.07.2025
Accepted: 15.12.2025
Published online:15.06.2026

ABSTRACT

Located on one of the world's most active tectonic belts, Turkey is one of the regions under high earthquake risk. Historically, earthquakes have caused severe losses both socially and economically, and the effects of these disasters have left deep traces in social memory. Structural and administrative measures

Keywords:
Partition Wall
Gypsum board
Reinforced concrete
Earthquake
Structural behaviour

to be taken before and after earthquakes play a critical role in minimizing potential damages. In this context, one of the priority issues is to bring the existing building stock into compliance with current earthquake regulations, i.e., to transform or retrofit risky buildings. Different structural solutions are offered in the process of building safe and functional structures that can meet current needs, and partition walls used in reinforced concrete structures stand out as an important component in this process. Although the main function of partition walls today is to separate interior spaces from each other, various studies reveal that these elements also contribute to the building system in a dynamic sense. Materials such as brick and gypsum pumice are widely preferred for partition walls that affect the performance of the building. It is found in various studies that each of these building materials has different mechanical, chemical, and physical properties. Within the scope of this study, it was aimed to put a different perspective on wall-building materials by using gypsum partition walls. The effect of using gypsum board partition walls as partition walls on building performance and the potential social impacts during disasters are also discussed. The cases of three different materials (brick, pumice and gypsum board walls) in two different building height classes (BYS=6 and BYS=4) were examined by using the linear analysis method with the static analysis program IDECAD. The weights of the compared building models increased depending on the density of the wall material used. The lowest building weight was realized in the models built with gypsum board. These differences directly affected the performance of the structures under earthquake. As the weight of the structure decreased, the horizontal loads and moments also decreased. Less torsional moment, modal base shear force and modal overturning moment occurred in gypsum board walled structures.

To Cite: Şeker S., Sağdıç O. Betonarme Yapıların Bölme Duvar Alternatiflerine Göre Deprem Yükü Altında Performanslarının İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1444-1463.

1. Giriş

Türkiye, aktif tektonik kuşaklar arasında yer alan Alp-Himalaya deprem kuşağında konumlanmış olması nedeniyle ciddi sismik riskler taşıyan bir ülkedir. Özellikle Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fay hatları, hem tarihsel hem de yakın geçmişte meydana gelen yıkıcı depremlerle ülke genelinde yapı güvenliği açısından önemli tehditler oluşturmaktadır (MTA, 2020). Ülke topraklarının yaklaşık üçte ikisi büyük depremlerin meydana gelebileceği tehlikeli bölgelerde yer almakta; nüfusun büyük kısmı ise bu riskli bölgelerde yaşamaktadır (TMMOB, 2023). Depremler, Türkiye'de hem en sık karşılaşılan hem de en büyük yapısal ve toplumsal kayıplara neden olan afet türü olarak öne çıkmaktadır. Mevcut yapı stokunun önemli bir bölümü yürürlükteki deprem yönetmeliklerinden önce inşa edildiği için, taşıyıcı sistem detaylarının yetersizliği ve malzeme kalitesindeki eksiklikler, 1999 Marmara ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinde olduğu gibi ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır (FEMA P-807, 2012). Çeşitli amaçlarla, özellikle zemin kat dolgu duvarları kaldırılmış çok sayıda binanın depremler sırasında bu katta artan yanal deplasman talebiyle yumuşak kat/zayıf kat mekanizmaları sergilediği ve binanın bu kat üzerine çöktüğü geçmiş depremlerden bilinmektedir (Bakala ve ark., 2024). Bu durum, yapıların deprem performanslarının değerlendirilmesini ve gerekli yapısal iyileştirmelerin yapılmasını zorunlu hale getirmiştir (Antoniou, 2023). Yapının deprem davranışını etkileyen en temel faktörlerden biri, yapıya

etki eden atalet kuvvetleriyle doğrudan ilişkili olan toplam kütledir. Deprem anında oluşan ivmeler sonucu ortaya çıkan kuvvetler, yapı kütlesinin büyüklüğüyle orantılıdır (Asteris ve ark., 2017). Genel olarak yapısal olmayan elemanlar olarak tanımlanan bölme duvarların yapının deprem etkileri altındaki davranışlarına olan katkıları bilinmektedir. Bu bağlamda, bölme duvarların hem yapıya eklediği kütle hem de bu duvarların yapıda ne şekilde yerleştirildiği, taşıyıcı sistemin de yapısal davranışını önemli ölçüde şekillendirmektedir (Kızıloğlu, 2006; Akkuzu, 2007). Özellikle yüksek rijitliğe sahip betonarme çerçeve sistemlerde, dolgu duvarların yerleşim düzeni; yapısal modlarının şekillenmesini, burulma etkilerinin büyüklüğünü ve enerjinin sönümlenme biçimini doğrudan etkileyebilmektedir (Magenes ve Calvi, 1997). Bu durumu ortaya koyan çalışmalar arasında taşıyıcı sisteme katkısını araştıran deneysel çalışmalar oldukça fazladır. Bu çalışmalar, dolgu duvarların yapılarda özellikle yatay rijitlikte olumlu katkı sağladığını ve yapının enerji sönümleme kapasitesine artırdığını göstermektedir (Mosalam ve ark., 1997). Eşdeğer deprem yükü yöntemi ile deprem etkisi altında yapısal davranış incelenmiş ve artırımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ile yapı performansı araştırılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar ışığında sayısal modelinde dolgu duvarların basınç çubuğu olarak dikkate alındığı durumda, dolgu duvarların yalnızca düşey yük olarak dikkate alındığı duruma göre periyot değerlerinin arttığı, tepe noktası deplasmanlarının azaldığı görülmüştür (Özyurt ve ark., 2023). Dolgu duvarların betonarme binalarda bölme elemanı olarak kullanılması dolgu duvarların binanın yanal rijitliğini artırdığını ve bundan dolayı binanın doğal titreşim periyodunu azalttığı, binanın tepe deplasman değerini azalttığı ve depremin binada oluşturduğu taban kesme kuvveti değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda dolgu duvarın yapılarda taşıyıcı eleman olarak kabul edilip yönetmelikte bu yönde ele alınmasının elzem olduğu sonucuna varılmıştır (Akgül, 2023). Dolgu duvarlar, yapı içerisindeki kütle ve rijitlik dağılımını etkileyerek burulma davranışının gelişmesine neden olabilmektedir (Pauley ve Priestley, 1992). Bu doğrultuda yapılan çeşitli araştırmalar bu etkiyi hem sayısal modellerle hem de deneysel yöntemlerle incelemiştir (Govindan ve Santhakumar, 1986; Panagiotakos ve Fardis, 2001). Ağır duvar elemanları, yapı kütlesini artırarak, deprem spektrumundan alınan tepki ivmelerini artırabiliyorken; daha hafif ağırlığa sahip malzemeler kullanılarak bu etkinin azaltılması mümkün olabilmektedir (Braga ve ark., 2011). Yapılarda kullanılan bölme duvar imalatlarında alçı levha ya da gazbeton gibi hafif malzemeleri kullanmak, yapıda etkili olabilecek sismik yükleri azaltma potansiyeli ile avantaj sağlamaktadır (Calderini ve ark., 2009; Çoban, 2022). Son dönemde, montaj kolaylığı, düşük maliyet ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajlarıyla alçı levha paneller gibi hafif bölme sistemlerinin kullanımı yaygınlık kazanmıştır (Giordano ve ark., 2009). Bu şekilde malzemeler ile imal edilmiş olan sistemlerin deprem etkileri altındaki davranışları sarsma tablası testleriyle kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir (Magliulo ve ark., 2014; Petrovic ve ark., 2021). Ayrıca, bu panellerin montaj tipi, darbe dayanımı ve eğilme kapasitesi gibi özelliklerinin mekanik davranışları üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir (Çelik ve ark., 2005). Farklı bölme duvar alternatiflerinin kullanılması, yapının titreşim modları, kat öteleme oranları ve taban kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi, daha bilinçli performans temelli tasarım

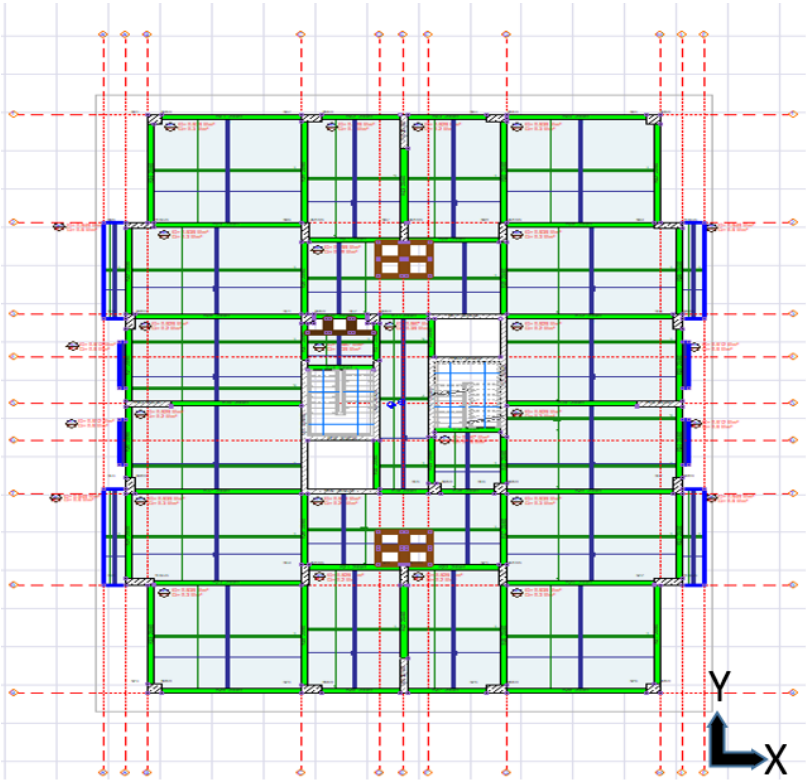
kararlarının alınmasına katkı sağlamaktadır (Asteris ve ark., 2015). Yapılan araştırmalarda yapılardaki bölme duvar türlerinin yapısal sisteme etkilerini detaylı olarak inceleyen ve avantajlarını ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır (Aras, 2018; Halis ve Akgüzel, 2022). Yapılan çalışmalarda tuğla dolgu duvarlı, gazbeton dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız binaların taşıyıcı çerçeve sistemlerinin üç boyutlu modelleri SAP2000 yapısal analiz programında oluşturulmuş ve eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Dolgu duvarlar, deneysel ve analitik çalışmaların ışığında eşdeğer diyagonal çubuklar olarak modellenmiştir. Analizlerin sonrasında tüm modellerin doğal titreşim periyodu, taban kesme kuvveti, yer değiştirme, kat rijitlik, burulma düzensizliği katsayısı ve etkin göreli kat ötelemesi değerleri verilmiştir (Uysal,2013). Benzer biçimde gerçekleştirilen bir başka çalışmada da TBDY-2018 ve Eurocode-8 yönetmeliklerine göre farklı kat yüksekliklerindeki betonarme binalar analiz edilmiş ve Eurocode-8'e göre tasarlanan yapıların taban kesme kuvvetleri ile deplasman değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu sonuç, yönetmelik farklılıklarının yapısal davranış üzerinde belirleyici olduğunun yanı sıra yapı ağırlığın ve rijitliğin deprem performansı üzerindeki belirleyici rolünü desteklemektedir (Ahmed ve ark., 2025)

Yapılan bu çalışma kapsamında, betonarme binalarda kullanılan farklı bölme duvar malzemeleri farklılaşmasının (alçı levha, tuğla, bims) yapıların deprem performansları üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarını araştırmak amacıyla analizlerde kullanılacak olan modeller İdeCAD yapısal analiz programında hazırlanmıştır. Ele alınan örnekler belirlenirken Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY 2018) tanımlanmış olan farklı bina yükseklik sınıflarındaki (BYS=4 ve BYS=6) yapıların kullanılması tercih edilmiştir. İncelenen örneklerde bina yüksekliklerinin değişimlerine bağlı olarak alternatif bölme duvar malzemelerinin yapısal davranışlara olan etkisini ortaya koyabilmek amacıyla, yapıların mimari plan ve taşıyıcı sistem geometrisinde değişikliğe gitmeden kullanılan bölme duvar malzemeleri farklılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen periyot, toplam kütle, taban kesme kuvveti, göreli kat ötelemesi ve devrilme momenti gibi parametreler üzerinden malzeme tipinin yapısal performansa etkisi karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, hafif yapı elemanlarının deprem performansına olan katkısını ve yönetmeliklerde dikkate alınması gereken tasarım parametrelerini ortaya koymaktadır.

2. Materyal ve Metot

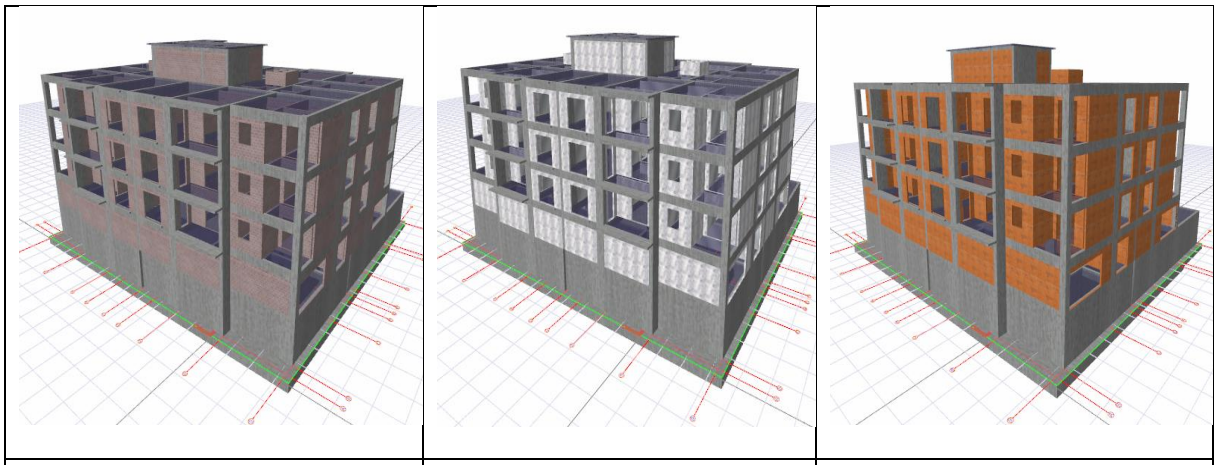
İnşaat projelerinin oluşum aşamasında yapıların tasarımı birtakım yönetmeliklere bağlı olarak belirli kıstaslar çerçevesinde gerçekleşmektedir. Bu kıstasların sahada doğru bir şekilde uygulanması ve yapısal elemanların deprem etkisi altında kendilerinden beklenen gerekli performansları sergilemesi büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple, tasarım aşamasında öngörülen yapısal davranışların doğru şekilde gerçekleşebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu davranışların sağlanabilmesi için imalatların, ilgili yönetmeliklerde belirtilen esaslara uygun olarak yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada incelenen yapısal modelin belirlenmesinde ülkemiz genelinde ve deprem bölgelerinde yapı stokumuzun

çoğunluğunu oluşturan bir betonarme yapı modeli tercih edilmiştir. Çalışmaya esas olan örneklere ait olan betonarme yapıya ait olan model Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. İncelenen yapı modeline ait plan

Ele alınan yapısal model ile; TBDY 2018'de tanımlanan bina yükseklik sınıflarından BYS:4 ve BYS:6 olacak şekilde farklı bina yükseklikleri ve yapılarda kullanılması öngörülen farklı bölme duvar malzemelerine göre yapıların davranışlarındaki etkilerinin ortaya konulması hedeflenmektedir. Çalışmada ele alınan yapısal modellerin taşıyıcı sistemlerinin tasarımında TBDY 2018 esasları dikkate alınmıştır. Bölme duvar malzemelerindeki farklılaşmalara göre ele alınan yapısal modellerin görünüşleri Şekil 2'de görülmektedir. Modellerde aynı ebatlarda duvar oluşacak şekilde bims, tuğla ve alçı levha duvar malzemeleri kullanılmıştır.



(a) Bims duvar	(b) Alçı levha	(c) Tuğla duvar

Şekil 2. Farklı duvar alternatiflerine göre oluşturulan yapılar

Söz konusu örnekler betonarme yapılarda yaygın olarak tercih edilen bölme duvarların yapısal performansa ve davranışa olan etkileri incelenmiştir.

2.1. Materyal

Modellenen örneklerde dış cephe ve iç cephe duvarlarında kullanılan malzemelerin özellikleri literatür çalışmalarında değerlendirilmiştir. Bu çalışmada yer alan bims duvar malzemesi gözenekli yapıları nedeniyle hafif olup birim hacim ağırlıkları deneysel çalışmalarda genellikle 600–1,500 kg/m³ aralığında raporlanmıştır; pomza agregalı hafif blok çalışmalarında kuru birim hacim ağırlıkları 900–1,500 kg/m³ aralığında olmuştur. Bims blokların basınç dayanımı çalışmalarda geniş değişim göstermekte; 2–8 MPa aralığı sık görülen bir aralıktır ancak katkı ve üretim yöntemine bağlı olarak daha yüksek değerlere çıkılmıştır (Akyüncü, 2019; Kayan ve ark., 2020; Çiçek, 2002). Isı iletkenlik açısından doğal bims ile yapılmış bloklarda malzeme yoğunluğuna bağlı olarak 0,17–0,30 W/m·K değerleri, su davranışı açısından bims blok numunelerde su emme katsayısı 1,8-2,4 kg/m.h değerleri olarak ölçülmüştür (Pamukçu ve ark.,1997; Çiçek, 2002).

Tablo 1. Bims iç duvar malzemesi Yük Analizi (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Yük Katmanı Adı	Kalınlık (m)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Duvar Yükü (kg/m²)
İç Sıva	0,02	800	16
Bims Duvar	0,135	600	81
İç Sıva	0,02	800	16
Duvar Örgü Harcı	0,0022	1800	3,96

Tablo 2. Bims dış duvar malzemesi yük analizi (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Yük Katmanı Adı	Kalınlık (m)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Duvar Yükü (kg/m²)
Dış Sıva	0,02	2000	40
Bims Duvar	0,135	600	8,1
İç Sıva	0,02	800	16
Duvar Örgü Harcı	0,0022	1800	3,96

Çalışmada bir diğer duvar yapı malzemesi olarak tuğla incelenmiştir. Literatür çalışmalarında birim hacim ağırlık 1000-2200 kg/m³ aralığında yer almıştır (İMO,2025; Çiçek, 2002; Pamukçu ve ark.,1997). Tuğla yapı malzemesinin basınç dayanımı pişirme sıcaklığı ve gözeneklilik oranına göre değişkenlik göstermekte olup 5-20 MPa olarak karşımıza çıkmaktadır (TS EN 771,2011). Isı iletkenlik değerleri açısından tuğla 0,30-1,03 W/m·K değerleri çalışmalar ortaya koymuştur. Su emme katsayısı 9-30 kg/m.h değer aralığında ölçülmüştür (Pamukçu ve ark.,1997; TSE 825, 2013; Şişman ve ark.,2006; Yücel,2020). Ayrıca pişirme sıcaklığının artması tuğlanın mekanik dayanımını arttırmakta, su emmesini azaltmakta ve birim ağırlığını arttırmaktadır (Ekmekyapar ve Örüng, 1993).

Tablo 3. Tuğla iç duvar malzemesi yük analizi (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Yük Katmanı Adı	Kalınlık (m)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Duvar Yükü (kg/m²)
İç Sıva	0,02	800	16
Tuğla Duvar	0,135	1000	135
İç Sıva	0,02	800	16
Duvar Örgü Harcı	0,0022	2000	4,4

Tablo 4. Tuğla dış duvar malzemesi yük analizi (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Yük Katmanı Adı	Kalınlık (m)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Duvar Yükü (kg/m²)
Dış Sıva	0,02	2000	40
Tuğla Duvar	0,135	1000	135
İç Sıva	0,02	800	16
Duvar Örgü Harcı	0,0022	2000	4,4

Bu çalışmada yer alan üçüncü alternatif duvar malzemesi olan standart ve suya dayanıklı alçı levhaların özelliklerinin belirlendiği çeşitli çalışmalar literatürde yer almaktadır. Birim alan kütlesi deneyleri sonucunda; standart alçı panelin birim alan kütlesi 9,4439 kg/m², suya dayanıklı alçı panelin birim alan kütlesi 12,0701 kg/m² olarak tespit edilmiştir. Lifli madde miktar deneyi sonucunda; standart alçı panelin lifli madde miktar %5,12, suya dayanıklı alçı panelin lifli madde miktar %7,68 olarak ölçülmüştür. Su emme oranı deneyi sonucunda; standart alçı panelin su emme oran %10,16, suya dayanıklı alçı panelin su emme oran %5,01 olarak ortaya koyulmuştur (Çelik ve ark., 2005). Alçı levhaların uygulamasında kullanılan çerçeve sistemden kaynaklanan yükler için Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı 15.530.1267 pozu analizi kullanılmıştır ve analizlerde dikkate alınmıştır.

Tablo 5. Alçı Levha dış duvar için 15.530.1267 pozu analizi (1 m² duvar için) (Çelik ve ark., 2005; Özbilen,2021; YFK,2025)

Poz No	Malzeme	Birimi	Miktarı	Birim ağırlık	Ağırlık
10.240.5583	12,5 mm kalınlığında suya dayanıklı alçı levha	m²	2,1	12,0701	25,3472
10.200.3016	Duvar U 100 profilli	m	0,84	0,69	0,5796
10.200.3010	Duvar C 100 profilli	m	2,1	0,88	1,848
10.420.1012	Vida ve Plastik Dübel	Adet	2,2	1,15	2,53
10.420.1013	Her Ebatta 1 Kutu (1000 Adet Borazan Vida)	Kutu	0,025	1,96	0,049
	10 Cm taş yünü izolasyon malzemesi	m²	1	15	15

Analiz sonucunda oluşan suya dayanıklı alçı levha duvar yükü 45,35 kg/m² olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 6. Alçı Levha iç duvar için 15.530.1267 pozu analizi (1 m² duvar için) (Çelik ve ark., 2005; Özbilen,2021; YFK,2025)

Poz No	Malzeme	Birimi	Miktarı	Birim ağırlık	Ağırlık
10.240.5583	12,5 mm kalınlığında standart alçı levha	m²	2,1	9,4439	19,8322
10.200.3016	Duvar U 100 profilli	m	0,84	0,69	0,5796
10.200.3010	Duvar C 100 profilli	m	2,1	0,88	1,848
10.420.1012	Vida ve Plastik Dübel	Adet	2,2	1,15	2,53
10.420.1013	Her Ebatta 1 Kutu (1000 Adet Borazan Vida)	Kutu	0,025	1,96	0,049
	10 Cm taş yünü izolasyon malzemesi	m²	1	15	15

Analiz sonucunda oluşan standart alçı levha duvar yükü 39,84 kg/m² olarak ortaya çıkmıştır.

Tablo 7. Dış Alçı Levha duvar malzemesi yük analizi (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Yük Katmanı Adı	Kalınlık	Birim Hacim Ağırlığı	Duvar Yükü
Dış Sıva	0,02 m	2000 kg/m³	40 kg/m²
Suya Dayanıklı Alçı Levha Duvar (analiz)			45,35 kg/m²
İç Sıva	0,02 m	800 kg/m³	16 kg/m²

Tablo 8. İç Alçı Levha duvar malzemesi yük analizi (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Yük Katmanı Adı	Kalınlık	Birim Hacim Ağırlığı	Duvar Yükü
İç Sıva	0,02	800 kg/m³	16 kg/m²
Standart Alçı Levha Duvar (analiz)			39,84 kg/m²
İç Sıva	0,02	800 kg/m³	16 kg/m²

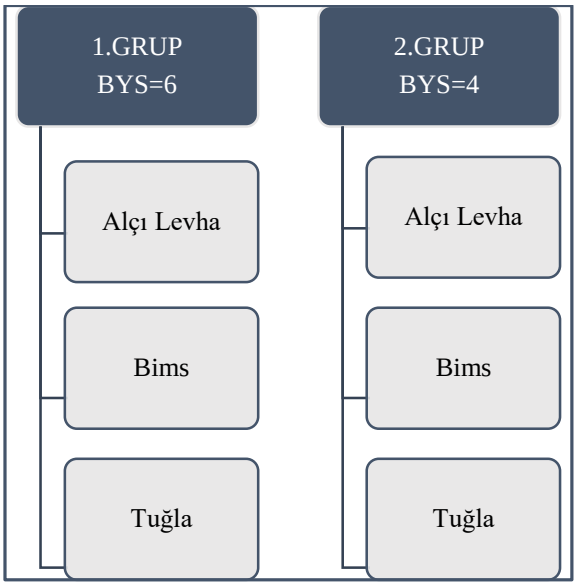
Tablo 9. Farklı duvar tiplerine göre duvar yükleri (Çiçek,2002; Çelik ve ark., 2005; İMO,2025; YFK,2025)

Duvar Tipi	Toplam Duvar Yükü (kg/m²)
Dış Tuğla Duvar	195,40
İç Tuğla Duvar	171,40
Dış Bims Duvar	140,96
İç Bims Duvar	116,96
Dış Suya Dayanıklı Alçı Levha Duvar	101,35
İç Alçı Levha Duvar	71,39

2.2. Metot

Çalışmada hedeflenen; yapılarda kullanılan bölme duvar alternatiflerinin yapısal davranışına olan etkilerinin daha belirgin anlaşılabilmesi adına yapının deprem etkilerinin yüksek olduğu bir yerde olacak şekilde tasarlanması planlanmıştır. Bu çalışmada, TBDY 2018 esas alınarak dayanıma göre tasarım yaklaşımıyla analiz edilen yapı modeli ele alınmıştır. Yapılar, Bina Kullanım Sınıfı 3 (BKS-3) şeklinde değerlendirilmiş olup, bu sınıfa karşılık gelen bina önem katsayısı 1,0 olarak belirlenmiştir. Performans hedefi olarak kontrollü hasar düzeyi esas alınmış ve yapı, Deprem Tasarım Sınıfı 1 (DTS-1) kapsamında ele alınmıştır. Deprem etkileri, Deprem Yer Hareketi Düzeyi 2 (DD-2) düzeyine karşılık gelen yer hareketi parametreleri kullanılarak temsil edilmiştir. Yapının bulunduğu bölgeye ait koordinatlar aktif diri faylara yakın olması adına 40,1755° enlem ve 29,1128° boylam olarak alınmış; zemin sınıfı ise ZC olarak tanımlanmıştır. Bu zemin sınıfına bağlı olarak spektrum karakteristik periyotları T_a=0,067 s ve T_b=0,336 s olarak belirlenmiştir. Deprem etkilerinin modellenmesinde, kısa periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_s) 0,834 ve 1 saniyelik periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1) ise 0,224 olarak kullanılmıştır. Tasarım spektral ivme katsayıları ise kısa periyot için S_{Ds} = 1,008 ve uzun periyot için S_{D1} = 0,36 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bölgeye ait en büyük yer ivmesi (PGA) 0,47g ve en büyük yer hızı (PGV) 21,42 cm/sn olarak tespit edilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda yapı modeli analiz edilerek, sismik taleplere karşı davranışı değerlendirilmiştir. Elde edilen parametreler kullanılarak yapısal davranışa bölme duvarlardaki değişikliklerin etkisi irdelenirken İdeCAD analiz programı kullanılarak, doğrusal elastik hesap yöntemlerinden yararlanılacaktır. Yapıların deprem davranışlarının analizinde kullanılan yöntemlerden biri olan doğrusal elastik hesap yöntemi, dayanıma göre tasarım yaklaşımının bir parçasıdır. Bu yöntem, yapı elemanlarının elastik sınırlar içerisinde kaldığı varsayımına dayanır ve yapı deprem etkilerine karşı rijitlik ve kütle özellikleri dikkate alınarak analiz edilir; yapının lineer olmayan davranışı önemsenmez. Doğrusal elastik hesap yaklaşımı, öngörülen performans düzeylerinin değerlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yöntemin en önemli uygulamalarından biri olan modal analiz yöntemi ise yapının titreşim modlarını ve her moda karşılık gelen doğal frekansları hesaplayarak, dinamik davranışın ortaya çıkmasını sağlar. Modal analizde, yapının serbest titreşim çözümlemesi yapılır ve her bir mod için modal kütle, modal rijitlik ve modal katılım katsayıları belirlenir. Ardından, deprem yer hareketleri bu modlara ayrı ayrı etki ettirilir ve elde edilen modal tepkiler bir birleştirme yöntemiyle toplanarak yapının toplam tepkisi belirlenir. Bu yönüyle

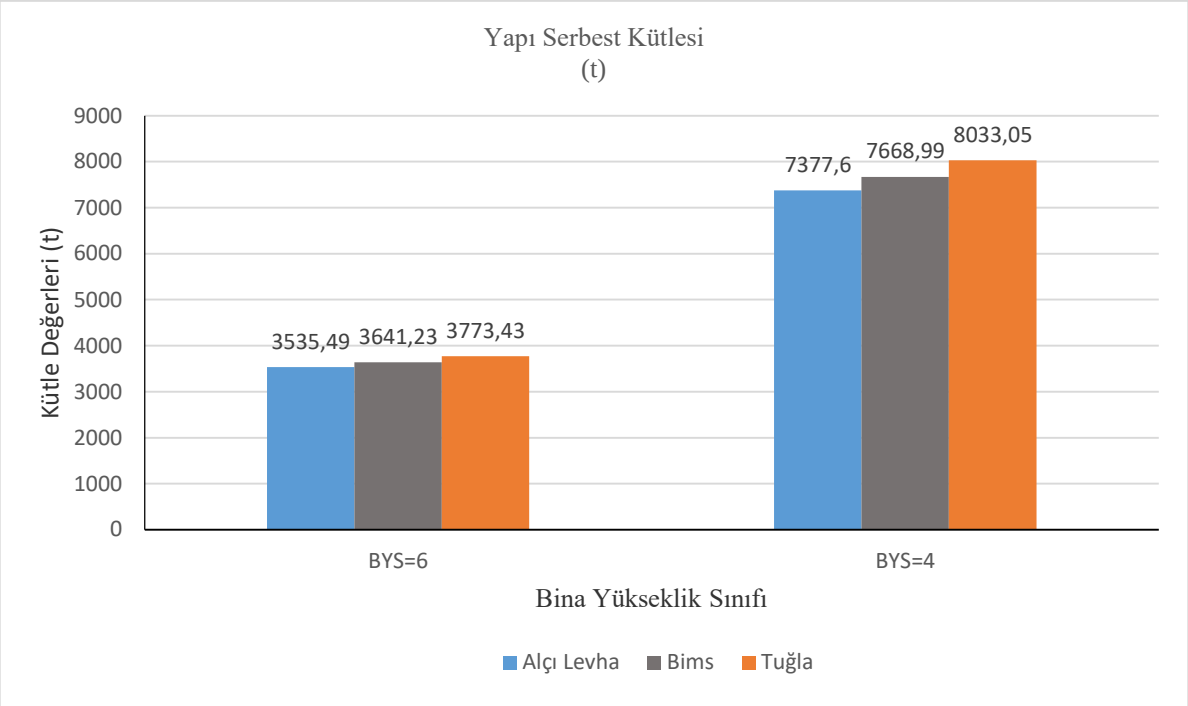
bu çalışmada da kullanılan modal analiz, yapılarda dinamik davranışın doğru modellenebilmesi için kritik bir analiz tekniği olduğu düşünülmektedir. Çalışmada TBDY 2018'de tanımlanan iki farklı bina yükseklik sınıflarına ait 6 farklı yapı ele alınarak bölme duvar etkileri incelenmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Farklı yükseklik sınıflarına göre tasarlanan modeller

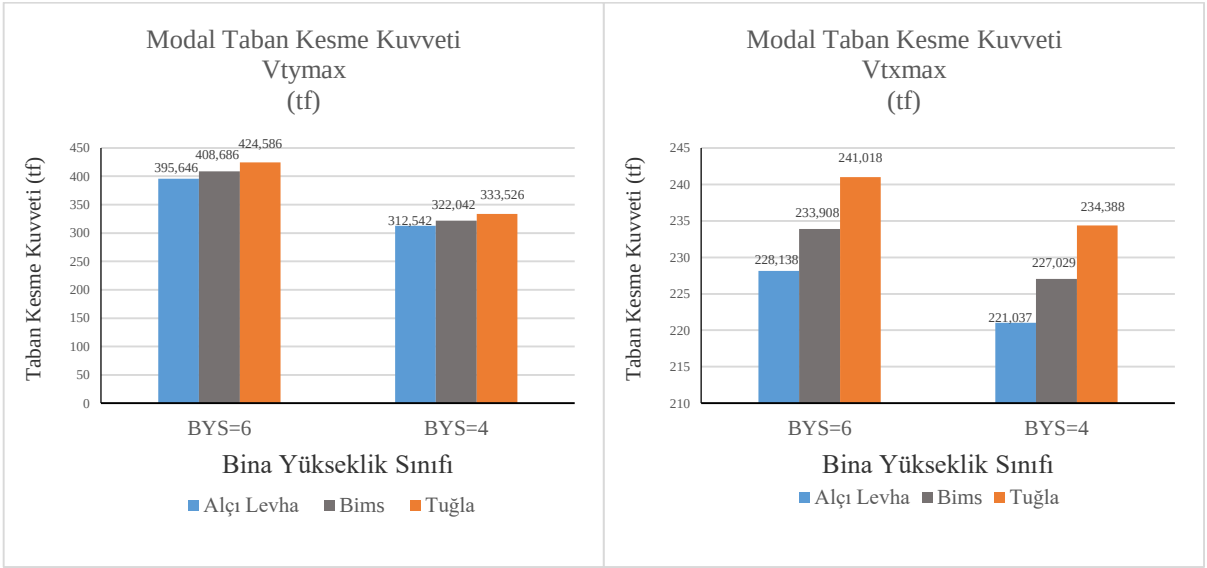
3. Bulgular ve Tartışma

Ele alınan örneklerdeki değişkenler günümüzde yapı stokları içerisinde en çok karşılaşılabilecek BYS=6 ve BYS=4 ana başlıkları altında alçı levha duvar malzemesi, bims duvar malzemesi ve tuğla duvar malzemesi olarak seçilmiştir. Yapısal analizlerin sonuçlarının değerlendirmelerinin aynı bina yükseklik sınıfı içerisinde tek değişkene bağlı olması adına modellenen mimari planlar ve duvar kalınlıkları sabit kalacak şekilde bir değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 4. Modellenen yapıların duvar malzemelerine ve bina yükseklik sınıflarına göre kütle dağılımı

Dolgu duvar malzemelerinin farklılaşması sonucu yapıların toplam serbest kütlelerinde yaşanan değişiklikler Şekil 4'te görülmektedir. Bina yükseklikleri için BYS=6 ve BYS=4 olarak modellenen yapılarda en düşük kütle değerleri alçı levha dolgu duvarlar ile modellenen yapıda, en yüksek değerler ise tuğla dolgu duvar malzemesi ile oluşturulan modellerde ortaya çıktığı görülmektedir.

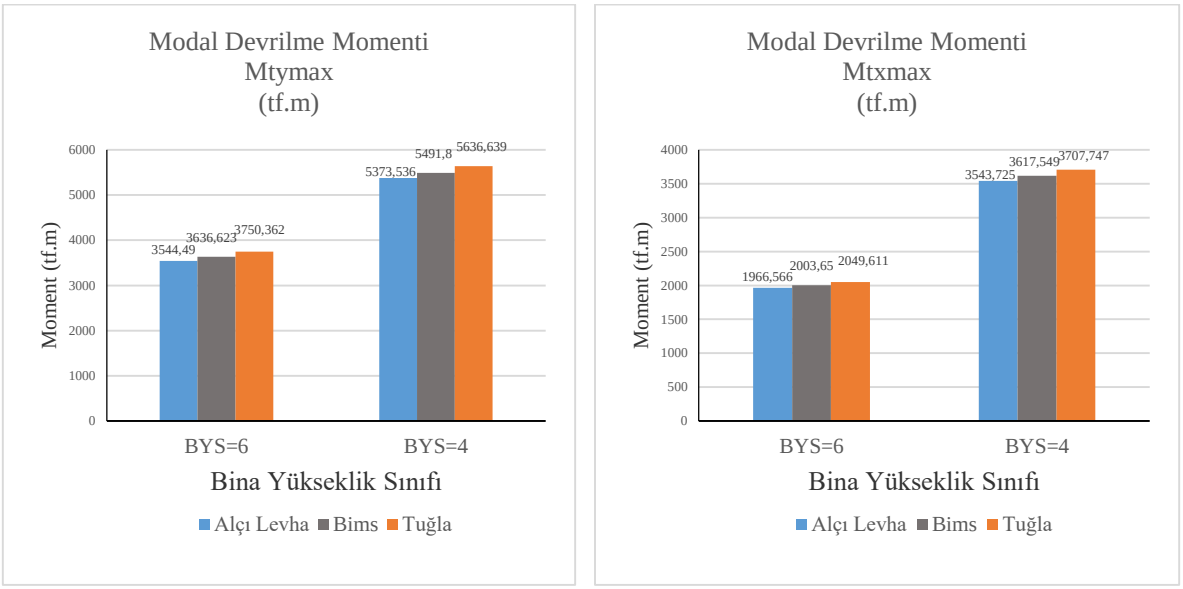


(a) (b)

Şekil 5. Yapıların Y yönündeki (a) ve X yönündeki (b) maksimum taban kesme kuvvetleri

Yapılan analizler sonucunda X-Y deprem doğrultuları için modellenen yapıların x ve y eksenleri doğrultusunda birleştirilmiş titreşim modlarına ait en büyük modal taban kesme kuvvetleri Şekil 5'de sunulmuştur. Şekildeki grafikten görüldüğü üzere en düşük taban kesme kuvvetlerinin alçı levhalı

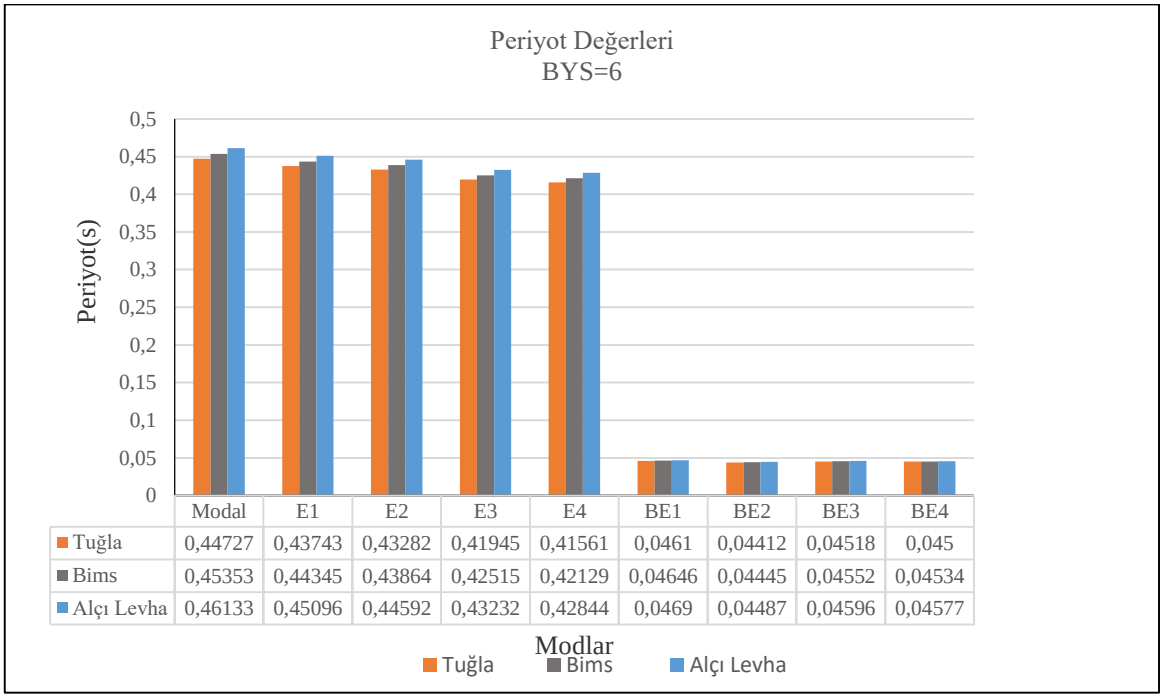
duvarlarla oluşturulan modellerde oluştuğu gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bina yüksekliklerine göre irdelendiğinde ise; aynı tür bölme duvar malzemelerinin kullanıldığı yapılar için BYS=4 olan modellerde taban kesme kuvvetlerinin BYS= 6 olan yapılardan daha düşük olduğu görülmektedir.



(a) (b)

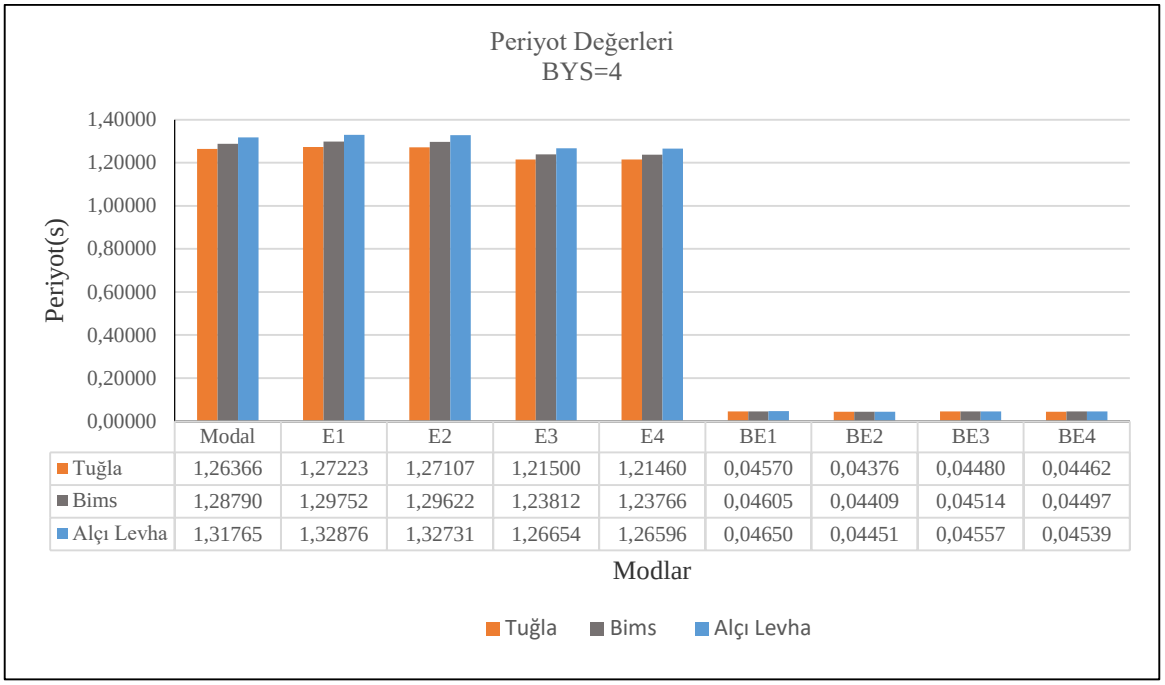
Şekil 6. Yapıların Y yönündeki (a) ve X yönündeki (b) maksimum modal devrilme momentleri

X ve Y eksenleri doğrultusunda birleştirilmiş titreşim modlarına ait en büyük modal devrilme momentleri Şekil 6'da görülmektedir. En düşük devrilme momentleri alçı levhalı duvarlarla oluşturulan modellerde oluşmuştur.



	Modal	E1	E2	E3	E4	BE1	BE2	BE3	BE4
Tuğla	0,44727	0,43743	0,43282	0,41945	0,41561	0,0461	0,04412	0,04518	0,045
Bims	0,45353	0,44345	0,43864	0,42515	0,42129	0,04646	0,04445	0,04552	0,04534
Alçı Levha	0,46133	0,45096	0,44592	0,43232	0,42844	0,0469	0,04487	0,04596	0,04577

Şekil 7. BYS=6 olan yapılara ait birinci mod periyot(s) değerleri

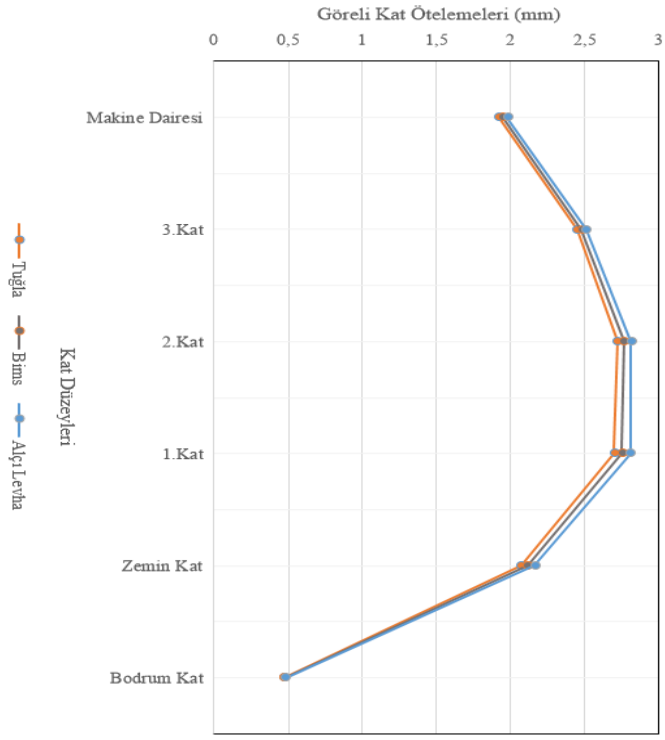


	Modal	E1	E2	E3	E4	BE1	BE2	BE3	BE4
Tuğla	1,26366	1,27223	1,27107	1,21500	1,21460	0,04570	0,04376	0,04480	0,04462
Bims	1,28790	1,29752	1,29622	1,23812	1,23766	0,04605	0,04409	0,04514	0,04497
Alçı Levha	1,31765	1,32876	1,32731	1,26654	1,26596	0,04650	0,04451	0,04557	0,04539

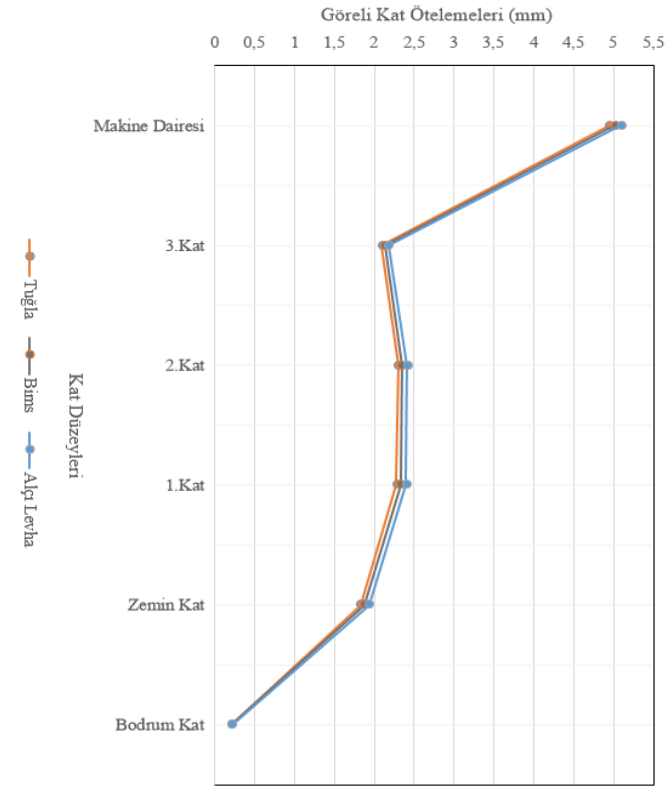
Şekil 8. BYS=4 olan yapılara ait birinci mod periyot(s) değerleri

Bina yükseklik sınıfına göre gruplandırılarak oluşturulan yapıların modal analiz sonucu 1. moda ait periyot değerleri Şekil 7. ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Periyot değerleri değerlendirilirken yapıların; ek dış merkezlik etkisi dikkate alınmadan, kat kütle merkezinin sırası ile +Y, -Y, +X, -X yönünde %5 kaydırılarak (E1, E2, E3, E4), ve bodrumlu binalarda sadece alt bölümün toplam kütleleri esas alınarak (BE1, BE2, BE3, BE4) olacak şekilde yapılan dinamik analize göre elde edilen sonuçlara ulaşılmıştır. Grafikte elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde yapı yüksekliği arttığında periyot değerleri de artış göstermektedir. Aynı bina yükseklik sınıfındaki değerler ele alındığında ise, tuğla dolgu duvar ile oluşturulan yapılardaki periyot değerlerinin, diğer bölme duvar alternatifleri ile tasarlanan yapılara göre daha az oldukları anlaşılmaktadır.

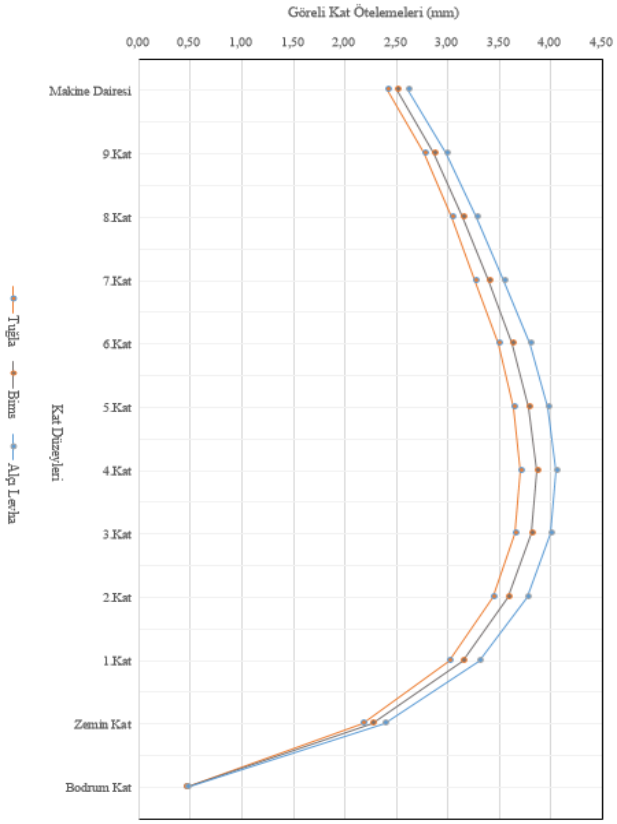
Duvar malzemesine ve bina yükseklik sınıfına bağlı olarak oluşturulan yapısal modellerin modal analizleri sonucunda elde edilen göreli kat ötelenmelerini gösteren değerler Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de görülmektedir. Her bir kat için X ve Y doğrultularında ' +' ve '-' %5 ek dış merkezlik için hesaplanan değerler grafikle belirtilmiştir. Göreli kat ötelemeleri değerlerinin her iki bina yükseklik sınıfına ve bölme duvar alternatiflerine göre her iki doğrultudaki durumunu Şekil 9-12'de verilen grafiklerden görülebilmektedir.



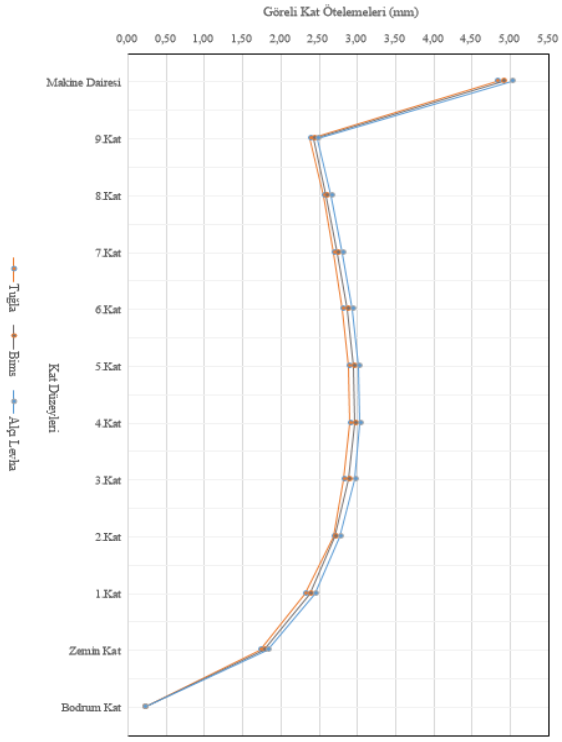
Şekil 9. BYS=6 olan modellerin X yönünde oluşan göreli kat ötelemeleri, $\Delta_{i\ max}$



Şekil 10. BYS=6 olan modellerin Y yönünde oluşan göreli kat ötelemeleri, $\Delta_{i\ max}$



Şekil 11. BYS=4 olan modellerin X yönünde oluşan göreli kat ötelemeleri, $\Delta_{i\ max}$



Şekil 12. BYS=4 olan modellerin Y yönünde oluşan göreli kat ötelemeleri, $\Delta_{i\ max}$

Çalışma kapsamında oluşturulan modellerde kullanılan duvar malzemeleri için 2025 yılı Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (YFK, 2025) birim fiyatlarında yer alan poz numaraları kullanılarak her bir model için yapıların maliyet hesapları Tablo 10. ve Tablo 11.'de gösterilmiştir. Alçı levha kullanımı için 15.530.1267 poz numarasına karşılık gelen 893,65 TL, bims duvar için 15.230.1003 poz numarasına karşılık gelen 508,70 TL, Tuğla duvar malzemesi maliyeti için ise 15.220.1014 poz numarasına karşılık gelen 665,21 TL olduğu görülmektedir. Maliyet hesaplamaları sonucunda en yüksek maliyetin alçı levha duvar malzemesi ile oluşturulan modellerde olduğu yer almaktadır.

Tablo 10. BYS=6 olan modellerin duvar malzemesine göre maliyetleri

Duvar Tipi	Metraj (m^2)	Birim Fiyat (TL/ m^2)	Maliyet (TL)
Alçı Levha	2804,05	893,65	2.505.839,28
Bims	2804,05	508,70	1.426.420,24
Tuğla	2804,05	665,21	1.865.282,10

Tablo 11. BYS=4 olan modellerin duvar malzemesine göre maliyetleri

Duvar Tipi	Metraj (m^2)	Birim Fiyat (TL/ m^2)	Maliyet (TL)
Alçı Levha	7135	893,65	6.376.192,75
Bims	7135	508,70	3.629.574,50
Tuğla	7135	665,21	4.746.273,35

3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Yapılan bu çalışma kapsamında ülkemizin tektonik yapısı gereği defalarca acı tecrübeler edindiğimiz deprem afetine karşı alınabilecek önlemler kapsamında, bölme duvar alternatiflerine göre yapıların deprem performansları üzerine bir bakış açısı sunulmuştur. Yapılarda kullanılan dolgu duvar malzemelerine bir alternatif olarak alçı levha duvar malzemesinin kullanılmasının deprem yükleri altında yapıya nasıl performans vereceğine yer verilmiştir. Ülkemizde kullanımı yaygın olan bims ve tuğla duvar malzemesinin de aynı modeller üzerinde doğrusal analiz yöntemi modal analizleri gerçekleştirilerek yapılara performans etkileri karşılaştırılmıştır. Farklı bölme duvar malzemelerinin (alçı levha, bims ve tuğla) betonarme yapıların deprem performansı üzerindeki etkileri iki farklı bina yükseklik sınıfında (BYS=6 ve BYS=4) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatür çalışmalarındaki benzer davranış eğilimleriyle uyum göstermektedir; bu durum modelin ve analiz sonuçlarının doğruluğunu desteklemektedir. (Asteris ve ark., 2015; Demir,2016; Aras, 2018; Çoban, 2022; Halis ve Akgüzel, 2022; Bakala ve ark., 2024) Böylelikle bina yüksekliklerinin de etkileri sunulmuştur. Yapısal analizlerin bulgularından aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır;

- Yapısal modellerde kullanılan duvar yapı malzemeleri Şekil 4'da verilen grafikte karşılaştırılmıştır. BYS=6 ve BYS=4 için de alçı levha duvar malzemesi ile oluşturulan yapısal modeller en düşük serbest kütle değerlerini elde etmiştir. En yüksek değerler ise tuğla dolgu duvar malzemesinde oluşmuştur. Bina yükseklik sınıfı 6 olan yapılar dikkate alındığında; bölme

duvar olarak alçı levha duvar malzemesi kullanılması, tuğla kullanılmasına göre yapı ağırlığı üzerinde yaklaşık %7 kadar bir azalma sağladığı görülmektedir. Bu durum BYS=4 olan yapılarda %8 seviyesine olduğu anlaşılmaktadır. Yapıların yüksekliklerinin artmasıyla bu etkinin daha fazla oranlarda olabileceği düşünülmektedir. Bu durum bölme duvarlarda alçı levha kullanımının yapılara etkiyen sismik yüklerin de azalmasına olanak sunmaktadır.

- X ve Y doğrultularındaki deprem yükleri altında elde edilen Şekil 5'de modal taban kesme kuvvetleri, Şekil 6'da ise modal devrilme momentleri karşılaştırmalı grafiklerle sunulmuştur. Grafiklerden anlaşıldığı gibi alçı levha kullanılan modellerde bu değerler diğer alternatif malzeme kullanım durumlarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar yapıların bölme duvarlarında alçı levha malzeme kullanılması durumlarında deprem etkilerini daha kontrollü karşıladığını göstermektedir.
- Elde edilen sonuçlar yapıların periyotları bakımından değerlendirildiğinde, periyot değerleri yapı yüksekliği ile orantılı bir şekilde artış göstermiştir. Aynı bina yükseklik sınıfları içerisinde alçı levha malzemesi ile oluşturulan yapılarda periyot değerleri daha yüksek olduğu görülmektedir. Tuğla duvar ile oluşturulan yapıların daha rijit davrandığı ve enerji sönümlemelerinin daha büyük oranda gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum az katlı yapılardan ziyade yüksek katlı yapılarda daha fazla ortaya çıktığı düşünülmektedir.
- X ve Y doğrultularındaki sismik etkilerden kaynaklanan göreli kat ötelemeleri değerleri incelendiğinde ise göreli kat ötelemelerin değerlerinin alçı levhalı duvar malzemesi kullanılması durumunda daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuçlardan tuğla duvar malzemesinin kullanılması yapı ağırlığını arttırarak yatay deplasmanları sınırlandırdığı sonucuna ulaşılmaktadır. Özellikle; yüksek katlı yapılarda bu durumun daha belirgin olduğuna ulaşılmıştır.
- Makine dairesi katındaki göreli kar ötelemeleri, makina dairesi katına ait düşük kütle ve sınırlı dolgu duvar katkısı nedeniyle alt katlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, deprem titreşim modlarının tepe noktasında maksimum deplasman oluşturması ve rijitlik azalışının etkisiyle ilişkilidir.
- Ele alınan modellerde bodrum katın bulunması, yapı rijitliğini kısmen artırmasına rağmen zemin seviyesi altında yer alması ve analizde rijit zemin kabulü yapılması nedeniyle, deprem parametrelerinde belirgin fark oluşturmadığı görülmektedir.
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği birim fiyatları baz alınarak yapılan maliyet analizleri sonucunda her iki bina yükseklik sınıfında da alçı levha duvar malzemelerinin kullanıldığı yapı modelleri en yüksek maliyete ulaşmıştır. Birim fiyatların piyasa koşulları dikkate alındığında farklılaşabileceği de göz önüne alınmalıdır.

Sonuç olarak, alçı levha yapı malzemesiyle oluşturulan bölme duvarlı modellerde yapının toplam ağırlıkları azalmış ve bu durum sismik etkiler karşısında yapıya avantaj sağlayacak yönde değişikliklere

neden olmuştur. Özellikle yüksek katlı yapılarda bu değişikliklerin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, alçı levha kullanımının yapı elemanlarının hafiflemesine bağlı olarak, olası bir afet durumunda yapıya etkiyen yatay yüklerin azalacağı ve buna bağlı olarak can kayıplarının azaltılmasına katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Daha düşük malzeme kütlesi sayesinde, enkaz miktarında da önemli ölçüde azalma ile afet sonrası arama kurtarma faaliyetlerine katkılar sağlanabileceği öngörülmektedir. Ancak maliyet yönünden, alçı levha uygulamalarının projeye ve bölgesel koşullara göre ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir. Öte yandan, geleneksel bir malzeme olan tuğla, yüksek dayanımı ve yangın direnciyle öne çıkarken, yapıya ek ağırlık getirmesi nedeniyle sismik performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Bims bloklar ise hafifliği sayesinde depreme karşı olumlu bir yapı davranışı sağlasa da ses ve ısı yalıtımı açısından ilave önlemler gerektirebilmektedir. Bu nedenle, bölme duvar malzemesi seçiminde yalnızca yapısal performans değil, yangın güvenliği, yalıtım, işçilik süresi ve ekonomik koşullar gibi çok boyutlu kriterlerin bütünsel bir bakış açısıyla ele alınması önem taşımaktadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Tüm yazarlar makaleye katkı sağladıklarını beyan ederler.

Kaynakça

Ahmed AA., Öztürk H., Aslan TA. Farklı kat yüksekliklerindeki binaların TBDY 2018 ve Eurocode 8'e göre karşılaştırmalı analizi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2025; 40(2): 265-272.

Akgül M. Türkiye bina deprem yönetmeliği (TBDY)'ne göre dolgu duvarların sönüme etkisinin analitik olarak incelenmesi. Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa, Türkiye, 2023

Akkuzu VA. Betonarme çerçeveli dolgu duvarların deprem etkisi altındaki dinamik davranışının incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:124, İstanbul, Türkiye, 2007.

Akyüncü V. Pomza agregalı hafif beton blokların mekanik özeliklerinin ve yangın etkisi altındaki davranışının incelenmesi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2019; 8(1): 147-157.

Antoniou S. Seismic retrofit of existing reinforced concrete buildings. Hoboken, NJ: Wiley; 2023

Aras F. Betonarme binalarda bölme duvar etkilerinin tam ölçekli deneylerle araştırılması. Teknik Dergi 2018; 29(5): 8651-8668.

Asteris PG., Smyrou E., Kakaletsis D. Seismic behavior of masonry infilled RC frames: a state-of-the-art review. Engineering Structures 2015; 111: 1-12.

Asteris PG., Tzamtzis AD., Chrysostomou CZ. Influence of infill wall distributions on the seismic performance of RC frame buildings: A parametric study. Engineering Structures 2017; 143: 468–490.

Bakala PIB., Mısır İS., Aldemir Ö. Betonarme çerçevelerde yumuşak kat etkilerinin yeni nesil dolgu duvarlar ile azaltılması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 2024; 26(77): 192-199

Braga F., Gigliotti R., Laterza M. Performance of non-structural elements during the L'Aquila (Italy) earthquake. Bulletin of Earthquake Engineering 2011; 9(1): 307-324.

Calderini C., Lagomarsino S., Cattari S. In plane seismic response of unreinforced masonry walls: Comparison between detailed and equivalent frame models. COMPDYN 2009; 22-24.

Çelik MH., Orhan M., Uğurlu AH. Bölme duvar amaçlı alçı panellerin bazı özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi. Politeknik Dergisi 2005; 8(3): 301-309.

Çiçek YE. Pişmiş toprak tuğla, bimsbeton, gazbeton ve perlitli yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2002.

Çoban MD. Dolgu duvar malzemelerinin betonarme yapıların deprem performansına etkisi. Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:8, Bitlis, Türkiye, 2022.

Demir T. Çok katlı betonarme yapıların deprem davranışında dolgu duvar etkisinin incelenmesi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, Türkiye, 2016.

Ekmeyapar T., Örüng İ. İnşaat malzeme bilgisi. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Yayınları 1993; 145: 22-36, Erzurum.

FEMA P-807. Seismic evaluation and retrofit of multi-unit wood-frame buildings with weak first stories. Federal Emergency Management Agency; 2012.

Giordano F., Vitti M., Faella C. Light partitions made of recycled gypsum panels: Seismic behavior and mechanical properties. Construction and Building Materials 2009; 23(1): 325-337.

Govindan P., Santhakumar AR. Ductility of ınfilled frames. ACI Journal 1986;83(4): 567-576.

Halis E., Akgüzel E. Effect of drywall partition walls on the seismic performance of RC structures. Teknik Dergi 2022; 33(1): 1123-1145.

İnşaat Mühendisleri Odası. Yapı malzemeleri ve yapı kısımlarının birim hacim ağırlıkları. TMMOB https://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f7deb880ca6b4b7_ek.pdf , Erişim tarihi: 23.8.2025.

Kayan Y., Karaşin A., Işık E. Pomzadan imal edilmiş çelik lif katkılı bimsblokların mekanik özelliklerinin araştırılması. DÜMF Mühendislik Dergisi 2020; 11(2): 723-730

Kızıloğlu MY. Deprem etkisi altında dolgu duvarların betonarme çerçeve yapılar üzerindeki etkisi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2006.

Magliulo G., Petrone C., Capozzi V. Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests. Bull Earthquake Engineering 2014; 12: 1657–1677.

Magenes G., Calvi GM. In-plane seismic response of brick masonry walls. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 1997; 26(11): 1091-1112.

Mosalam KM., White RN., Gergely P. Seismic performance of reinforced concrete frame structures with unreinforced masonry infill walls. PEER Report;1997.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Web Sitesi. Deprem Türkiye'nin deprem potansiyeli, https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/deprem_potansiyeli. Erişim tarihi: 23.8.2025.

Özbilen BŞ. Ses yalıtım ve maliyet performansına bağlı duvar tipi seçimi için bir yaklaşım . İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul, Türkiye, 2021.

Özyurt MZ., Kadıoğlu ÖF. Çelik yapılarda farklı dolgu duvar tasarımlarının doğrusal ve doğrusal olmayan deprem analiz yöntemleri ile araştırılması. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2023; 10(2): 330-344.

Pamukçu Ç., Köse H., Yalçın N., Seçer T. Pomza ve yapı malzemesi olarak kullanım olanakları, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu 1997; sayfa no: 97-105, İzmir

Panagiotakos TB., Fardis MN. Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. ACI Structural Journal 2001; 98(2): 135-148.

Petrovic A., Tashkov L., Dimoski T. Building partitions and their influence on seismic performance of RC structures: Experimental insights and practical implications. Structures 2021; 33: 238-251.

Şişman CB., Kocaman İ., Gezer E. Tekirdağ yöresinde üretilen ve tarımsal yapılarda yaygın olarak kullanılan tuğlanın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir araştırma. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 2006; 3(1): 32-40.

TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

TMMOB. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri raporu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Yayını, 2023; sayfa no: 23-175, Ankara.

TS 825 2013. Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Ankara.

TS 705 EN 771-1 2010. Kâgir Birimler – Kil Tuğlalar. TSE, Ankara.

Uysal KE. Betonarme binalarda dolgu duvarların deprem etkisi altındaki davranışının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2013.

YFK. İnşaat birim fiyat analizleri. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/1.-cilt-20250117153726.pdf, Erişim tarihi: 23.8.2025.

Yücel KT., Korkmaz Ş. Tarihi yapılarda kullanılan tuğla malzemelerin, termal iletkenlik, fiziksel ve mekanik özelliklerinin saptanması. Mühendislik ve Yer Bilimleri Dergisi 2020; 5(2): 1-9.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1464-1480, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1464-1480, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Isıl İşlem Türünün ve Nano Zirkonya Katkısının Al6061 Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Mahmut Can ŞENEL[1*], Rana Şevval SOYDEMİRCİ[2]

[1,2]Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55020, Samsun

[1]https://orcid.org/0000-0001-7897-1366
[2]https://orcid.org/0009-0008-3971-0700
*Sorumlu yazar: mahmutcan.senel@omu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 13.10.2025
Kabul tarihi:15.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Toz metalürjisi
Al6061 alaşımı
Zirkonya
Kompozit

ÖZ

Bu araştırmada, nanozirkonya (ZrO_2) katkısının (ağırlıkça %1, 2, 3, 4, 5) ve ısıl işlemin (sinterleme, sıcak presleme) Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri (yoğunluk, gözeneklilik oranı, sertlik, basma dayanımı) üzerine olan etkisi incelenmiştir. Mekanik testler sonucunda; en yüksek deneysel yoğunluk (2,71±0,005 g/cm³), sertlik (158±3 HV) ve basma dayanımı (328±4 MPa) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%4ZrO_2 nanokompozitte elde edilmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla yoğunluğun, sertliğin ve basma dayanımının sırasıyla; %2,3, %75,5 ve %56,2 oranında arttığı belirlenmiştir. Ancak %5 ZrO_2 takviyesinde nanopartiküllerin topaklanması nedeniyle mekanik özelliklerde bir düşüş gözlemlenmiştir. Yürütülen mikroskobik incelemeler neticesinde Al6061-%4ZrO_2 nanokompozit yapıda nano zirkonya partiküllerin homojene yakın dağıldığı ve tane sınırlarına yerleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca sinterleme sonrası uygulanan sıcak presleme işleminin mekanik özelliklerin iyileşmesini desteklediği sonucuna varılmıştır.

Effect of Heat Treatment Type and Nano Zirconia Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Al6061 Matrix Composites

Research Article

Article History:
Received: 13.10.2025
Accepted: 15.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Powder metallurgy
Al6061 alloy
Zirconia
Composite

ABSTRACT

In this research, the effects of nanozirconia (ZrO_2) addition (1, 2, 3, 4, 5 wt%) and heat treatment (sintering, hot pressing) on the microstructure and mechanical properties (density, porosity ratio, hardness, compressive strength) of Al6061-ZrO_2 nanocomposites were investigated. As a result of the mechanical tests, the highest experimental density (2.71±0.005 g/cm³), hardness (158±3 HV), and compressive strength (328±4 MPa) were obtained in the sintered and induction hot-pressed Al6061-4%ZrO_2 nanocomposite. It was determined that the density, hardness, and compressive strength increased by 2.3%, 75.5% and 56.2%, respectively, compared to Al6061 alloy. However, a decrease in mechanical properties was observed at a 5% ZrO_2 addition due to the agglomeration of nanoparticles. Microscopic investigations revealed that nanozirconia particles in the Al6061-4%ZrO_2 nanocomposite structure were distributed almost homogeneously and settled at grain boundaries. It is also concluded that the hot-pressing process applied after sintering supports the improvement of mechanical properties.

To Cite: Şenel MC., Soydemirci RŞ. Isıl İşlem Türünün ve Nano Zirkonya Katkısının Al6061 Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1464-1480.

1. Giriş

Gelişen teknoloji, malzemelerden beklenen özelliklerin artması geleneksel malzemelerin birçok sektörde yetersiz kalmasına yol açmıştır. Bu durum, geleneksel malzemelerin yerine daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin kullanılmasını sağlamıştır. En az iki farklı malzemenin üstün özelliklerini birleştiren kompozit malzemeler, gün geçtikçe daha da önem kazanmaktadır (Şenel, 2018). Özellikle son dönemde, farklı malzeme kombinasyonları ve üretim teknikleri üzerine yapılan araştırmalara büyük öncelik verilmiştir. Bu araştırmalar, malzeme bilimi açısından büyük öneme sahiptir (Kalemtaş, 2016).

Kompozit malzemeler, kullanılan ana malzemesine göre; metal, polimer ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerde, seramik esaslı malzemeler genellikle matris malzemesi olarak tercih edilir. Bu tür kompozitler; yüksek aşınma direnci, korozyon direnci ve termal dayanım gibi avantajlara sahiptir. Polimer esaslı kompozitlerde ise matris malzemesi olarak polimerler kullanılır. Bu malzemeler hafiflik, kolay üretim ve şekillendirme süreçleri gibi özellikleri nedeniyle sıkça tercih edilmektedir (Şahin, 2015). Metal matrisli kompozit malzemelerde ise matris malzemesi olarak titanyum (Xiao ve ark, 2025), magnezyum (Wang ve ark., 2025), bakır (Ma ve ark., 2025), alüminyum (Pul, 2021), nikel (Tabrez ve ark., 2025), çinko (Xia ve ark., 2025), demir (Li ve ark., 2025), silisyum (Jung ve ark., 2025) ve kalay (Jhamb ve ark., 2025) gibi metaller ve bu metallerin alaşımları kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde malzemelerin özelliklerini artırmak için en çok tercih edilen takviye elemanları; silisyum nitrür (Si_3N_4) (Şenel ve Mahmutoğlu, 2022), silisyum karbür (SiC) (Tok ve Ateş, 2023), bor karbür (B_4C) (Taşkın, 2023), silisyum dioksit (SiO_2) (Banoth ve ark., 2025), bor nitrür (BN) (Şenel ve Gürbüz, 2021), titanyum karbür (TiC) (Arulkumar ve ark., 2025), zirkonya (ZrO_2) (Soydemirci, 2025) ve alüminadır (Al_2O_3) (Yu ve Lee, 2000).

Bu çalışmada matris malzeme olarak tercih edilen Al6061 alüminyum alaşımı; hafif, dayanıklı ve mükemmel işlenebilirlik özellikleri ile bilinen bir alaşımdır. Al6061, 6000 serisi alaşımların bir parçası olup çeşitli endüstrilerde, özellikle otomotiv, havacılık, denizcilik ve genel mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (Tok ve Ateş, 2023). Takviye malzemesi olarak kullanılan zirkonya ise, yüksek ergime sıcaklığı, üstün aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikleriyle bilinen bir ileri teknoloji seramiğidir (Gautam ve ark., 2016).

Literatürde zirkonya takviyeli Al6061 matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Pal vd. çalışmalarında alüminyum matrise %2, 4, 6 oranlarında ZrO_2 takviyesi yaparak ürettikleri numunelerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapı analizlerinde ZrO_2 parçacıklarının homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Sertlik testi, sertlik değerinin artan takviye oranıyla doğru orantılı olarak arttığını ve en yüksek değere (92,7 HRB) ağırlıkça %6 takviye oranında ulaşıldığını göstermiştir (Pal ve ark., 2020). Martinez vd. yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %2 ve %5 ZrO_2 takviyesi içeren Al7075 matrisli kompozitlerde üç farklı değirmenin homojen dağılıma olan etkisini incelemişlerdir. Yatay

atritör değirmeninde istenilen seviyede homojen dağılım sağlanamazken, gezegensel bilyalı değirmende daha homojen bir dağılım elde edilmiştir. Ancak en homojen dağılım karıştırmalı bilyalı değirmende elde edilmiştir. Çalışma sonucunda değirmen tipi ve öğütme koşullarının numunelerdeki homojen dağılıma önemli oranda etki ettiği vurgulanmıştır (Martinez ve ark., 2015). Rajaram ve ark. (2023) yürüttükleri çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemiyle Al6063-ZrO_2 (ZrO_2 katkısı: Ağırlıkça %2 ve %4) kompozitleri üreterek kompozitlerin mikroyapılarını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı analizleri, ZrO_2 partiküllerinin homojen olarak dağıldığını göstermiştir. Mekanik testlerde en yüksek sertlik (71 HV) ve çekme dayanımına (168,38 MPa) Al6063-%4ZrO_2 kompozitlerde ulaşılmıştır (Rajaram ve ark., 2023). Pul çalışmasında, vakum infiltrasyon tekniğiyle ürettiği Al2024 matrisli farklı oranlarda (ağırlıkça %5, 10, 15, 20) ZrO_2 takviyesi içeren kompozit malzemelerin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Mikroyapı analizleri, homojen dağılım ve güçlü bir arayüzey bağının olduğunu göstermiştir. Ancak artan takviye oranının topaklanmaya sebep olduğu belirtilmiştir. Mekanik testlerde en yüksek yoğunluk (~3,1 g/cm^3) ve sertlik değerlerine (71,7 HB) ağırlıkça %20 ZrO_2 takviye oranında ulaşılmıştır (Pul, 2021).

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Al6061-ZrO_2 kompozit malzemelerin özellikleri üzerine çeşitli çalışmaların bulunduğu görülmüştür. Ancak, mevcut çalışmayı literatürdeki çalışmalardan ayıran en önemli fark, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen kompozitlere sinterleme sonrasında ikincil işlem olarak indüksiyonla sıcak presleme işleminin uygulanmasıdır. Bu sayede hem sıcak preslemenin hem de nano zirkonya katkısının kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisi analiz edilebilmiştir.

Bu çalışmada, toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleri kullanılarak Al6061 alüminyum matrisli nano ZrO_2 takviyeli kompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışma kapsamında da matris malzemesi olarak ~10 µm boyutunda Al6061 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Al6061 alaşım tozları Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Al6061 alaşımı, bakır (%0,25), silisyum (%0,6-0,9), magnezyum (%1,0-1,2), alüminyum (%97,9) ve diğer iz elementlerden oluşur. Al6061 alaşımı, düşük yoğunluğa (2,7 g/cm³) sahip olup hafif bir malzeme olarak bilinir. Al6061 alaşımının diğer özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir (Tok ve Ateş, 2023).

Tablo 1. Al6061 alaşımına ait bazı özellikler (Tok ve Ateş, 2023)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7
Eğme dayanımı (MPa)	386
Basma dayanımı (MPa)	607
Elastisite modülü (GPa)	68,9
Poisson oranı	0,33
Sertlik (HV)	107

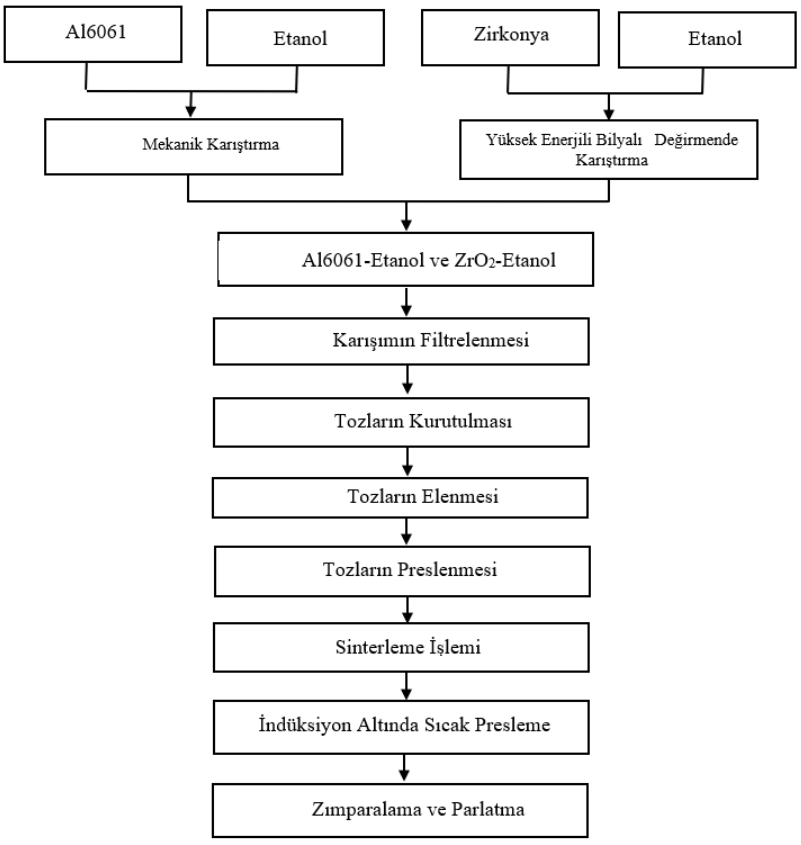
Takviye elemanı olarak tercih edilen 70 nm boyutundaki nano zirkonya tozu Merck (Almanya) firmasından temin edilmiştir. Zirkonya, yüksek ergime sıcaklığı, üstün aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikleriyle bilinen bir ileri teknoloji seramiğidir. ZrO_2; kübik, tetragonal ve monoklinik olmak üzere üç farklı kristal yapıda bulunabilmektedir. Oda sıcaklığında monoklinik kristal yapıda bulunan zirkonya, 1170°C'den sonra tetragonal yapıya geçmekte ve 2370°C'den itibaren kübik kristal yapının özelliklerini göstermeye başlamaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Zirkonyanın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri (Gautam ve ark., 2016)

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	5,68
Kaynama sıcaklığı (ºC)	4300
Ergime sıcaklığı (ºC)	2823-2973
Eğme dayanımı (MPa)	115-711
Basma dayanımı (MPa)	1200-5200
Elastisite modülü (GPa)	100-250
Poisson oranı	0,22-0,32

2.2. Yöntem

Bu çalışmada; toz metalürjisi yöntemi kullanılarak Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretim süreci; karıştırma, filtreleme, kurutma, eleme, şekillendirme, sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme adımlarından oluşmaktadır. Üretim süreci Şekil 1'de şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 1. Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerin üretim adımları

Numune üretiminin ilk aşaması olan karıştırma işlemi için MTI marka MSK-SFM-3 model yüksek enerjili bilyalı değirmen kullanılmıştır. Karıştırma haznesi içerisine hacimce 1/3 oranında zirkon bilya ve 1/3 oranında ise etanol-nano zirkonya karışımı ilave edilmiştir. Hazırlanan karışım 1200 dev/dk'da 60 dakika boyunca bilyalı değirmende karıştırılmıştır. Ardından karışıma önceden tartılan Al6061 tozu eklenmiş ve mekanik karıştırıcıda 300 dev/dk hızda 15 dk süresince karıştırılmıştır. Zirkonya katkılı çözeltiler hazırlandıktan sonra çözelti içerisindeki etanolün uzaklaştırılması için filtreleme/süzme işlemi uygulanmıştır. Karışım içerisindeki nemin arındırılması için karışım 12 saat boyunca 50°C sıcaklıktaki vakum altında etüv fırınına kurutulmaya bırakılmıştır. Toz karışımındaki topaklanmaları önlemek amacıyla karışım agat havanda ezilip 200 μm'lik elek yardımı ile elenerek soğuk presleme için hazır hale getirilmiştir. En temel işlem olan presleme için, 10 tonluk Başaran marka hidrolik pres ve AISI 304 paslanmaz çelik kalıp (10 ton yüke dayanıklı) kullanılmıştır. Presleme işlemi 700 MPa basınç altında gerçekleştirilmiş olup 10×10×5 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Presleme sonucu numunelerin sahip olduğu mukavemet değeri ve ham yoğunluk değerlerini arttırmak amacıyla numunelere sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi Protherm marka tüp fırında, Value marka vakum pompası ile sürekli vakum altında gerçekleştirilmiştir. Numunelere sinterleme işlemi, 600ºC sıcaklıkta ve 60 dk süresince uygulanmıştır. Sinterleme sonrası ikincil işlem olarak indüksiyonla sıcak presleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcak presleme işlemi 500ºC sıcaklıkta ve 25 MPa basınç altında uygulanmıştır. Yapılan bir dizi deneysel çalışma neticesinde K tipi termokupl kullanılarak indüksiyon ocağındaki 500ºC'lik sıcaklığa 6 A çalışma akımı, 30 s ısıtma süresi, 30 s bekleme süresi ve 10 s soğutma süresinde ulaşılmıştır. Bu sayede mikroyapıda gözenekliliğin azaltılarak mekanik dayanımın artırılması amaçlanmaktadır. Sıcak presleme sonrasında malzeme yüzeyleri BrightWAY marka zımparalama ve parlatma cihazı kullanılarak zımparalanmış ve parlatılmıştır. Zımparalama işlemi için numuneler 600, 1200 ve 2500'lük SiC su zımparalarıyla 15 dk boyunca 300 dev/dk dönme hızında zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Ardından 30 dk süresince elmas çuha ve alümina solüsyonu kullanılarak numuneler parlatılmıştır.

Numunelerin yüzeyleri zımparalanıp parlatıldıktan sonra mikro Vickers sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, numune yüzeyinin en az 5 farklı noktasından 15 saniye boyunca 200 gf yük alınmıştır. Bu verilerin ortalaması alınarak da ortalama sertlik değeri belirlenmiştir. Numunelerin ortalama basma dayanımını belirlemek içinse en az 3 basma testi gerçekleştirilmiştir. Basma testleri Mares tst-10 t üniversal test makinesinde, 3 mm/dk basma hızında 5 MPa'lık bir ön yük ve 1 mm/dk'lık ön yük hızında uygulanmıştır. Numunelerin deneysel yoğunluğu, Arşimet yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak Eşitlik (1)'den faydalanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte; m_k numunelerin kuru ağırlıkları, m_a su içerisindeki asılı ağırlıkları, m_d numunelerin doygun ağırlıkları ve ρ_{su} suyun yoğunluğudur (1 g/cm³) (Şenel, 2018).

$$\rho_D = (m_k / (m_d - m_a)) \times \rho_{su} \quad (1)$$

Kompozitlerin teorik yoğunlukları, kullanılan tozların ağırlık yüzdeleri ve teorik yoğunlukları dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Eşitlik (2)'de, $\%m_m$ ve $\%m_t$ sırasıyla matris ve takviye malzemelerinin ağırlık yüzdelerini temsil etmektedir. ρ_m ve ρ_t ise matris ve takviye malzemelerinin yoğunluklarını belirtmektedir (Şenel, 2018).

$$\rho_T = (\%m_m \times \rho_m) + (\%m_t \times \rho_t) \quad (2)$$

Bağıl yoğunluk ($\%\rho_R$) değeri, Eşitlik (3)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Şenel, 2018).

$$\%\rho_R = (\rho_D/\rho_T) \times 100 \quad (3)$$

Kompozit numunelerde üretim süreci sebebiyle gözenekler oluşabilmektedir. Bu gözenekler, malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, gözeneklilik oranının (%G) belirlenmesi amacıyla Eşitlik (4) kullanılmaktadır (Şenel, 2018).

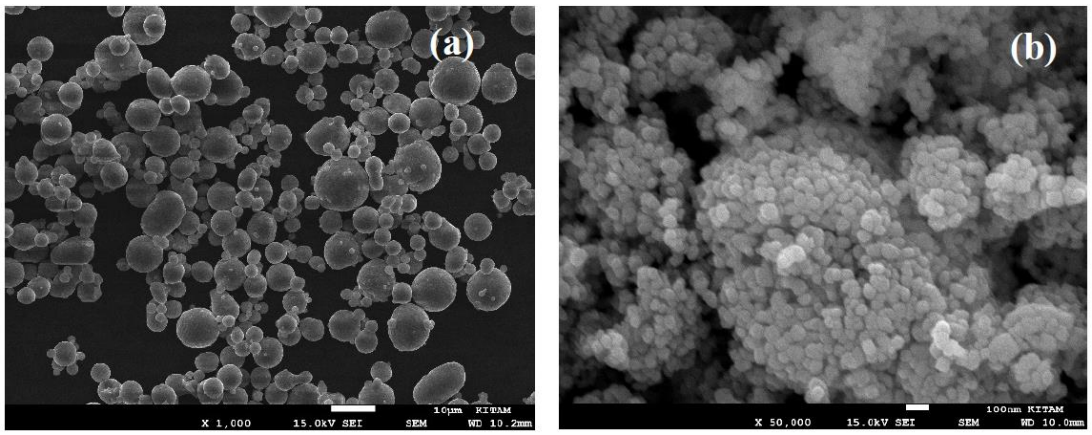
$$\%G = (1 - \rho_D/\rho_T) \times 100 \quad (4)$$

Bu çalışmada, kullanılan tozlar ve üretilen kompozit malzemelerin X-ışını kırınımı (XRD) analizi için, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezi (KİTAM) bünyesinde yer alan Rigaku SmartLab model X-ışını kırınım (XRD) cihazı kullanılmıştır. Numunelerin kırık yüzeylerini ve tozların morfolojilerini incelemek için KİTAM'daki Jeol JSM7001F model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

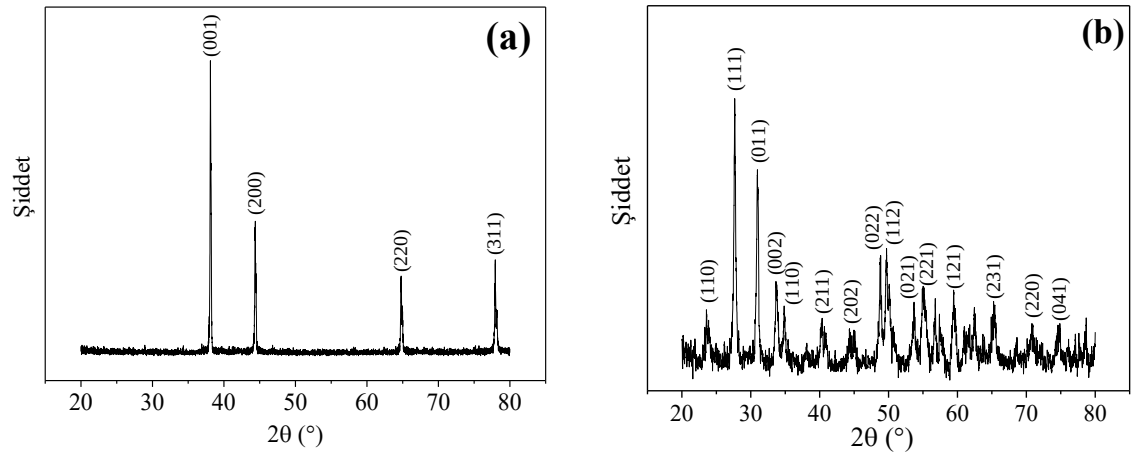
3.1. Tozların SEM ve XRD Analizleri

Al6061 alüminyum alaşım ve ZrO_2 tozlarının morfolojik özellikleri SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir (Şekil 2). Şekil 2a'da yer alan Al6061 alüminyum alaşım tozunun x1000 büyütmeli SEM görüntülerine göre, tozların küresele yakın bir morfolojide ve yaklaşık 10 μm ortalama tanecik boyutuna sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, bu tozların düzensiz bir morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 2b'de incelenen nano ZrO_2 tozlarının ise küresel bir yapıya sahip olduğu ve ortalama tanecik boyutlarının ~70 nm olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2. (a) Al6061 alaşım ve (b) nano ZrO_2 tozlarına ait SEM görüntüleri

Şekil 3'de, Al6061 alaşım ve nano ZrO_2 tozlarına ait XRD örgü desenleri sunulmuştur. Şekilden, Al6061 alaşımının kırınım açılarının sırasıyla 2θ=~38°, 45°, 65° ve 78° olduğu belirlenmiştir. Nano ZrO_2 tozlarının kırınım açılarının ise sırasıyla 2θ=~23,9°, 27,5°, 31,3°, 34,1°, 40,9°, 44,7°, 50,1°, 55,2°, 56,9°, 60,7°, 63,4°, 66,2°, 71,8°, 78,9° olduğu gözlemlenmiştir. Bu analiz, üretilen kompozit numunelerin fazlarının tespiti açısından kritik önem arz etmektedir.

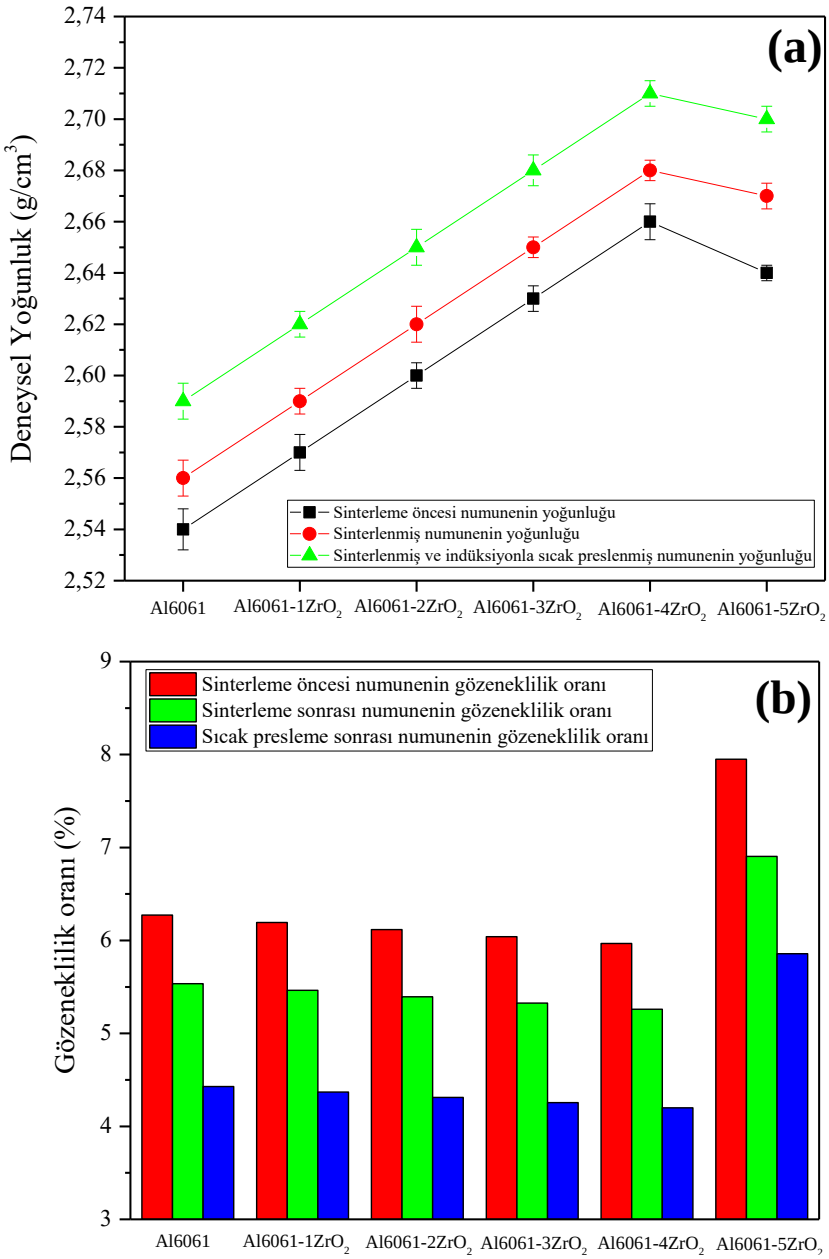


Şekil 3. (a) Al6061 alaşım ve (b) nano ZrO_2 tozlarına ait XRD örgü desenleri

3.2. Yoğunluk ve Gözeneklilik Ölçüm Sonuçları

Al6061- ZrO_2 nanokompozitlerin yoğunluk değerleri ve gözeneklilik oranları ZrO_2 takviye oranı ve uygulanan ısıl işlem türüne bağlı olarak Şekil 4'de sunulmuştur. Şekillerden anlaşıldığı üzere, ZrO_2 takviye oranının artmasıyla birlikte yoğunluk değerlerinde bir yükseliş gözlenmiştir. Bu durum, yüksek yoğunluklu ZrO_2 partiküllerinin (5,68 g/cm³) mikroyapıya eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, sinterleme ve indüksiyonla sıcak presleme işlemleri sayesinde yoğunluk değerlerinde artış görülürken, gözeneklilik oranında azalma yaşanmıştır. Sinterleme sırasında meydana gelen atomik difüzyonun etkisiyle toz partikülleri birbirine bağlanmış ve gözeneklilik oranı azalmıştır. Daha sonra, sinterlenmiş numunelere uygulanan indüksiyonla sıcak presleme işlemi, tanelerin yoğunlaşmasını sağlayarak gözeneklilik oranını sinterleme öncesine kıyasla önemli ölçüde azaltmıştır. Gözeneklilik

oranındaki bu düşüş, yoğunluk değerlerindeki artışı da beraberinde getirmiştir. Bu bağlamda, en yüksek yoğunluk değeri (2,71±0,005 g/cm³) ve en düşük gözeneklilik oranı (%4,2), sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%4ZrO_2 nanokompozitlerde elde edilmiştir. Ancak, bu katkı oranını (ağırlıkça %4) aşan durumlarda, nano boyutlu ZrO_2 partiküllerinin mikroyapıda muhtemel topaklanması nedeniyle yoğunluk değerlerinde düşüş ve gözeneklilik oranlarında artış gözlenmiştir.

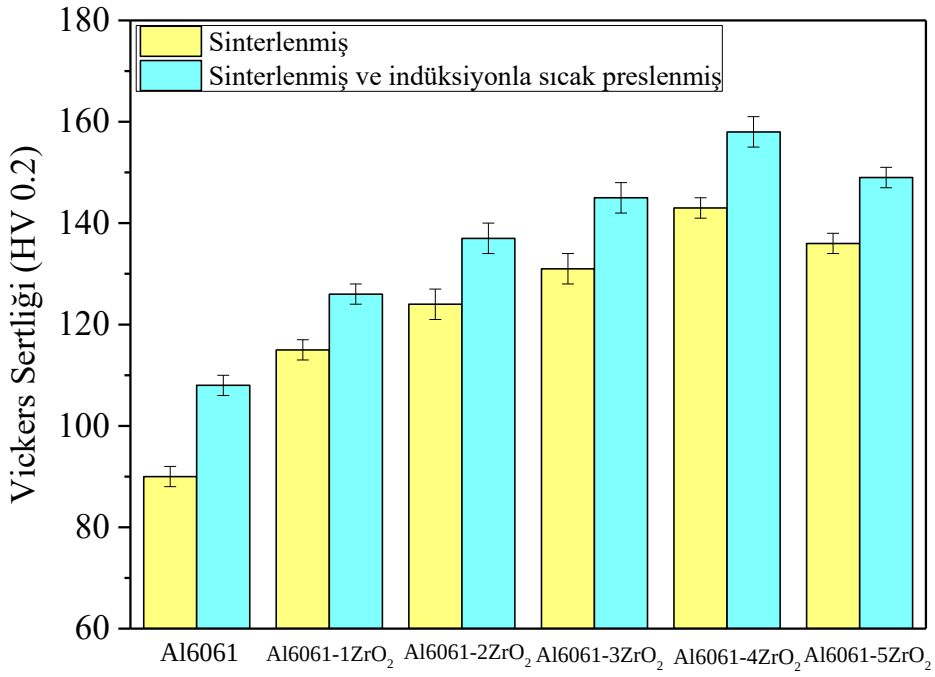


Şekil 4. Al6061 alaşımı ve Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerde (a) deneysel yoğunluk ve (b) gözeneklilik oranının takviye oranı ve ısıl işlem türüne bağlı olarak değişimi

3.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Şekil 5'te Al6061 alüminyum matrise ZrO_2 (ağırlıkça %1, 2, 3, 4, 5) takviyesinin ve indüksiyonla sıcak preslemenin Vickers sertliğine etkisi gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, ZrO_2 takviyesinin nanokompozitlerin sertlik değerlerini artırdığı ve en yüksek sertlik değerinin (158±3 HV) sinterlenmiş

ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%4ZrO_2 nanokompozitinde elde edildiği görülmektedir. Sıcak presleme işleminin etkisiyle kompozitin sertliğinin yaklaşık %10 oranında arttığı gözlenmiştir. Al6061-%4ZrO_2 kompozitin sertliği Al6061 alaşımına kıyasla %75,5 oranında artmıştır. Bu durum, matris yapıya eklenen yüksek sertliğe sahip nano ZrO_2 partiküllerinden ve sinterleme sonrası uygulanan indüksiyonla sıcak presleme işleminden kaynaklanmaktadır. Ancak, ağırlıkça %4 ZrO_2 takviye oranının üstünde, nano boyutlu ZrO_2 partiküllerinin mikroyapıda muhtemel topaklanması nedeniyle sertlik değerinde bir düşüş meydana gelmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; bu çalışmalardaki maksimum sertlik değeri 152 HV iken; mevcut çalışmada 158 HV sertlik değerine ulaşılmıştır (Zhang ve ark., 2023). Bu iyileşmeyi sağlayan en önemli etken; sıcak presleme işlemi ve nano zirkonya partiküllerin içyapıda homojene yakın dağılması olarak değerlendirilmektedir.



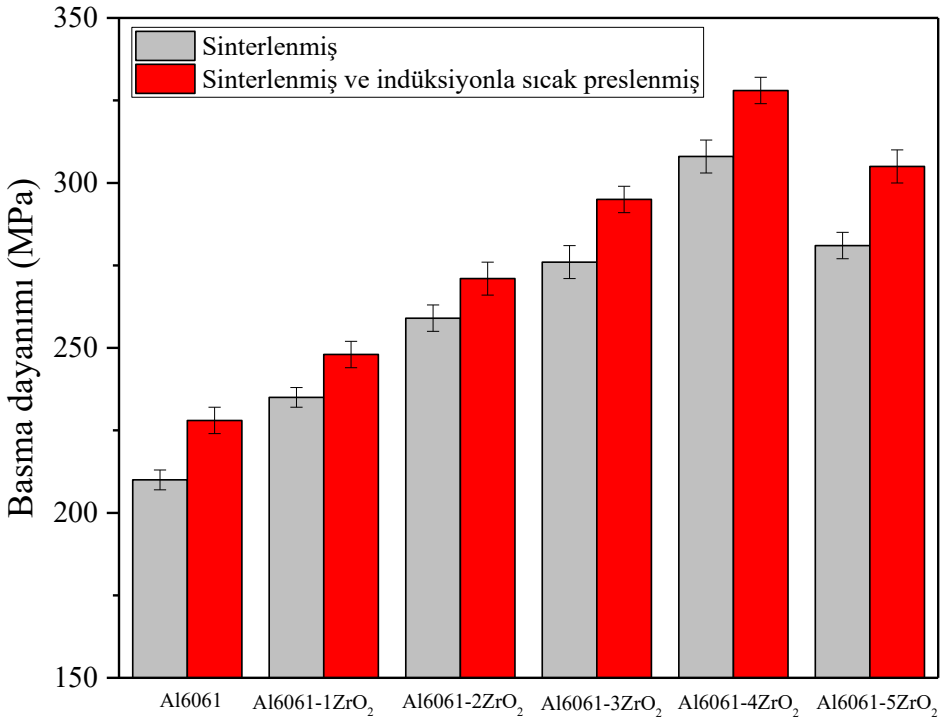
Şekil 5. Al6061 alaşımı ve Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerde Vickers sertlik değerinin takviye oranı ve ısıl işlem türüne bağlı olarak değişimi

Yüksek sertliğe sahip takviye elemanlarının yapıya eklenmesi, nanokompozit malzemelerin sertliğinde artışa sebep olmaktadır. Bu artış, Eşitlik 5'te verilen karışım kuralı kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu bağıntıda H_K kompozitin sertliğini, H_M matris fazının sertliğini, H_T ise takviye fazının sertliğini ifade ederken; f_M ve f_T sırasıyla matris ve takviye fazlarının hacimsel katkı oranlarını ifade etmektedir (Işık, 2023).

$$H_K = H_M f_M + H_T f_T \tag{5}$$

3.4. Basma Test Sonuçları

Şekil 6'da Al7075-ZrO_2 nanokompozitlerin takviye oranı ve ısıl işlem türüne bağlı olarak basma dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Elde edilen veriler, zirkonyanın yüksek sertliğe sahip yapısı nedeniyle takviye miktarındaki artışın kompozitlerin basma dayanımını genel olarak artırdığını ortaya koymuştur. Aynı kompozisyona sahip malzemede indüksiyonla sıcak preslemenin etkisiyle basma dayanımının yaklaşık %6 oranında arttığı görülmüştür. En yüksek basma dayanımı (328±4 MPa) indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%4ZrO_2 kompozitte tespit edilmiştir. Sadece sinterlenmiş Al6061 alaşımına (210±3 MPa) kıyasla sinterleme sonrası indüksiyonla sıcak preslenmiş Al7075-%4ZrO_2 nanokompozitte basma dayanımı %56,2 oranında artmıştır. Bu artış, sert seramik partiküllerin matris içerisinde homojene yakın bir şekilde dağılmasından kaynaklandığı öngörülmektedir. Bu sebeple de kompozitlerin kırık yüzey mikroyapıları bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; basma dayanımı değerlerinin 355 MPa'a kadar çıktığı rapor edilmiştir (Khan ve ark., 2020). Fakat bu değere %9ZrO_2 ve %5SiC katkısında ve mikrodalga sinterleme yöntemiyle ulaşıldığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada ise sadece %4ZrO_2 katkısıyla müspet sonuçlar elde edilebilmiştir. Elde edilen yüksek basma dayanımı sonuçları, üretilen Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerin havacılık, uzay, otomotiv, elektronik ve denizcilik sektörlerinde kullanımını da desteklemektedir.



Şekil 6. Al6061 alaşımı ve Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerinde basma dayanımı değerinin takviye oranı ve ısıl işlem türüne bağlı olarak değişimi

Kompozit malzemelerin mekanik dayanımını iyileştirmeye yönelik olarak termal uyumsuzluk, Orowan mekanizması, yük transferi ve tane inceltme gibi çeşitli güçlendirme mekanizmaları kullanılmaktadır. Matris ve takviye fazları farklı termal genleşme katsayıları ile elastik modül değerlerine sahiptir. Bu

farklılık, sıcaklık değişimlerinde matris ve takviye arasındaki arayüzeyde artık termal gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır. Oluşan bu gerilmeler ile elastik modül farkı, mikroyapıda dislokasyon yoğunluğunu artırmaktadır. Dislokasyon yoğunluğundaki artış ise malzemenin mukavemetini yükseltmektedir. Termal uyumsuzluk ile dislokasyon yoğunluğu arasındaki ilişki Eşitlik (6) ile ifade edilmekte olup bu denklemde $\Delta\alpha\Delta T$ termal genleşme farkını, b Burgers vektörünü ve N_A ise nanopartikül sayısını göstermektedir (Işık, 2023).

$$\Delta\rho = \Delta\alpha\Delta T N_A / b \tag{6}$$

Kompozit yapı içerisinde dislokasyon yoğunluğunun artması, Orowan döngülerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu döngüler, dislokasyon çizgilerinin belirli bir yoğunluğa ulaştığında takviye taneleri etrafında dairesel yollar izlemesiyle meydana gelmektedir. Orowan döngüleri, dislokasyon hareketini kısıtlayarak malzeme dayanımında artış sağlamaktadır. Orowan güçlendirme mekanizmasına ait dayanım katkısı (σ_O), Eşitlik (7) ile ifade edilmektedir. Bu denklemde λ takviye taneleri arasındaki mesafeyi ve r ise bu tanelerin yarıçapını göstermektedir (Taşkın, 2023).

$$\sigma_o = 0{,}13(Gb/\lambda)ln(r/b) \tag{7}$$

Yük transferi mekanizması, Eşitlik 8ile ifade edilmektedir. Bu denklemde f_r takviye fazının hacimsel oranını ve σ_{YM} ise matris malzemesinin akma dayanımını göstermektedir. Matris malzemesi hasar gördüğünde, gerilme takviye fazına aktarılmaktadır. Böylece matris ile takviye malzemesi arasında güçlü bir arayüzey bağının oluşması sağlanmaktadır (Şenel ve Mahmutoğlu, 2022).

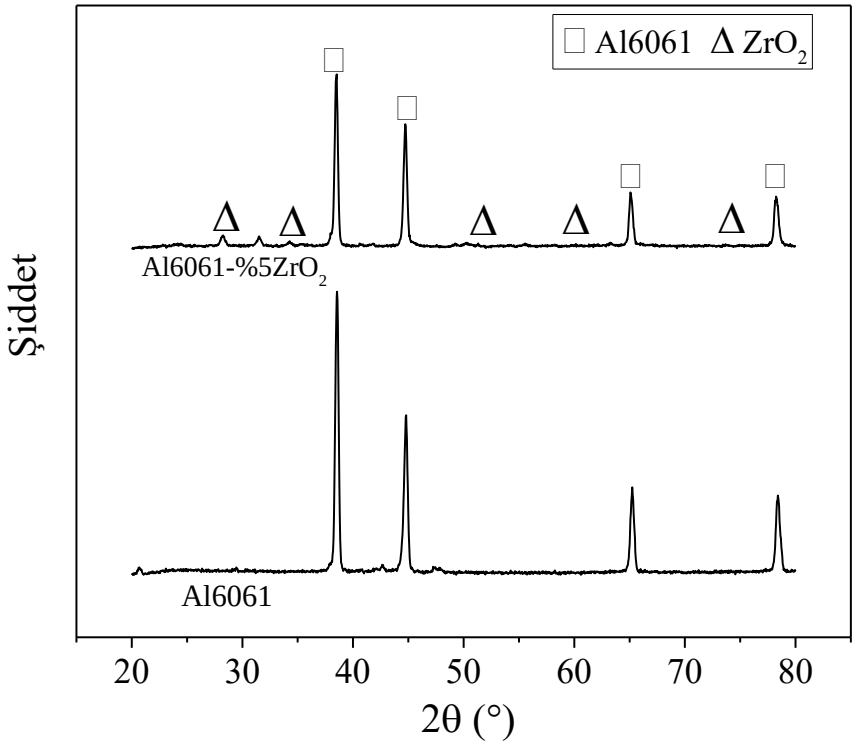
$$\sigma_L = 0{,}5 f_r \sigma_{YM} \tag{8}$$

Tane inceltme mekanizmasıyla sağlanan dayanım artışı Hall-Petch denklemiyle tanımlanmaktadır (Eşitlik (9)). Bu denklemde k malzeme sabitini ve d ise ortalama tane çapını ifade etmektedir. Tane boyutunun küçülmesi ile tane sınırı sayısını artmakta ve dislokasyon hareketi sınırlanmaktadır. Böylece dislokasyon yoğunluğu artmakta ve kompozit malzemenin dayanımı gelişmektedir (Chen ve ark., 2020; Şenel ve Mahmutoğlu, 2022).

$$\sigma_{GR} = k d^{-1/2} \tag{9}$$

3.5. XRD Faz Analizi Sonuçları

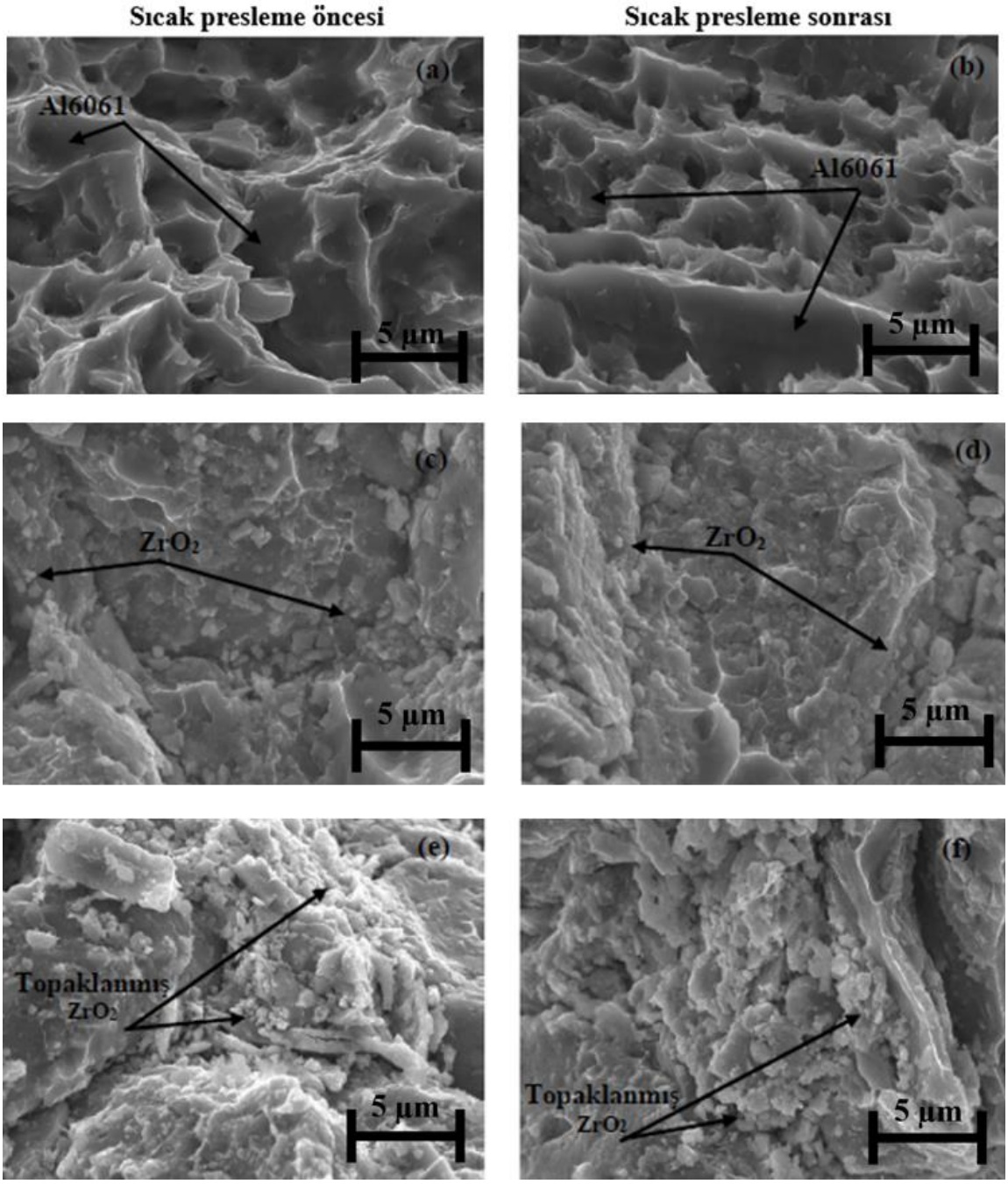
Şekil 7'de yer alan Al6061 alaşımı ve Al6061-%5ZrO_2 nanokompozitine ait XRD faz analizleri incelendiğinde, içyapıda sinterleme ve indüksiyonla ısıl işlem gibi yüksek sıcaklık uygulamaları sonucunda oluşabilecek istenmeyen ikincil fazlara ait herhangi bir pik gözlemlenmemiştir. Al6061-%5ZrO_2 kompozit yapıda sadece zirkonya ve alüminyum fazlarının varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 7. Al6061 alüminyum alaşımı ve Al7075-%5ZrO_2 kompozitlerine ait XRD örgü desenleri

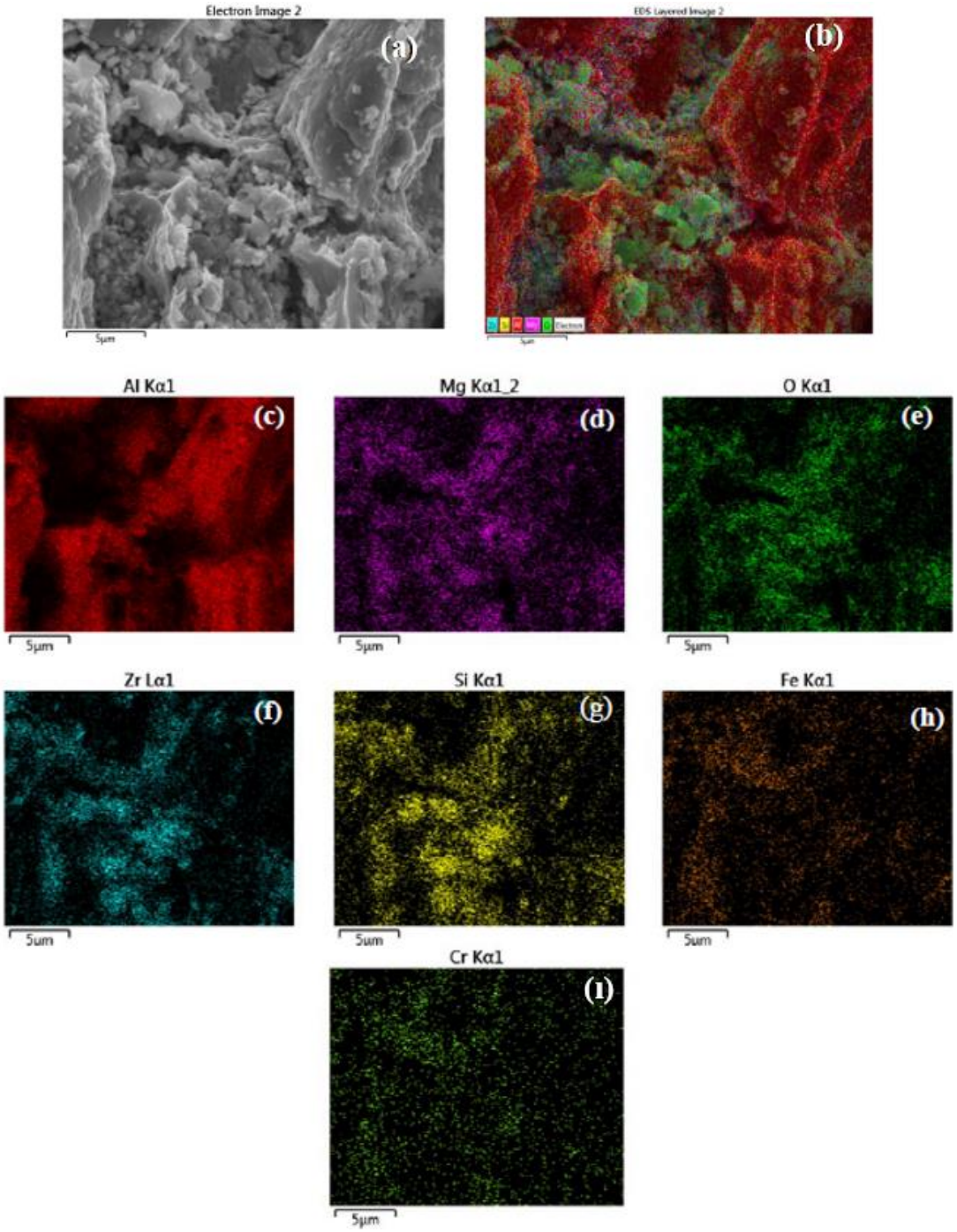
3.6. Numunelerin SEM ve SEM-EDX Görüntüleri

Al6061 alaşımına, Al6061-%4ZrO_2 ve Al6061-%5ZrO_2 nankompozitlerine ait kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 8'de sunulmuştur. Al6061-%4ZrO_2 nanokompozitinin SEM görüntüsüne bakıldığında, nano ZrO_2 partiküllerinin mikroyapı içerisinde homojene yakın dağıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, SEM görüntülerine göre nano ZrO_2 partiküllerinin tane sınırlarında yer aldığı belirlenmiştir. Bu partiküller, tane sınırlarında bir bariyer görevi görerek sinterleme ve indüksiyonla ısıl işlem sırasında aşırı tane büyümesini engellemiştir. Ancak, ağırlıkça %5ZrO_2 takviyesinde mikroyapıda topaklanmalar ve gözenekler tespit edilmiştir. Bu durum, topaklanmaların yoğunluk, sertlik ve basma dayanımında düşüşe yol açtığını doğrulamaktadır.



Şekil 8. Al6061 alüminyum alaşımı ve Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerin sıcak presleme öncesi ve sonrası kırık yüzey SEM resimleri: (a) Al6061, (b) Al6061-i, (c) Al6061-%4ZrO_2, (d) Al6061-%4ZrO_2-i, (e) Al6061-%5ZrO_2, (f) Al6061-%5ZrO_2-i

Şekil 9'da sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%5ZrO_2 nanokompozitine ait SEM-EDX element dağılım analizleri gösterilmektedir. Analizlerde, Al (kırmızı renk), Si (sarı renk), Fe (turuncu renk), Mg (mor renk) ve Cr (açık yeşil renk) gibi Al6061 alüminyum alaşımına ait elementlerin mikroyapıda yer aldığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, Zr (turkuaz renk) ve O (koyu yeşil renk) elementleri, nano zirkonyanın mikroyapıdaki dağılımını göstermektedir. Bu analizden, zirkonya nanopartiküllerinin kümeleştiği görülmüştür.



Şekil 9. Sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş Al6061-%5ZrO_2 nanokompozitine ait (a) SEM, (b) SEM-EDX görüntüsü ve (c-ı) element dağılımları

4. Sonuç

Bu çalışmada, Al6061 alüminyum matrisine %1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında ZrO_2 takviyesi yapılarak toz metalürjisi ve indüksiyonla sıcak presleme yöntemleriyle nanokompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenerek en iyi performansı sağlayan ZrO_2 takviye oranı belirlenmiştir. Üretilen nanokompozitlerin yoğunluğu, sertliği, basma dayanımı ve mikroyapısı incelenerek elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Al6061-ZrO_2 nanokompozitlerde, en yüksek deneysel yoğunluk (2,71±0,005 g/cm³), sertlik (158±3 HV) ve basma dayanımı (328±4 MPa) sinterlenmiş ve indüksiyonla sıcak preslenmiş %4 nanozirkonya içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Al6061 alaşımına kıyasla yoğunluğun, sertliğin ve basma dayanımının sırasıyla %2,3, %75,5 ve %56,2 oranında arttığı belirlenmiştir. Bu durum, nano zirkonya nanopartiküllerinin tane sınırlarına yerleşerek dislokasyon hareketlerini kısıtlamasından kaynaklanmaktadır.
- Al6061-%4ZrO_2 nanokompozitlerin kırık yüzey SEM analizleri neticesinde, ZrO_2 nanopartiküllerinin mikroyapıda homojene yakın bir şekilde dağıldığını göstermiştir. XRD analizleri ise mikroyapıda istenmeyen ikincil fazların bulunmadığını ortaya koymuştur.
- Al6061-%4ZrO_2 nanokompozitlerin SEM analizlerinde ZrO_2 nanopartiküllerinin tane sınırlarına yerleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sinterleme ve indüksiyonla ısıl işlem sırasında aşırı tane büyümesini engelleyerek mekanik özelliklerin iyileşmesini desteklemektedir. Ancak, %5 nano zirkonya takviyesinde nanopartiküllerin topaklanması nedeniyle mekanik özelliklerde bir düşüş gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAPKOB) tarafından PYO.MUH.1901.22.008 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye benzer oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Arulkumar S., Anandakrishnan V., Ismail LS. Influence of parameters on the tribological behavior of AA7075 Nano-TiC metal matrix composite. Canadian Metallurgical Quarterly 2025: 1-12.

Banoth S., Valasingam SB., Darla, VR., Gujjala R., Prasad D. Investigation of amorphous SiO_2 and activated carbon (AC) on microstructural, mechanical, and tribological properties of hybrid (AA7075) metal matrix composites. International Journal of Metalcasting 2025: 1-14.

Chen W., Yang T., Dong L., Elmasry A., Song J., Elmarakbi A., Liu T., Lu HB., Fu YQ. Advances in graphene reinforced metal matrix nanocomposites: mechanisms, processing, modelling, properties and applications. Nanotechnology and Precision Engineering 2020; 3(4): 189–210.

Gautam C., Joyner J., Gautam A., Rao J., Vajtai R. Zirconia based dental ceramics: structure, mechanical properties, biocompatibility and applications. Dalton Transactions 2016; 45(48): 19194-19215.

Işık E. Al7075-Al_2O_3-grafen ve Al7075-ZrO_2-grafen hibrit kompozitlerin mekanik, tribolojik özelliklerinin ve mikroyapısının incelenmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, 2023.

Jhamb SK., Goyal A., Pandey A. Tribological behaviour of Mg-1%Sn-X%HA composites for biomedical application. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion 2025; 11: 1-12.

Jung Y., Do K., Kim M., Choi M., Bansal N., Salunkhe RR., Ahn H. Dispersion optimization of Si nanoparticles in Si@SiOC composites via ascorbic acid for high-performance Si-based li-ion batteries. Social Science Research Network 2025: 1-13.

Kalemtaş A. İnfiltrasyon yöntemiyle kompozit üretiminde etkili olan temel değişkenler. Putech and Composite 2016; 20-26.

Khan A., Abdelrazeq MW., Mattli MR., Yusuf MM., Alashraf A., Matli PR., Shakor RA. Structural and mechanical properties of Al-SiC-ZrO_2 nanocomposites fabricated by microwave sintering technique. Crystals 2020; 10: 1-12.

Li J., Wang G., Shu Y., Cheng J. Mechanical properties and oxidation behaviors of iron-based composites with Mo-coated MoS_2 powders according to elevated temperatures. Journal of Materials Research and Technology 2025; 39: 7151-7162.

Ma J., Torrens R., Bolzoni L., Yang F. Enhanced thermal conductivity of hot-pressed copper/diamond composites with titanium-modified interface. Materials Characteriation 2025; 230: 1-14.

Martinez SEH., Rivera JJC., Reyes CGG., Sanchez RM., Guel IE, Rivera, JLH. Comparative study of synthesis of AA7075–ZrO_2 metal matrix composite by different mills. Journal of Alloys and Compounds 2015; 643: 107-113.

Pal K., Navin K., Kurchania R. Study of structural and mechanical behaviour of Al-ZrO_2 metal matrix nanocomposites prepared by powder metallurgy method. Materials Today: Proceedings 2020; 26(2): 2714-2719.

Pul M. Effect of ZrO_2 quantity on mechanical properties of ZrO_2 reinforced aluminum composites produced by the vacuum infiltration technique. Revista de Metalurgia 2021; 57(2): e195.

Rajaram S., Karthikeyan P., Surya TJ., Kaniskar K., Pazhanivel V. Experimental investigation of mechanical properties of AA6063/ZrO_2 metal matrix composites. Materials Today: Proceedings 2023; 74: 105-109.

Soydemirci R. Zirkonya ve grafen takviyeli al6061 esaslı kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, 2025.

Şahin Y. Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayınevi, Ankara 2015.

Şenel MC. Grafen-seramik tanecik takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitlerin toz metalürjisi metoduyla üretimi, mekanik ve mikroyapı özelliklerinin incelenmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmış Doktora Tezi, 2018.

Şenel MC., Gürbüz M. Synergistic effect of graphene/boron nitride binary nanoparticles on aluminum hybrid composite properties. Advanced Composites and Hybrid Materials 2021; 4(4): 1248-1260.

Şenel MC., Mahmutoğlu Ü. Effect of induction heat treatment on the mechanical properties of Si_3N_4-graphene reinforced Al2024 hybrid composites. Bulletin of Materials Science 2022; 45(1): 1-17.

Tabrez S., Kumar V., Aur KK., Raja AR., Sharma, A., Hamzah FM., Singh S. Tribological performance of Ni-metal matrix composites reinforced with MXene. Macromolecular Symposia 2025: 1-12.

Taşkın A. Al7075-Si_3N_4-grafen ve Al7075-B_4C-grafen hibrit kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin araştırılması. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, 2023.

Tok A., Ateş S. Al6061 matrisli hibrit kompozitlerin sertlik ve çekme dayanımına SiC Al_2O_3 ve yumurta kabuğu tozu takviyesinin etkilerinin incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 23(5): 1307-1315.

Wang N., Yin S., Han H., Zhang G., Guan R. Effect of interlayer-sprayed TiC particulates on the mechanical properties of WAAM-fabricated magnesium matrix composites. Journal of Alloys and Compounds 2025; 1047: 1-16.

Xia D., Yang H., Cui C., Yang G., Guo K., Luo A., Zhang P., Wu T., Gupta M., Xu L. Synthesis and characterization of ZnO reinforced zinc matrix composites via in-situ oxidation process. Journal of Materials Research and Technology 2025; 39: 5832-5846.

Xiao Y., Zhao T., Xiao R., Li J., Wang C., Du H., Li Y. A novel powder-fiber-foil approach to fabricating woven SiC fiber-reinforced titanium matrix composite: microstructure and mechanical properties. Materials Science & Engineering A 2025; 948: 1-14.

Yu XX., Lee WB. The design and fabrication of an alumina reinforced aluminum composite material. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2000; 31(3): 245-258.

Zhang J., Zhang L., Ma H. Effect of ZrO_2 additions on the microstructure, mechanical and wear properties of ZrO_2/7075 aluminium alloy composite. Materials Today Communications 2023; 37: 1-12.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1481-1500, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1481-1500, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Assessing Control Strategies for Monkeypox: A Compartmental Model Including Vaccinated, Quarantined, and Hospitalized Individuals

Mehmet KOCABIYIK[1*], Abdulkadir ŞAN[2]

[1]Mehmet Akif Ersoy University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Mathematics, 15000, Burdur, Türkiye
[2]Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Institute of Sciences, Department of Mathematics, 15000, Burdur, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-7701-6946
[2]https://orcid.org/0009-0000-6048-8114
*Sorumlu yazar: mkocabiyik@mehmetakif.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 11.10.2025
Accepted: 15.12.2025
Published online: 15.06.2026

Keywords:
Monkeypox modelling
Vaccination impact
Quarantine strategy
Hospitalization effect
Stability analysis

ABSTRACT

Monkeypox is an infectious disease originating in animals, caused by a double-stranded DNA virus. It spreads between humans through close contact with infected people or animals, especially during intimate interaction and via respiratory secretions. Because its symptoms resemble other viral diseases, diagnosis is difficult and requires laboratory confirmation. With increasing infection rates, particularly in resource-limited countries, monkeypox has become a growing global health concern, emphasizing the need for effective prevention and control. In epidemiology, mathematical modelling is essential for understanding disease spread, predicting outbreaks, and evaluating control strategies. These models provide insights into transmission patterns and are used to assess interventions such as vaccination, isolation, and hospitalization. This study introduces a new compartmental model, SVEIQHR, designed to examine the combined effects of quarantine and vaccination on monkeypox transmission. The model divides the population into seven groups: Susceptible, Vaccinated, Exposed, Infectious, Quarantined, Hospitalized, and Recovered. Unlike previous studies analyzing these components separately, this integrated model provides a more comprehensive representation of disease control mechanisms and evaluates multiple interventions within one framework. Mathematical techniques, including the next-generation matrix, were applied to determine the basic reproduction number, as well as the disease-free and endemic equilibrium points. Stability was assessed using eigenvalue-based methods. Numerical simulations with the Runge–Kutta method illustrate the model's dynamics across various time intervals through tables and visual plots. This framework contributes to understanding monkeypox transmission and control. Future work will refine the model by adding subgroups such as asymptomatic, pre-symptomatic, and treated individuals.

Maymun Çiçeği İçin Kontrol Stratejilerinin Değerlendirilmesi: Aşılanmış, Karantinaya Alınmış ve Hastaneye Yatmış Bireyleri İçeren Bölmeli Bir Model

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.10.2025
Kabul tarihi: 15.12.2025
Online Yayınlanma: 15.06.2026

ÖZ

Maymun çiçeği hastalığı, hayvan kökenli bir enfeksiyon olup çift sarmallı DNA virüsü tarafından oluşturulur. Enfekte kişilerle veya hayvanlarla yakın temas, özellikle fiziksel veya cinsel temas ve solunum salgıları yoluyla insandan insana bulaşır. Belirtileri diğer viral hastalıklarla benzerlik

Anahtar Kelimeler:
Maymun çiçeği modellenmesi
Aşılanmanın etkisi
Karantina stratejisi
Hastaneye yatış etkisi
Kararlılık analizi

gösterdiğinden tanı zor olup laboratuvar doğrulaması gerektirir. Enfeksiyon oranlarının özellikle kaynakları sınırlı ülkelerde artmasıyla, maymun çiçeği küresel bir sağlık sorunu haline gelmiş ve etkili önleme ile kontrol önlemlerine duyulan ihtiyacı artırmıştır. Epidemiyolojide matematiksel modelleme, hastalıkların yayılımını anlamada, salgınları tahmin etmede ve kontrol stratejilerini değerlendirmede temel bir araçtır. Bu modeller, bulaşma dinamikleri hakkında önemli bilgiler sunar ve aşılama, izolasyon ve hastaneye yatırma gibi müdahalelerin etkinliğini değerlendirmede kullanılır. Bu çalışma, karantina ve aşılama stratejilerinin birlikte etkisini incelemek için geliştirilen yeni bir bölmeli modeli, SVEIQHR modelini sunmaktadır. Model, nüfusu yedi gruba ayırır: Duyarlı, Aşılı, Maruz, Bulaşıcı, Karantinaya Alınmış, Hastanede Yatan ve İyileşmiş. Önceki çalışmalarda bu unsurlar ayrı ayrı incelenirken, bu entegre model hastalık kontrol mekanizmalarını daha bütüncül biçimde temsil eder ve birden fazla müdahaleyi aynı çerçevede değerlendirir. Matematiksel analizlerde yeni nesil matris yöntemi kullanılarak temel üreme sayısı ve hastalıksız ile endemik denge noktaları belirlenmiştir. Dengenin kararlılığı özdeğer tabanlı yöntemlerle incelenmiştir. Runge–Kutta yöntemi ile yapılan sayısal simülasyonlar, farklı zaman aralıklarında modelin dinamiklerini tablo ve grafiklerle göstermektedir. Bu çerçeve, maymun çiçeği bulaşmasının ve kontrolünün anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, asemptomatik, presimptomatik ve tedavi altındaki bireyleri ekleyerek modelin geliştirilmesini hedeflemektedir.

To Cite: Kocabıyık M., Şan A. Assessing Control Strategies for Monkeypox: A Compartmental Model Including Vaccinated, Quarantined, and Hospitalized Individuals. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1481-1500.

1. Introduction

Monkeypox is a zoonotic virus from the Ortho poxvirus genus of the Poxviridae family that can be transmitted from animals to humans (McCollum and Damon, 2014). The monkeypox disease was first identified during an outbreak in Copenhagen in 1958 (Van Dijck et al., 2023). In humans, it was first observed in 1970 in the Democratic Republic of the Congo (Durski, 2018). Although human monkeypox had not been seen outside certain regions of Africa before 2022, it has become a national concern due to reported cases in other countries (Thornhill et al., 2022). There are not enough resources regarding viral dynamics or the transmission period of the monkeypox virus. While two drugs, Brin cidofovir and Tecovirimat, have shown positive effects in animals, there is no licensed treatment available for humans (Adler et al., 2022).

Monkeypox is similar to smallpox and is clinically difficult to distinguish from chickenpox. For this reason, it should be monitored and diagnosed in a laboratory setting. While the virus is primarily transmitted from animals to humans through contact, it can also spread via respiratory droplets and contaminated objects (McCollum and Damon, 2014; Rizk et al, 2022). Additionally, due to symptoms such as skin rashes, the disease can be confusing by other illnesses. For these reasons, it is important to establish an international collaboration and laboratory network to conduct more comprehensive studies on monkeypox (Altindis et al., 2022). It is not definitively known which animal transmits the virus. Although it is often said to be transmitted from monkeys, there is also a possibility that it can be transmitted from rodents (Kaler et al., 2022).

The most common symptoms of the disease include fluid-filled blister-like rashes in the mouth, anal, and genital areas, muscle pain, fever, and abnormalities in the liver. Although most individuals

experience a mild form of the illness, there are also individuals who go through a severe course (Huhn et al., 2005; Mitjà et al., 2023).

Mathematical models play a crucial role in predicting the course of an outbreak and estimating the effects of interventions such as vaccination, quarantine, and hospitalization. They evaluate the probability of disease transmission by an infected individual, changes in the number of infected individuals, and the impact of control measures. Models constructed using systems of differential equations allow for the analysis of scenarios such as spread, stabilization, increase, and decrease of the outbreak within a population. As a result of these analyses, appropriate precautions can be taken, potentially yielding positive outcomes for public health.

For monkeypox, models such as SIR, SEIR, SVIR, and SVEIR have been developed based on dynamic infection. The accuracy and reliability of these models depends on the use of correct parameters and real data. In the developed models, when scenarios such as the effect of vaccination on infected individuals and quarantine are simulated, a decline in the outbreak is predicted. In addition, situations such as fluctuations in individual immunity and viral mutations can also be modeled, allowing for the analysis of the long-term progression of the outbreak. For these reasons, mathematical modeling not only addresses the current situation but also provides significant contributions to understanding the future trajectory of the outbreak by evaluating long-term scenarios. Mathematical modeling plays an important role in predicting the spread of diseases and analyzing them using different approaches to aid in their control (Gümüş and Köse, 2012; Siettos and Russo, 2013; Berge et al., 2017; Ndaïrou et al, 2020; Kocabıyık et al., 2021; Kocabıyık and Ongun, 2022; Mekonen et al., 2022; Melkamu and Mebrate, 2022; Öztürk et al., 2023; Kocabıyık and Şan, 2024; Kocabıyık, 2025; Kocabıyık and Ongun, 2025).

Bhunu and Mushayabasa developed a model capturing outbreak dynamics and formulated it as a system of nonlinear differential equations. Their objective was to demonstrate that the disease-free equilibrium is globally asymptotically stable with respect to the basic reproduction number. Additionally, they established the stability of the animal-specific endemic equilibrium using the Lyapunov method. Their results indicated that the disease exhibits local asymptotic stability in both human and animal populations (Bhunu and Mushayabasa, 2011). Especially after the 2022 outbreak, many mathematical models and studies related to monkeypox disease have been developed. Peter et al. conducted a deterministic monkeypox virus mathematical model that was developed using classical and fractional-order differential equations, and the instability condition was investigated. They examined the outbreak with different parameters and various system values. The aim was to develop infection control policies (Peter et al., 2022a). Allehiany et al. prepared a mathematical model by analyzing infected individuals of monkeypox in the USA. The model highlights the disease-free equilibrium point, stability, backward bifurcation, and the effects of parameters (Allehiany et al., 2023).

Monkeypox, although rare in countries outside Central and West Africa, particularly poses a serious public health threat in the Democratic Republic of Congo. It is important to perform mathematical modeling and dynamic analysis of the disease using various data. In our study, a Mpox model was

created using current data, and the disease's progression was predicted through stability and numerical analyses.

In the study, mathematical modeling, stability analysis, and numerical analysis were performed to evaluate how effective the monkeypox virus is and to determine strategies for controlling the spread of the disease. The developed SVEIQHR model enables a more detailed investigation of epidemiological diseases such as monkeypox. By incorporating interventions such as quarantine, vaccination, and hospitalization along with up-to-date data, the model provides a comprehensive analysis of the transmission dynamics of monkeypox within a population during an epidemic. It plays a significant role in understanding the impact of the outbreak and in developing effective control strategies. The findings obtained from the intervention scenarios demonstrate that the spread of the disease can be significantly reduced.

The innovations and advantages of the developed study include a more detailed structure compared to other models, the use of up-to-date data to simulate realistic scenarios involving vaccination and hospitalization, and the incorporation of early diagnosis through isolation. Stability analysis was conducted to examine the long-term behavior of the model, including equilibrium points and threshold values. Additionally, numerical analysis was used to investigate the temporal dynamics of the disease, supported by graphical representations.

This study consists of six sections. The second section includes the diagram and modeling of the developed system. The third section provides the basic information regarding the solution of the mathematical model system. This section explains the definitions and advantages of numerical and stability methods. In the fourth section, the stability analysis of the system is detailed and solved. The fifth section presents the numerical analysis of the system using the Runge-Kutta method, supported by graphs and figures for interpretation. The sixth section contains the conclusion, which includes evaluations related to the topic.

2. Mathematical Modelling of Monkeypox Disease

Mathematical models are useful tools for predicting the dynamics of a hypothetical or ongoing outbreak by analyzing its temporal dynamics. In this study, the model describes the temporal changes in susceptible, vaccinated, exposed, infected, quarantined, hospitalized, and recovered individuals. The variables are defined as follows: S represents susceptible individuals, V refers to vaccinated individuals, E denotes exposed individuals, I corresponds to infected individuals, Q indicates quarantined individuals, H stands for hospitalized individuals, and R represents recovered individuals. The following system of equations represents the mathematical framework for monkeypox transmission, considering the impacts of vaccination and quarantine measures.

$$\frac{dS}{dt} = b - cS(t)I(t) - aS(t) - dS(t) + fQ(t)$$

$$\frac{dV}{dt} = aS(t) - dV(t)$$

$$\frac{dE}{dt} = cS(t)I(t) - mE(t) - zE(t) - kE(t) - dE(t)$$

$$\frac{dI}{dt} = zE(t) - wI(t) - dI(t) - pI(t) \quad (1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = mE(t) - fQ(t) - vQ(t) - dQ(t) - \gamma Q(t)$$

$$\frac{dH}{dt} = wI(t) + vQ(t) - dH(t)$$

$$\frac{dR}{dt} = kE(t) + pI(t) + \gamma Q(t) - dR(t)$$

$$S(t_0) = S_0,\ V(t_0) = V_0,\ E(t_0) = E_0,\ I(t_0) = I_0,\ Q(t_0) = Q_0,\ H(t_0) = H_0\ ,\ R(t_0) = R_0.$$

The parameters used in the model are defined as follows: b represents the birth or recruitment rate, and d corresponds to the natural death rate. a indicates the vaccination rate of susceptible individuals, while f refers to the rate at which quarantined individuals return to the susceptible class. m denotes the rate at which exposed individuals are transferred to quarantine, and z expresses the progression rate of exposed individuals to the infected class. v stands for the rate at which quarantined individuals worsen and require hospitalization, whereas w specifies the rate at which infected individuals are hospitalized. k signifies the recovery rate of exposed individuals without developing the disease, p represents the recovery rate of infected individuals, and γ indicates the recovery rate of quarantined individuals. Finally, c corresponds to the transmission rate at which susceptible individuals become exposed. A schematic representation of the model is presented in Fig. 1.

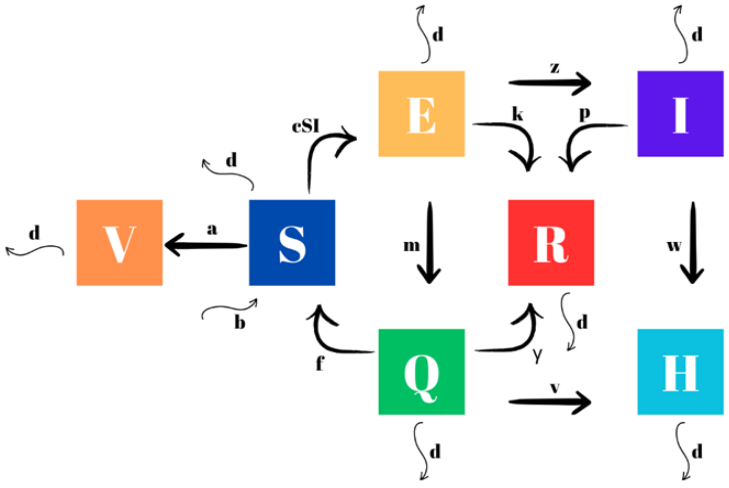


Figure 1. The diagram of the mathematical model for Monkeypox

Remark: In this study, the SVEIQHR model was developed to provide an integrated framework for analyzing the combined effects of quarantine and vaccination strategies on the spread of monkeypox. However, several simplifying assumptions were made during the model's formulation. First, the inclusion of quarantine for individuals in the incubation phase is not entirely realistic from an epidemiological perspective, as these individuals are asymptomatic and they cannot be clinically

detected. This assumption represents an idealized scenario in which intensive contact tracing or advanced screening strategies are implemented. Similarly, the transition from the quarantine class back to the susceptible class represents situations where individuals are mistakenly quarantined despite being uninfected; however, such a pathway is not applicable for infected individuals. Furthermore, the model assumes that hospitalized individuals either die or remain hospitalized, without explicitly accounting for the possibility of recovery and subsequent reintegration into community. Incorporating this transition in future extensions of the model would provide a more accurate representation of disease dynamics. Finally, although monkeypox is a zoonotic disease that often originates from rodents before spreading among humans, the present model considers only human-to-human transmission. This simplification was made in order to focus specifically on evaluating the effects of interventions within human populations. Nevertheless, future work will extend the model by including animal reservoirs to capture the zoonotic nature of monkeypox transmission.

3. Basic Information and Definitions about Numerical Methods

Dynamic analysis of mathematical models refers to the examination of the time-dependent behavior of systems of differential equations. This type of analysis enables the investigation of key properties such as equilibrium points and stability. It is widely applied in various fields, including epidemiology, engineering, and economics. Equilibrium points in mathematical model systems are constants that do not change over time. They are crucial for understanding the long-term behavior of differential equations. Since the derivatives at equilibrium points are zero, they can be determined easily (Martcheva, 2015). Stability reflects the response of a system to environmental disturbances. In dynamic systems, it provides advantages such as realistic predictions, control, reliability, and understanding long-term dynamics. In epidemiological models, it is effective in answering questions related to the progression of the disease and the outcomes of various variables.

Let $x(t) \in \mathbb{R}^n$ denote the state vector of a dynamic system. A first-order ordinary differential equation (ODE) in vector form is written as: The vector form of the first-order ordinary differential equation is given as:

$$\frac{dx}{dt} = g(x)\,, g\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n, t \geq 0. \tag{2}$$

Definition 3.1: (Allen et al., 2008; Dilek, 2023) A point $x^* \in \mathbb{R}^n$ is an equilibrium point if

$$g(x^*) = 0. \tag{3}$$

Definition 3.2: (Alın, 2020) If g is differentiable $(g \in C^1)$, the Jacobian matrix of g at $x \in \mathbb{R}^n$ is defined as

$$J_g(x) = \frac{\partial g}{\partial x} = \left[\frac{\partial g_i}{\partial x_j}\right]_{\{i,j=1\}}^{n}. \tag{4}$$

Definition 3.3: (Butcher, 1966) Let x^* be an equilibrium point and $J_g(x^*)$ its Jacobian.

- x^* is locally asymptotically stable if $Re(\lambda_i) < 0$ for all eigenvalues λ_i of $J_g(x^*)$.
- x^* is unstable if $\exists \lambda_i : Re(\lambda_i) > 0$.

This criterion provides a rigorous mathematical basis for evaluating the local stability of the equilibrium within the proposed model (Burrage and Butcher, 1979).

To study how an epidemic spreads over time in a population consisting entirely of susceptible individuals, an approach must be developed. In the first step, the changes in the number of individuals during the spread of the epidemic are disregarded, and the transmission potential of the epidemic is linearized (Diekmann et al., 1990). Next, the basic reproduction number, denoted as R_0, is used (Hethcote, 2000).

If $R_0 < 1$, infected individuals cannot spread the epidemic, and the outbreak does not occur. However, if $R_0 > 1$, the number of infected individuals increases, and the epidemic spreads. The basic reproduction number (R_0) determines the threshold for transmission of the epidemic to a fully susceptible population; however, once the epidemic has started spreading, conditions may change, and R_0 may no longer be an appropriate measure of transmission.

Nonetheless, in many models, R_0 is associated with the peak number of infected individuals and the overall size of the epidemic. For this reason, it is useful for measuring the spread of the epidemic (Van den Driessche and Watmough, 2002).

Definition 3.4: (Van den Driessche and Watmough, 2008; Sameni, 2020) Let $x(t) \in \mathbb{R}^n$ denote the state vector of the model, written as

$\frac{dx}{dt} = g(x(t))$.

R_0 depends on both infected and non-infected (e.g., recovered, susceptible, etc.) individuals. The expression above denotes the state vector as $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), x_{m+1}(t), \dots, x_n(t)]^T$. Here, $x_1(t), \dots, x_m(t)$ represent the components corresponding to infected individuals, while $x_1(t), \dots, x_n(t)$ represent all other variable components in the model. This approach involves identifying the relevant terms in the infected class equations and organizing them into two vectors, denoted as F and V. Specifically, the terms in the equations corresponding to the infected compartments are separated into these two vectors: F, representing the rate of appearance of new infections, and V, representing the rate of transfer between compartments and recovery or removal.

$\frac{dx}{dt} = g\big(x(t)\big) = F(x(t)) - V(x(t))$.

F represents the appearance of new infections, while V denotes the transfer of existing infections within the population. The Jacobian matrices of F and V are computed by differentiating these vectors with respect to the relevant subset of variables. These matrices are then evaluated at the disease-free equilibrium (DFE), defined as $x^* = [0,0, \dots, 0, x^*_{m+1}, \dots, x^*_n]^T$;

$$DF(y_0) = \begin{bmatrix} F & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad DV(y_0) = \begin{bmatrix} V & 0 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

F and V are mxm matrices expressed as follows:

$F = \left[\frac{\partial F_i}{\partial x_j}(x_0)\right]$ and $V = \left[\frac{\partial V_i}{\partial x_j}(x_0)\right]$ with $1 \leq i, j \leq m$.

Moreover, F is a non-negative matrix, while V is a non-singular matrix . For ordinary differential equations (ODEs), the next-generation matrix is defined as FV^{-1}. Finally, the basic reproduction number is obtained as $R_0 = \rho(FV^{-1})$, where ρ denotes the spectral radius operator. In other words, to determine the value of R_0, the largest eigenvalue of the matrix FV^{-1} must be computed. This method is biologically meaningful and has proven successful in numerous examples (Mikucki, 2012).

The Runge-Kutta method is used to solve initial value problems in differential equations. Compared to other numerical solution techniques, it offers several advantages, such as reduced error probability in long-term computations due to larger step sizes and the fact that it does not require higher-order derivatives. It is also a significant method in terms of stability. When the step size is chosen sufficiently small, the method provides high accuracy, which yields stable results for most problems. However, if the step size is too large, the error in the solution increases, leading to unstable results. Moreover, the Runge-Kutta method possesses convergence properties, which help assess the proximity of the numerical solution to the exact solution.

Definition 3.5: (Türker and Başarır, 2003) The following presents a differential equation;

$\frac{dx}{dt} = f(t, x), \quad x(t_0) = x_0.$

To solve the above-given equation as an initial value problem, the Runge-Kutta method employs the following formula:

$k_1 = hf(t_0, x_0), k_2 = hf(t_0 + \frac{h}{2}, x_0 + \frac{k_1}{2}), k_3 = hf(t_0 + \frac{h}{2}, x_0 + \frac{k_2}{2}), k_4 = hf(t_0 + h, x_0 + k_3).$

Here, h denotes the step size, while k_1 represents the initial slope, k_2 and k_3 are intermediate estimates, and k_4 is the estimate of the slope at the next point. The general form of the equation is as follows:

$k = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4).$

4. Stability Analysis

In this section, the equilibrium points and stability behavior of the model equation will be examined. The equilibrium points are obtained by setting the right-hand side of the model equation equal to zero, resulting in the disease-free equilibrium (E_0). The equilibrium points previously referenced are outlined below:

$$b - cS(t)I(t) - aS(t) - dS(t) + fQ(t) = 0$$

$$\alpha S(t) - dV(t) = 0$$

$$cS(t)I(t) - mE(t) - zE(t) - kE(t) - dE(t) = 0$$

$$zE(t) - wI(t) - dI(t) - pI(t) = 0 \qquad (5)$$

$$mE(t) - fQ(t) - vQ(t) - dQ(t) - \gamma Q(t) = 0$$

$$wI(t) + vQ(t) - dH(t) = 0$$

$$kE(t) + pI(t) + \gamma Q(t) - dR(t) = 0$$

When Eqn. (5) is solved, E_0 disease free equilibrium point is obtained as:

$E_0 = (S, V, E, I, Q, H, R) = \left(\frac{b}{a+d}, \frac{ab}{(a+d)d}, 0, 0, 0, 0, 0\right)$.

R_0 is defined as the average number of secondary cases that an infected individual will produce during their infectious period in the entire population. This ratio is used to understand the potential for the spread of the epidemic.

The stability of the disease-free equilibrium point is determined below using the next generation matrix method, with the matrix F representing the infected terms and the matrix V representing the remaining terms:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & \frac{cb}{a+d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ and } V = \begin{bmatrix} m+z+k+d & 0 \\ -z & w+d+p \end{bmatrix},$$

$$FV^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{cbz}{(a+d)(m+z+k+d)(w+d+p)} & \frac{cb}{(a+d)(w+d+p)} \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

The largest eigenvalue was obtained by calculating the determinant from Eqn. (6). Accordingly, R_0 can be obtained as follows:

$$R_0 = \rho(FV^{-1}) = \frac{cbz}{(a+d)(m+z+k+d)(w+d+p)}. \quad (7)$$

Theorem 4.1: The disease-free equilibrium point of the model System (1) is asymptotically stable if and only if $R_0 < 1$; however, if $R_0 > 1$, the disease-free equilibrium point becomes unstable.

Proof: To further the analysis, the Jacobian matrix of the system is first formulated, and then the values of the disease-free equilibrium point are substituted into it, through which the following form is obtained:

$$J = \begin{vmatrix} -a-d & 0 & 0 & -c\frac{b}{a+d} & f & 0 & 0 \\ a & -d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d-k-m-z & c\frac{b}{a+d} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z & -d-p-w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & -d-f-\gamma-v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w & v & -d & 0 \\ 0 & 0 & k & p & \gamma & 0 & -d \end{vmatrix}.$$

The eigenvalues of the given Jacobian matrix are as follows:

$\lambda_1 = -d, \lambda_2 = -a-d, \lambda_3 = -d, \lambda_4 = -d, \lambda_5 = -d-f-\gamma-v,$

$$\lambda_6 = \frac{-2ad-ak-am-ap-aw-az-2d^2-dk-dm-dp-dw-dz + \sqrt{\begin{matrix}(a^2k^2+2a^2km-2a^2kp-2a^2kw+2a^2kz+a^2m^2-2a^2mp-2a^2mw+2a^2mz+a^2p^2 \\ +2a^2pw-2a^2pz+a-2a^2wz+a^2z^2+4abcz+2adk^2+4adkm-4adkp-4adkw \\ +4adkz+2adm^2-4admp-4admw+4admz+2adp^2+4adpw-4adpz+2adw^2 \\ -4adwz+2adz^2+4bcdz+d^2k^2+2d^2km-2d^2kp-2d^2kw+2d^2kz+d^2m^2-2d^2mp \\ -2d^2mw+2d^2mp-2d^2mw+2d^2mz+d^2p^2+2d^2pw-2d^2pz+d^2w^2-2d^2wz+d^2z^2)\end{matrix}}}{2(a+d)},$$

$$\lambda_7 = \frac{-2ad-ak-am-ap-aw-az-2d^2-dk-dm-dp-dw-dz - \sqrt{\begin{matrix}a^2k^2+2a^2km-2a^2kp-2a^2kw+2a^2kz+a^2m^2-2a^2mp-2a^2mw+2a^2mz+a^2p^2 \\ +2a^2pw-2a^2pz+a-2a^2wz+a^2z^2+4abcz+2adk^2+4adkm-4adkp-4adkw \\ +4adkz+2adm^2-4admp-4admw+4admz+2adp^2+4adpw-4adpz+2adw^2 \\ -4adwz+2adz^2+4bcdz+d^2k^2+2d^2km-2d^2kp-2d^2kw+2d^2kz+d^2m^2-2d^2mp \\ -2d^2mw+2d^2mp-2d^2mw+2d^2mz+d^2p^2+2d^2pw-2d^2pz+d^2w^2-2d^2wz+d^2z^2\end{matrix}}}{2(a+d)}.$$

$\lambda_1, \lambda_2, .., \lambda_5$ have a negative real part. It should be shown that λ_6 and λ_7 have a negative real part. For this, the R_0 value will be used. From the expressions found in λ_6, if we establish such an equality and simplify, we obtain the following equality:

$$\lambda_6 = \frac{1}{2(a+d)}\left(-(L) + \sqrt{(K)}\right), \lambda_7 = \frac{1}{2(a+d)}\left(-(L) - \sqrt{(K)}\right),$$

where

$$L = 2ad + ak + am + ap + aw + az + 2d^2 + dk + dm + dp + dw + dz,$$

$$K = \begin{matrix}a^2k^2 + 2a^2km - 2a^2kp - 2a^2kw + 2a^2kz + a^2m^2 - 2a^2mp - 2a^2mw + 2a^2mz + a^2p^2 \\ +2a^2pw - 2a^2pz + a - 2a^2wz + a^2z^2 + 4abcz + 2adk^2 + 4adkm - 4adkp - 4adkw \\ +4adkz + 2adm^2 - 4admp - 4admw + 4admz + 2adp^2 + 4adpw - 4adpz + 2adw^2 \\ -4adwz + 2adz^2 + 4bcdz + d^2k^2 + 2d^2km - 2d^2kp - 2d^2kw + 2d^2kz + d^2m^2 - 2d^2mp \\ -2d^2mw + 2d^2mp - 2d^2mw + 2d^2mz + d^2p^2 + 2d^2pw - 2d^2pz + d^2w^2 - 2d^2wz + d^2z^2\end{matrix}.$$

If K is negative, $\sqrt{(K)}$ is not a real number. The real parts of the expressions λ_6 and λ_7 are negative. If K is positive, λ_7 still has a negative real part, and λ_6 will have a negative part as well. In light of the results obtained:

$$-(L) + \sqrt{(K)} < 0.$$

On the basis of the derived results:

$$4(a+d)\left(1 - \frac{1}{R_0}\right)bcz < 0.$$

where a, b, c, z, d are positive terms, there is no negative part. Therefore $1 - \frac{1}{R_0} < 0$ must hold. From this expression, it follows that $R_0 < 1$. The proof is complete.

Now, we will obtain the endemic equilibrium point E_1. So, the endemic equilibrium point can be obtained as follows;

$$S = \frac{d^2+kd+md+dp+dw+zd+kp+kw+mp+mw+zp+zw}{cz},$$

$$V = \frac{a\left(d^2+kd+md+dp+dw+zd+kp+kw+mp+mw+zp+zw\right)}{czd},$$

$$E = -\frac{(d^2a+adk+adm+adp+adw+adz+akp+akw+amp+amw+apz+awz-zcb+d^3 + d^2k+d^2m+d^2p+d^2w+d^2z+dkp+dkw+dmp+dmw+dpz+dwz)\,(d+f+\gamma+v)}{(d^2+df+kd+d\gamma+md+dv+zd+kf+zf+\gamma k+vk+m\gamma+\gamma z+vm+zv)\,cz},$$

$$I = -\frac{(d^2a+adk+adm+adp+adw+adz+akp+akw+amp+amw+apz+awz-zcb+d^3 + d^2k+d^2m+d^2p+d^2w+d^2z+dkp+dkw+dmp+dmw+dpz+dwz)\,(d+f+\gamma+v)}{(d^2+df+kd+d\gamma+md+dv+zd+kf+zf+\gamma k+vk+m\gamma+\gamma z+vm+zv)\,c(d+p+w)},$$

$$Q = -\frac{(d^2a+adk+adm+adp+adw+adz+akp+akw+amp+amw+apz+awz-zcb+d^3 + d^2k+d^2m+d^2p+d^2w+d^2z+dkp+dkw+dmp+dmw+dpz+dwz)\,m}{(d^2+df+kd+d\gamma+md+dv+zd+kf+zf+\gamma k+vk+m\gamma+\gamma z+vm+zv)\;cz},$$

$$H = -\frac{(d^2a+adk+adm+adp+adw+adz+akp+akw+amp+amw+apz+awz-zcb+d^3 + d^2k+d^2m+d^2p+d^2w+d^2z+dkp+dkw+dmp+dmw+dpz+dwz)\,(dmv+dwz+fwz+\gamma vz+mpv+mvw+vwz)}{(d^2+df+kd+d\gamma+md+dv+zd+kf+zf+\gamma k+vk+m\gamma+\gamma z+vm+zv)\,(d+p+w)\,czd},$$

$$R = -\frac{(d^2a+adk+adm+adp+adw+adz+akp+akw+amp+amw+apz+awz-zcb+d^3 + d^2k+d^2m+d^2p+d^2w+d^2z+dkp+dkw+dmp+dmw+dpz+dwz)\,(d^2k+dfk+dk\gamma+dkp+dkv+dkw+d\gamma m+dpz+fkp+fpz+k\gamma p+k\gamma w+kpv+kvw +\gamma mp+\gamma mw+\gamma pz+pvz)}{(d^2+df+kd+d\gamma+md+dv+zd+kf+zf+\gamma k+vk+m\gamma+\gamma z+vm+zv)\,(d+p+w)\,czd}.$$

If the obtained equilibrium point is expressed in terms of R_0, the population parameters take the following form;

$$S_e = \frac{(d+p+w)(d+k+m+z)}{cz} = \frac{b}{a+d}\;\frac{1}{R_0},$$

$$V_e = \frac{a(d+p+w)(d+k+m+z)}{czd} = \frac{ab}{d(a+d)}\;\frac{1}{R_0},$$

$$E_e = \frac{(czb)-(d+p+w)(d+k+m+z)(a+d)}{cz}\frac{(d+f+\gamma+v)}{\zeta} = \frac{b(d+f+\gamma+v)}{\zeta}\left(1-\frac{1}{R_0}\right),$$

$$I_e = \frac{(czb)-(d+p+w)(d+k+m+z)(a+d)}{c(d+p+w)}\frac{(d+f+\gamma+v)}{\zeta} = \frac{(zb)(d+f+\gamma+v)}{\zeta(d+p+w)}\left(1-\frac{1}{R_0}\right),$$

$$Q_e = \frac{(czb)-(d+p+w)(d+k+m+z)(a+d)m}{\zeta cz} = \frac{bm}{\zeta}\left(1-\frac{1}{R_0}\right),$$

$$H_e = \frac{(czb)-(d+p+w)(d+k+m+z)(a+d)\eta}{\zeta(d+p+w)czd} = \frac{b\eta}{\zeta(d+p+w)d}\left(1-\frac{1}{R_0}\right),$$

$$R_e = \frac{(czb)-(d+p+w)(d+k+m+z)(a+d)\theta}{\zeta(d+p+w)czd} = \frac{b\theta}{\zeta(d+p+w)d}\left(1-\frac{1}{R_0}\right),$$

where

$\zeta = d^2 + df + kd + d\gamma + md + dv + zd + kf + zf + \gamma k + vk + m\gamma + \gamma z + vm + zv, \eta = dmv + dwz + fwz + \gamma vz + mpv + mvw + vwz, \theta = d^2k + dfk + dk\gamma + dkp + dkv + dkw + d\gamma m + dpz + fkp + fpz + k\gamma p + k\gamma w + kpv + kvw + \gamma mp + \gamma mw + \gamma pz + pvz.$

Theorem 4.2: The endemic equilibrium point of the model system (1) is asymptotically stable if and only if $R_0 > 1$; however, if $R_0 < 1$, the endemic equilibrium point becomes unstable.

Remark: Due to the large number of parameter values and the complexity of the calculations involved, it is difficult to perform a stability analysis of the endemic equilibrium point. Therefore, the equilibrium point will be analyzed using numerical methods in Section 5, with the selected parameter values applied.

5. Numerical Analysis

In this section, the stability of the equilibrium points has been analyzed, and a numerical analysis has been conducted using the Runge-Kutta method. Convergence to the exact solution has also been examined. The results have been interpreted and supported through graphical representations. The parameters and values used in stability and numerical analyses are presented in Tab. 1 (Bhunu et al., 2009; Tchuenche and Bauch, 2012; El-Mesady et al., 2022; Peter et al., 2022b; Molla et al., 2023; Singh et al., 2025).

Table 1: Parameter values for numerical and stability analysis

PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
$\boldsymbol{a}$	0,05 (Tchuenche and Bauch, 2012)	z	0,2 (Peter et al., 2022b)
$\boldsymbol{b}$	0,029 (Peter et al., 2022b)	k	0,88 (Fitted)
$\boldsymbol{c}$	0,00006 (Peter et al., 2022b)	w	0,07 (Fitted)
$\boldsymbol{f}$	2 (Fitted)	v	0,005 (Fitted)
$\boldsymbol{d}$	0,055 (Peter et al., 2022a)	γ	0,52 (El-Mesady et al., 2022)
$\boldsymbol{m}$	2 (Molla et al., 2023)	p	0,83 (Fitted)

By using the parameter values given in Tab. 1 and performing the analysis, the basic reproduction number is found to be $R_0 = 1.107003587 \times 10^{-6}$. Accordingly, the equilibrium point is determined: $E_0 = (0.2761904762, 0.2510822511, 0, 0, 0, 0, 0)$.

Subsequent to the substitution of the obtained values into the Jacobian matrix, the characteristic function corresponding to the equilibrium point is derived as follows:

$$DE_0 = \lambda^7 + 6.940017222\lambda^6 + 15.37327525\lambda^5 + 11.55960000\lambda^4 + 2.44928352\lambda^3 + 0.2207073\lambda^2 + 0.00826566\lambda + 0.0001349390068$$

The ensuing investigation yielded the following results upon calculating the roots of the characteristic equation:

$\lambda_1 = -0.0286 + 0.0222i,\ \lambda_2 = -0.1058 + 0.0453i,\ \lambda_3 = -0.9567,$

$\lambda_4 = -2.5776,\ \lambda_5 = -3.1366,\ \lambda_6 = -0.1058 - 0.0453i,\ \lambda_7 = -0.0286 - 0.0222i.$

If all eigenvalues are examined, it is observed that they all have negative real parts. Therefore, according to Defn. 3.3, the equilibrium point E_0 is locally asymptotically stable.

For the stability of the equilibrium point E_1, when the values from Tab. 1 are substituted into the system, E_1 is obtained as:

$E_1 = (249493.75, 226812.50, -16.532.00, -3462.19, -12815.50, -5571.48, -437924.53).$

Now, the values for E_1 are substituted into the Jacobian matrix, the characteristic function is obtained as follows:

$$DE_1 = 1.000000992\lambda^7 + 6.732245278\lambda^6 + 10.95985693\lambda^5 + 0.81184328\lambda^4 - 0.86266358\lambda^3 - 0.1425407\lambda^2 - 0.00649172\lambda - 0.0001349390069.$$

When the roots of the obtained equation are calculated, the following results are obtained:

$\lambda_1 = 0.2995,\ \lambda_2 - 0.0279 + 0.0258i,\ \lambda_3 = -0.1205, \lambda_4 = -0.2535,\ \lambda_5 = -2.4517,$

$\lambda_6 = -4.1501,\ \lambda_7 = -0.0279 - 0.0258i.$

Upon examining the eigenvalues, it is observed that the first eigenvalue does not have a negative real part. Therefore, under the given parameter values, the disease-free equilibrium point is unstable.

If the parameter values in Tab. 1 are substituted into the constructed system (1), the graphs in this section were obtained using the Runge-Kutta method. Accordingly, Fig. 2 illustrates the trajectories of all population compartments. As predicted, it is clearly observed in Fig. 2 that the system converges to the disease-free equilibrium point. This indicates that the model behaves correctly under the given parameter values.

In Fig. 3, the effect of the change in the number of vaccinated individuals—one of the main objectives of the study—is analyzed. For this purpose, the variation of the parameter a was considered. As can be seen from Fig. 3, increasing the vaccination rate leads to a decrease in the number of susceptible individuals and a significant reduction in the infection rate. This demonstrates that the model effectively captures the impact of vaccination on the population.

Fig. 4 focuses on another important objective: the effect of hospitalized individuals on the system. Accordingly, the impact of the hospitalization parameter w on the recovery of individuals is illustrated.

In Fig. 5, the aim is to show the impact of changes in the number of quarantined individuals. This effect is examined through the variation of the parameter f. It is observed that the changes in the number of susceptible, hospitalized, and recovered individuals can be estimated through the model.

Finally, Fig. 6 presents the impact of all these varying parameter values on the designated population compartments. It can be concluded that the system is sensitive to parameter changes and successfully represents the population dynamics. All figures in this section were generated using the MATLAB software package.

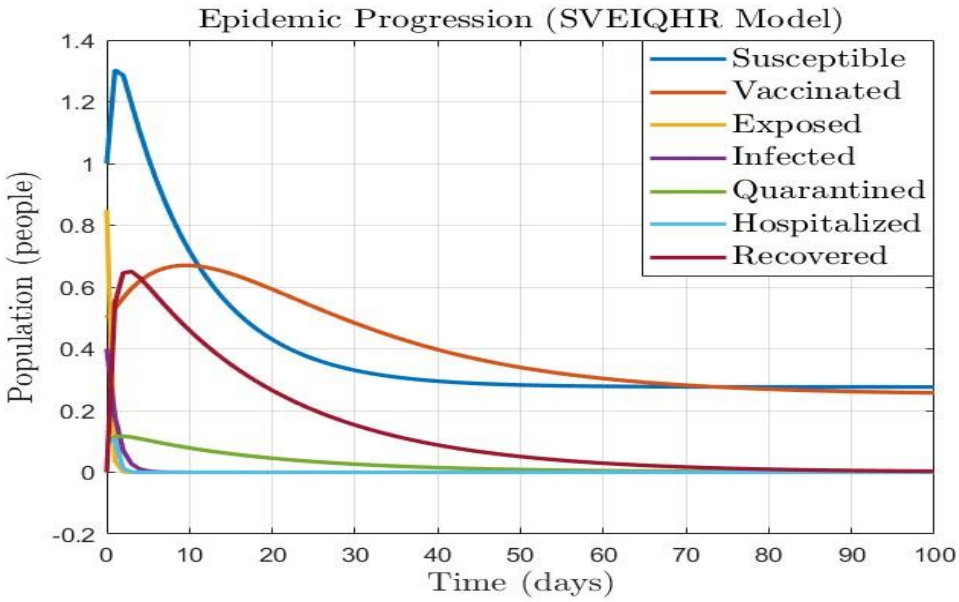


Figure 2. Simulation of Population Dynamics Showing Convergence to the Disease-Free Equilibrium

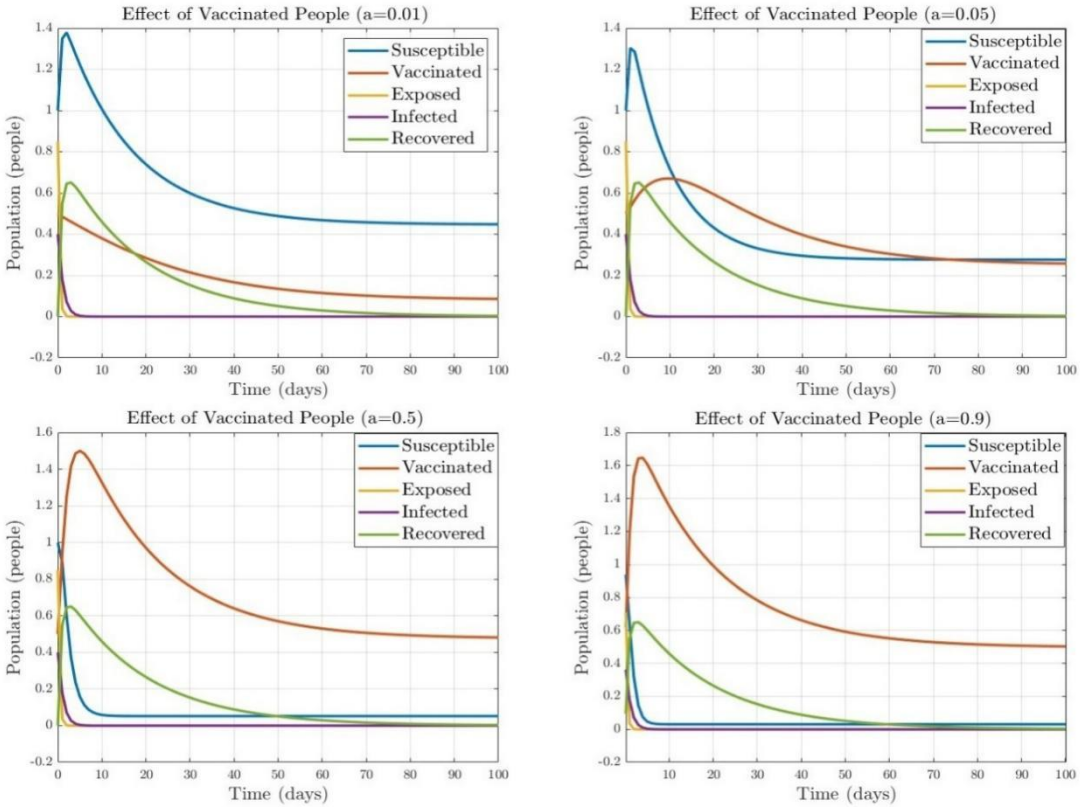


Figure 3. Effect of Vaccination Rate (*a*) on Susceptible and Infected Populations

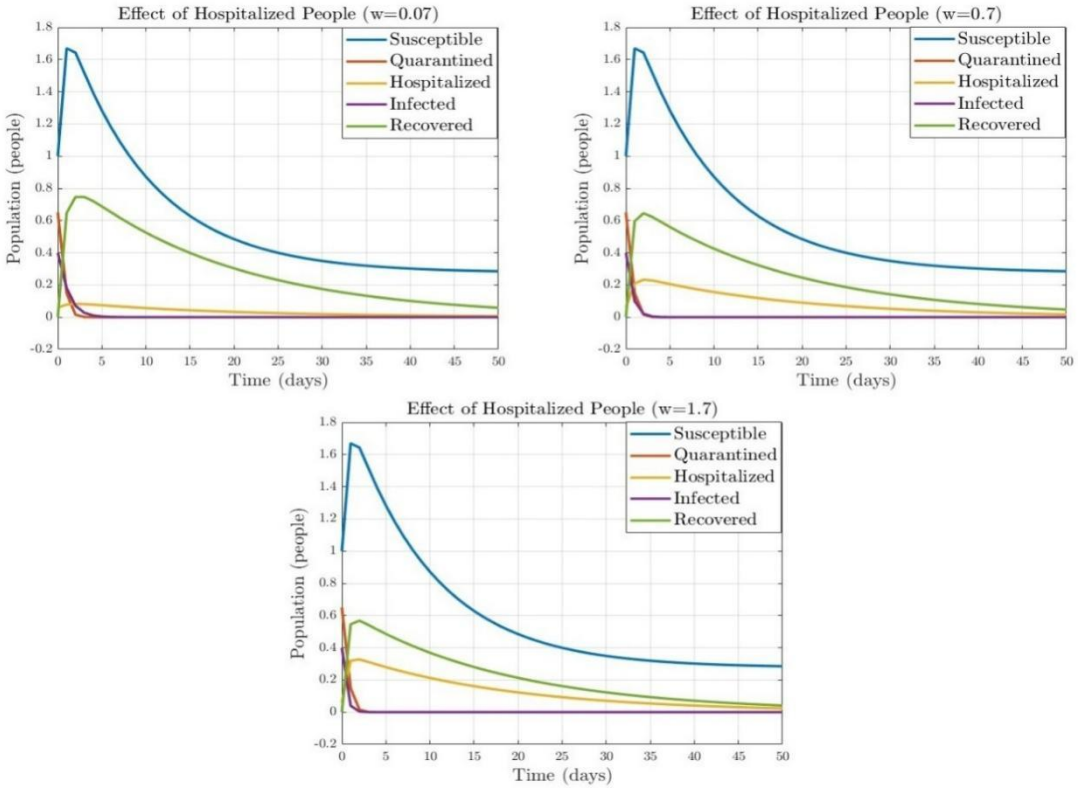


Figure 4. Impact of Hospitalization Rate (*w*) on Recovery Dynamics

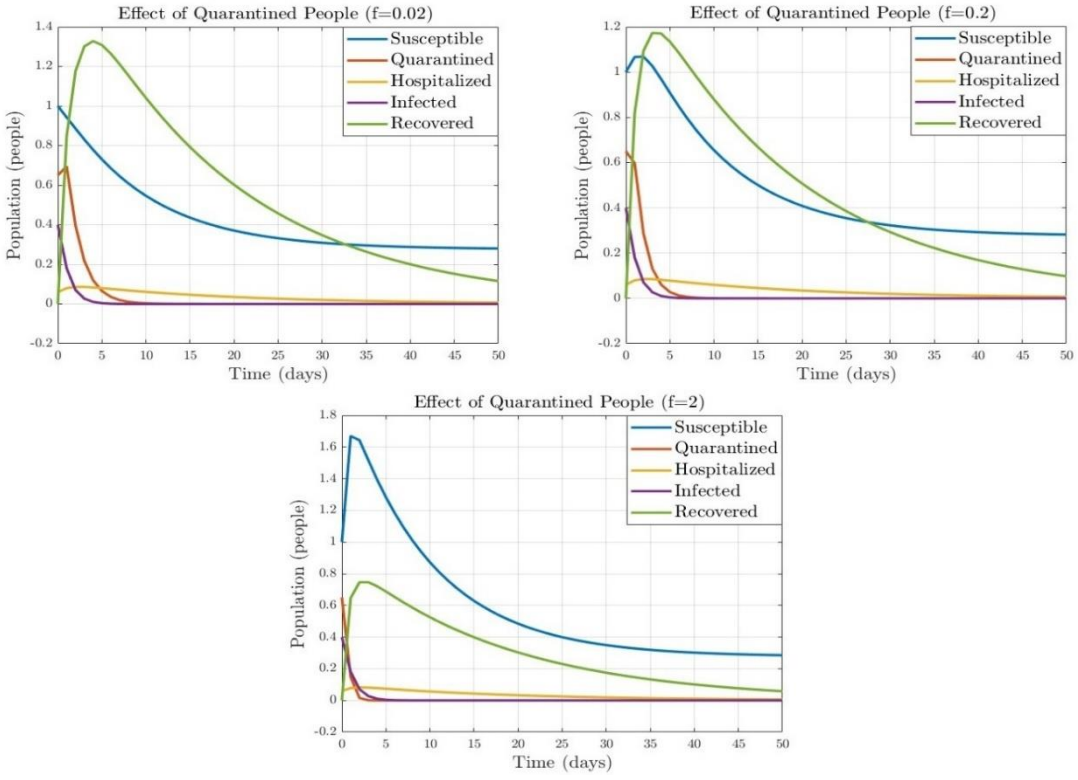


Figure 5. Influence of Quarantine Rate (*f*) on Population Compartments

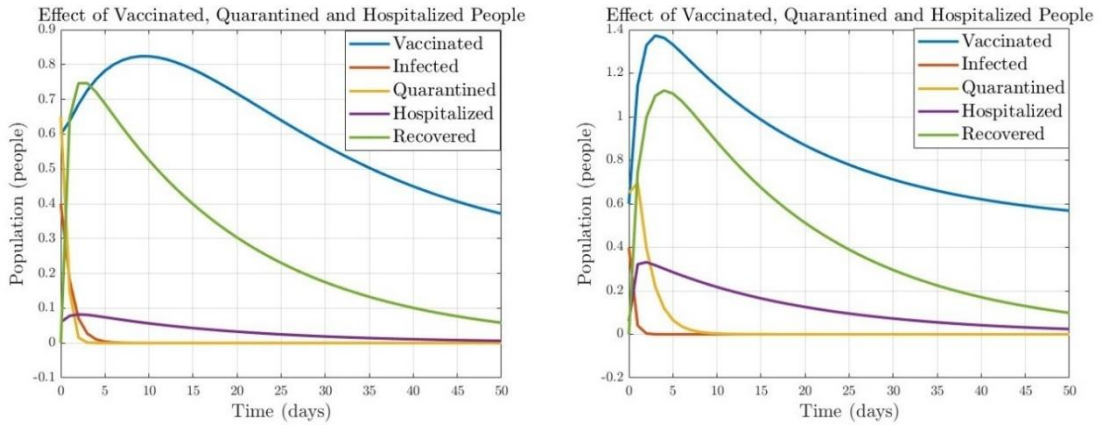


Figure 6. Monkeypox Combined Effects of Varying Parameters on Population Distribution

6. Conclusion

In this study, a novel compartmental mathematical model named SVEIQHR was developed to investigate the transmission dynamics of monkeypox and assess the combined effects of vaccination, quarantine, and hospitalization strategies. Recognizing the increasing threat posed by monkeypox—particularly in underdeveloped and developing regions—this model was designed to offer a comprehensive representation of disease progression by incorporating compartments for Susceptible, Vaccinated, Exposed, Infected, Quarantined, Hospitalized, and Recovered individuals. This integrative approach addresses a gap in literature where such components are often studied in isolation, thus offering a more realistic framework for evaluating public health interventions.

The primary objective of this study was to understand how different intervention strategies influence the spread and control of monkeypox. To achieve this, the model was analyzed using the next-generation matrix method to calculate the basic reproduction number, and equilibrium points were examined through eigenvalue-based local stability analysis. Numerical simulations, carried out via the Runge-Kutta method, provided insight into the system's behavior under varying parameter values. Figures generated using MATLAB clearly demonstrate the impact of vaccination, quarantine, and hospitalization rates on the susceptible and infected populations. For instance, increasing the vaccination rate significantly reduced the number of susceptible individuals and slowed the infection spread, while changes in hospitalization and quarantine rates affected recovery and transmission dynamics.

The simulation results not only validated the model's ability to reflect real-world population dynamics under intervention scenarios but also highlighted its sensitivity to parameter changes. This sensitivity underscores the importance of accurate parameter estimation in guiding effective public health policy decisions. Furthermore, the model demonstrated convergence to the disease-free equilibrium under certain parameter configurations, confirming the potential effectiveness of timely and combined intervention strategies.

In future work, the model will be extended by incorporating additional population subgroups such as asymptomatic, pre-symptomatic, and treated individuals to further enhance its applicability and

predictive power. Moreover, the integration of real-world data, particularly from recent outbreaks, will allow for improved calibration and validation of the model. Ultimately, this modeling approach aims to support health authorities in devising more targeted and efficient control strategies to mitigate the global impact of monkeypox and similar emerging infectious diseases.

Acknowledgements.

The authors express their profound gratitude to the reviewers and the editor for their invaluable comments and constructive suggestions, which have significantly enhanced the quality of the manuscript.

Conflict of interest.

The authors report that they have no conflicts of interest regarding the conduct, authorship, or publication of this study.

Author Contributions.

Mehmet Kocabıyık conducted the model design, analysis, and numerical simulations, while Abdulkadir Şan contributed to the writing, research, and numerical simulations. Both authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

Data Availability.

No datasets were generated or analysed during the current study

References

Alın M. Stability analysis of a mathematical model of Crimean Congo haemorrhagic fever disease. Istanbul Technical University, Master's Thesis 2020.

Allehiany FM., Darassi MH., Ahmad I., Khan MA., Tag-Eldin EM. Mathematical modeling and backward bifurcation in monkeypox disease under real observed data. Results in Physics 2023; 50: 106557.

Altindis M., Puca E., Shapo L. Diagnosis of monkeypox virus–An overview. Travel Medicine and Infectious Disease 2022; 50: 102459.

Adler H., Gould S., Hine P., Snell LB., Wong W., Houlihan CF., Hruby DE. Clinical features and management of human monkeypox: a retrospective observational study in the UK. The Lancet Infectious Diseases 2022; 22(8): 1153-1162.

Berge T., Lubuma JS., Moremedi GM., Morris N., Kondera-Shava R. A simple mathematical model for Ebola in Africa. Journal of Biological Dynamics 2017; 11(1): 42-74.

Bhunu CP., Garira W., Magombedze G. Mathematical analysis of a two strain HIV/AIDS model with antiretroviral treatment. Acta Biotheoretica 2009; 57: 361-381.

Bhunu CP., Mushayabasa S. Modelling the transmission dynamics of pox-like infections. IAENG International Journal of Applied Mathematics 2011; 41(2): 141-149.

Burrage K., Butcher JC. Stability criteria for implicit Runge–Kutta methods. SIAM Journal on Numerical Analysis 1979; 16(1): 46-57.

Butcher JC. On the convergence of numerical solutions to ordinary differential equations. Mathematics of Computation 1966; 20(93): 1-10.

Diekmann O., Heesterbeek JAP., Metz JAJ. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations. Journal of Mathematical Biology 1990; 28: 365-382.

Dilek T. Salgın hastalıkların seyrinin SEIHR-D matematiksel modellenmesi için kararlılık analizi. Erzurum Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi 2023.

Durski KN. Emergence of monkeypox—west and central Africa, 1970–2017. MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report 2018; 67.

El-Mesady A., Elsonbaty A., Adel W. On nonlinear dynamics of a fractional order monkeypox virus model. Chaos, Solitons & Fractals 2022; 164: 112716.

Gümüş ÖA., Köse H. Fark zamanlı popülasyon modelinde avcı sayısına bağlı olarak kararlılık analizi ve allee etkisi. Adıyaman University Journal of Science 2012; 2(1): 24-33.

Hethcote HW. The mathematics of infectious diseases. SIAM Review 2000; 42(4): 599-653.

Huhn GD., Bauer AM., Yorita K., Graham MB., Sejvar J., Likos A., Kuehnert MJ. Clinical characteristics of human monkeypox, and risk factors for severe disease. Clinical Infectious Diseases 2005; 41(12): 1742-1751.

Kaler J., Hussain A., Flores G., Kheiri S., Desrosiers D. Monkeypox: a comprehensive review of transmission, pathogenesis, and manifestation. Cureus 2022; 14(7): e26531.

Kocabıyık M. A maple program to the analysis of equilibrium points in social media addiction model. Erzincan University Journal of Science and Technology 2025; 18(1): 115-128.

Kocabıyık M., Ongun MY. Construction a distributed order smoking model and its nonstandard finite difference discretization. AIMS Mathematics 2022; 7(3): 4636–4654.

Kocabıyık M., Ongun MY. Distributed order hantavirus model and its nonstandard discretizations and stability analysis. Mathematical Methods in the Applied Sciences 2025; 48(2): 2404-2420.

Kocabıyık M., Ongun MY., Turhan Çetinkaya İ. Standart olmayan sonlu fark metodu ile dağılımlı mertebeden SVIR modelinin nümerik analizi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 23(2): 577-591.

Kocabıyık M., Şan A. A new mathematical model for monkeypox with vaccination effect and its quantified analysis. BIDGE Publications 2024; 20-49.

Martcheva M. An introduction to mathematical epidemiology. New York: Springer 2015.

McCollum AM., Damon IK. Human monkeypox. Clinical Infectious Diseases 2014; 58(2): 260-267.

Mekonen KG., Balcha SF., Obsu LL., Hassen A. Mathematical modeling and analysis of TB and COVID-19 coinfection. Journal of Applied Mathematics 2022; 2022(1): 2449710.

Melkamu B., Mebrate B. A fractional model for the dynamics of smoking tobacco using Caputo–Fabrizio derivative. Journal of Applied Mathematics 2022; 2022(1): 2009910.

Mikucki MA. Sensitivity analysis of the basic reproduction number and other quantities for infectious disease models. Colorado State University, Master's Thesis 2012.

Mitjà O., Ogoina D., Titanji BK., Galvan C., Muyembe JJ., Marks M., Orkin CM. Monkeypox. The Lancet 2023; 401(10370): 60-74.

Molla J., Sekkak I., Ortiz AM., Moyles I., Nasri B. Mathematical modeling of mpox: A scoping review. One Health 2023; 16: 100540.

Ndaïrou F., Area I., Nieto JJ., Torres DF. Mathematical modeling of COVID-19 transmission dynamics with a case study of Wuhan. Chaos, Solitons & Fractals 2020; 135: 109846.

Ngungu M., Addai E., Adeniji A., Adam UM., Oshinubi K. Mathematical epidemiological modeling and analysis of monkeypox dynamism with non-pharmaceutical intervention using real data from United Kingdom. Frontiers in Public Health 2023; 11: 1101436.

Öztürk Y., Anapalı Şenel A., Limoncu C., Gülsu M. A Numerical application of the chebyshev operational matrix method for HIV infection of CD4+T-cells. Adıyaman University Journal of Science 2023; 13(1&2): 59-73.

Peter OJ., Oguntolu FA., Ojo MM., Olayinka OA., Jan R., Khan I. Fractional order mathematical model of monkeypox transmission dynamics. Physica Scripta 2022a; 97(8): 084005.

Peter OJ., Kumar S., Kumari N., Oguntolu FA., Oshinubi K., Musa R. Transmission dynamics of Monkeypox virus: a mathematical modelling approach. Modeling Earth Systems and Environment 2022b; 8(3): 3423-3434.

Rizk JG., Lippi G., Henry BM., Forthal DN., Rizk Y. Prevention and treatment of monkeypox. Drugs 2022; 82(9): 957-963.

Sameni R. Mathematical modeling of epidemic diseases; a case study of the COVID-19 coronavirus. arXiv preprint arXiv:2003.11371 2020.

Siettos CI., Russo L. Mathematical modeling of infectious disease dynamics. Virulence 2013; 4(4): 295-306.

Singh T., Behera DK., Othman AS., Saeed RK. An iterative method based on the average quadrature formula. Computational Algorithms and Numerical Dimensions 2025; 4(1): 57-64.

Tchuenche JM., Bauch CT. Can culling to prevent monkeypox infection be counter-productive? Scenarios from a theoretical model. Journal of Biological Systems 2012; 20(3): 259-283.

Thornhill JP., Barkati S., Walmsley S., Rockstroh J., Antinori A., Harrison LB., Orkin C. Monkeypox virus infection in humans across 16 countries—April–June 2022. New England Journal of Medicine 2022; 387(8): 679-691.

Türker ES., Başarır M. Çözümlü problemlerle diferansiyel denklemler. İstanbul: Değişim Yayınları 2003.

Van den Driessche P., Watmough J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. Mathematical Biosciences 2002; 180(1–2): 29-48.

Van den Driessche P., Watmough J. Further notes on the basic reproduction number. Mathematical Epidemiology 2008; 159–178.

Van Dijck C., Hoff NA., Mbala-Kingebeni P., Low N., Cevik M., Rimoin AW., Liesenborghs L. Emergence of mpox in the post-smallpox era: narrative review on mpox epidemiology. Clinical Microbiology and Infection 2023; 29(12): 1487-1492.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1501-1528, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1501-1528, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology



Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Sınıflandırma Performanslarının Değerlendirilmesi: Çağrı Merkezi Verisi Örneği

Zafer ÖZDEMİR[1*], Leyla DİNÇER[2]

[1, 2] İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34398, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0001-7090-373X
[2]https://orcid.org/0009-0003-3039-2885
*Sorumlu yazar: zafer.ozdemir@nisantasi.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 10.12.2024
Kabul tarihi:20.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Makine öğrenmesi
Metin sınıflandırma
Çağrı merkezi verisi
Sınıflandırma performansı
Denetimli öğrenme algoritmaları
Doğruluk – Duyarlılık – F1 skoru

ÖZ

Bu çalışma, makine öğrenmesi algoritmalarının gerçek çağrı merkezi verisi üzerindeki performanslarını değerlendirmektedir. Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri (SVM), Rastgele Orman ve K-En Yakın Komşu (KNN) algoritmaları uygulanmıştır. Modellerin performansı; doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1-skoru ve ROC eğrisi altındaki alan (AUC) gibi ölçütlerle değerlendirilmiştir. Algoritmalar Python ortamında uygulanmış, hiperparametreler grid search yöntemiyle optimize edilmiştir. SVM algoritması %85,8 doğruluk ve 0,86 F1-skoru ile en iyi sonuçları vermiştir. Rastgele Orman yaklaşık %80 doğruluk elde ederken, Naive Bayes %69 doğrulukla daha düşük başarı göstermiştir. KNN algoritması %73 doğruluk ile orta düzeyde performans sunmuştur. Sonuçlar, algoritmaların sınıflar arasında farklı başarılar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, veri özelliklerine uygun algoritma seçiminin önemini vurgulamakta ve çağrı merkezi süreçlerinde veri temelli karar verme sürecine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Evaluation of Classification Performance of Machine Learning Algorithms: A Case Study on Call Center Data

Research Article

Article History:
Received: 10.12.2024
Accepted: 20.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Machine learning
Text classification
Classification performance
Supervised learning algorithms
Accuracy – Recall – F1-score

ABSTRACT

This study evaluates the performance of machine learning algorithms on real-world call center data. Naive Bayes, Support Vector Machines (SVM), Random Forest, and K-Nearest Neighbors (KNN) were applied. Model performances were measured using accuracy, precision, recall, F1-score, and area under the ROC curve (AUC). The models were implemented in Python with hyperparameters optimized via grid search. SVM achieved the best results with 85.8% accuracy and a 0.86 F1-score. Random Forest models yielded around 80% accuracy, while Naive Bayes had 69%. KNN showed moderate performance with 73% accuracy. Results reveal that each algorithm performs differently across classes. This study highlights the importance of algorithm selection based on data characteristics and provides insights for data-driven decision-making in call center operations.

To Cite: Özdemir Z., Dinçer L. Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Sınıflandırma Performanslarının Değerlendirilmesi: Çağrı Merkezi Verisi Örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1501-1528.

1. Giriş

Günümüz rekabetçi iş dünyasında, müşteri hizmetleri ve çağrı merkezleri şirketler için hayati bir temas noktasıdır. Müşteri etkileşimlerinden elde edilen veriler, müşteri memnuniyetini artırmak, operasyonel verimliliği yükseltmek ve stratejik kararlar almak için paha biçilmez içgörüler sunmaktadır. Bu

bağlamda, çağrı merkezi verilerinin otomatik olarak sınıflandırılması, gelen taleplerin doğru departmanlara yönlendirilmesi, acil durumların hızlı tespiti ve hizmet kalitesinin sürekli iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak çağrı merkezi verileri, konuşma dili doğası, gürültülü yapısı, kısaltmaların kullanımı ve genellikle dengesiz sınıf dağılımları gibi kendine özgü zorluklar içermektedir. Literatürde genellikle standart veya daha temiz veri setleri üzerinde yapılan karşılaştırmalı çalışmalara ek olarak, bu araştırmada doğrudan Turkcell Global Bilgi çağrı merkezinden elde edilmiş, doğal gürültüyü ve karmaşıklığı içeren bir veri seti kullanılmaktadır. Bu durum, algoritmaların pratik uygulamalardaki dayanıklılığını ve genellenebilirliğini daha gerçekçi bir şekilde test etme fırsatı sunmaktadır.

Çağrı merkezi verileri, özellikle müşteri etkileşimlerinin karmaşıklığı, veri hacminin büyüklüğü ve konuşma metinlerinin doğal dil işleme ihtiyacı gibi niteliklere sahiptir. Bu çalışma, makine öğrenmesi algoritmalarının bu tür spesifik bir veri yapısı üzerindeki performansını değerlendirerek, sektörel uygulamalara yönelik somut çıkarımlar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, çağrı merkezlerinde müşteri memnuniyetini artırma, operasyonel verimliliği iyileştirme ve talep eğilimlerini anlama gibi stratejik kararlara veri odaklı yaklaşımlar getirilmesine yardımcı olabilir. Bu çalışma, çağrı merkezi verileri üzerinde dört farklı denetimli makine öğrenmesi algoritmasını incelemektedir: Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri (SVM), Rastgele Orman ve K-En Yakın Komşu (KNN). Bu algoritmalarının seçilmesinin temel nedenleri, çağrı merkezi verilerinin doğası ve literatürdeki yaygınlıklarıdır. Bu algoritmalar, metin sınıflandırma ve genel sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan ve farklı öğrenme prensiplerine sahip temel modelleri temsil etmektedir. Çalışma daha yaygın erişilebilir ve yorumlanabilir algoritmalar üzerinde yoğunlaşarak, pratik uygulanabilirliği ve yorumlanabilirliği de göz önünde bulundurmuştur. Bu durum, çağrı merkezi operasyonları gibi alanlarda iş birimlerinin sonuçları anlaması ve aksiyon alması açısından önemli bir faktördür.

Elde edilen sonuçlar, çağrı merkezleri için hangi algoritmanın belirli sınıflandırma görevlerinde daha uygun olabileceğine dair somut içgörüler sağlamaktadır. Bu, sektördeki karar vericilere, müşteri hizmetleri otomasyonu ve optimizasyonu konusunda veri odaklı stratejiler geliştirmeleri için rehberlik edebilir.

Literatürde, her bir algoritmanın farklı veri türleri üzerinde farklı performanslar sergilediği görülmektedir. Naive Bayes algoritması, özellikle metin madenciliği ve spam filtreleme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, basit olmasına rağmen güçlü sınıflandırma performansı göstermektedir (Mohri ve ark., 2018). Destek Vektör Makineleri (SVM), yüksek boyutlu verilerde güçlü performans sergileyen ve özellikle sınıflar arasındaki ayrımın belirgin olduğu durumlarda etkili sonuçlar sunan bir yöntemdir (Harman, 2021). Rastgele Orman (Random Forest), birden fazla karar ağacından oluşmakta ve genelleme yeteneği yüksek bir algoritma olarak dikkat çekmektedir (Çebi, 2020). Son olarak, K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması, sınıflandırmada en yakın veri noktalarını referans alarak tahmin yapmaktadır ve genellikle küçük veri setlerinde etkili sonuçlar vermektedir (Öztürk, 2021).

Makine öğrenmesi algoritmalarının performansını değerlendirmek için literatürde doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skor gibi metriklerin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Hastie ve ark., 2009). Bu metrikler, modelin güçlü ve zayıf yönlerini belirleyerek, hangi veri türlerinde daha başarılı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, farklı makine öğrenmesi algoritmalarının çağrı merkezi verileri üzerindeki performansını inceleyerek her bir algoritmanın güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymayı hedeflemektedir. Literatür taramasına dayanan bu inceleme, farklı veri setlerinde algoritmaların performansını ve bu performansın hangi metriklerle değerlendirildiğini ele almaktadır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları, Python programlama dili kullanılarak uygulanmış ve her bir model için hiperparametre ayarları deneysel olarak optimize edilmiştir. Özellikle SVM modeli için RBF (radial basis function) çekirdeği ile uygun C parametresi, Rastgele Orman algoritması için ise ağaç sayısı (n_estimators) ve maksimum derinlik (max_depth) gibi parametreler grid search yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yaklaşım, her bir modelin veri setine en uygun parametrelerle değerlendirilmesini sağlamış ve karşılaştırmaların nesnel temellere dayandırılmasına olanak tanımıştır.

2. Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Bu bölümde çalışmada kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları matematiksel temelleriyle birlikte sunulmaktadır. Her yöntem; model varsayımları, karar fonksiyonları, optimizasyon ölçütleri ve hesaplamaya ilişkin temel denklemler verilerek tanıtılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemleri genel olarak denetimli (gözetimli) ve denetimsiz (gözetimsiz) öğrenme olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Schapire, 2003). Denetimli öğrenme algoritmaları etiketli örnekler üzerinden eğitilirken, denetimsiz öğrenme algoritmaları etiketlenmemiş veriler üzerinde çalışmaktadır (Gentleman, 2008). Bu çalışmada kullanılan tüm modeller, denetimli öğrenme kapsamında sınıflandırma problemlerine uyarlanmış olup aynı eğitim verisi, hiper parametre ayarları ve performans ölçütleri altında değerlendirilmiştir.

Tüm makine öğrenmesi yöntemleri, çağrı metinlerinin sayısal gösterimi olan kelime sayım vektörleri üzerinde eğitilmiştir. Her bir metin, sözlük büyüklüğü $p$olmak üzere $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$biçiminde bir vektörle temsil edilmekte; bu vektördeki her bileşen ilgili kelimenin frekansını ifade etmektedir. Dolayısıyla tüm modeller, kelime frekansı vektörleri ve bunlara karşılık gelen sınıf etiketleri kullanılarak eğitilmiştir.

Veri kümesinin çok sınıflı yapısı doğrultusunda eğitim/test ayrımı %80/%20 oranında yapılmış; model hiper parametreleri ise ızgara araması (grid search) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada dört farklı makine öğrenmesi algoritmasının seçilmesinin temel nedeni, sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan ve birbirinden farklı öğrenme prensiplerine dayanan temsilci yöntemleri kapsamlı bir biçimde karşılaştırmaktır. Naive Bayes, Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makineleri ve Rastgele Orman, literatürde hem metin sınıflandırma hem de genel çok sınıflı sınıflandırma problemlerinde sıkça başvurulan, istatistiksel, geometrik ve ansambl temelli yaklaşımları içeren temel algoritmalardır. Bu çeşitlilik, model performanslarının farklı veri özellikleri

ve karar sınırı yapıları karşısında nasıl değiştiğini gözlemlemeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca söz konusu algoritmalar, yorumlanabilirlik, hesaplama maliyeti, genelleme kabiliyeti ve hiperparametre duyarlılığı açısından birbirinden belirgin şekilde ayrılmakta; dolayısıyla metin madenciliği uygulamalarında yaygın olarak karşılaşılan yüksek boyutlu ve seyrek veri yapısında temsil gücü yüksek karşılaştırmalar yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu nedenlerle, seçilen beş algoritma hem literatürdeki yerleşik kullanımlar hem de farklı modelleme paradigmalarını temsil etmeleri bakımından çalışmanın amacıyla uyumlu bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.

2.1. Denetimli Öğrenme

Denetimli öğrenme algoritmaları, verilerdeki örüntüleri ve ilişkileri keşfederek, yeni veriler üzerinde tahminler yapabilen ve karmaşık problemleri çözebilen veri modelleri oluşturur (Geron, 2017). Giriş–çıkış çiftlerinden oluşan etiketli bir veri kümesi üstünde bir fonksiyonun öğrenilmesini amaçlayan bir makine öğrenmesi yaklaşımıdır. Bu çerçevede amaç, $\mathbf{x}_i$ girdisini doğru sınıf etiketi $y_i$ile eşleştiren bir karar fonksiyonunun

$$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathcal{Y} \quad (1)$$

öğrenilmesidir. Öğrenme süreci, model parametrelerinin eğitim verisi üzerinde bir kayıp fonksiyonunu minimize edecek şekilde optimize edilmesine dayanır. Yaygın kayıp fonksiyonları arasında çapraz entropi, kare kayıp, lojistik kayıp ve margin tabanlı kayıplar bulunmaktadır. Denetimli öğrenme yöntemleri, sınıflandırma problemlerinde karar sınırlarının belirlenmesini, regresyon problemlerinde ise sürekli değerlerin tahmin edilmesini sağlar.

Bu yaklaşımın temel varsayımı, eğitim verisindeki etiketlerin doğru ve temsil gücü yüksek olmasıdır. Eğitim kümesinden öğrenilen karar fonksiyonunun, dağılımı benzer yeni örneklere genellenebilmesi hedeflenir. Bu nedenle denetimli öğrenme modelleri, aşırı öğrenme (overfitting) riskine karşı düzenlileştirme (regularization), çapraz doğrulama (cross-validation) ve hiperparametre optimizasyonu gibi yöntemlerle desteklenir. Denetimli öğrenme algoritmaları; istatistiksel yöntemler (Naive Bayes, Lojistik Regresyon), geometrik yöntemler (Destek Vektör Makineleri), örnek tabanlı yöntemler (K-En Yakın Komşu) ve ağaç/ansambl tabanlı yöntemler (Karar Ağaçları, Rastgele Orman) gibi çeşitli modelleme paradigmalarını kapsamaktadır. Bu çeşitlilik, farklı veri niteliklerine ve karar sınırı yapılarına uyum sağlayabilen esnek bir öğrenme yapısı sunmaktadır.

2.1.1. Naive Bayes

Thomas Bayes tarafından 1812 yılında geliştirilen Bayes teoremi, olasılık kuramının önemli bir unsuru olarak ortaya çıkar. Bu teorem, bir rastgele değişkenin olasılık dağılımındaki koşullu olasılıklar ile marjinal olasılıklar arasındaki ilişkiyi açıklar. Naive Bayes sınıflandırma tekniği, Bayes teorisinden türetilmiş olup bu algoritma bütün değişkenlerin hepsinin birbirlerinden bağımsız olduğu ve her birinin aynı öneme sahip olduğu varsayımına dayanmaktadır.

Diğer sınıflandırma algoritmalarından ayrılan bir özellik olarak, Naive Bayes (NB) algoritması sınıflandırma yapmadan olasılıksal olarak hangi tahmin verisinin daha yüksek olduğuna odaklanır. Bu algoritmanın uyum sağlama yeteneği, sistemdeki veriler değiştikçe Naive Bayes modelinin kendini güncelleyebilmesine olanak tanır. Bu uyum sağlama durumu şu şekilde düşünülebilir: Bir verinin olasılıksal değeri arttığında, Naive Bayes modeli bu veri türünü daha önemli kabul edebilir; olasılıksal değeri düştüğünde ise onu daha az önemli kabul edebilir. Ancak, bu özellik Naive Bayes'in eğitim aşamasını zorlaştırır (Türkoğlu,2021).

Bayes teoremi sınıflandırma bağlamında aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$P(C|X) = \frac{P(X|C)\cdot P(C)}{P(X)} \quad (2)$$

burada,

$P(C|X)$: X gözlemlenen kanıtı göz önüne aldığımızda C sınıfının sonsal (posterior) olasılığını temsil eder.

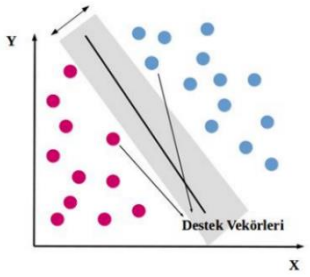
$P(X|C)$: C sınıfı verildiğinde X kanıtının gözlemlenme olasılığıdır (likelihood).

$P(C)$: C sınıfının önsel (prior) olasılığıdır.

$P(X)$: Kanıtın (X) marjinal olasılığıdır.

2.1.2. Destek Vektör Makineleri

Bu çalışmada sınıflandırma problemleri için kullanılan temel yöntemlerden biri Destek Vektör Makineleri (SVM) Vladimir Vapnik tarafından geliştirilmiştir. Temel amacı, veri setinde pozitif ve negatif olarak adlandırılan sınıflar arasında en uygun ayıracı yani hiper düzlemi bulmaktır, bu sınıflandırmayı Şekil 1'te gösterildiği gibi gerçekleştirir (Harman, 2021).



Şekil 1. Destek vektör makineleri

SVM, iki sınıfı ayırmak amacıyla veri uzayında en geniş marjine sahip doğrusal veya doğrusal olmayan bir ayırıcı hiper düzlem tanımlayan bir optimizasyon yöntemidir. Amaç, sınıflar arasında ayrımı maksimize eden bir karar sınırı elde etmektir.

İkili sınıflandırma problemi için veri kümesi

$$\mathcal{D} = \{(\mathbf{x}_i, y_i)\}_{i=1}^{N}, \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^d,\ y_i \in \{-1, +1\} \quad (3)$$

şeklindedir.

Destek vektör makinelerinin optimizasyon problemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\min_{\mathbf{w},b,\xi} \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2 + C \sum_{i=1}^{N} \xi_i \quad (4)$$

koşuluyla

$$y_i(\mathbf{w}^\top \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0. \quad (5)$$

Burada $C > 0$, sınıflandırma hatası ile marjin genişliği arasında denge kuran hiperparametredir.

- Büyük C: daha az hata, daha dar marjin
- Küçük C: daha geniş marjin, daha toleranslı model

Kara fonksiyonu ise,

$$\widehat{y_i} = \arg max_{1,2,\dots,m}\ (w^T x_i + b), i = 1,2, \dots, m \quad (6)$$

2.1.3. Rastgele Orman

Rastgele Orman (RF), 2001 yılında Breiman tarafından geliştirilen bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Rastgele terimi, gözlemler ve değişkenler arasında rastgele seçim yapma kavramına atıfta bulunur. Bu özellik, makine öğrenmesinde genellenebilirlik ve aşırı öğrenme gibi önemli konulara odaklanarak, modelin daha sağlam ve dengeli olmasına katkı sağlar.

Yöntemin temel amacı, tek bir yapının yüksek varyansını azaltmak ve modellenen ilişkinin genelleme performansını artırmaktır. Bu yapı, hem örnekleme rastgeleliği hem de özellik alt kümesi rastgeleliği kullanarak çeşitlilik oluşturan bir ağaç topluluğu üretir.

Algoritma aşağıdaki adımlardan oluşur:

Veri kümesi

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N}, x_i\ \in \mathbb{R}^d, y_i \in \{1, \dots, K\} \quad (7)$$

şeklinde tanımlandığında Rastgele Orman modeli aşağıdaki adımlara göre tanımlanır:

1. Adım Bootstrap Örnekleme

Her bir ağaç için eğitim verisi Düzerinden yerine koyarak bootstrap örneklemesi yapılır. Bu işlem sonucunda her ağaç için şu örneklem elde edilir:

$$D_k \sim Bootstrap\ (D), k\ =\ 1, \ldots, K \tag{8}$$

Burada K, ormandaki toplam ağaç sayısını ifade eder.

2. Adım Rastgele özellik alt kümesi seçimi

Her iç düğümde bölünme, tüm özellik kümesi $\mathcal{F}$ yerine rastgele seçilmiş bir alt küme üzerinden gerçekleştirilir:

$$F_{node} \subset F, |\ F_{node}\ | = m \tag{9}$$

Tipik olarak sınıflandırmada $m\ = \sqrt{p}$, regresyonda ise $m\ = \frac{p}{3}$ kullanılmaktadır. Bu teknik, ağaçlar arasındaki korelasyonu azaltarak topluluk performansını artırır.

3. Adım Düğüm bölünmesi ve safsızlık azalması

Her bir düğümde en iyi bölünme; safsızlık azalmasını maksimize eden özellik f^* ve eşik θ^* ile belirlenir:

$$\Delta\, I(D, f, \theta)\ = I(D)\ - \left(\frac{|D_L|}{|D|} I(D_L) + \frac{|D_R|}{|D|} I(D_R)\right) \tag{10}$$

Burada $I(D)$, seçilen safsızlık ölçütüdür (Gini, Entropi veya MSE).

4. Adım Ağaç tahmini ve topluluk kararı

Her bir ağaç k gözlem $f(x)$ için tahmin üretir. Rastgele Orman'ın nihai sınıflandırma tahmini çoğunluk oyu ile elde edilir:

$$\hat{y}_{RF}(\mathbf{x}) = \underset{k=1}{\overset{K}{\text{mode}}}\{\hat{y}_k(\mathbf{x})\} \tag{11}$$

5. Adım OOB (Out-of-Bag) tahmini ve hata kestirimi

Her bir bootstrap örneğine dahil olmayan gözlemler (yaklaşık %36,8) OOB gözlemlenmiştir. OOB hata tahmini:

$$Hata_{OOB} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I\ (\tilde{y}_{RF}^{OOB}(x_i) \neq y_i) \tag{12}$$

6. Adım Özellik önemleri (feature importance)

Permütasyon öneminde, belirli bir özellik j karıştırılarak OOB hata farkı hesaplanır:

$$\text{Önem}_j = \text{Hata}_{OOB}(\text{permütasyon}(j)) - \text{Hata}_{OOB}(\text{orijinal}) \quad (13)$$

Bu değer arttıkça ilgili özelliğin modelin tahmin gücüne katkısı artmaktadır.

2.1.4. K-En Yakın Komşu

KNN algoritması, ilk olarak 1950'lerin başlarında Evelyn Fix ve Joseph L. Hodges Jr. tarafından geliştirilmiş olup, N.J. Nilsson'ın 1965'te yaptığı minimum uzaklık sınıflayıcı çalışmalarıyla evrimleşmiş ve 1967'de Thomas M. Cover ve Peter E. Hart tarafından genişletilerek istatistiksel analizlere yönelik kullanımı ve önerisi ile önemli bir gelişme kaydetmiştir (Ozturk, 2021).

Genelde sınıflandırma algoritmaları sınıflandırmayı kendi çözümleri içerisinde sınıflandırıcı oluşturup sistem içindeki her veri değerini bu sınıflandırıcıyı kullanarak yapar. KNN algoritması ise genellikle her bir değer için, bu değere en yakın komşu kümesi seçip bu küme üzerinden bir sınıflandırıcı yaratarak değerleri sınıflandırır. Bu tekrarlanan sınıflandırıcı algoritması, sınıflandırma sürecini zaman alıcı hale getirebilir. Bu nedenle literatürde "Tembel Öğrenme Algoritması" olarak da adlandırılır (Ozturk, 2021).

Veri kümesi

$$\mathcal{D} = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{N}, x_i \in \mathbb{R}^d,\ y_i \in \{1, \dots, K\} \quad (14)$$

şeklinde tanımlansın.

Bir gözlem x'in sınıf tahmini şu üç aşamayla gerçekleştirilir:

1. Adım Uzaklık Hesabı

KNN'de en yaygın uzaklık ölçüsü Öklid uzaklığıdır:

$$d(x, x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{d} (x_j - x_{ij})^2} \quad (15)$$

Genel durumda $L_p$normu da kullanılabilir:

$$d_p(x, x_i) = \left(\sum_{j=1}^{d} | x_j - x_{ij} |^p\right)^{1/p} \quad (16)$$

2. Adım K En Yakın Komşunun Seçilmesi

Tüm eğitim örnekleri arasında $d(x, x_i)$uzaklıkları hesaplanır ve en küçük Kuzaklığa sahip örnek kümesi seçilir:

$\mathcal{N}_K(x) =$ K en küçük $d(x, x_i)$ değerine sahip komşular (17)

3. Adım Oylama Tabanlı Sınıf Tahmini

(a) Eşit Ağırlıklı Oylama (Uniform Voting)

Bu çalışmada kullanılan karar kuralı çoğunluk oylamasına dayanmaktadır:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \arg\max_k \sum_{\mathbf{x}_i \in N_K(\mathbf{x})} \mathbf{1}(y_i = k) \quad (18)$$

Burada $\mathbf{1}(\cdot)$gösterge fonksiyonudur.

(b) Mesafeye Göre Ağırlıklandırılmış Oylama (Distance-Weighted)

Daha yakın komşulara daha yüksek ağırlık verilmek istenir ise:

$$w_i = \frac{1}{d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)} \quad (19)$$

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \arg\max_k \sum_{\mathbf{x}_i \in N_K(\mathbf{x})} w_i \ \mathbf{1}(y_i = k) \quad (20)$$

Bu çalışmada ağırlıklı versiyon değil, eşit ağırlıklı KNN tercih edilmiştir.

Hiperparametre Seçimi

KNN'in temel hiperparametresi komşu sayısı K'dır. Küçük Kdeğerleri modele duyarlılık ve varyans kazandırırken, büyük Kdeğerleri karar sınırlarını daha düzgün hâle getirir.

Bu çalışmada $K = 1,2, \ldots ,30$ aralığı Grid Search ile taranmış ve test doğruluğunu en çok artıran Kdeğeri seçilmiştir.

KNN'in Metin Verisi Üzerindeki Özellikleri

Çalışmanın veri setinde metin tabanlı yüksek boyutlu bir özellik uzayı bulunması nedeniyle:

- Uzaklık hesaplamaları yüksek maliyetlidir,
- Veri dengesizliği bazı sınıflarda düşük precision/recall değerlerine yol açabilir,
- Model karmaşıklığı doğrudan Nile arttığından KNN'in hesaplama maliyeti SVM ve RF'ye kıyasla yüksektir.

Bu nedenlerle KNN, genel doğruluk açısından diğer modellere göre daha düşük performans göstermiştir.

3. Performans Değerlendirme Ölçütleri

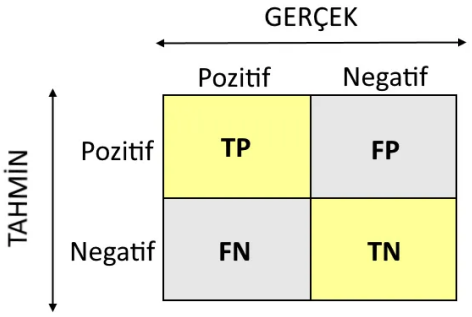
Makine öğrenmesi performans değerlendirme ölçütleri, bir modelin doğruluğunu ve etkinliğini ölçmek için kullanılır. En yaygın kullanılan ölçütlerden biri doğruluk (accuracy) olup, doğru tahminlerin toplam tahminlere oranını ifade eder. Bunun dışında, hassasiyet (precision) ve duyarlılık (recall), sınıflandırma problemlerinde modelin doğru pozitif tahminlerini ve gerçek pozitif verileri ne kadar doğru tespit

ettiğini ölçer. F1 skoru, hassasiyet ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve dengesiz veri setlerinde daha iyi bir performans ölçütü sağlar. Son olarak, AUC-ROC eğrisi ve kare hata gibi ölçütler, özellikle regresyon ve ikili sınıflandırma problemlerinde modelin genel başarısını ve hata oranını değerlendirir.

3.1. Sınıflandırma Modellerinin Değerlendirilmesi

Sınıflandırma Modellerinin başarı değerlendirme ölçütlerinden bazıları Karışıklık Matrisi ve ROC eğrisidir.

Karışıklık Matrisi: Öngörülen ve gerçek değerler arasında dört farklı kombinasyonu içeren bir tablodur (Şekil 2) .



Şekil 2. Karışıklık matrisi

True Positive: Model tahmini pozitif, bu tahminin doğru olduğu durumdur.

True Negative: Model tahmini pozitif, bu tahminin yanlış yani olduğu durumdur

False Positive: Model tahmini negatif, bu tahminin doğru olduğu durumdur

False Negative: Model tahmini negatif, bu tahminin yanlış olduğu durumdur.

Güvenilir sonuçlar elde etmenin yollarından biri de karışıklık matrisi içindeki değerler kullanılarak çeşitli ölçümler yapmaktır. Bu ölçümler, Precision, Recall, F-Score, Accuracy formülleri aracılığıyla elde edilir (Bilen, 2021).

3.1.1. Doğruluk

Doğruluk, modelin yaptığı tüm tahminler içinde doğru olan tahminlerin oranını ifade eden en temel ölçüttür. Doğru tahminler (TP + TN) toplam veri sayısına (TP + TN + FP + FN) bölünerek hesaplanır (Hastie, Tibshirani, Friedman, 2009).

$$Doğruluk = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (21)$$

3.1.2. Duyarlılık

Duyarlılık, gerçekte pozitif olan tüm durumlar içinde, modelin bu durumları ne kadar doğru tespit edebildiğini gösterir. Yanlış Negatif (FN) maliyetinin yüksek olduğu durumlarda (örneğin hastalık teşhisi, dolandırıcılık tespiti) kritik bir metriktir. (Hastie, Tibshirani, Friedman, 2009).

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP+FN} \quad (22)$$

3.1.3. Kesinlik

Kesinlik, modelin pozitif olarak tahmin ettiği durumlar arasında, gerçekten pozitif olanların oranını gösterir. Özellikle Yanlış Pozitif (FP) maliyetinin yüksek olduğu durumlarda (örneğin spam tespiti, sahte ürün uyarısı) önemli bir metriktir (Hastie, Tibshirani, Friedman, 2009).

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP+FP} \quad (23)$$

3.1.4. F Skoru

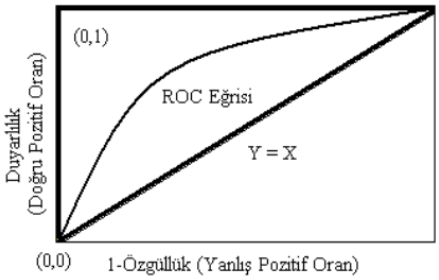
F1-Skoru, Kesinlik (Precision) ve Duyarlılık (Recall) metriklerinin harmonik ortalamasıdır. Bu ölçüt, modelin hem Yanlış Pozitifleri hem de Yanlış Negatifleri dikkate alarak dengeli bir performans sunup sunmadığını anlamak için önemlidir. Özellikle veri setindeki sınıflar arasında dengesizlik (imbalance) olduğunda Doğruluk'tan (Accuracy) daha güvenilir bir değerlendirme sağlar. (Hastie, Tibshirani, Friedman, 2009).

$$F\ skoru = 2.\frac{Kesinlik.Duyarlılık}{Kesinlik+Duyarlılık} \quad (24)$$

3.1.5. ROC (Receiver Operating Characteristic) Eğrisi

ROC eğrisi, kökenini 2. Dünya Savaşı döneminde kullanılan radar sinyali tespit uygulamalarından alır. Adını buradan almıştır, çünkü radar alıcılarını kullananlara "receiver operator" denilirdi. Uygulamadaki temel amaç, radarda tespit edilen noktaların düşman uçağı olup olmadığına karar vermektir (Duran, 2022).

ROC Eğrisi, farklı eşik ayarlarında sınıflandırma problemlerinin performansını ölçen bir araçtır. ROC, temelde bir olasılık eğrisidir ve bu nedenle ayrıla bilirliğin derecesini veya ölçüsünü ifade eder (Şekil 3). İkili sınıflandırma sistemlerinde ayrım, eşik değerinin değiştiği durumlarda duyarlılığın kesinliğe olan oranıyla ortaya çıkar (Duran, 2022).



Şekil 3. ROC eğrisi

ROC eğrisi, duyarlılık ve özgüllük arasındaki dengeyi değerlendirmek için kullanılır. ROC eğrisi altındaki alan, AUC (Area Under the Curve) olarak adlandırılır ve model başarısının bir özeti olarak

sunulur. AUC değeri bir olduğunda, bu pozitif değerlerin negatif değerlerden mükemmel bir şekilde ayrıldığı anlamına gelir. AUC değeri sıfır olduğundaysa hiçbir pozitif değer bulunamadığı anlamına gelir. Diğer bir deyişle, tahminleri tamamen yanlış olan bir modelin AUC değeri 0 olur. Ancak tamamen doğru olan bir modelin AUC değeri 1 olacaktır (Duran, 2022).

4. Deneysel Kurulum ve Tekrarlanabilirlik

Bu bölümde çağrı merkezine ait etiketli data seti dört farklı makine öğrenmesi modeline uygulanmıştır. Modeli uygulamak için yazılan kodlar jupyter notebook da python dilinde yazılmıştır. Modellerin eğitimi için data setinin %80 i eğitim (train), %20 si ise test verisi olarak kullanılmıştır. Çalışmanın bilimsel geçerliliğini artırmak ve yöntemlerin diğer araştırmacılar tarafından tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla, kullanılan veri setinin yapısal özellikleri ve makine öğrenmesi algoritmalarının optimizasyon detayları aşağıda sunulmuştur.

4.1. Veri Seti Detayları

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Turkcell Global Bilgi Çağrı Merkezinden toplanmış gerçek dünya verilerini içermektedir. Veri seti, toplam 15732 adet örnekten oluşmaktadır. Her bir örnek, bir çağrıya ait çeşitli özellikler ve bu çağrının ait olduğu "sınıf" (örneğin, 'Arıza', 'Abonelik', 'Fatura İşlemleri' vb.) etiketini barındırmaktadır. Veri setindeki özellikler, çağrının içeriği (SPEECH_TO_TEXT), çağrının kategorisi (INTENT_NAME) olmak üzere 2 adet niteliği kapsamaktadır. Özellikle SPEECH_TO_TEXT özelliği, müşterinin yapmak istediği işlemin konuşma metnini içermekte olup, doğal dil işleme teknikleriyle metinsel veriden özellik çıkarımı yapılmıştır.

Sınıf dağılımı incelendiğinde, veri setinin dengesiz bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 'Abonelik' ve 'Arıza' gibi sınıflar veri setinin büyük bir kısmını oluştururken, 'Güncelleme İşlemleri', 'Taahhüt' ve 'Tahsilat' gibi sınıflar daha az örnek içermektedir. Bu dengesiz dağılım, özellikle düşük örnek sayısına sahip sınıflarda model performansını etkileyebileceğinden, ön işleme adımlarında bu durum göz önünde bulundurulmuştur.

Veri ön işleme adımları şunları içermektedir:

Kayıp Değerlerin Ele Alınması: Veri setindeki kayıp değerler temizlenmiştir.

Metin Verisinin İşlenmesi: SPEECH_TO_TEXT özelliğindeki metin verileri, sınıflandırma modelleri için uygun sayısal temsile dönüştürülmüştür. Bu kapsamda küçük harfe dönüştürme ve noktalama işaretlerinin temizlenmesi ön işleme adımları uygulanmıştır. Daha sonra, metin verisi CountVectorizer yöntemi kullanılarak sayısal vektörlere dönüştürülmüştür. Bu yöntem, her bir metindeki kelime sıklıklarını sayarak, metinleri sayısal vektörlere çevirir ve algoritmalar tarafından işlenebilir hale getirir.

Kategorik Değerlerin Dönüştürülmesi: Veri setinde yalnızca INTENT_NAME sütunu kategorik bir özellik olup, bu sütun çalışmamızda sınıf (hedef) değişkeni olarak kullanılmıştır. INTENT_NAME dışındaki modelin girdi katmanına beslenecek başka bir kategorik özellik bulunmadığından, ek bir kategorik değer dönüştürme işlemi (One-Hot Encoding veya Label Encoding gibi) uygulanmamıştır.

Hedef değişken (INTENT_NAME), modellerin doğrudan sınıflandırma yapabilmesi için uygun formatta kullanılmıştır.

Ölçeklendirme: Çalışmada yalnızca metin verisinden elde edilen vektörler model girdisi olarak kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında ek bir sayısal özellik için ölçeklendirme işlemi uygulanmamıştır.

4.2. Algoritma Hiperparametreleri

Çalışmada kullanılan modellerin parametreleri, Python scikit-learn kütüphanesi kullanılarak optimize edilmiştir.

Tablo 1. Kodlarda tanımlanan arama uzayları ve sabit parametreler

Algoritma	**Optimize Edilen Parametre**	**Kullanılan Değer / Arama Aralığı**	**Açıklama**
	Model Türü	MultinomialNB	Metin sınıflandırma için standart model seçilmiştir.
Naive Bayes	alpha	1.0 (Varsayılan)	Kodda özel bir grid aranmadığı için varsayılan değer kullanılmıştır.
	Kernel (Çekirdek)	RBF	Doğrusal olmayan ayrım için Radyal Tabanlı Fonksiyon kullanılmıştır.
Destek Vektör Makineleri (SVM)	C (Düzenlileştirme)	[0.1, 1, 10, 100, 1000]	Grid Search ile bu aralık taranmıştır. (En iyi değer sonuç çıktısındadır)
	Gamma	[1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001]	Grid Search ile bu aralık taranmıştır.
	n_estimators	[100, 200, 500]	Ormandaki ağaç sayısı için bu seçenekler denenmiştir.
Rastgele Orman (Random	max_depth	[10, 20, 30, 40, 50]	Aşırı öğrenmeyi önlemek için derinlik sınırları taranmıştır.
Forest)	criterion	gini	Bölünme kriteri olarak Gini indeksi kullanılmıştır.
	n_neighbors (K)	range(1, 30)	1'den 30'a kadar olan tüm K değerleri taranmıştır.
K-En Yakın Komşu (KNN)	metric	minkowski	Varsayılan mesafe ölçütü kullanılmıştır.
	weights	uniform	Komşuların eşit ağırlıklı olması tercih edilmiştir.

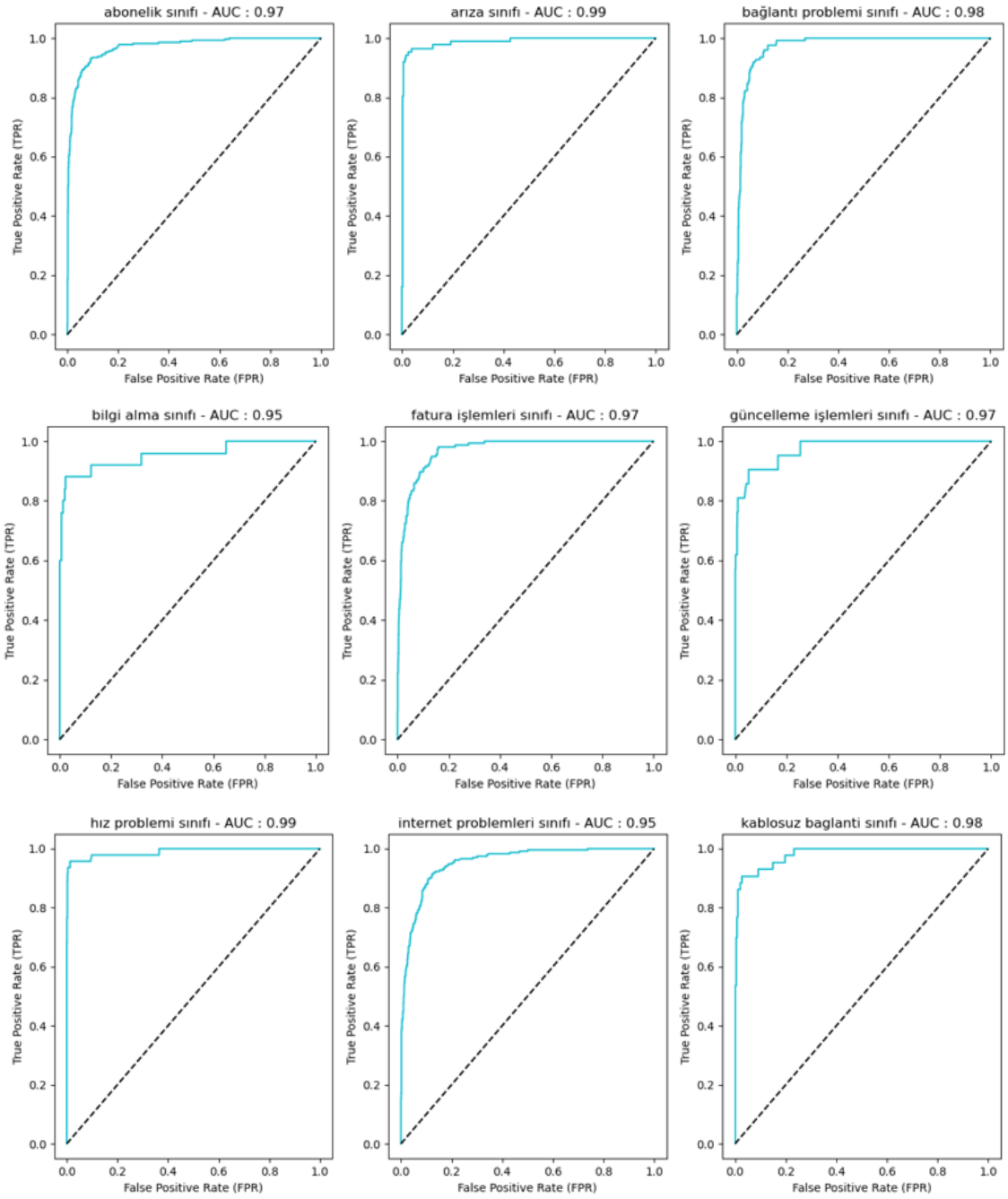
5. Uygulama ve Analiz

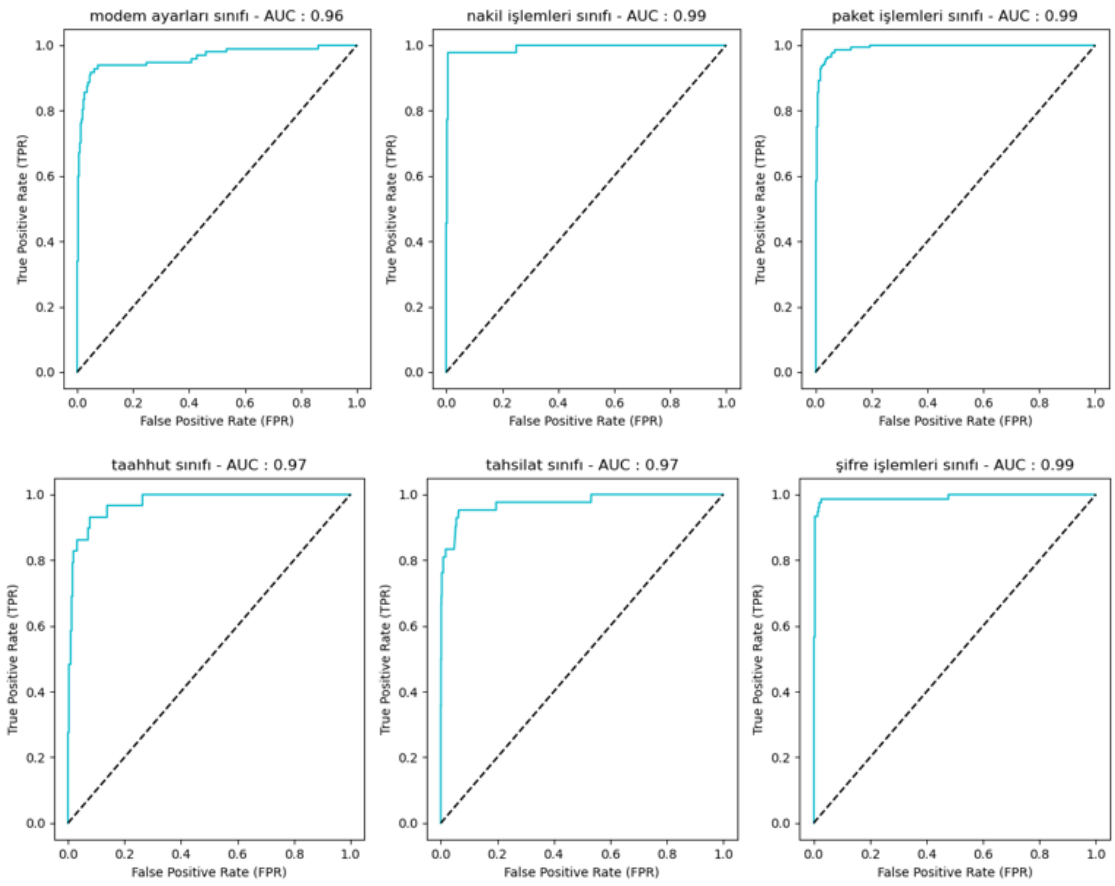
5.1. Naive Bayes Modeli Uygulama

Model uygulandığında sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri Tablo 2'de verilmiştir.
Doğruluk Oranı: 0,6923611111111111

Tablo 2. Naive bayes uygulama çıktısı sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri tablosu

	precision	**recall**	**f1-score**	**AUC**
Arıza	0,96	0,63	0,76	0,99
Abonelik	0,60	0,96	0,74	0,97
Bağlantı problemi	0,72	0,74	0,73	0,98
Bilgi alma	1,00	0,08	0,15	0,95
Fatura işlemleri	0,66	0,75	0,70	0,97
Güncelleme işlemleri	1,00	0,00	0,00	0,97
Hız problemi	1,00	0,55	0,71	0,99
İnternet problemleri	0,59	0,89	0,71	0,95
Kablosuz bağlantı	1,00	0,12	0,21	0,98
Modem ayarları	0,89	0,52	0,65	0,96
Nakil işlemleri	0,88	0,34	0,49	0,99
Paket işlemleri	0,88	0,70	0,78	0,99
Taahhüt	1,00	0,00	0,00	0,97
Tahsilat	1,00	0,05	0,09	0,97
Şifre işlemleri	0,91	0,82	0,86	0,99
*accuracy			0,69	
*macro avg	0,87	0,48	0,51	
*weighted avg	0,77	0,69	0,66	


abonelik sınıfı - AUC : 0.97
arıza sınıfı - AUC : 0.99
bağlantı problemi sınıfı - AUC : 0.98
bilgi alma sınıfı - AUC : 0.95
fatura işlemleri sınıfı - AUC : 0.97
güncelleme işlemleri sınıfı - AUC : 0.97
hız problemi sınıfı - AUC : 0.99
internet problemleri sınıfı - AUC : 0.95
kablosuz baglanti sınıfı - AUC : 0.98
True Positive Rate (TPR)
False Positive Rate (FPR)



Şekil 4. Naive Bayes modeli ROC eğrisi grafiği

Doğruluk oranı, bu modelin genel olarak doğru tahmin yüzdesinin %69 olduğunu göstermektedir. Sınıflandırma raporu, her bir sınıf için modelin performansını detaylı bir şekilde açıklar. Precision, recall ve f1-score değerleri bu performansı değerlendirmek için kullanılır. Bazı sınıfların analizi yapacak olursak:

- Abonelik: Yüksek precision ve recall değerleri ile bu sınıf iyi bir şekilde tahmin edilmiş. Model, bu sınıftaki örnekleri doğru bir şekilde tanıyabiliyor. Ayrıca ROC eğrisinde AUC değeri 0.97 ile bire yakın olduğundan bu sınıf iyi bir şekilde tahmin edilmiş diyebiliriz.
- Arıza: Yüksek precision ancak düşük recall değeri, modelin bu sınıfı iyi tahmin edebildiğini ancak tüm gerçek arızaları tespit etmediğini gösterir.
- Fatura İşlemleri: Orta seviyede precision ve recall değerleri, modelin bu sınıfta orta düzeyde başarı elde ettiğini gösterir.
- Güncelleme İşlemleri, Taahhüt, Tahsilat: Precision değeri 1.0 olan sınıflar, modelin bu sınıfları tahmin ederken yanlış pozitif yapma olasılığının düşük olduğunu gösterir. Ancak, recall değerleri düşük olduğundan, bu sınıflardaki tüm gerçek örnekleri tespit edemiyor.
- Hız Problemi, Modem Ayarları: Precision ve recall değerleri yüksek olan sınıflar, modelin bu sınıfları hem doğru bir şekilde tahmin etme hem de tüm gerçek örnekleri tespit etme konusunda başarılı olduğunu gösterir.

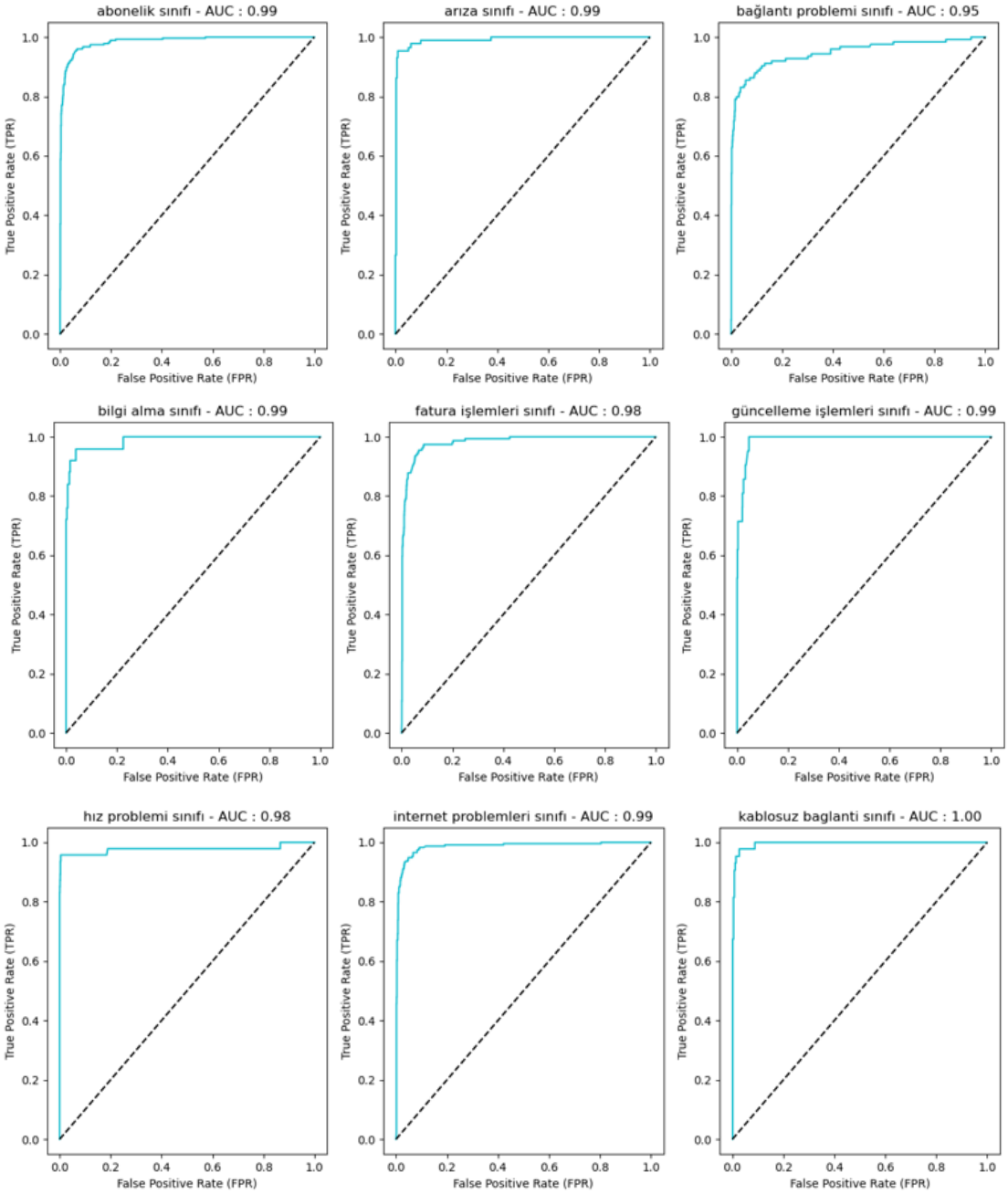
Sonuç olarak, bu sınıflandırma raporu, modelin belirli sınıflarda iyi bir performans gösterdiğini, ancak diğerlerinde zayıf olduğunu göstermektedir. Modelin iyileştirilmesi için özellikle düşük duyarlılık ve F1-Score'a sahip sınıflar üzerinde odaklanılabilir.

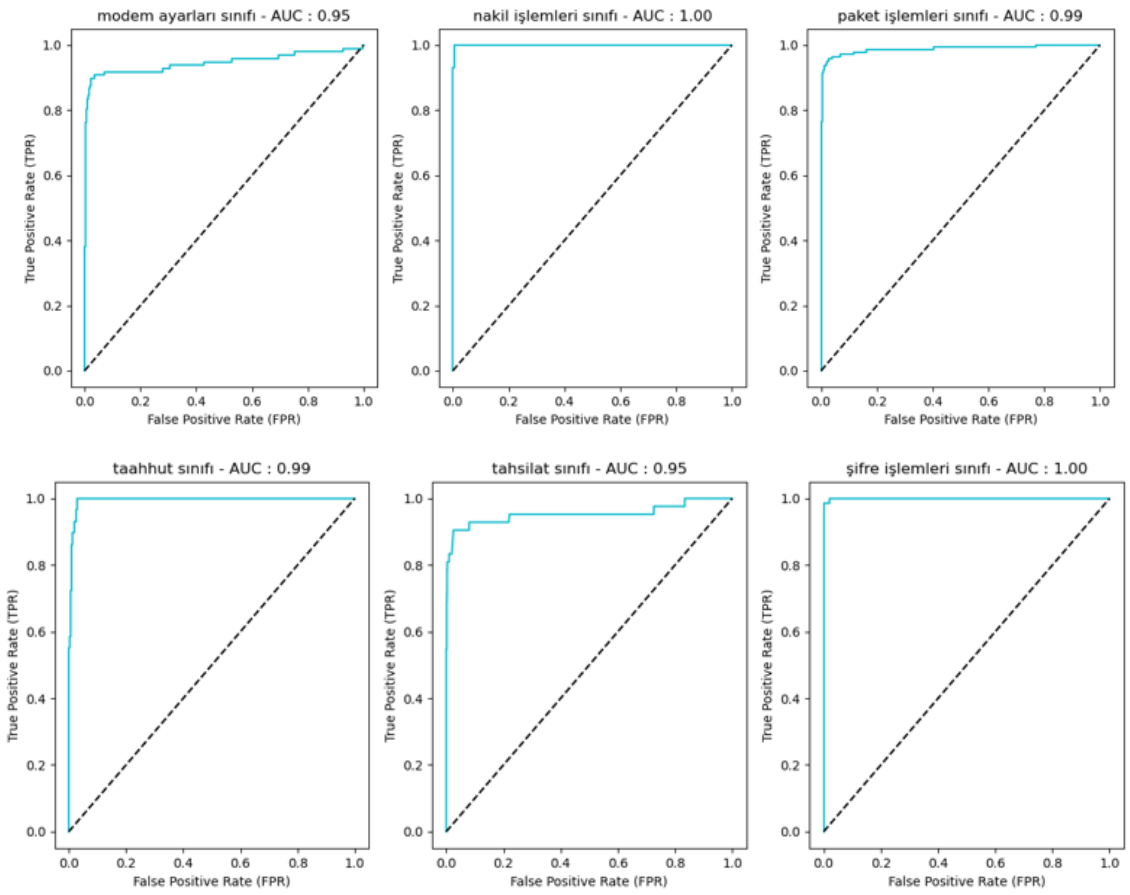
5.2. Destek Vektör Makineleri Modeli Uygulama

Model uygulandığında sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri Tablo 3'de verilmiştir.
Doğruluk Oranı: 0,8583333333333333

Tablo 3. Destek vektör makineleri modeli uygulama çıktısı sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri tablosu

	precision	**recall**	**f1-score**	**AUC**
Arıza	0,84	0,89	0,87	0,99
Abonelik	0,85	0,93	0,89	0,99
Bağlantı problemi	0,86	0,80	0,83	0,95
Bilgi alma	0,93	0,56	0,70	0,99
Fatura işlemleri	0,79	0,85	0,81	0,98
Güncelleme işlemleri	0,78	0,67	0,72	0,99
Hız problemi	0,93	0,89	0,91	0,98
İnternet problemleri	0,85	0,92	0,89	0,99
Kablosuz bağlantı	0,87	0,79	0,83	1,00
Modem ayarları	0,85	0,71	0,78	0,95
Nakil işlemleri	0,89	0,95	0,92	1,00
Paket işlemleri	0,91	0,89	0,90	0,99
Taahhüt	0,70	0,72	0,71	0,99
Tahsilat	0,94	0,69	0,79	0,95
Şifre işlemleri	0,96	0,97	0,97	1,00
*accuracy			0,86	
*macro avg	0,86	0,82	0,83	
*weighted avg	0,86	0,86	0,86	


abonelik sınıfı - AUC : 0.99
arıza sınıfı - AUC : 0.99
bağlantı problemi sınıfı - AUC : 0.95
bilgi alma sınıfı - AUC : 0.99
fatura işlemleri sınıfı - AUC : 0.98
güncelleme işlemleri sınıfı - AUC : 0.99
hız problemi sınıfı - AUC : 0.98
internet problemleri sınıfı - AUC : 0.99
kablosuz baglanti sınıfı - AUC : 1.00
True Positive Rate (TPR)
False Positive Rate (FPR)



Şekil 5. Destek Vektör Makineleri ROG eğrisi grafiği

Doğruluk oranı, bu modelin genel olarak doğru tahmin yüzdesinin %85 olduğunu göstermektedir.

Sınıflandırma raporu, her bir sınıf için modelin performansını detaylı bir şekilde açıklar. Precision, recall ve f1-score değerleri bu performansı değerlendirmek için kullanılır. Bazı sınıfların analizi yapacak olursak:

"abonelik", "arıza", "internet problemleri", ve "şifre işlemleri" gibi sınıflar yüksek precision, recall ve F1-Score değerlerine sahiptir. Model bu sınıfları hem doğru bir şekilde tahmin edebiliyor hem de gerçek pozitifleri tespit edebiliyor.

"bilgi alma" sınıfı yüksek precision ancak düşük recall değerine sahiptir, bu da modelin bu sınıftaki örnekleri doğru tahmin etme konusunda başarılı olduğunu ancak tüm gerçek pozitif örnekleri tespit etmekte zorlandığını gösterir.

"güncelleme işlemleri" ve "taahhüt" sınıfları, özellikle recall değerlerinde daha düşük başarı gösterir. Bu sınıflardaki gerçek pozitifleri tespit etme oranı düşüktür.

Bu sınıflandırma raporu, Destek Vektör Machine modelinin genel olarak iyi bir performans sergilediğini gösteriyor. Precision, recall ve F1-Score değerlerinin çoğu sınıfta yüksek olduğu görülüyor. Ancak, her sınıfta mükemmel bir performans olmadığı ve bazı sınıflarda düşük recall değerleri olduğu gözlemlenmektedir.

Doğruluk oranının yüksek olmasına rağmen, bazı sınıflarda düşük recall değerleri, dengesiz sınıflandırma problemlerine işaret edebilir. Modelin özellikle belirli sınıfları diğerlerine göre daha iyi

tanıma eğiliminde olduğu görülmektedir. ROC eğrisinin altında kalan alan AUC değeri tüm sınıflarda bire yakın olduğundan bu model sınıfları birbirinden ayırt etmede başarılıdır diyebiliriz.

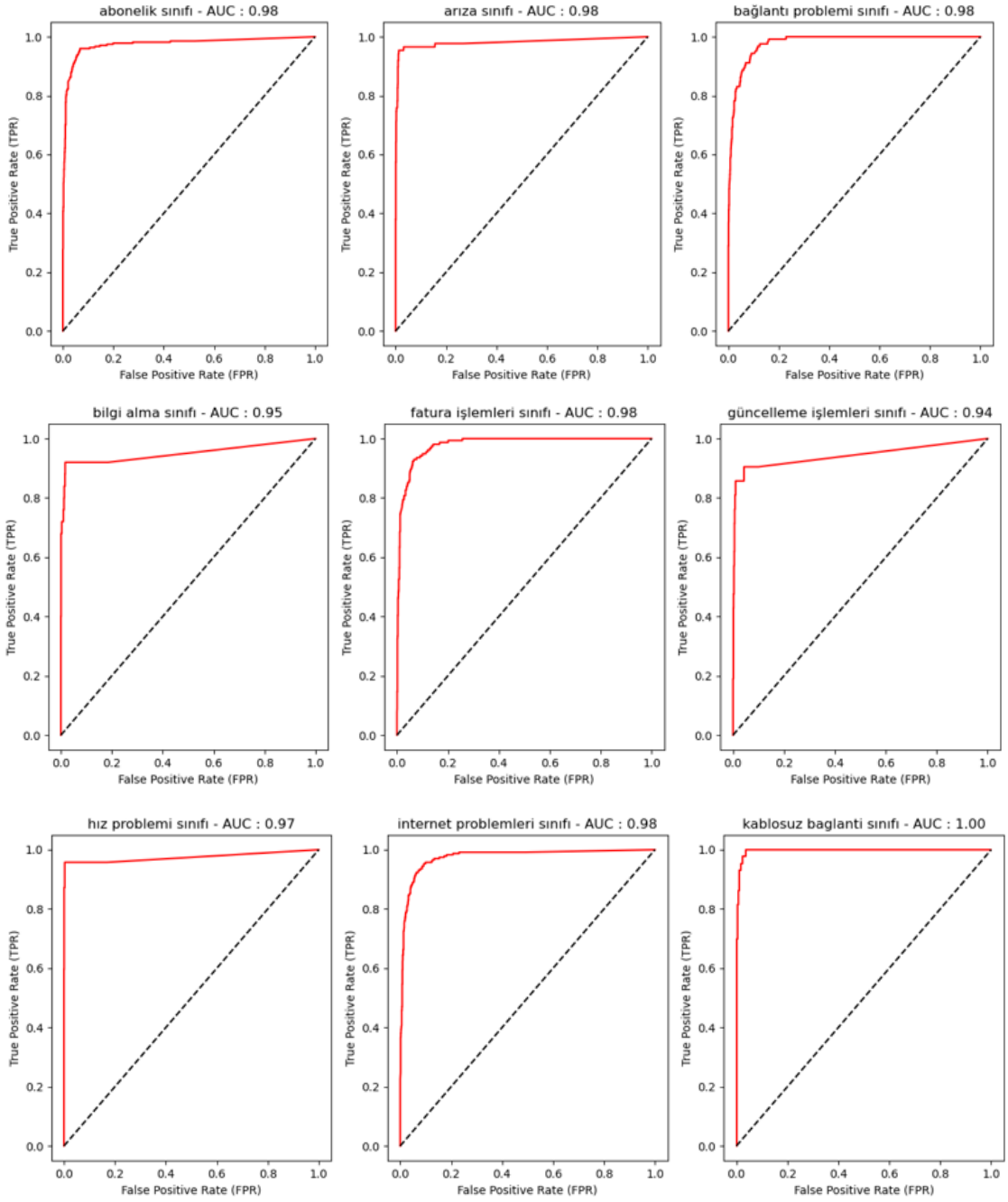
5.3. Rastgele Orman (Random Forest) Modeli Uygulama

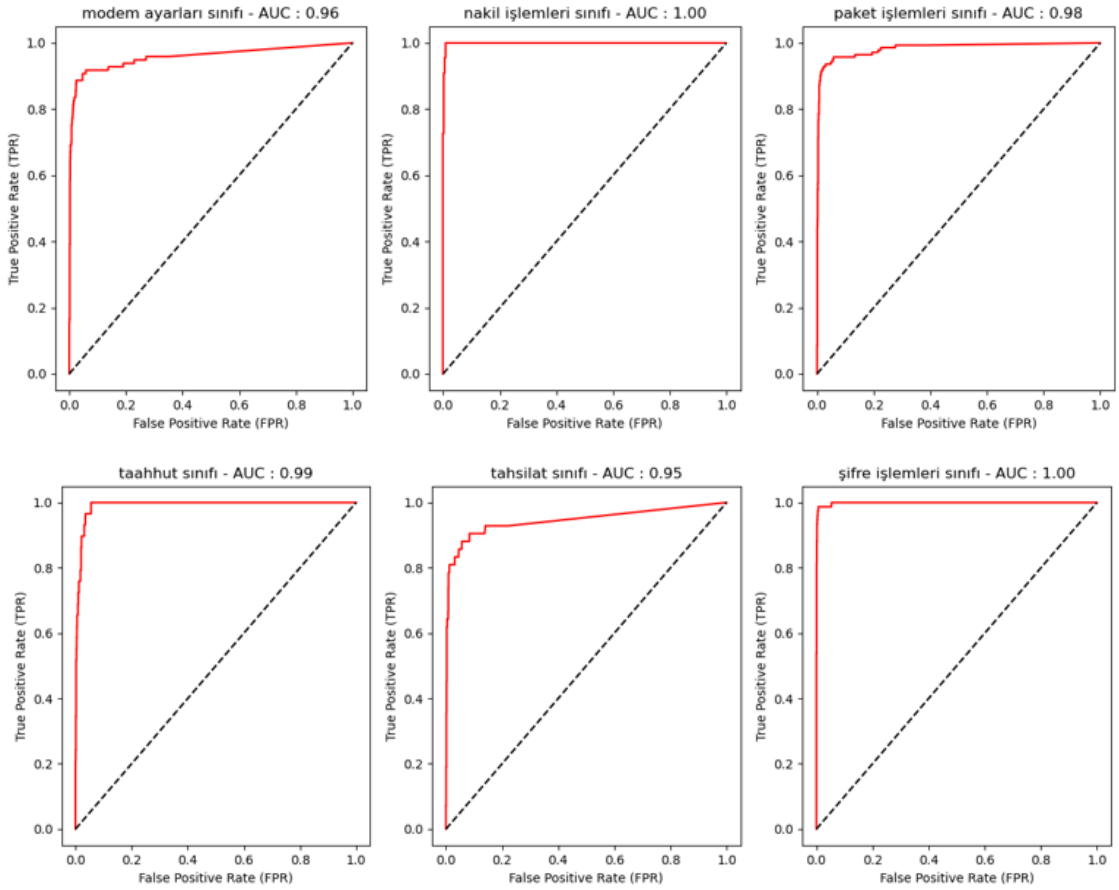
Model uygulandığında sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Doğruluk Oranı: 0,8097222222222222

Tablo 4. Rastgele orman modeli uygulama çıktısı sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri tablosu

	precision	**recall**	**f1-score**	**AUC**
Arıza	0,84	0,85	0,85	0,98
Abonelik	0,88	0,89	0,88	0,98
Bağlantı problemi	0,73	0,77	0,75	0,98
Bilgi alma	0,67	0,72	0,69	0,95
Fatura işlemleri	0,69	0,83	0,75	0,98
Güncelleme işlemleri	0,71	0,57	0,63	0,94
Hız problemi	0,95	0,83	0,89	0,97
İnternet problemleri	0,75	0,89	0,82	0,98
Kablosuz bağlantı	0,93	0,63	0,75	1,00
Modem ayarları	0,85	0,69	0,76	0,96
Nakil işlemleri	0,91	0,93	0,92	1,00
Paket işlemleri	0,89	0,76	0,82	0,98
Taahhüt	0,71	0,52	0,60	0,99
Tahsilat	0,90	0,62	0,73	0,95
Şifre işlemleri	0,97	0,91	0,94	1,00
*accuracy			0,81	
*macro avg	0,83	0,76	0,79	
*weighted avg	0,82	0,81	0,81	


abonelik sınıfı - AUC : 0.98
arıza sınıfı - AUC : 0.98
bağlantı problemi sınıfı - AUC : 0.98
bilgi alma sınıfı - AUC : 0.95
fatura işlemleri sınıfı - AUC : 0.98
güncelleme işlemleri sınıfı - AUC : 0.94
hız problemi sınıfı - AUC : 0.97
internet problemleri sınıfı - AUC : 0.98
kablosuz baglanti sınıfı - AUC : 1.00
True Positive Rate (TPR)
False Positive Rate (FPR)



Şekil 6. Random Forest ROC eğrisi grafiği

Doğruluk oranı, bu modelin genel olarak doğru tahmin yüzdesinin %80 olduğunu göstermektedir.

Sınıflandırma raporu, her bir sınıf için modelin performansını detaylı bir şekilde açıklar, Precision, recall ve f1-score değerleri bu performansı değerlendirmek için kullanılır, Bazı sınıfların analizi yapacak olursak:

"arıza", "internet problemleri", "nakil işlemleri", ve "şifre işlemleri" gibi sınıflar yüksek precision, recall ve F1-Score değerlerine sahiptir. Model bu sınıfları hem doğru bir şekilde tahmin edebiliyor hem de gerçek pozitifleri tespit edebiliyor.

"güncelleme işlemleri" ve "taahhüt" sınıfları, özellikle recall değerlerinde daha düşük başarı gösterir. Bu sınıflardaki gerçek pozitifleri tespit etme oranı düşüktür.

"bilgi alma" sınıfı, düşük precision ve recall değerlerine sahiptir. Model bu sınıftaki örnekleri hem doğru bir şekilde tahmin etme hem de gerçek pozitifleri tespit etme konusunda zorlanmış olabilir.

Bu sınıflandırma raporu, Random Forest modelinin genel olarak iyi bir performans sergilediğini gösteriyor. Precision, recall ve F1-Score değerlerinin çoğu sınıfta yüksek olduğu görülüyor, ancak, her sınıfta mükemmel bir performans olmadığı ve bazı sınıflarda düşük recall değerleri olduğu gözlemlenmektedir.

Doğruluk oranının yüksek olmasına rağmen, bazı sınıflarda düşük recall değerleri, dengesiz sınıflandırma problemlerine işaret edebilir. Modelin özellikle belirli sınıfları diğerlerine göre daha iyi

tanıma eğiliminde olduğu görülmektedir. ROC eğrisinin altında kalan alan AUC değeri tüm sınıflarda bire yakın olduğundan bu model sınıfları birbirinden ayırt etmede başarılıdır diyebiliriz.

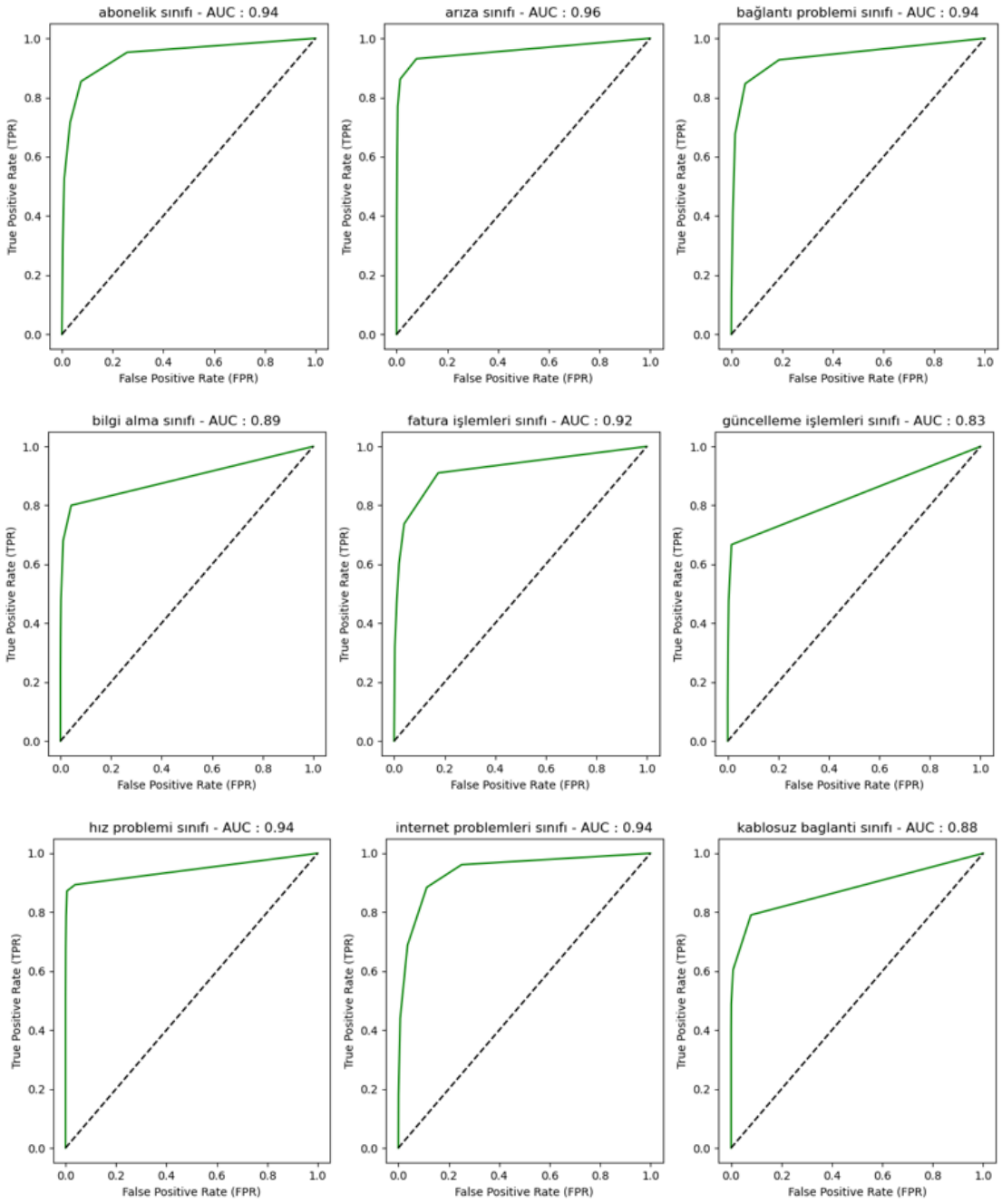
5.4. K-En Yakın Komşu Modeli Uygulama

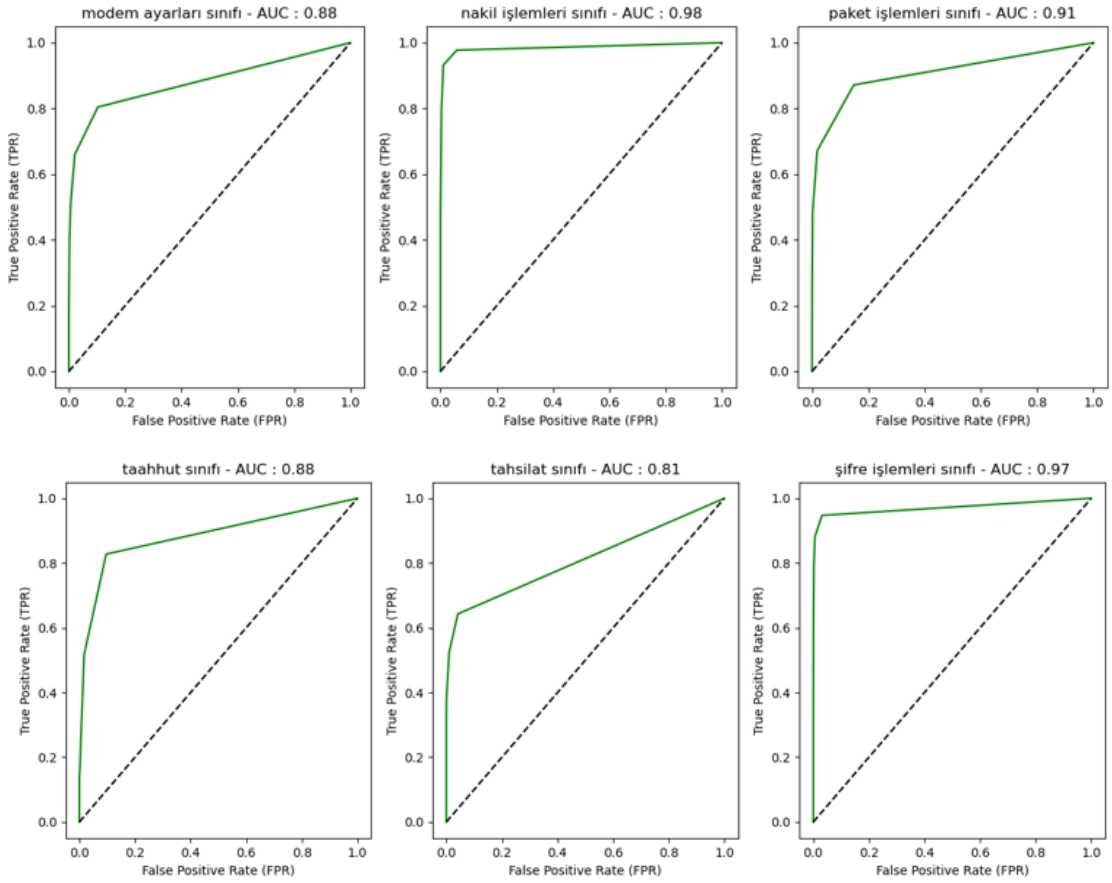
Model uygulandığında sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Doğruluk Oranı: 0,7333333333333333

Tablo 5. K-En Yakın Komşu modeli çıktısı sınıflandırma raporu ve ROC eğrisi AUC değerleri tablosu

	precision	**recall**	**f1-score**	**AUC**
Arıza	0,66	0,87	0,75	0,96
Abonelik	0,80	0,85	0,82	0,94
Bağlantı problemi	0,66	0,79	0,72	0,94
Bilgi alma	0,53	0,64	0,58	0,89
Fatura işlemleri	0,68	0,73	0,70	0,92
Güncelleme işlemleri	0,69	0,43	0,53	0,83
Hız problemi	0,93	0,79	0,85	0,94
İnternet problemleri	0,71	0,82	0,76	0,94
Kablosuz bağlantı	0,96	0,51	0,67	0,88
Modem ayarları	0,75	0,53	0,62	0,88
Nakil işlemleri	0,88	0,82	0,85	0,98
Paket işlemleri	0,93	0,56	0,70	0,91
Taahhüt	0,67	0,28	0,39	0,88
Tahsilat	0,84	0,38	0,52	0,81
Şifre işlemleri	0,94	0,86	0,90	0,97
*accuracy			0,73	
*macro avg	0,77	0,66	0,69	
*weighted avg	0,75	0,73	0,73	


abonelik sınıfı - AUC : 0.94
arıza sınıfı - AUC : 0.96
bağlantı problemi sınıfı - AUC : 0.94
bilgi alma sınıfı - AUC : 0.89
fatura işlemleri sınıfı - AUC : 0.92
güncelleme işlemleri sınıfı - AUC : 0.83
hız problemi sınıfı - AUC : 0.94
internet problemleri sınıfı - AUC : 0.94
kablosuz baglanti sınıfı - AUC : 0.88
True Positive Rate (TPR)
False Positive Rate (FPR)



Şekil 7. K-En yakın komşu ROC eğrisi

Doğruluk oranı, bu modelin genel olarak doğru tahmin yüzdesinin %73 olduğunu göstermektedir.

Sınıflandırma raporu, her bir sınıf için modelin performansını detaylı bir şekilde açıklar. Precision, recall ve f1-score değerleri bu performansı değerlendirmek için kullanılır. Bazı sınıfların analizi yapacak olursak:

- "abonelik", "arıza", "internet problemleri", "nakil işlemleri", ve "şifre işlemleri" gibi sınıflar yüksek precision, recall ve F1-Score değerlerine sahiptir. Model bu sınıfları hem doğru bir şekilde tahmin edebiliyor hem de gerçek pozitifleri tespit edebiliyor.
- Bazı sınıflar, özellikle "taahhüt" ve "tahsilat" gibi, düşük precision ve recall değerlerine sahiptir. Bu sınıflarda modelin doğruluk oranının düşük olmasının nedeni bu olabilir.

Bu sınıflandırma raporu, K-En Yakın Komşu modelinin genel olarak orta düzeyde bir performans sergilediğini gösteriyor. Precision, recall ve F1-Score değerlerinin çoğu sınıfta orta seviyede olduğu görülüyor. Ancak, bazı sınıflarda düşük recall ve precision değerleri, modelin bu sınıfları doğru bir şekilde sınıflandırmakta zorlandığını gösterir.

Doğruluk oranının orta seviyede olmasına rağmen, bazı sınıflarda düşük recall ve precision değerleri, dengesiz sınıflandırma problemlerine işaret edebilir. Modelin özellikle belirli sınıfları diğerlerine göre daha iyi tanıma eğiliminde olduğu görülmektedir. ROC eğrisinin altında kalan alan AUC değeri tüm

sınıflarda bire yakın ama diğer modellere göre düşük olduğundan bu model diğer modellere göre sınıfları iyi ayırt edemiyor diyebiliriz.

6. Tartışma

Bu çalışmada, çağrı merkezi verileri üzerinde beş farklı denetimli makine öğrenmesi algoritması (Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu) uygulanmış ve sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, her bir algoritmanın belirli sınıflarda avantaj sağlarken, bazı sınıflarda ise sınırlı başarı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Destek Vektör Makineleri (SVM), %85 doğruluk oranı ve dengeli precision-recall-F1 skorları ile en yüksek performansı sergileyen model olmuştur. Bu başarı, SVM'in yüksek boyutlu uzaylarda sınıflar arası sınırları net bir şekilde ayırma kapasitesine dayanmaktadır. Özellikle "şifre işlemleri", "nakil işlemleri" ve "internet problemleri" gibi daha ayrışabilir sınıflarda gösterdiği üstün performans dikkat çekicidir.

Rastgele Orman algoritmaları da benzer şekilde yüksek doğruluk (%80 civarı) sağlamış; ancak bazı sınıflarda düşük recall değerleri, sınıf dengesizliğiyle ilişkili olarak modelin tüm pozitif örnekleri yakalayamadığını göstermektedir.

Naive Bayes algoritması, %69 doğruluk oranı ile daha düşük genel başarı göstermiş; ancak bazı sınıflarda, örneğin “abonelik” ve “arıza” gibi örneklerde yüksek precision değerleri elde etmiştir. Bu durum, algoritmanın basitliğine rağmen belirli örüntülerde etkili olabildiğini gösterse de özellikler arasındaki bağımsızlık varsayımının çoğu sınıf için gerçekçi olmaması nedeniyle genelde sınırlı kalmıştır.

K-En Yakın Komşu (KNN) algoritması ise %73 doğruluk oranı ile nispeten zayıf performans göstermiştir. Özellikle düşük sıklıklı sınıflarda precision ve recall değerlerinin belirgin şekilde düşmesi, algoritmanın veri yoğunluğu gereksinimi ve “tembel öğrenme” yapısıyla açıklanabilir. Ayrıca, yüksek boyutlu metin verisi bağlamında tüm örnekler üzerinde işlem yapma zorunluluğu, KNN’in pratik kullanımını sınırlandırmaktadır.

Genel olarak, çağrı merkezi verisi gibi çok sınıflı, dengesiz ve örtüşen kategorilere sahip veri setlerinde, sınıflar arası ayrım gücü yüksek modellerin daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda SVM öne çıkan model olurken, model seçiminde yalnızca doğruluk oranı değil, işlem süresi, yorumlanabilirlik ve veri yapısı gibi faktörler de dikkate alınmalıdır**.**

7. Sonuç

Bu çalışmada, çağrı merkezi verisi kullanılarak Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman ve K-En Yakın Komşu olmak üzere beş farklı denetimli makine öğrenmesi algoritmasının sınıflandırma performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analizler doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F1 skoru ve ROC eğrisi altındaki alan (AUC) gibi temel performans ölçütleri üzerinden gerçekleştirilmiş, her bir algoritmanın güçlü ve zayıf yönleri sınıf düzeyinde analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, Destek Vektör Makineleri algoritmasının yüksek doğruluk oranı ve tutarlı performans metrikleriyle en başarılı model olduğunu ortaya koymuştur. Bu performans, SVM'in sınıf sınırlarını belirlemede yüksek ayrım kabiliyetine sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir. Rastgele Orman ve algoritmaları da yüksek doğruluk sunmakla birlikte, bazı sınıflarda düşük duyarlılık değerleri nedeniyle sınıflandırma başarımında sınırlı kalmıştır. Naive Bayes algoritması ise belirli sınıflarda yüksek kesinlik sağlamasına rağmen, düşük duyarlılık nedeniyle genel başarıda geride kalmıştır. K-En Yakın Komşu algoritması ise veri setinin dengesiz yapısı ve çok sınıflı karakteri nedeniyle diğer modellere kıyasla daha zayıf bir performans sergilemiştir.

Bu bulgular, sınıflandırma problemlerinde algoritma seçiminin yalnızca doğruluk gibi metriklerle değil, aynı zamanda veri setinin yapısı, sınıf dağılımı ve uygulama bağlamı gibi faktörlerle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir. Uygun model seçimi, probleme özgü yapısal özelliklerin dikkatli analiz edilmesini zorunlu kılmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, bu çalışmada kullanılan veri seti farklı sektörlerden elde edilecek çağrı merkezi verileri ile genişletilerek algoritmaların genellenebilirliği değerlendirilebilir. Özellikle az temsil edilen sınıflar için veri dengeleme yöntemlerinin uygulanması, sınıflandırma başarımını artırma potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca öznitelik mühendisliği süreçleriyle daha açıklayıcı değişkenlerin üretilmesi, modellerin öğrenme başarısını iyileştirebilir. Bunun yanında, metin tabanlı veri analizinde derin öğrenme temelli modellerin (örneğin LSTM, BERT) kullanılması, daha karmaşık örüntülerin yakalanmasına imkân sağlayacaktır. Son olarak, modellerin karar verme süreçlerinin açıklanabilirliğini artırmak amacıyla SHAP veya LIME gibi yöntemlerin entegrasyonu da önemli katkılar sunabilir.

Bu bağlamda, çalışma kapsamında elde edilen bulguların hem akademik araştırmalara hem de çağrı merkezi operasyonlarının veri temelli yönetimi açısından pratik uygulamalara katkı sunması beklenmektedir.

Kaynakça

Alpaydın E. Machine learning (Revised And Updated Edition). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 2014.

Al-Dallal N., Al-Dallal H., Mohammed FH. Comparative analysis of five machine learning algorithms for sentiment classification in social media text: Logistic Regression, Support Vector Machines (SVM), Random Forest, Naive Bayes, and Gradient Boosting. World Journal of Advanced Research and Reviews 2024; 21(1):1083–1090.

Bilen B. Karışıklık matrisi (Confusion Matrix) [Internet]. Medium; 2021 [cited 2024 Jan 25]. Available from: https://burhanbilen.medium.com/kar%C4%B1%C5%9F%C4%B1kl%C4%B1k-matrisi-confusion-matrix-990dfc718653

Çebi C. Rastgele orman algoritması [Internet]. Medium; 2020 [cited 2024 Jan 25]. Available from: https://medium.com/@cemthecebi/rastgele-orman-algoritmas%C4%B1-1600ca4f4784

Duran O. Sınıflandırmada kullanılan bir ölçüt: ROC eğrisi [Internet]. Matematiksel 2022 [cited 2024 Feb 24]. Available from: https://www.matematiksel.org/siniflandirmada-kullanilan-bir-olcut-roc-egrisi/

Gentleman R., Huber W., Carey VJ. Supervised machine learning. In: Bioconductor Case Studies. New York: Springer 2008; 121–136.

Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow. Sebastopol, CA: O'Reilly Media; 2017.

Harman G. Destek vektör makineleri ve Naive Bayes sınıflandırma algoritmalarını kullanarak Diabetes Mellitus tahmini. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2021; 32:7–13. Available from: https://doi.org/10.31590/ejosat.1041186

Hastie T., Tibshirani R., Friedman JH. The elements of statistical learning. 2nd ed. New York: Springer; 2009.

Hatipoğlu A., Güneri Y., Yılmaz E. Makine ve derin öğrenme temelli karşılaştırmalı bir öngörücü bakım uygulaması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2023; 39(2): 1037-1048.

Hincapié MM., Londoño AV., Taborda JMC. Requests classification in the customer service area for software companies using machine learning and natural language processing. PeerJ Computer Science 2023; 9:e1458.

Schapire RE. The boosting approach to machine learning: An overview. In: Nonlinear estimation and classification. New York: Springer 2003; 149–171.

Şen B., Çoban S. Machine learning-based text classification comparison: Turkish Language Context. International Journal of Advanced Engineering and Pure Sciences 2022; 14(2): 241–248.

Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalker A. Foundations of machine learning. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 2018.

Öztürk M. Python ile sınıflandırma analizleri – En yakın komşu algoritması (KNN) [Internet]. 2021 [cited 2024 Feb 25]. Available from: https://miracozturk.com/python-ile-siniflandirma-analizleri-knn-k-nearest-neighbours-k-en-yakin-komsu-algoritmasi/

Türkoğlu F. Naive bayes algoritması-makine öğrenmesi [Internet]. Medium; 2021 [cited 2024 Jan 25]. Available from: https://mfatihto.medium.com/naive-bayes-algoritmas%C4%B1-makine-%C3%B6%C4%9Frenmesi-2b93b090ce3

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1529-1549, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1529-1549, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Çorum İli Süt Sığırcılığı İşletmelerinin Biyogüvenlik Uygulamaları Açısından Değerlendirilmesi

Gökşad Cemil KOTAN[1*], Bülent BAYRAKTAR[2], Şeyma AYDEMİR[3], Emre TEKCE[4], Esra SUCU[5]

[1,3,5] Hitit University Alaca Avni Çelik Vocational School, Department of Veterinary Medicine, 19000, Çorum
[2] Bayburt University, Faculty of Health Sciences, Department of Physiotherapy and Rehabilitation, 69000, Bayburt
[4]Bayburt University, Faculty of Applied Sciences, Department of Organic Farming Management, 69000, Bayburt

[1]https://orcid.org/0000-0001-7064-917X
[2]https://orcid.org/0000-0002-2335-9089
[3]https://orcid.org/0000-0003-0636-8212
[4]https://orcid.org/0000-0002-6690-725X
[5]https://orcid.org/0009-0002-0162-9487
*Sorumlu yazar: goksadcemilkotan@hitit.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 21.08.2025
Kabul tarihi:21.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Biyogüvenlik
Süt sığırcılığı işletmeleri
Hayvan sağlığı
Çorum

ÖZ

Bu araştırma, biyogüvenlik için gerekli bazı faktörler bakımından Çorum ilinde faaliyet gösteren süt sığırcılığı işletmesinde biyogüvenlik uygulamalarını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Tesadüfi örnekleme metodu kullanılarak seçilen 120 adet süt sığırcılığı işletmesinde, gönüllülük esasına dayalı olarak işletme sahiplerine yüz yüze anket uygulanmıştır. Yapılan çalışmada, işletmelerdeki yetiştiricilerin çoğu genç (31-40 yaşında; %35,00 oranında) ve orta yaşlı iken (41-50 yaşında; %31,67 oranında) eğitim düzeylerinde lise ve ilkokul mezunları (%26,67) çoğunluktadır. İşletmelerin büyük bir kısmı yarı açık (%60,83) veya kapalı (%39,17) sistem kullanmaktadır. Yetiştiricilerin yaklaşık yarısında (%47,50) biyogüvenlik bilgi eksikliği olduğu belirlenmiştir. Biyogüvenlik uygulamalarını zorlaştıran en önemli faktör olarak %50,83 oranla "yeterli bilgi eksikliği" olarak belirtilmiştir. Hayvan alımında, yetiştiricilerin yaklaşık yarısı (%49,17) hayvan pazarlarından temin yapmasına rağmen, getirilen hayvanların test edilme (%15,00) ve karantinaya alınma (%30,00) oranları oldukça düşüktür. İşletmelerde arazi sınır güvenliği yüksek olsa da (%80,83), hasta hayvan (%35,00) ve doğum (%42,50) bölmeleri gibi önemli fiziksel önlemlerin eksikliği göze çarpmaktadır. İşletmelerde kemirgen mücadelesi (%72.50) ve barınak dezenfeksiyonu (%58,33) gibi temel uygulamalar yetersiz olup, ziyaretçi biyogüvenliği konusunda da önemli eksiklikler bulunmaktadır. Ziyaretçilerin hijyen kurallarına dikkat etme oranı düşük (%48,33), ziyaretçi kaydı tutma oranı (%11,67) düşük olduğu ve işletmeye doğrudan erişim izin verildiği belirlenmiştir (%70,00). Sonuç olarak, Çorum'daki süt sığırcılığı işletmelerinde biyogüvenlik uygulamalarının yetersiz olduğu ve geliştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu olumsuzlukların giderilmesi için, işletme yöneticileri ve tüm personele eğitimler verilmesinin mevzuatın uygulanmasının güçlendirilmesi ve denetimlerin artırılmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır.

Evaluation of Dairy Cattle Farms in Çorum Province in Terms of Biosecurity Practices

Research Article

Article History:
Received: 21.08.2025
Accepted: 21.12.2025
Published online:15.06.2026

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate biosecurity practices in dairy farms in Çorum province in terms of some factors necessary for biosecurity. In this study, face-to-face questionnaires were administered on a voluntary basis to the owners of 120 dairy cattle enterprises, selected using the random sampling method. The study

Keywords:
Biosecurity
Dairy farms
Animal health
Çorum

revealed that the majority of the breeders were young (31-40 years old; 35.00%) or middle-aged (41-50 years old; 31.67%), with high school and primary school graduates constituting the majority (26.67%) in terms of education level. A significant portion of the enterprises utilize semi-open (60.83%) or closed (39.17%) housing systems. It was determined that approximately half of the breeders (47.50%) lacked knowledge regarding biosecurity. "Lack of sufficient knowledge" was identified as the most significant factor hindering biosecurity practices, with a rate of 50.83%. regarding animal procurement, although approximately half of the breeders (49.17%) source animals from livestock markets, the rates of testing (15.00%) and quarantining (30.00%) the introduced animals remain remarkably low. While perimeter security in the enterprises was found to be high (80.83%), a deficiency in critical physical facilities, such as sick animal isolation pens (35.00%) and calving pens (42.50%), was evident. Basic practices such as rodent control (72.50%) and barn disinfection (58.33%) were found to be insufficient, and significant shortcomings regarding visitor biosecurity were also observed. It was determined that compliance with hygiene rules by visitors was low (48.33%), the rate of keeping visitor logs was minimal (11.67%), and direct access to the facility was frequently permitted (70.00%). In conclusion, it was determined that biosecurity practices in dairy cattle enterprises in Çorum are insufficient and require improvement. To address these deficiencies, it is suggested that providing training to farm managers and all personnel, strengthening the enforcement of legislation, and increasing inspections would be appropriate measures.

To Cite: Kotan GC., Bayraktar B., Aydemir Ş., Tekce E., Sucu E. Evaluation of Dairy Cattle Farms in Çorum Province in Terms of Biosecurity Practices. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1529-1549.

1. Introduction

Dairy farming is one of the most important branches of the agricultural sector, directly contributing to food security through the production of milk, a cornerstone of human nutrition (Abuhay Mengistu, 2025). Dairy farming plays a critical role in building a sustainable future, both economically and socially, by stimulating the economy with value-added products such as cheese and yogurt derived from milk, providing income for farmers, and reducing rural migration (Mwirigi et al., 2025). However, the dairy sector is constantly faced with invisible threats such as zoonotic diseases and devastating epidemics (Bose and Siva Kumar, 2025). In addition to directly endangering animal health, these risks also lead to declines in milk yield, high treatment costs, and even farm losses, thus seriously threatening productivity and food security (Akinmoladun et al., 2025). Zoonotic diseases such as brucellosis and tuberculosis pose a serious threat to public health by being transmitted to humans through contaminated dairy products and direct contact (Holzhauer et al., 2023).

Biosecurity encompasses all measures aimed at protecting livestock farms from zoonotic diseases, ensuring animal health and food safety, thereby reducing treatment costs and increasing productivity, and maximizing farm profitability (Alawneh et al., 2025). Therefore, biosecurity stands out as an absolute necessity for modern dairy farms, not only protecting their current productivity but also ensuring their economic resilience and food security for future generations. Biosecurity is no longer a choice, but a strategic step toward a sustainable future (Sheppard et al., 2011).

Çorum, the basis of our study, is a province that offers suitable conditions for dairy farming thanks to its geographical location (34°04' E and 39°54' N), extensive pastureland (726,759 ha of pastureland), and favorable climatic conditions (temperatures can reach up to 29°C in summer and -5°C in winter).

According to Turkish Statistical Institute (TurkStat) data for December 2024, the amount of cow's milk collected by commercial dairy farms in Çorum province increased by 5.2% compared to the previous month, reaching 942,928 tons (TurkStat, 2025). Studies emphasizing the importance of biosecurity, an indispensable component of economic and sustainable animal husbandry, contribute to the development of the sector by raising awareness among relevant stakeholders. Our research and literature review did not reveal any studies on biosecurity in dairy cattle farming enterprises in Çorum province. This study aims to evaluate the current situation of dairy cattle farms operating in Çorum province in terms of some structural, hardware, managerial and personnel factors required within the scope of biosecurity practices.

2. Materials and Methods

The research material consists of data obtained from a survey conducted on 120 cattle farms in the central district of Çorum province between June and July 2025. To assess biosecurity practices in dairy farms in Çorum province, a face-to-face survey was conducted with farm owners. The survey form included questions regarding biosecurity practices. According to the 2025 records of the Çorum Provincial Directorate of Agriculture and Forestry, where the study was conducted, there are 16,290 cattle breeding enterprises. The number of surveys was calculated based on the regional distribution of cattle breeders in the region and registered in the Animal Registration System (TURKVET, 2025). The proportional approximation method was used to determine a representative sample size. Using this method, the number of surveys was calculated according to the following formula (Miran, 2003):

$$n = \frac{N * t^2 * p * q}{(N-1) * \sigma_p^2 + t^2 * p * q}$$

The total population (N) for the study was 16,290 businesses. To determine the representative sample size (n), the proportional approximation method was used with a 9% margin of error (σp = 0.09) and a 95% confidence interval (t = 1.96). This number was calculated by taking p = 0.5 to maximize the sample size since the characteristics of the producers constituting the main mass were not known at the beginning. Among the terms in this formula, n = Sample size, N = Number of businesses, $\sigma p2$ = Ratio variance (with a 95% confidence interval and a 9% margin of error to reach the maximum sample size), t = Table value, p = The desired ratio to be calculated, q = 1-p. The calculation was performed as follows

$$n = \frac{16290 * 1.96^2 * 0.5 * 0.5}{(16290-1) * 0.09^2 + 1.96^2 * 0.5 * 0.5} = 118.8$$

Based on the proportional approximation method, the required sample size was calculated as 118.8 (approximately 119). To ensure the reliability of the study and to account for potential data losses or inconsistencies, the final sample size was set at 120 businesses. All 120 completed questionnaires were included in the evaluation. The obtained data were analyzed using frequency tables in the SPSS package program (SPSS, 2022).

3. Results and Discussion

This study examined the biosecurity practices of dairy farms in Çorum province. Based on the survey results, the sociodemographic characteristics of the farmers and the general structure of the dairy farms are presented in Table 1. Age plays an important role in individuals' adaptation to and approach to biosecurity practices (Mankad, 2016). Young farmers tend to adopt modern agricultural technologies and innovative practices more quickly. However, this can vary depending on time, farming method, geographic location, and perceived risk (Barr, 2008; Bish and Michie, 2010). Therefore, different results can be found regarding the age of farmers implementing zoonotic control programs. For example, some studies report that younger people have lower compliance with recommended practices, while older people are more likely to adopt protective approaches for themselves and their livestock (Barr 2008, Bish and Michie 2010, Schemann et al., 2011). Another study reports that young and middle-aged breeders are generally the most likely to implement zoonotic control programs (Ellis-Iversen et al., 2010). This study found that breeders were most heavily involved in the young and middle-aged age groups, with a significant majority in the 31-40 age group (35.00%) and 41-50 age group (31.67%).

Education level is a factor that positively affects the overall biosecurity level by providing a better understanding of the importance of biosecurity protocols, improving application skills, and facilitating compliance with current information (Tang et al., 2024). Yılmaz (2019) reported that the education levels of breeders in the districts where dairy farms in Bursa are located vary: While there are breeders of all educational levels in Mustafakemalpaşa, Yenişehir has a high school degree, Karacabey has a primary school degree, Nilüfer has a primary school degree, and Osmangazi has a primary school degree. It is noteworthy that the education level of breeders in dairy farms in this study is predominantly high school graduates (34.17%) and primary school graduates (26.67%). This is consistent with similar research results (Yılmaz, 2019). Breeders' experience plays an important role in providing healthy living conditions, hygiene, and disease protection for animals for the success of biosecurity systems (Verzhykhovskyi and Nedosekov, 2024). In this study, the breeding experience ranges from 11-20 years (29.17%) and 6-10 years (27.50%) are prominent. In his study which evaluates dairy cattle farms in Bursa, Yılmaz (2019) determined that 62.1% of the farms were engaged in dairy farming, 37.9% in beef cattle farming, 17.5% of the barns were closed, 82.5% were semi-open, and only 40.9% had an administration building.

Closed farm systems, which provide protection against infectious diseases by isolating animals and implementing biosecurity measures such as strict entry-exit regulations, disinfection, and quarantine (Verma et al., 2024), are becoming more common. A study by Yener et al. (2013) on cattle farms in Şanlıurfa found that the majority were dairy cattle (62.1%) and the rest were beef cattle (37.9%), while most barns were semi-open (82.5%) or closed (17.5%). This indicates the adoption of modern husbandry methods. The genetic structure of a cattle breed and its natural resistance to diseases also directly affect the success of biosecurity measures (Kasimanickam et al., 2025). Additionally, the research on farm capacities shows that the sector is dominated by small and medium-sized family businesses, with farms holding 31-50 head (43.33%) and 51-100 head (20.83%) making up the largest share. The very low number of farms with more than 100 animals (3.33%) suggests that large-scale, modern, and integrated livestock facilities have not yet become widespread.

The widespread preference for Simmental and Holstein breeds on farms is a significant factor in biosecurity, directly impacting genetic structure and natural disease resistance (Wrathall et al., 2003). While these high-yielding breeds offer substantial economic gains, they are also known for low disease resistance. For instance, the Holstein breed, due to its high milk yield, is particularly susceptible to diseases like mastitis and thus necessitates stringent biosecurity measures (Detilleux, 2001). The prevalence of Simmental (60.83%) and Holstein (28.33%) breeds in this context points to a strong preference for high meat and milk yields among breeders. Additionally, a notable 84.17% of breeders involved in the study are members of unions and/or cooperatives, a high participation rate that demonstrates a strong level of organization and solidarity within the livestock sector. This collective action suggests that breeders are actively coming together to develop shared solutions for common challenges. A separate study on cattle farms in Şanlıurfa by Yener et al. (2013) found that dairy farming was the focus for a large portion of farms (62.1%), with most barns being semi-open (82.5%). The findings also revealed that over half of these farms lacked an administrative building (59.1%) and had a low rate of in-service training (22.7%), despite a higher rate of record-keeping (59.1%). Financial data showed that veterinary health costs were higher for dairy farms (5.2%) compared to beef cattle farms (3.7%), and calf mortality rates ranged from 5% to 20%. When examining breeders' knowledge of biosecurity and animal health, research determined that nearly half (47.50%) lacked an understanding of biosecurity, highlighting an urgent need for awareness-raising efforts. A significant portion of breeders (34.17%) stated that the purpose of biosecurity rules was to prevent disease, while 30.00% prioritized animal health and welfare. Furthermore, the fact that "animal contact with the farm from outside" was considered the most important biosecurity risk by 55.83% of breeders suggests they have a strong grasp of the practical risks. Finally, the observation that the biggest obstacle to implementing biosecurity practices is "lack of sufficient information" (50.83%) further underscores the critical importance of providing targeted training and consultancy services to the sector.

Zoonotic diseases, such as brucellosis and bovine tuberculosis, are significant animal health problems that not only cause substantial economic losses in cattle farming but also pose serious public health risks (Pal et al., 2017). While breeders demonstrate a strong foundational knowledge, this awareness does not always translate into effective prevention. According to a study by Özcan and Şahin (2012) on brucellosis knowledge, although a high percentage of breeders were aware of the disease (86%) and its transmission to humans (77%), key preventive actions were often neglected. For example, less than half had received vaccinations (45.7%), a large majority failed to report abortions (78.28%), and a significant portion contributed to the disease's spread by consuming raw cheese and grazing their animals with other herds (41.15%). Further analysis of breeders' knowledge of zoonotic diseases and prevention methods revealed that roughly half were aware of the diseases and took precautions (50.83%), while a considerable number were either unaware (28.33%) or unsure (20.83%). Despite these knowledge gaps, there is a strong perception of risk among breeders, as evidenced by the vast majority (80.00%) who believe there is a risk of disease transmission to their families. This awareness is further highlighted by the fact that most breeders (85.05%) correctly identified contact with sick animals as the most risky situation, demonstrating a sound understanding of practical risks.

Table 1. General characteristics of enterprises and farmer knowledge levels

Survey Questions	**Frequency**	
	N	**%**
Breeder Age		
18-30	27	22.50
31-40	42	35.00
41-50	38	31.67
51 and above	13	10.83
What is your education level background?		
Literate	8	6.67
Primary School	32	26.67
Middle School	27	22.50
High School	41	34.17
University	12	10.00
Farming experiences (year)?		
0-5	11	9.17
6-10	33	27.50
11-20	35	29.17
21-30	24	20.00
30 and above	17	14.17
What is your barn type ?		
Open	0	0.00
Indoor	47	39.17
Semi-open	73	60.83
What is the herd size of your farm?		

0-10	21	17.50
11-30	18	15.00
31-50	52	43.33
51-100	25	20.83
More than 100	4	3.33
What cattle breed do you have on your farm?		
Simmental	73	60.83
Holstein	34	28.33
Other	13	10.83
Are you a enrolled to breeder associations or cooperatives?		
Yes	101	84.17
No	19	15.83
Are you receiving any support for livestock activities?		
Yes	96	80.00
No	24	20.00
Are you knowledgeable on biosecurity and biosafety ?		
Yes	63	52.50
No	57	47.50
For what purpose do you think biosecurity rules are implemented?		
To protect against diseases	41	34.17
For the health and welfare of animals	36	30.00
In unavoidable circumstances	11	9.17
To provide economic benefits	32	26.67
What do you think are the most important biosecurity risks?		
External animal contact with the business (New arrivals, other businesses, etc.)	67	55,83
Wild animals	9	7.50
Inadequate care and feeding conditions (Cleaning, hygiene, rations, etc.)	28	23.33
Visitors	16	13.33
Do you implement the information you learned about biosecurity and biosafety practices in your business?		
Yes	72	60.00
No	48	40.00
What factors hinder/obstruct biosecurity practices in your business?		
I don't have enough knowledge	61	50.83
Increased costs	22	18.33
Increased workforce	16	13.33
I don't believe they will be beneficial	21	17.50
Are you knowledgeable about zoonotic diseases and their prevention methods?		
Yes - I take the necessary precautions	61	50.83
No - I don't know	34	28.33
I'm not sure	25	20.83
Do you think there is a risk of disease transmission from animals to you or your family in your business?		
Yes	96	80.00
No	13	10.83
Not sure	11	9.17

Under what circumstances do you think you or your family are most likely to contract a disease from your animals? (Please answer if you did not answer NO to the previous question.)		
Contact with sick animals	91	85.05
Consumption of raw milk	7	6.54
Intervention during birth	9	8.41
Do businesses have animal insurance?		
Yes	29	24.17
No	91	75.83

Livestock insurance is a crucial element in reducing risks and securing production for dairy farmers. A study conducted by Rakan and Birinci (2025) on farmers in Gümüşhane found that the rate of purchasing agricultural insurance was quite low (13.90%). The vast majority of those who purchased insurance (87.23%) opted for cattle life insurance, with 68.29% citing it as a primary reason for agricultural credit access. When examining the availability of livestock insurance in this study, it was found that only 24.17% of farms insured their livestock, while the vast majority (75.83%) did not (Table 1). This suggests an inadequate protection mechanism against economic losses. Furthermore, a large portion of farmers (80.00%) received support for their livestock activities demonstrates the high contribution of agricultural policies to the sector.

For dairy farms to achieve efficiency and sustainability, in addition to milking animals, calves, young animals, maternity and sick animal pens, a milking unit, and feed and manure storage facilities, an office should be located where data such as milk production, calf counts, birth and death records, feed consumption, and manure production are digitally recorded and plans are kept (Alkan and Ünlü, 2020). According to a study conducted by Alkan and Ünlü (2020) on cattle farms in Giresun, they found that a large portion of the barns in the region lacked sections crucial for modern animal husbandry, such as sick animal pens (93.78%), maternity pens (91.65%), milking parlors (97.88%), calf pens (62.82%), and manure pits or septic tanks (78.76%). They also found serious deficiencies in animal health and hygiene. The data obtained in this study on biological security measures in farms is presented in Table 2. According to the survey results, 80.83% of farms have secured their land borders. This demonstrates that farms are aware of fundamental external threats. However, when considering the presence of enclosures within the barns, only 35.00% of farms have sick animal enclosures, while 42.50% have maternity enclosures. These figures indicate serious deficiencies in key areas such as animal health management and quarantine. Conversely, 60.83% of farms have calf enclosures and 56.67% have milking enclosures. The percentage of farms with feed storage facilities is 68.33%.

Table 2. Biosecurity measures implemented in farms in terms of shelter characteristics

Survey Questions	Frequency	
	N	%
Is your business's land border security ensured?		
Yes	97	80.83
No	23	19.17
Does your business have a sick animal area?		
Yes	42	35.00
No	78	65.00
Does your business have a birthing area?		
Yes	51	42.50
No	69	57.50
Does your business have a milking area?		
Yes	68	56.67
No	52	43.33
Does your business have a calf area?		
Yes	73	60.83
No	47	39.17
Does your business have a separate feed storage area?		
Yes	82	68.33
No	38	31.67
Does your business have other animals? (Cats, dogs, small livestock, poultry, etc.)		
Yes	94	78.33
No	26	21.67
Is rodent control carried out regularly at your business?		
Yes	33	27.50
No	87	72.50
How often is your business's physical area disinfected?		
Once a year	32	26.67
Twice a year	18	15.00
None	70	58.33
How is manure cleaned at your business?		
With labor	81	67.50
With mechanical systems	39	32.50
To prevent equipment and feed from coming into contact with manure in your business:		
The same equipment is used for feeding and manure cleaning.	4	3.33
The same equipment is used for feeding and manure cleaning. but only after cleaning.	9	7.50
Different equipment is used for feeding and manure cleaning.	107	89.17
Do you pay attention to the cleanliness of visitors to your business?		
Yes	58	48.33
No	62	51.67
Do you keep records of visitors to your business?		
Yes	14	11.67
No	106	88.33
Can visitors to your business access the shelter directly?		
Yes	84	70.00
No	36	30.00
Do you ensure that visitors to your business wear disposable aprons. boots. etc.?		

Yes	11	9.17
No	109	90.83
Are there disinfectant footbaths at the entrance of the shelter that visitors can use?		
Yes	57	47.50
No	63	52.50
Are visitors to your business allowed to come into contact only with healthy, adult animals?		
Yes	66	55.00
No	54	45.00
Do you change your clothes and boots after visiting other businesses or do you ensure they are cleaned and disinfected?		
Yes	58	48.33
No	62	51.67

Rodents and pests are among the most critical elements of biosecurity because they carry diseases and easily spread pathogens. Rodent control in dairy farms is not only a hygienic necessity but also a critical biosecurity practice based on scientific foundations (Collins and Wall, 2004). Research findings indicate that only 27.50% of farms regularly conduct rodent control. This rate suggests that the disease risks rodents may carry are largely overlooked. Similarly, the frequency of disinfection in farms' physical spaces is also a concern.According to biosecurity regulations, farm personnel are required to wear special clothing, masks, and disinfect their hands and boots (Carr and Howells, 2020). While 58.33% of farms do not disinfect at all, 26.67% disinfect once a year and 15.00% twice a year. These findings suggest that farms consider basic hygiene measures inadequate in preventing the spread of disease. According to a study by Erdoğan et al. (2013), it was determined that 91.1% of the cattle farms in Kars province applied disinfection process in their barns.

Cleaning manure from barns in animal production facilities is crucial for both animal and human health. In animal production facilities, manure is removed from barns using mechanical systems for solid waste and hydraulic systems for liquid waste. Mechanical scrapers regularly remove solid and semi-solid manure from barns, reducing odor but also causing ammonia emissions from wet surfaces (Parihar et al., 2019). According to a study by Güzel and Aybek (2017) on dairy cattle farms in Kahramanmaraş, 83.33% of farms use mobile systems, 13.83% use direct manure storage in the manure chute, and 2.79% use tracked, endless-chain manure removal systems. 85.92% store manure in the open, and 13.87% store manure in manure pits. In these farms, the largest workforce (3 people) and an average time of 45 minutes are devoted to barn cleaning. According to a study conducted by Kaygısız and Özkan (2021) on dairy farms in the Tekkeköy district of Samsun, barn cleaning is done twice a day in 76% of these farms, and once a day in 24%. The study found that 61 people cleaned their barns by sweeping, vacuuming, or washing them every morning and evening, and 19 people cleaned them once a day by sweeping, vacuuming, or washing them, and that they always wore the same clothes during these procedures. When manure cleaning methods were examined in this study, it

was observed that the vast majority of farms (67.50%) carried out the cleaning manually, while a smaller portion (32.50%) used mechanical systems. The main reasons for preferring manure over mechanical systems are thought to be high costs, farm size, availability of cheap labor, and lack of technical knowledge. However, the percentage of farms using different equipment for feeding and manure cleaning was high, at 89.17%. This suggests a positive approach to reducing the risk of cross-contamination.

External sources such as people and vehicles are a significant risk factor in biosecurity practices due to their potential to transmit pathogens to farms (Newell et al., 2011). Survey results in the study reveal that biosecurity measures for external visitors in livestock farms are significantly inadequate. Data such as lack of attention to visitor hygiene (51.67%), failure to keep visitor records (88.33%), allowing direct access into the barn (70.00%), and failure to provide protective equipment (9.17%) pose significant risks for disease entry into the farm. These results are consistent with studies reported in the literature (Yılmaz, 2019; Renault et al., 2021; Huston, 2021).During an outbreak, examining visitor records plays a critical role in determining the source and spread of disease (Muley et al., 2020). Visitors can contribute to the emergence and spread of disease by sharing dirty hands, feet, clothing, and hair (Kagan et al., 2002). Visitors must record their names, dates, and duration of visits, and they must wear disposable protective equipment (boots, overalls, and caps) (Munoz-Price et al., 2015). Another significant finding is that 88.33% of enterprises do not keep visitor records. The use of disinfectant footbaths at the entrance of the shelters is inadequate (47.50%). This finding indicates that basic biosecurity practices are being neglected and enterprises are inadequate in combating visitor-related risks. This poses a serious threat to the sustainability of aquaculture activities in the sector and the protection of public health.

Table 3. Biosecurity measures implemented in terms of herd management in farms

Survey Questions	Frequency	
	N	%
How do you source animals for your business?		
From your own business	37	30.83
From neighboring businesses	24	20.00
From animal markets	59	49.17
How do you proceed when purchasing animals for your business?		
I consider the seller's declaration.	11	9.17
I personally inspect the animal I'm purchasing and select it.	79	65.83
I purchase animals from businesses I know and trust.	23	19.17
I purchase from official/private businesses that sell registered and certified animals.	7	5.83
Do you test animals purchased from outside your business?		
Yes	18	15.00
No	86	71.67
Sometimes	16	13.33
What is your reason for not testing the animals you purchase from outside your business? (Please answer if you did not answer YES to the previous question.)		
I don't think it's helpful.		
I don't know/it's not recommended.	13	12.75
Testing is expensive.	34	33.33
What is your reason for not testing the animals you purchase from outside your business? (Please answer if you did not answer YES to the previous question.)	55	53.92
Do you quarantine animals you bring into your business?		
Yes	36	30.00
No	72	60.00
Sometimes	12	10.00
Are the animals in your business regularly checked for health?		
I do it myself	66	55.00
The veterinarian does it	32	26.67
It is not done.	22	18.33
Are health records for animals on your business kept regularly?		
Yes	31	25.83
No	89	74.17
How do you prepare the ration at your farm		
Based on my own knowledge and experience	64	53.33
In consultation with breeders in my area	7	5.83
Based on information received from veterinarians/zootechnicians	38	31.67
With guidance from feed factories, unions, and/or cooperatives	11	9.17

Do you regularly monitor the physiological status of your animals, such as lameness, body condition score, appetite, rumination, etc.?		
Yes	39	32.50
No	81	67.50
Do you bathe the animals on your farm?		
Yes	26	21.67
No	94	78.33
Do you have a foot bath on your farm?		
Yes	51	42.50
No	69	57.50
Do you groom your animals?		
Yes	34	28.33
No	86	71.67
Do you administer rumen magnets to your animals?		
Yes	106	88.33
No	14	11.67
Do your animals have contact with pasture or other pasture-going animals?		
Yes	73	60.83
No	47	39.17
What is your preferred breeding/insemination method for the female animals on your farm?		
Natural breeding	19	15.83
Artificial insemination	55	45.83
Natural and artificial insemination	46	38.33

The findings regarding herd management and biosecurity measures at the enterprises included in the study are shown in Table 3. When examining animal procurement and biosecurity measures in the study, almost half of the enterprises (49.17%) procure their animals from animal markets, a significant finding that increases the risk of disease transmission. Animal markets are one of the most risky areas in terms of biosecurity because they are places where animals from different sources congregate. This creates a potential breeding ground for the spread of epidemics.

According to Yılmaz (2019), a study evaluating the biosecurity practices of dairy cattle farms in Bursa province showed that only 12% of newly purchased animals were quarantined, and that contact between herds was common in 70% of farms due to a lack of fencing, suggesting inadequate biosecurity measures and a high risk of disease transmission. To prevent the spread of potential epidemics, newly purchased animals should be kept in an isolated quarantine area separate from the existing herd for 30 days and animal movement should be restricted (Yılmaz, 2019). In this study, regarding the testing and quarantine practices of farms purchasing animals from abroad, the vast majority (71.67%) of farms did not undergo testing and 60% did not implement quarantine, indicating that these farms placed herd health at serious risk. This situation reveals that biosecurity protocols, which are crucial for protecting the health of the existing herd with newly arrived animals, are not

being implemented. The prominent reasons for not undergoing testing include high costs (53.92%) and lack of knowledge (33.33%), indicating that breeders lack sufficient knowledge about the importance of biosecurity measures and cost-benefit analysis. According to Yılmaz (2019), a study evaluating the biosecurity practices of dairy cattle farms in Bursa, the distribution of farms that keep regular health records by district is as follows: Karacabey 77.8%, Nilüfer 63.6%, Osmangazi 61.8%, Mustafa Kemalpaşa 61.7%, and Yenişehir 12.5%. In this study, the lack of regular animal health records (74.17%) hinders the monitoring of the herd's health history and the early diagnosis of potential disease risks. The low rate of regular veterinary visits (26.67%) indicates deficiencies in early disease diagnosis and the implementation of correct treatment protocols.

The lack of scientific methods in animal feeding and inadequate physiological monitoring weakens the immune systems of animals, increasing biosecurity risks and facilitating the spread of diseases (Yu, 2024). Kurt et al. (2020), in their study examining the current status and proposed solutions regarding the nutrition of cows and calves in cattle farms in the central district of Muş province, determined that breeders lack sufficient knowledge and professional competence in these areas. In this study, the fact that farm owners rely on their own knowledge and experience in ration preparation (53.33%) suggests insufficient use of scientifically based feeding methods. The lack of widespread monitoring of animal physiological conditions (67.50%) can lead to nutritional deficiencies or subclinical health problems being overlooked.

A study conducted by Önal and Özder (2008) on farms affiliated with the Edirne Cattle Breeders Association found that 5.3% of farms had footbaths, and 10.5% had hoof care equipment. In a similar study conducted by Özder and Önal (2007) in Tekirdağ province, the rate of farms using footbaths was 15.9%. In this study, the lack of routine practices such as footbaths and hoof care (57.50% and 71.67%) suggests deficiencies in preventing common problems such as lameness. This can negatively impact animal welfare and productivity.

While pasture use is part of common herd management practices for livestock, transmission between animals in neighboring pastures is a major cause of the spread of infectious diseases among herds (Palisson et al., 2017). According to a study conducted by Korkmaz and Çarpıcı (2025) on pasture use habits in several villages in the Karacabey District of Bursa Province, 73.7% of the surveyed farmers reported grazing cattle and sheep together, 22% grazed only sheep, and 4.4% grazed only cattle. These results indicate that mixed grazing is the most common pasture use in the region. The contact of the animals in this study (60.83%) with pasture or other animals is another factor that increases the risk of disease transmission.

Artificial insemination is an effective method for biosecurity measures by minimizing the risk of diseased bulls transmitting disease to the herd (Wentink et al., 2000). A study by Doğanay and Yanar (2024) found that the vast majority of cattle breeders in Şanlıurfa (68.5%) did not prefer artificial insemination, but instead determined their cows' estrus by observing multiple signs (80.7%) and inseminated their heifers at 1.5 years of age (75.7%). The preference for artificial insemination

(45.83%) and its use in conjunction with natural mating (38.33%) in the farms participating in this study is a positive indicator of biosecurity by reducing the risk of spreading sexually transmitted diseases.

The results of the evaluation of biosecurity measures implemented in terms of health protection practices in the farms participating in the study are presented in Table 4. Biosecurity encompasses all measures to prevent diseases from entering and spreading within a farm, while vaccination complements these measures (Léger et al., 2017). According to a 2019 study conducted in the Muş province by Kibar and Bakır (2019), the vast majority of dairy farms (92.5%) receive preventive vaccinations, with foot and mouth disease (91.8%) and brucellosis (71.3%) being the most commonly administered vaccines. However, the rates of use for theileriosis (17.1%), anthrax (24.3%), and pneumonia (4.5%) vaccines are lower. In these farms, veterinary services are mostly sought when disease is detected (61.5%), and mastitis (64.7%), a common problem, is reported to be most frequently detected with symptoms of pus discharge (75.4%). When the study examined the vaccination practices of the farms in terms of biosecurity measures, it was found that 55.83% of the farms did not adhere to a regular vaccination schedule. This can make animal populations more vulnerable to infectious diseases. The rate of farms administering vaccinations beyond mandatory vaccinations is only 39.17%, suggesting that preventive health practices may be inadequate. Kaygısız et al. (2023) found that 94% of calves in dairy farms in the Torul district of Gümüşhane were separated from their mothers after birth, 53% performed umbilical cord care, 90% of breeders administered colostrum within the first 2 hours, and 86% of calves received colostrum from their mothers. According to a 2012 study by Gül et al. on the structural characteristics of sheep farming in Aksaray, 24.5% of breeders surveyed reported performing umbilical cord care on newborn calves, while 70.3% reported not performing this practice. When examining the calves' care in terms of calves' care in this study, the rate of farms ensuring calves received colostrum was 73.33%. Given the critical importance of colostrum for the immune system, this rate needs to be increased further. Another study by Bebek and Keskin (2018) reported that 80% of breeders did not perform umbilical cord care, while only 20% did. In this study, disinfecting the umbilical cords of newborn calves (57.50%) was also an important step in reducing the risk of infection.

Mastitis is a significant problem that causes productivity losses in dairy cattle farms and can be prevented through biosecurity practices that include management and hygiene measures to protect animal health (Bhakat et al., 2020). According to a study conducted in Kahramanmaraş by Kaygısız and Karmak (2012), although subclinical mastitis was detected in 36% of 515 cows studied, the average somatic cell count in the herds remained below the legal limit. When examining mastitis management in the farms included in the study, the percentage of farms that clean udders and equipment before and after milking was 60%. Mastitis occurs in 44.17% of farms at an annual rate of 6-15%, indicating that the disease is a widespread problem. 46.67% of farms use tests for mastitis diagnosis, while 17.50% utilize laboratory analyses. The use of more advanced diagnostic methods is

important for accurate disease identification and the development of effective treatment plans. While separating mastitis-affected animals from healthy ones (65.83%) and seeking veterinary support (76.67%) are positive practices, it is noteworthy that only 35% of mastitis patients receive vaccination. This rate suggests that preventative approaches have not yet been fully adopted. Because parasites not only directly harm animals but also contribute to the spread of many diseases, effective parasite control is an integral part of a biosecurity program (Cable et al., 2017). In this study, 65.83% of the farms were found to implement internal and external parasite control twice a year. While this practice is sufficient to control parasite loads for effective biosecurity, it would be appropriate to adjust it according to seasonal and regional factors.

Table 4. Biosecurity measures implemented in terms of health protection practices in enterprises

Survey Questıons	**Frequency**	
	N	**%**
Does your operation follow a regular vaccination schedule?		
Yes	53	44.17
No	67	55.83
Are your animals vaccinated beyond the mandatory vaccinations?		
Yes	47	39.17
No	73	60.83
How often are internal and external parasites treated at your operation?		
Once a year (Summer)	41	34.17
Twice a year (Spring-Summer)	79	65.83
What method is used for internal and external parasite control at your operation?		
Medication	46	38.33
Injection	33	27.50
Medication-Injection-Liming	41	34.17
How many times a day are milked at your operation?		
Once	18	15.00
Two times	87	72.50
Three times	15	12.50
How is milking done at your operation?		
Manual	28	23.33
Automatic	13	10.83
Semi-automatic	79	65.83
Do you clean udders and equipment before and after milking?		
Yes	84	60.00
No	36	40.00
What is the annual mastitis incidence rate at your operation?		
0-5%	51	42.50
6-15%	53	44.17

More than 15%	16	13.33
What methods do you use to diagnose mastitis at your operation?		
Physical examination and observation (Udder and teat inspection - Milk appearance)	43	35.83
Mastitis Diagnostic Tests	56	46.67
Laboratory Analyses	21	17.50
Do you separate animals with mastitis from healthy animals?		
Yes	79	65.83
No	41	34.17
Do you seek veterinary support for mastitis treatment?		
Yes	92	76.67
No	28	23.33
Do you ensure calves receive adequate colostrum (colostrum)?		
Yes	88	73.33
No	32	26.67
Does your farm vaccinate against mastitis?		
Yes	42	35.00
No	78	65.00
Do you administer intramammary injections (drying-off antibiotics) to dry cows for mastitis treatment or prevention?		
Yes	29	24.17
No	81	67.50
Do you disinfect the umbilical cords of newborn calves?		
Yes	69	57.50
No	51	42.50
How do you remove the foal membranes after birth?		
I give them to dogs	12	10.00
I bury them in the ground	36	30.00
I throw them in the trash	72	60.00
When does your farm experience the most animal losses?		
Spring	41	34.17
Summer	18	15.00
Autumn	23	19.17
Winter	38	31.67

4. Conclusion

Biosecurity in dairy farming encompasses all protective measures aimed at preventing the introduction and spread of disease agents into the farm to protect animals from disease and increase productivity. Because this study was conducted on 120 farms in the central districts of Çorum, the findings cannot be generalized to the entire province or the country. Therefore, future research is recommended to use a larger sample size and different assessment tools. Based on the data obtained in the current study, it has been determined that the current state of biosecurity practices in dairy farms in Çorum is inadequate, and that several regulations and changes are needed to achieve adequate biosecurity. This

situation stems from a lack of knowledge among farmers, inadequate modern housing, problems with the implementation of hygiene rules, and uncontrolled animal procurement processes. These deficiencies pose serious risks to both animal and public health. In this context, to solve these problems, comprehensive training programs should be organized for breeders on biosecurity, herd health and management, businesses should be inspected more strictly by the relevant ministry units, administrative sanctions should be made more effective, successful businesses should be cited as examples and rewarded, and supportive policies and control mechanisms should be strengthened to prevent diseases and minimize economic losses.

Acknowledgment

This study was supported by the Scientist Support Programs Directorate (BİDEB) of the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK), under the 2209-A University Student Research Projects Support Program (Project No: 1919B012332749). We extend our gratitude to TÜBİTAK for its support.

Compliance with Ethical Standards

The study was conducted after obtaining approval from the Hitit University Non-Interventional Research Ethics Committee (Decision no: 175; Decision date: 27/05/2025).

Conflicts of interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

References

Akinmoladun OF., Fon FN., Nji Q., Adeniji OO., Tangni EK., Njobeh PB. Multiple mycotoxin contamination in livestock feed: Implications for animal health, productivity, and food safety. Toxins 2025; 17(8): 365-393.

Alawneh JI., Hassan MM., Camac J., Ransom L., Planck J., Porchun SC., Chay R. Plant biosecurity and One Health: Government and industry roles as risk creators and mitigators. One Health Outlook 2025; 7(1): 27-52.

Barr DJ. Analyzing "visual world" eyetracking data using multilevel logistic regression. Journal of Memory and Language 2008; 59(4): 457-474.

Bhakat C., Mohammad A., Mandal DK., Mandal A., Rai S., Chatterjee A., Dutta TK. Readily usable strategies to control mastitis for production augmentation in dairy cattle: A review. Veterinary World 2020; 13(11): 2364.

Bose B., Siva Kumar S. Economic burden of zoonotic and infectious diseases on livestock farmers: a narrative review. Journal of Health Population and Nutrition 2025; 44(1): 158.

Bish A., Michie S. Demographic and attitudinal determinants of protective behaviours during a pandemic: A review. British Journal of Health Psychology 2010; 15(4): 797-824.

Cable J., Barber I., Boag B., Ellison AR., Morgan ER., Murray K., Booth M. Global change, parasite transmission and disease control: lessons from ecology. Philosophical Transactions of the Royal Society B 2017; 372(1719): 20160088.

Carr J., Howells M. Biosecurity. Livestock 2020; 25(3): 150-154.

Collins JD., Wall PG. Food safety and animal production systems: controlling zoonoses at farm level. Revue Scientifique et Technique de l'OIE 2004; 23(2): 685-700.

Detilleux J. Genetic improvement of resistance to infectious diseases in livestock. Journal of Dairy Science 2001; 84: E39-E46.

Doğanay S., Yanar M. Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki büyükbaş hayvancılık işletmelerinde uygulanan yetiştirme teknikleri: Şanlıurfa İli Merkez Eyyubiye İlçesi örneği. Bahri Dağdaş Hayvancılık Araştırma Dergisi 2024; 12(2): 103-117.

Ellis-Iversen J., Smith R., Van Winden S., Paiba G., Watson E., Snow L., Cook A. Farm practices to control E. coli O157 in young cattle-A randomised controlled trial. Veterinary Research 2008; 39(1): 1-12.

Erdoğan HM., Çitil M., Güneş G., Saatci M. Dairy cattle in Kars district, Turkey: I. Characteristics and production. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences 2004; 28: 735-743.

Güzel M., Aybek A. Kahramanmaraş ili süt sığırcılığı işletmelerinin mekanizasyon yapısı. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi 2017; 20(2): 148-159.

Holzhauer M., Wennink GJ. Zoonotic risks of pathogens from dairy cattle and their milk-borne transmission. Journal of Dairy Research 2023; 90(4): 325-331.

Huston CL. Biosecurity for beef and dairy herds. In: Bovine Reproduction 2021: 347-358.

Jori F., Hernandez-Jover M., Magouras I., Dürr S., Brookes VJ. Wildlife–livestock interactions in animal production systems: what are the biosecurity and health implications? Animal Frontiers 2021; 11(5): 8-19.

Kagan LJ., Aiello AE., Larson E. The role of the home environment in the transmission of infectious diseases. Journal of Community Health 2002; 27(4): 247-267.

Kasimanickam R., Ferreira JCP., Kastelic J., Kasimanickam V. Application of genomic selection in beef cattle disease prevention. Animals 2025; 15(2): 277.

Kaygısız A., Karnak İ. Kahramanmaraş'ta süt sığırı işlemelerinden toplanan çiğ süt örneklerinin somatik hücre sayısının AB normları ve subklinik mastitis bakımından değerlendirilmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi[1] Tarım ve Doğa Dergisi 2012; 15(3): 9-15.

Kaygısız A., Özkan İ. Samsun Tekkeköy ilçesindeki süt sığırcılık işletmelerinin yapısal özellikleri ve hijyen koşulları. Harran Tarım Gıda Bilimleri Dergisi 2021; 25(2): 225-233.

Kibar M., Bakır G. Muş ilinde süt sığırcılığı işletmelerinde sağlık yönetiminin belirlenmesi. Journal of Institute of Science and Technology 2019; 9(4): 2409-2419.

Kurt Ö., Şahin O., Çoban ÖB. Muş ili merkez ilçesi sığırcılık işletmelerinde ineklerin ve buzağıların beslenmesi açısından mevcut durum ve çözüm önerileri. Akademik Ziraat Dergisi 2020; 9(2): 337-344.

Léger A., De Nardi M., Simons R., Adkin A., Ru G., Estrada-Peña A., Stärk KD. Assessment of biosecurity and control measures to prevent incursion and to limit spread of emerging transboundary animal diseases in Europe: An expert survey. Vaccine 2017; 35(44): 5956-5966.

Mankad A. Psychological influences on biosecurity control and farmer decision-making. A review. Agronomy for Sustainable Development 2016; 36(2): 40.

Muley D., Shahin M., Dias C., Abdullah M. Role of transport during outbreak of infectious diseases: evidence from the past. Sustainability 2020; 12(18): 7367.

Munoz-Price LS., Banach DB., Bearman G., Gould JM., Leekha S., Morgan DJ., Wiemken TL. Isolation precautions for visitors. Infection Control & Hospital Epidemiology 2015; 36(7): 747-758.

Mwirigi D., Fekete-Farkas M., Borbély C. From cow to climate—Tracing the path of dairy sustainability: Unveiling the impact on sustainable development goals through bibliometric and literature analyses. Animals 2025; 15(7): 931.

Newell DG., Elvers KT., Dopfer D., Hansson I., Jones P., James S., Allen VM. Biosecurity-based interventions and strategies to reduce Campylobacter spp. on poultry farms. Applied and Environmental Microbiology 2011; 77(24): 8605-8614.

Özcan H., Şahin M. Hayvan yetiştiricilerinin işletme büyüklüğüne göre, brusella hastalığı hakkındaki bilgi düzeylerinin araştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi 2012; 1(4): 211-224.

Pal M., Gizaw F., Fekadu G., Alemayehu G., Kandi V. Public health and economic importance of bovine Brucellosis: an overview. American Journal of Epidemiology 2017; 5(2): 27-34.

Palisson A., Courcoul A., Durand B. Analysis of the spatial organization of pastures as a contact network, implications for potential disease spread and biosecurity in livestock, France, 2010. PLoS ONE 2017; 12(1): e0169881.

Parihar SS., Saini KPS., Lakhani GP., Jain A., Roy B., Ghosh S., Aharwal B. Livestock waste management: A review. Journal of Entomology and Zoology Studies 2019; 7(3): 384-393.

Rakan Y., Birinci A. Gümüşhane İli Torul İlçesindeki çiftçilerin tarım sigortasına olan yaklaşımlarının belirlenmesi. Journal of Animal Science and Economy 2025; 4(1): 12-19.

Renault V., Humblet MF., Pham PN., Saegerman C. Biosecurity at cattle farms: Strengths, weaknesses, opportunities and threats. Pathogens 2021; 10(10): 1315.

Schemann K., Taylor MR., Toribio JA., Dhand N"K. Horse owners' biosecurity practices following the first equine influenza outbreak in Australia. Preventive Veterinary Medicine 2011; 102(4): 304-314.

Sheppard AW., Raghu S., Begley C., Genovesi P., De Barro P., Tasker A., Roberts B. Biosecurity as an integral part of the new bioeconomy: A path to a more sustainable future. Current Opinion in Environmental Sustainability 2011; 3(1-2): 105-111.

Tang Q., Yan F., Yuan L., Tang Y., Chen H., Sun Y., Song G. Enhancing laboratory biosafety management: a comprehensive strategy from theory to practice. Frontiers in Public Health 2024; 12: 1439051.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Süt ve Süt Ürünleri Üretimi, Aralık 2024. Haber Bülteni, Sayı: 53968, 2025.

Verma S., Malik Y. S., Singh G., Dhar P., Singla AK. Key concepts and principles of epidemiology, prevention, and control of animal diseases. In: Core Competencies of a Veterinary Graduate 2024: 119-137.

Verzhykhovskyi O., Nedosekov V. Key aspects of biosafety in modern animal husbandry. Ukrainian Journal of Veterinary Sciences 2024; 15(3).

Wentink GH., Frankena K., Bosch JC., Vandehoek JED., Van den Berg TH. Prevention of disease transmission by semen in cattle. Livestock Production Science 2000; 62(3): 207-220.

Wrathall AE., Simmons HA., Bowles DJ., Jones S. Biosecurity strategies for conserving valuable livestock genetic resources. Reproduction Fertility and Development 2003; 16(2): 103-112.

Yener H., Atalar B., Mundan D. Şanlıurfa ilindeki sığırcılık işletmelerinin biyogüvenlik ve hayvan refahı açısından değerlendirilmesi. Harran Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi 2013; 2(2): 87-93.

Yılmaz Ş. Bursa ili süt sığırcılığı işletmelerinin biyogüvenlik uygulamaları açısından değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, 2019.

Yu S. Disease prevention and control for improved animal welfare. Animal Molecular Breeding 2024; 14(3): 228-238.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1550-1571, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1550-1571, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

hnRNPA1 PY-NLS Bölgesinde N267S Mutasyonunun Amiloid Fibril Stabilitesi ve Dinamikleri Üzerine Etkileri: Moleküler Dinamik Simülasyonlardan Bulgular

Hakan ALICI[1*]

[1]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Atom ve Molekül Fiziği Anabilim Dalı, 67100, Zonguldak

[1]https://orcid.org/ 0000-0001-5105-8331
*Sorumlu yazar: hakanalici@beun.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 17.09.2025
Kabul tarihi:21.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
hnRNPA1
PY-NLS
Amiloid fibril
N267S mutasyonu
Moleküler dinamik simülasyon

ÖZ

hnRNPA1 proteininin düşük komplekslik (LC) bölgesi, hem normal hücresel süreçlerde hem de nörodejeneratif hastalıkların patogenezinde kritik bir role sahiptir. Bu bölge içerisinde yer alan PY-NLS motifi, nükleer taşınımda karyoforin-β2 ile yüksek afiniteli etkileşimler kurmasının yanı sıra amiloid fibril çekirdeğinin oluşumuna da katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, PY-NLS dizisinin merkezinde bulunan N267 kalıntısındaki serin ikamesinin (N267S) fibril yapısının stabilitesi ve dinamikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel olarak çözümlenmiş fibril yapısı temel alınarak oluşturulan WT ve N267S modelleri, 500 ns süreli atomistik moleküler dinamik simülasyonlarına tabi tutulmuş ve sonuçlar RMSD, Rg, RMSF, protofilament-içi ve protofilamentler-arası mesafeler ile hidrojen bağı profilleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bulgular, N267S mutasyonunun fibril yapısını global ölçekte daha kompakt ve başlangıç formuna yakın bir konformasyonda koruduğunu ortaya koymuştur. WT formunda zamanla artan genlikli dalgalanmalar ve coil-2 bölgesinde belirgin esneklik gözlenirken, N267S mutantı daha düşük genlikli hareketlerle rijit bir mimari sergilemiştir. N268–N268 protofilamentler-arası arayüz mesafesi mutant formda WT'ye kıyasla daha dar aralıkta korunmuş, F263–F273 hattındaki aromatik π-π yığınlaşması ise her iki formda da kararlı biçimde sürdürülmüştür. Protofilament-içi mesafe analizleri, WT'de yeniden hizalanma ve daralma eğilimlerini gösterirken, mutant formda bu değişimlerin sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. Hidrojen bağı analizleri, özellikle protofilamentler arası bağların mutantta artış gösterdiğini ve arayüz stabilitesini güçlendirdiğini ortaya koymuştur. Tüm veriler bir arada değerlendirildiğinde, N267S mutasyonunun fibril yapısını daha sıkı paketlenmiş, daha stabil ve daha az esnek bir mimariye yönlendirdiği sonucuna varılmıştır. Bu bulgular, hnRNPA1 fibril oluşumunun moleküler düzeyde anlaşılmasına katkı sunmakta ve mutasyona bağlı nörodejeneratif süreçlerin aydınlatılmasında yeni ipuçları sağlamaktadır.

Effects of the N267S Mutation on Amyloid Fibril Stability and Dynamics in the hnRNPA1 PY-NLS Region: Insights from Molecular Dynamics Simulations

Research Article

Article History:
Received: 17.09.2025
Accepted: 21.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
hnRNPA1

ABSTRACT

The low-complexity (LC) domain of hnRNPA1 plays a critical role both in normal cellular processes and in the pathogenesis of neurodegenerative diseases. Within this region, the PY-NLS motif not only mediates high-affinity interactions with karyopherin-β2 during nuclear import but also contributes to amyloid fibril formation. In this study, we investigated the impact of a serine substitution at residue N267 (N267S) on the stability and dynamics of the

PY-NLS
Amyloid fibril
N267S mutation
Molecular dynamics simulation

hnRNPA1 fibril core. Wild-type (WT) and N267S models were subjected to 500-ns atomistic molecular dynamics simulations, and the results were analyzed using RMSD, Rg, RMSF, inter- and intra-protofilament distance measurements, and hydrogen bond profiles. The findings revealed that the N267S mutation maintains the fibril structure in a more compact and stable conformation, closer to its initial state. While WT fibrils exhibited larger amplitude fluctuations and increased flexibility in the coil-2 region, the N267S mutant displayed reduced mobility and a more rigid architecture. The N268–N268 inter-protofilament distance remained narrower in the mutant compared to WT, whereas the F263–F273 aromatic π-π stacking persisted robustly in both forms. Intra-protofilament distance analysis demonstrated compaction and rearrangements in WT fibrils, while the mutant maintained a more preserved geometry. Hydrogen bond analysis indicated that N267S increases inter-protofilament interactions, reinforcing the stability of the fibril interface. Collectively, these results suggest that the N267S mutation enhances fibril stability by restricting flexibility, tightening interfacial packing, and strengthening hydrogen bonding networks. This provides molecular-level insight into hnRNPA1 fibril formation and its potential contribution to mutation-driven neurodegenerative processes.

To Cite: Alıcı H. hnRNPA1 PY-NLS Bölgesinde N267S Mutasyonunun Amiloid Fibril Stabilitesi ve Dinamikleri Üzerine Etkileri: Moleküler Dinamik Simülasyonlardan Bulgular. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1550-1571.

1. Giriş

Heterojen nükleer ribonükleoprotein A1 (hnRNPA1), ökaryotik hücrelerde RNA metabolizmasının çeşitli basamaklarını düzenleyen, çok işlevli bir RNA bağlayıcı proteindir. Özellikle transkripsiyon sonrası süreçlerde, alternatif ekson birleştirilmesi, mRNA stabilitesi, çekirdekten sitoplazmaya RNA taşınımı gibi önemli roller üstlenir (Jean-Philippe ve ark., 2013; Bruun ve ark., 2016). Ayrıca, HnRNPA1, özellikle sinir sistemi hücrelerinde yüksek düzeyde bulunur ve bu özelliği nedeniyle nörodejeneratif hastalıklarda patolojik bir odak noktası olarak dikkat çekmektedir (Bruun ve ark., 2016; Clarke ve ark., 2021).

hnRNPA1 proteini 320 amino asit uzunluğunda olup, modüler bir organizasyona sahiptir (Gui ve ark., 2019; Martin ve ark., 2021). N-terminal bölgede yer alan iki RNA Tanıma Motifi (RRM1: 14–86; RRM2: 98–168), hnRNPA1'in hedef RNA dizilerine bağlanmasını sağlar (Martin ve ark., 2021). Bu motifleri takip eden ve C-terminalde konumlanan düşük kompleksiteli (Low-Complexity, LC) alan ise proteinin intrinsik olarak düzensiz (IDR) yapıda kalan kısmını oluşturur. Bu bölge, faz ayrışması (liquid-liquid phase separation), stres granülü oluşumu, protein–protein etkileşimleri ve patolojik agregasyon gibi süreçlerde temel işlev görür (Molliex ve ark., 2015; Gui ve ark., 2019).

LC bölgesi içinde, 263–289 pozisyonları arasında yer alan ve Prolin–Tirozin Nükleer Lokalizasyon Sinyali (PY-NLS) olarak adlandırılan kısa bir motif, hnRNPA1'in sitoplazmadan çekirdeğe taşınmasını sağlayan kritik bir sinyal bölgesidir (Chompoopong ve ark., 2022; Matsuura, 2023). Son yıllarda yapılan yapısal biyoloji çalışmalarında da, PY-NLS'nin yalnızca taşınımda değil, aynı zamanda amiloid fibril oluşumunda da doğrudan rol aldığı da rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2020; Garcia-Pardo ve Ventura, 2024). Özellikle Sun ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen kriyo-elektron mikroskobu (cryo-EM) tabanlı yapısal çözümleme, hnRNPA1 LC bölgesinin 251–295 arasındaki amino asitlerinden oluşan bir segmentin kompakt bir amiloid fibril çekirdeği oluşturduğunu ortaya koymuştur (PDB ID: 7BX7) (Sun

ve ark., 2020). Bu yapı, hnRNPA1'in hem normal fizyolojik fonksiyonlarda hem de potansiyel olarak patolojik agregasyon süreçlerinde nasıl rol oynadığını anlamamıza büyük katkı sağlamıştır (Lu ve ark., 2020). Bu fibril çekirdeği içerisinde yer alan PY-NLS dizisinin, Kapβ2 aracılığıyla taşınma yeteneğini sürdürürken aynı zamanda fibril organizasyonunun merkezinde konumlanması, bu motifin çift işlevli olduğunu açıkça göstermektedir (Gonzalez ve ark., 2023; Garcia-Pardo ve Ventura, 2024). Bu durum, PY-NLS'nin taşıma-fibrilleşme dengesi açısından kritik bir regülasyon noktası olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, bu bölgedeki amino asitlerde meydana gelen mutasyonlar, hem taşınım mekanizmasını hem de agregasyon eğilimini etkileyerek hücresel dengeyi bozabilir (Gonzalez ve ark., 2023; Bartolomé-Nafría ve ark., 2024).

Bu bağlamda, hnRNPA1 LC bölgesinde yer alan ve N267S ile tanımlanan bir mutasyon, son yıllarda özellikle nörodejeneratif hastalıklarla, örneğin amyotrofik lateral skleroz (ALS) ve multisistem proteinopati (MSP) ile ilişkilendirilmiştir (Gui ve ark., 2019; Beijer ve ark., 2021; Ferreon ve ark., 2022). Bu mutasyonun moleküler etkileri, hem taşınımda aksamaya hem de patolojik agregasyon eğiliminde artışa neden olabileceği yönünde değerlendirilmektedir (Sun ve ark., 2020; Li ve ark., 2021; Sharma ve ark., 2024). Ancak bu mutasyonun atomik düzeyde fibril mimarisini nasıl etkilediği henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır (Lu ve ark., 2020; Dang ve ark., 2021; Wang ve ark., 2022).

Bu noktada, moleküler dinamik (MD) simülasyonları, biyolojik makromoleküllerin dinamik özelliklerini anlamada son yıllarda güçlü bir araç haline gelmiştir (Straub ve Thirumalai, 2011; Liu ve ark., 2012; Zheng ve ark., 2019; Faidon Brotzakis ve ark., 2023; Topuz ve ark., 2025). Kristalografi ya da cryo-EM gibi teknikler yapının sabit halini sunarken, MD simülasyonları bu yapıların zaman içindeki dinamik davranışlarını örneğin fleksibilite, stabilite, etkileşim ağları ve yapısal geçişler gibi karakteristiklerini analiz etmeye olanak sağlar (Tarus ve ark., 2006; Alıcı, 2020a; Aranda-Garcia ve ark., 2022; Brooks ve ark., 2024). Özellikle amiloid fibril yapıları gibi çoklu protomer içeren, simetrik ve büyük komplekslerde, MD simülasyonları mutasyonların yapısal etkilerini değerlendirmede oldukça etkilidir (Tarus ve ark., 2006; Jang ve ark., 2010; Vitalis ve Pappu, 2011).

Tüm bu bilgiler ışığında, 7BX7 yapısını temel alarak gerçekleştirilecek MD simülasyonların, N267S mutasyonunun hnRNPA1 fibril yapısı üzerindeki atomik düzeydeki etkilerini incelemek için uygun bir strateji olabileceği söylenilebilir. Böylece, mutasyonun oluşturabileceği potansiyel konformasyonel değişiklikler, hidrojen bağı sayılarındaki farklılıklar, protofilament arayüzündeki bozulmalar ve genel kararlılık parametreleri hesaplamalı olarak ortaya konabilir. Ayrıca elde edilecek bu bilgiler, deneysel doğrulamalar için temel oluşturabilir ve hastalıkla ilişkili yapısal bozulmaların anlaşılmasına katkı sunar.

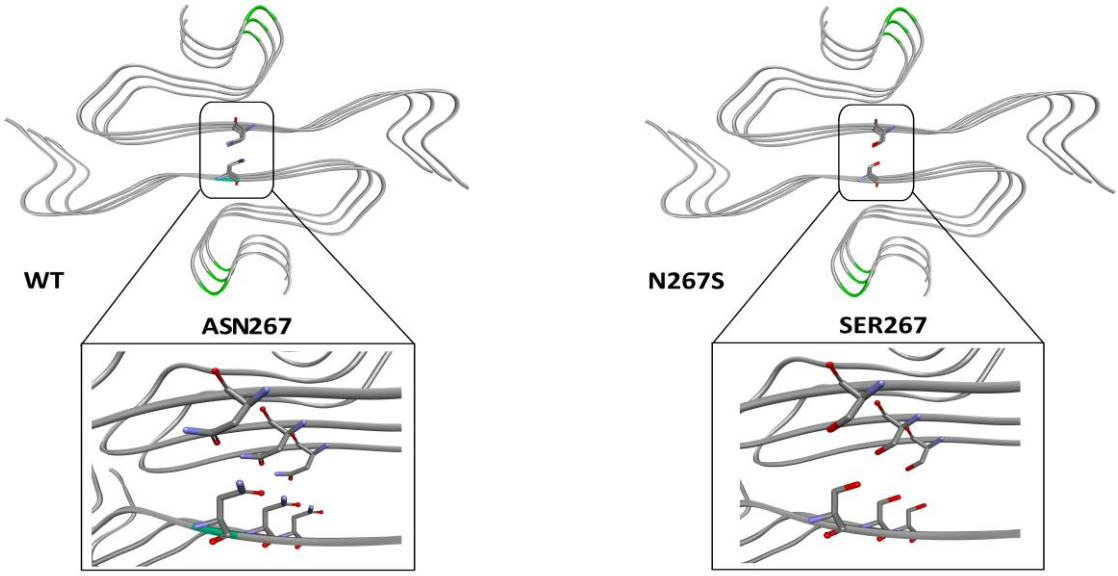
Bu bağlamda sunulan bu araştırmanın amacı, PY-NLS bölgesinde yer alan ve hastalıkla ilişkilendirilen N267S mutasyonunun hnRNPA1 fibril yapısına etkilerini MD simülasyonları aracılığıyla incelemektir. Bu doğrultuda, ilk olarak Cryo-EM ile çözülmüş olan 7BX7 yapısı referans alınarak hem wild-type hem de N267S mutant modeller oluşturuldu. Daha sonra her biri üç replikalı MD simülasyonları sonucunda elde edilen RMSD, RMSF, gyrasyon yarıçapı (Rg), hidrojen bağları, tuz köprüleri ve protofilamentler-

arası ve -içi filament mesafeler analiz edilerek karşılaştırıldı. Elde edilen bulgular, N267S mutasyonunun fibril kararlılığı üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymakta ve bu mutasyonun moleküler düzeyde nasıl patolojik etkiler doğurabileceğini açıklamaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Yapısal Modelleme ve Mutasyonun Tanımlanması

Bu çalışmada kullanılan başlangıç yapısı, hnRNPA1 proteininin düşük komplekslikli (LC) bölgesine ait, cryo-elektron mikroskobu (cryo-EM) ile çözülmüş ve Protein Veri Bankası'nda (PDB) 7BX7 koduyla kayıtlı olan amiloid fibril yapısıdır (Sun ve ark., 2020). Bu yapı, 251–295 arası amino asit kalıntılarını kapsayan LC domainine ait çift protofilamentli bir fibril çekirdeği içermektedir. İlgili yapıda her bir protofilamentte de üç monomer olmak üzere toplamda altı monomer yer almaktadır. Simülasyonda bu sistem wild-type (vahşi tip; WT) olarak adlandırılmıştır. N267S mutasyonu, Discovery Studio Visualizer (BIOVIA, 2025) yazılımı kullanılarak wild-type yapı üzerine in silico olarak uygulanmıştır. Mutasyon işlemi sırasında yalnızca hedef kalıntı değiştirilmiş ve yapının genel üç boyutlu organizasyonu korunmuştur. Şekil 1 de sunulan bu yapılar simülasyonlara başlangıç yapıları olarak ele alınmıştır. Aynı yazılım, görsel analizler ve tüm yapısal temsillerin hazırlanmasında da kullanılmıştır.



Şekil 1. hnRNPA1 LC bölgesi fibril çekirdeğinin WT ve N267S mutasyonu içeren başlangıç yapıları.

2.2. Moleküler Dinamik Simülasyonu

Bu çalışmada, hnRNPA1 proteininin düşük komplekslikli (LC) bölgesine ait amiloid fibril yapısının WT ve N267S mutant formları karşılaştırmalı olarak MD simülasyonları ile incelenmiştir. Simülasyonlar, GROMACS 2022.3 (Abraham ve ark., 2015) yazılımı ve CHARMM36m (Huang ve ark., 2017) kuvvet alanı kullanılarak yürütülmüştür. Hem wild-type hem de N267S mutant sistemler için üçer replikasyon oluşturularak toplam altı bağımsız simülasyon gerçekleştirilmiştir. Her bir simülasyon

500 nanosanise (ns) süreyle yürütülmüş ve böylece toplam simülasyon süresi 3 mikrosaniyeye (μs) ulaşmıştır. Üç tekrarlı yapı kullanılması, sistemin stokastik doğasından kaynaklanabilecek varyasyonların etkisini azaltmak ve elde edilen bulguların istatistiksel olarak güvenilirliğini artırmak amacıyla tercih edilmiştir (Alıcı, 2020b; Alıcı ve Demir, 2021a).

Her yapı, kübik bir simülasyon kutusu içerisine yerleştirilmiş ve yapının sınırları ile kutu kenarları arasında en az 1,2 nanometrelik boşluk kalacak şekilde TIP3P (Jorgensen ve ark., 1983) su modeli ile solvatlanmıştır. Sistemler, toplam elektrik yükü nötr olacak şekilde sodyum ve klor iyonları ile dengelenmiş ve iyonik kuvvet 0,15 M olarak ayarlanmıştır. Bu hazırlık işlemleri gmx solvate ve gmx genion araçları ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu yapıların enerji seviyeleri, steepest descent algoritması kullanılarak minimize edilmiş; maksimum kuvvet değeri 1000 kJ/mol/nm altına düşene kadar iterasyonlara devam edilmiştir. Enerji minimizasyonunun ardından her sistem, önce sabit hacimli ve sabit sıcaklıklı (NVT), ardından sabit basınçlı ve sıcaklıklı (NPT) ortamda 2 ns' lik simülasyonlarla dengeye getirilmiştir. NVT dengeleme 300 K sıcaklıkta ve V-rescale termostatı (Bussi ve ark., 2007) kullanılmıştır. NPT dengeleme aşamasında ise basınç 1 bar hedeflenmiş, Parrinello–Rahman barostatı (Parrinello ve Rahman, 1981) uygulanmıştır. Bu süreçte protein ağır atomlarına konum kısıtlamaları getirilmiş, su ve iyonlar serbest bırakılmıştır.

Dengelemelerin ardından her sistem için 500 ns süresince üretim (production) simülasyonları başlatılmıştır. Bu simülasyonlarda herhangi bir konum kısıtlaması uygulanmamış; sistem, izotermal-izobarik (NPT) koşullarda tam serbestlikte değerlendirilmiştir. Entegrasyon zaman adımı 2 femtosaniye (fs) olarak belirlenmiş, Van der Waals kesim mesafesi 1,2 nm olarak ayarlanmıştır. Uzun menzilli elektrostatik etkileşimler Particle Mesh Ewald (PME) (Darden ve ark., 1993) yöntemi ile hesaplanmış, komşuluk listesi her 20 adımda bir güncellenmiştir. Tüm simülasyonlar sırasında çıktı verileri .xtc, .gro, .edr ve .log formatlarında düzenli aralıklarla kaydedilmiştir.

Simülasyon sonrası yapısal analizler GROMACS araçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıların genel stabilitesini değerlendirmek amacıyla gmx rms aracı ile kök ortalama kare sapma (RMSD) değerleri hesaplanmış; kalıntı bazlı fleksibilite değerlendirmesi için gmx rmsf komutu ile kök ortalama kare fluktuasyon (RMSF) analizleri yapılmıştır. Yapıların kompaktlık durumları gmx gyrate komutu ile belirlenmiş ve zaman boyunca gyrasyon yarıçapı (Rg) değişimleri analiz edilmiştir. Moleküler etkileşimler bağlamında, hidrojen bağları gmx hbond aracıyla belirlenmiş ve burada bağ tanımı olarak donor–akseptör mesafesi < 0,35 nm ve bağ açısı > 135° kriterleri kullanılmıştır.

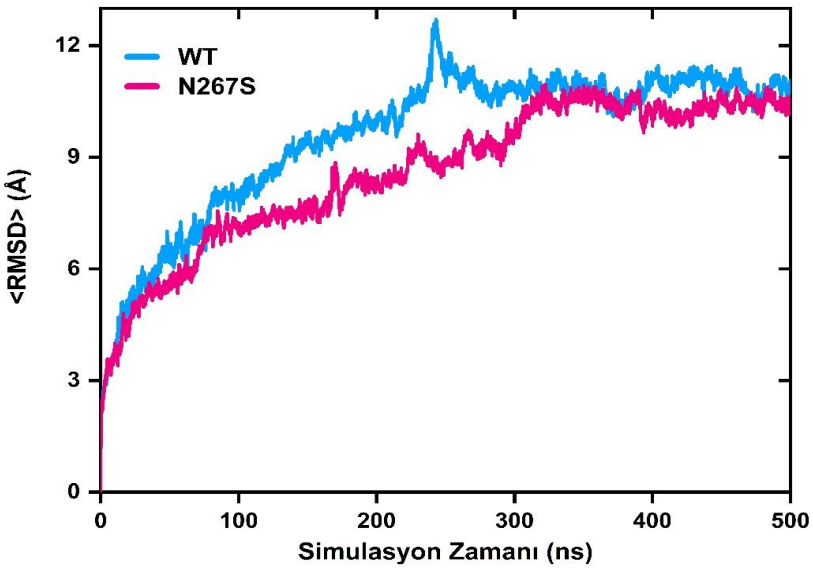
Yapının fibril doğasına uygun olarak, protofilamentler-içi ve -arası filament mesafe analizleri gerçekleştirilmiş; bu analizlerde zincirler arası ortalama minimum Cα–Cα atom mesafeleri zaman serisi şeklinde hesaplanmıştır. Bu ölçümler gmx distance komutu ile elde edilmiş ve hem zamana bağlı fluktuasyon hem de ortalama mesafeler WT ve mutant yapılar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sunulan metrik ölçümler her bir replikanın zaman serileri boyunca ortalamaları olarak verilmiştir. Ayrıca, görselleştirmeler Discovery Studio Visualizer (BIOVIA, 2025) ve VMD (Visual Molecular Dynamics) (Humphrey ve ark., 1996) yazılımlarıyla gerçekleştirilmiştir.

Modeller, hnRNPA1 fibrilinin cryo-EM yapısı (PDB ID: 7BX7) temel alınarak oluşturulmuştur. 267. pozisyondaki kalıntılar çubuk (stick) gösterimiyle vurgulanmıştır; WT formunda asparajin (Asn267), N267S mutasyonlu formda ise serin (Ser267) yer almaktadır. Alt panellerde, molekül dinamik simülasyonları öncesinde yan zincir kimyası ve potansiyel hidrojen bağı paternlerindeki farklılıkları vurgulayan yakın plan görünümler sunulmuştur.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yapısal Stabilite Üzerine Etkiler: RMSD, RMSF ve Rg Analizleri

RMSD analizleri, WT ve N267S mutant hnRNPA1 fibril modellerinin zaman içerisindeki global yapısal sapmalarını karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Simülasyonların başlangıcında her iki yapı da yaklaşık 2,5–3,0 Å seviyelerinde RMSD değerleri ile başlamış ve ilk 20 ns içerisinde hızlı bir artış göstermiştir. Bu hızlı yükseliş, enerji minimizasyonu ve dengeleme aşamalarının ardından sistemlerin moleküler dinamik koşullarına uyum sağladığını ve başlangıçtaki yapısal yeniden düzenlenmelerin gerçekleştiğini göstermektedir.



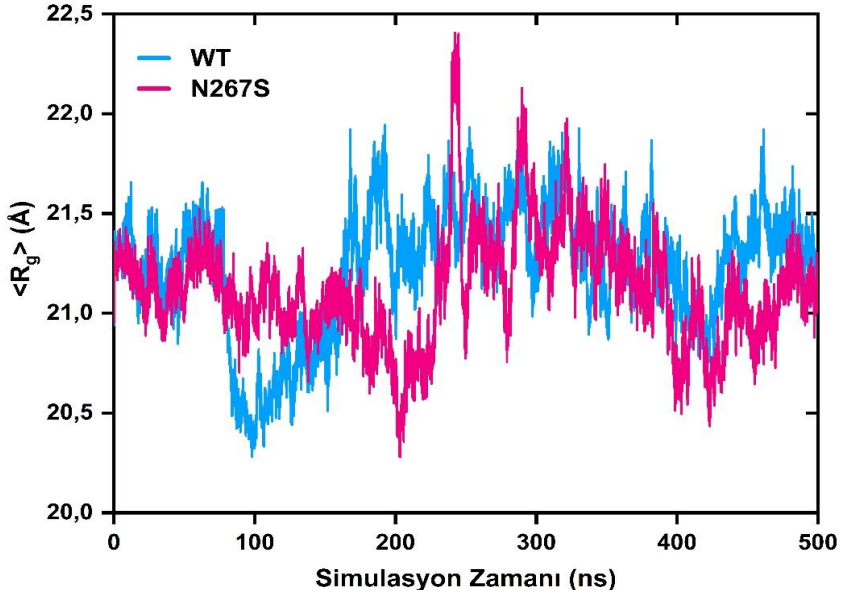
Şekil 2. hnRNPA1 LC bölgesi fibril çekirdeğinin WT ve N267S mutasyonlu formlarında simülasyonlar boyunca ortalama RMSD değişimi.

20–200 ns aralığında WT formunun RMSD değerleri, N267S mutanta kıyasla daha hızlı bir şekilde artış göstermiştir. WT yaklaşık 9 Å seviyelerine ulaşırken, N267S bu dönemde 8–8,5 Å civarında kalarak daha sınırlı bir yapısal sapma sergilemiştir. Bu durum, N267S mutasyonunun fibril yapısının global ölçekte daha kompakt bir konformasyonda kalmasını sağladığını ve WT formuna kıyasla daha düşük yapısal esneklik gösterdiğini düşündürmektedir.

200–300 ns aralığında WT formunda 250 ns civarında belirgin ve kısa süreli bir RMSD piki (~12,5 Å) gözlenmiştir. Ortalama eğride görülen bu yüksek pik, üç bağımsız replikadan birinde meydana gelen geçici ve yüksek amplitüdlü bir sapmanın etkisiyle ortaya çıkmış olabilir. Diğer replikalarda bu büyüklükte bir sapma görülmemesi, söz konusu dalgalanmanın tüm sistem için kalıcı bir kararsızlık

durumu değil, lokal ve geçici bir yeniden düzenlenme ile ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. N267S mutantı ise bu dönemde daha pürüzsüz ve dengeli bir RMSD profili çizmiş, yaklaşık 9 Å civarında kalarak WT'ye göre daha kararlı bir trend sergilemiştir.

Simülasyonun sonuna doğru (300–500 ns), her iki formun RMSD değerleri birbirine yakınsamış (~10–10,5 Å) olduğu gözlemlenmektedir. Bu plateau kesiminde RMSD genlikleri WT'de daha geniş ve yüksek değerlerde seyrederken, N267S'de daha düşük ortalama ve daha dar bir aralıkta kalmıştır. Bu durum, her iki formun da bu zaman diliminde genel anlamda dinamik dengeye ulaştığını, ancak WT formunun denge halinde dahi daha belirgin genlikte dalgalanmalar sergilediğini göstermektedir. N267S formu ise bu evrede daha kompakt ve sınırlı hareketlilik profili ile öne çıkmıştır.



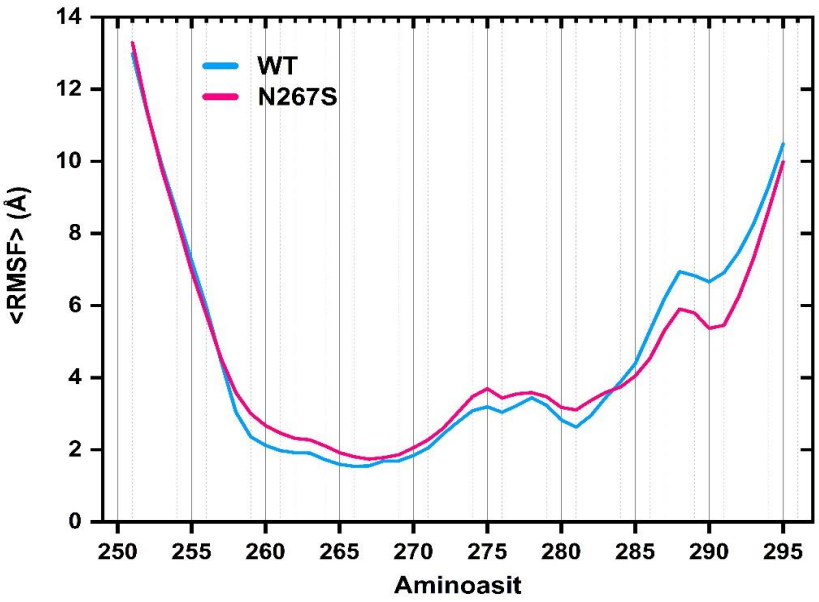
Şekil 3. hnRNPA1 LC bölgesi fibril çekirdeğinin WT ve N267S mutasyonlu formlarında simülasyonlar boyunca ortalama Rg değişimleri.

RMSD analizinde gözlenen dinamik denge durumu, fibrillerin genel kompaktlık düzeylerinin zaman içerisindeki değişimi ile birlikte değerlendirildiğinde daha bütüncül bir yapısal bakış sunabilir. Bu amaçla gerçekleştirilen Rg analizleri (Şekil 3), WT ve N267S formlarının simülasyon süresince kütle merkezine göre atomlarının ortalama dağılımını inceleyerek yapının sıkılaşma veya gevşeme eğilimlerini ortaya koymaktadır. Bu metrik, fibril çekirdeğinin kompaktlığını ve zamanla meydana gelen genişleme/daralma olaylarını yansıtması bakımından kritik önemdedir.

Başlangıçta fibrillerin doğal Rg değeri yaklaşık 20,9 Å civarındadır. Simülasyonların ilk anlarında her iki formda da Rg değerlerinde hafif bir artış gözlenmiş, bunu takiben WT ve N267S mutant formlarının her ikisi de ilk 50–60 ns içerisinde dalgalı bir profil çizerek başlangıç seviyelerine yakınsamıştır. Bu erken dönem dalgalanmaları, enerji minimizasyonu ve dengeleme aşamalarının ardından sistemlerin moleküler dinamik koşullarına adaptasyonu ile ilişkilendirilebilir ve RMSD analizinde gözlenen hızlı yükseliş evresi ile uyum göstermektedir.

50–300 ns aralığında WT formunda Rg değerleri kademeli olarak artış eğilimi göstererek 21,2–21,3 Å seviyelerine kadar ulaşmıştır. Bu artış, RMSD analizinde gözlenen daha yüksek genlikli sapmalarla uyumlu olup, WT fibrillerin orta dönemde daha gevşek bir paketlenme eğilimi gösterdiğini düşündürmektedir. N267S mutantı ise aynı zaman diliminde WT forma kıyasla daha istikrarlı bir Rg profili çizmiş ve genellikle 21,0 Å civarında seyrederek daha kompakt bir yapı korumuştur. Bu durum, mutasyonun protofilamentler arası etkileşimleri stabilize edici ve global genişlemeyi sınırlayıcı bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir.

300–500 ns aralığında her iki formun Rg değerleri büyük oranda sabitlenmiş ve yaklaşık 21,0–21,1 Å seviyelerinde dengelenmiştir. Bu durum, RMSD analizinde de gözlenen dinamik denge evresinin bir yansımasıdır. Ancak WT formunda bu dönem içerisinde bile kısa süreli ve düşük genlikli dalgalanmalar gözlenmiş, bu da protofilament arayüzünde geçici yeniden düzenlenmelerin devam ettiğine işaret etmektedir. N267S mutantı ise bu evrede daha düz bir profil sergileyerek kompaktlığını korumuş ve WT'ye kıyasla daha düşük genlikli dalgalanmalar göstermiştir. Genel olarak Rg sonuçları, mutasyonun fibril yapısında global ölçekte daha istikrarlı bir kompaktlık profili sağladığını, WT formunun ise orta ve geç evrede daha fazla konformasyonel esneklik sergilediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, LC-domain fibrillerinde tekli polar mutasyonların global stabiliteyi artırdığı benzer çalışmalarda da bildirilmiştir (Lu ve ark., 2020; Li ve ark., 2021).



Şekil 4. hnRNPA1 LC bölgesi fibril çekirdeğinin WT ve N267S mutasyonlu formlarında simülasyonlar boyunca ortalama RMSF değerlerinin aminoasit pozisyonlarına göre dağılımı.

Rg analizinde gözlenen global kompaktlık değişimlerinin ardından, bu yapısal davranışların hangi aminoasit bölgelerinde yoğunlaştığını belirlemek amacıyla RMSF analizi gerçekleştirilmiş ve kalıntı bazında esneklik profilleri Şekil 4'te sunulmuştur. Elde edilen profiller incelendiğinde hem WT hem de N267S formunda uç bölgeler olan 251–255 ve 290–295 aralıklarında yüksek RMSF değerleri dikkat

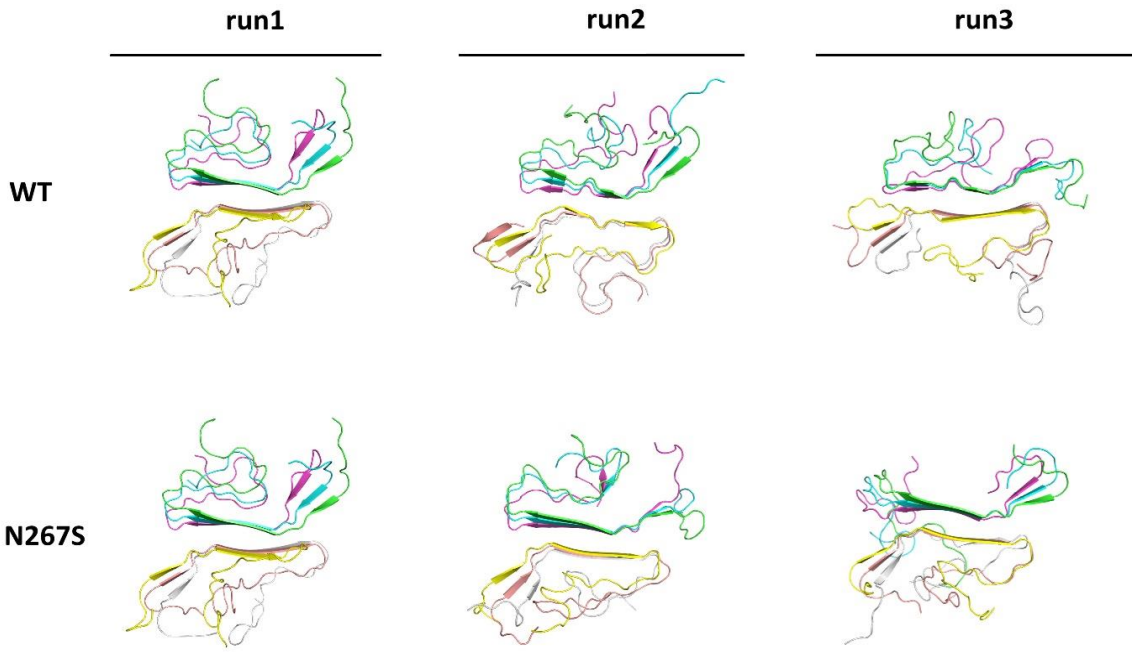
çekmektedir. Bu bölgelerde 5,0–13,0 Å aralığında değişen RMSF değerleri gözlenmiş olup, bu durum, uç bölgelerin kısıtlanmamış yapısı nedeniyle daha serbest salınım yapabilmesine bağlanabilir. Aynı zamanda, bu durum literatürdeki benzer fibril yapılarındaki trend ile uyumlu olup aslında beklenilen bir sonuç olduğu söylenilebilir (Alıcı, 2021a, 2021b; Alıcı ve Demir, 2021b). PY-NLS çekirdeğine karşılık gelen orta çekirdek bölgede ise belirgin bir çanak profili görülmektedir. Bu bölgedeki 257–260 aralığında RMSF, iki formda da hızlı bir şekilde düşerek yaklaşık 3–3,5 Å'dan 2–2,5 Å seviyelerine gerilemektedir. Minimum RMSF değeri 263–267 civarında olup WT için yaklaşık 1,8–2,0 Å, N267S için ise 1,9–2,1 Å aralığında ölçülmüştür. Bu düşüş, β-şerit bandının (yaklaşık 260–273) ve arayüz hizalanmasının kısıtlayıcı etkisini yansıtmaktadır.

Bununla birlikte, bu çanak profilinin üzerine binen küçük fakat tutarlı bir fark dikkat çekmektedir. 257–283 aralığının genelinde N267S mutantı, WT'ye kıyasla 0,1–0,3 Å kadar daha yüksek RMSF değerleri sergilemektedir. Bu fark, özellikle 257–260 ve 268–272 bölgelerinde belirgin olup mutasyon çevresinde lokal salınım genliğinin hafif şekilde arttığını göstermektedir. 272'den itibaren RMSF tekrar yükselerek 274–279 civarında her iki formda da 3,0–3,5 Å bandına ulaşmaktadır. 280–282 aralığında kısa süreli bir düşüş (~2,6–3,0 Å) görülse de bu durum her iki form için ortaktır.

283. aminoasit pozisyonundan itibaren tablo tersine dönmektedir. Coil-2 ve C-uç segmentini kapsayan 283–295 aralığında WT, N267S mutantına göre sistematik olarak daha yüksek RMSF değerlerine sahiptir. Özellikle 285–292 penceresinde WT yaklaşık 4–6,5 Å aralığında dalgalanırken N267S 3–5,5 Å bandında kalmaktadır. 289–291 civarında WT'nin RMSF değeri N267S'e kıyasla 0,5–1,0 Å daha yüksektir. En uç pozisyon olan 295'te ise her iki formda da RMSF yeniden zirve yapmakta, WT yaklaşık 10,3–10,6 Å, N267S ise 9,8–10,1 Å seviyelerinde ölçülmektedir.

Bu veriler, mutasyonun etkisinin tüm yapıya homojen olarak dağılmadığını, aksine belirli bölgelerde esnekliği artırırken, diğer bölgelerde azalttığını göstermektedir. Özellikle fibril çekirdeğinin N-terminal kısmına yakın olan β-şerit bölgesinde (257–283) esneklik artışı, coil-2 segmentinde (283–295) ise esneklik azalması dikkat çekmektedir. Bu iki yönlü davranış, N267S mutasyonunun yapısal esnekliği yeniden dağıtan lokal bir değişiklik yarattığını ortaya koymaktadır.

Rg ve RMSD ve RMSF verilerinin yorumlanmasını görsel olarak desteklemek amacıyla, 500 ns sonunda elde edilen WT ve N267S yapılarına ait anlık görüntüler Şekil 5'te sunulmuştur. Başlangıç yapısında (Şekil 1) düzenli bir β-şerit hizalanması ve kompakt steric-zipper mimarisi gözlenirken, simülasyonların sonunda WT ve N267S formlarında bu mimarinin farklı derecelerde korunduğu veya bozulduğu görülmektedir. WT formunda, özellikle coil bölgelerinin açıldığı, β-şeritler arasındaki hizalanmada belirgin kaymaların meydana geldiği ve bazı replikalarda fibril çekirdeğinin kısmi dağılmalar gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu durum, RMSD analizinde WT'nin daha yüksek sapmalar sergilemesiyle ve Rg eğrisinde gözlenen daha geniş genlikli dalgalanmalarla uyumlu görünmektedir. Ayrıca RMSF sonuçlarıyla desteklendiği üzere, WT formunda coil-2 bölgesinde (283–295) artan esneklik bu dağılmaların yapısal temelini oluşturabilir.



Şekil 5. WT (üstte) ve N267S mutantı (alt panel) hnRNPA1 fibril çekirdek yapılarının 500 ns simülasyon sonundaki temsili görünümleri. Zincirler farklı renklerle kodlanmıştır. Mutant formda β-şerit bandı hizasında açılma, coil-2 bölgesinde kompaktlaşma gözlenmektedir.

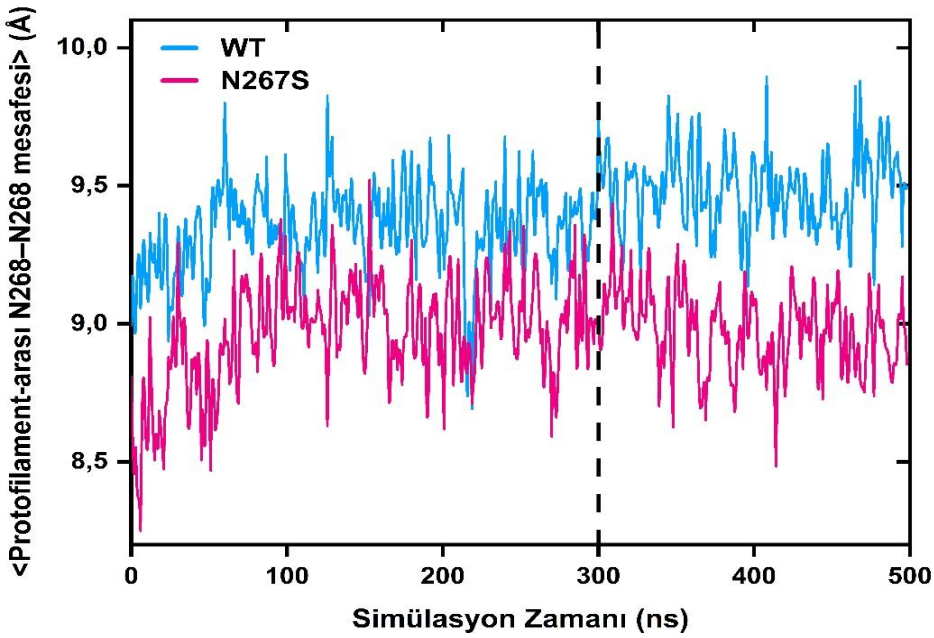
Buna karşılık N267S mutantında, üç replikada da fibril çekirdeği daha kompakt kalmış ve β-şeritler arasındaki hizalanma WT'ye kıyasla daha iyi korunmuştur. Mutant formun bu davranışı, RMSD eğrisinde gözlenen daha düşük ortalama sapmalar ve Rg değerlerindeki dar genlikli dalgalanmalarla uyumludur. RMSF analizinde ise mutantın WT'ye göre daha sınırlı dalgalanmalar göstermesi, coil bölgelerinin daha az açıldığını ve global yapının daha kararlı kaldığını desteklemektedir. Dolayısıyla görsel analiz, sayısal sonuçlarla birleştiğinde N267S mutasyonunun fibril çekirdeğinin global kararlılığını artırıcı bir etkisi olabileceğini düşündürmektedir.

3.2. Protofilamentler Arası Kalıntı Mesafeleri: Arayüz Geometrisi

Amiloid fibrillerin uzun dönem stabilitesi yalnızca zincir içi düzenlemeden değil, aynı zamanda iki protofilamentin arayüzündeki paketlenme derecesinden doğrudan etkilenmektedir. Bu nedenle protofilamentler-arası mesafelerin incelenmesi, N267S mutasyonunun arayüz mimarisine nasıl yansıdığını anlamak için kritik bir yaklaşımdır. Bu çalışmada iki tamamlayıcı metrik değerlendirilmiştir:

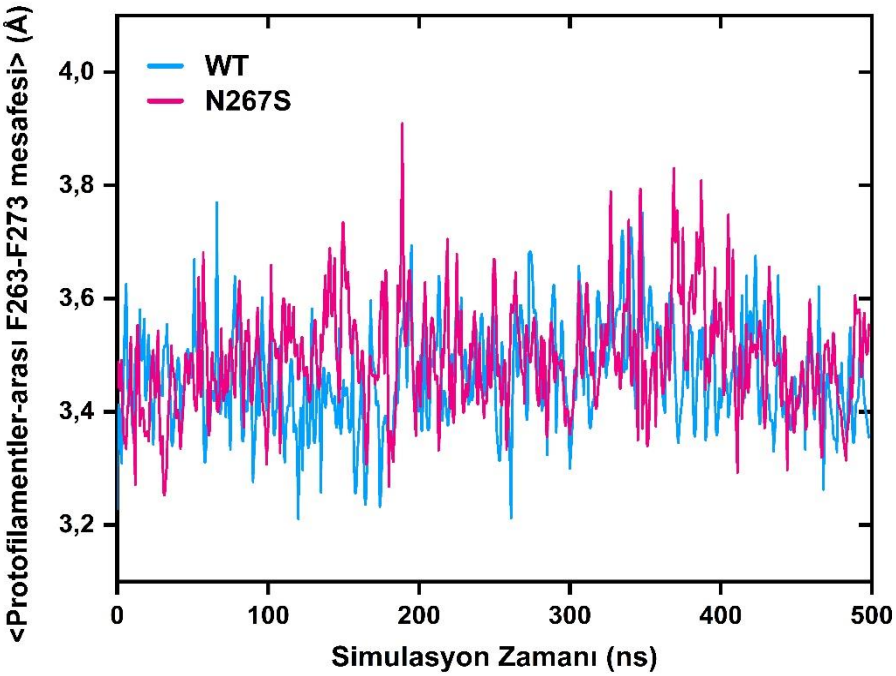
- N268–N268 protofilamentler-arası mesafesi, yani PY-NLS çekirdeğinin merkezinde konumlanan N268 kalıntılarının karşı protofilamentler arasındaki ortalama uzaklığı A–B–C ve D–E–F protofilament gruplarındaki 268. kalıntıların kütle merkezleri ortalama koordinatları arasındaki uzaklık).
- F263–F273 protofilamentler-arası mesafesi, arayüzün uç noktasında yer alan fenilalanin hattındaki π–π yığınlaşmayı temsil eden kritik aromatik kontak.

N268–N268 protofilamentler-arası mesafesi (Şekil 6) WT ve N267S arasında belirgin farklılıklar göstermiştir. Her iki form da başlangıçta benzer değerlerle (~9,0 Å) başlamış, ilk 50 ns içinde hızlı bir adaptasyon fazına girerek kararlı dalgalanmalar sergilemiştir. 50–300 ns aralığında WT formu 9,3–9,5 Å bandında gezinmiş ve zaman zaman daha geniş açılmalar göstermiştir. N267S mutantı ise daha kompakt bir profile sahip olmuş ve ~8,9–9,1 Å aralığında sabit kalmıştır. 300 ns sonrasında fark daha da belirginleşmiştir: WT formunda mesafeler 9,6–9,8 Å seviyelerine kadar çıkarken, N267S mutantı ~9,0 Å etrafında kararlı şekilde korunmuştur. Bu, WT'nin daha gevşek bir arayüz mimarisi sergilediğini, N267S'nin ise bu açıklığı daraltarak arayüzü daha sıkı tuttuğunu göstermektedir.



Şekil 6. hnRNPA1 fibril çekirdeğinde WT ve N267S mutant formları için N268–N268 protofilamentler-arası mesafe değişimleri.

F263–F273 protofilamentler-arası mesafesi (Şekil 7) ise steric-zipper'ın uç noktalarında bulunan fenilalaninlerin karşılıklı hizalanmasını yansıtmaktadır. Bu mesafe hem WT hem de N267S formunda oldukça dar bir aralıkta (~3,3–3,6 Å) korunmuştur. WT'de zaman zaman 3,7–3,8 Å'a çıkan kısa süreli açılmalar gözlenmiş, N267S'de ise bu çıkıntılar daha nadir ve düşük genlikte kalmıştır. Bu bulgu, mutasyonun fenilalanin hattını doğrudan bozmadığını, aksine WT'ye kıyasla daha dar bir dağılım aralığında tuttuğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 7. WT ve N267S mutant fibrillerinde F263–F273 protofilamentler-arası mesafe değişimleri.

İki metrik birlikte değerlendirildiğinde önemli bir ilişki ortaya çıkmaktadır. WT'de N268–N268 mesafesindeki genişlemeler, çoğu zaman uç fenilalanin kontağında da (F263–F273) kısa süreli açılmalarla paralellik göstermektedir. Bu durum, WT fibrillerinde hem merkez hat hem uç bölgelerde eş zamanlı "nefes alma" hareketlerinin gerçekleştiğini düşündürmektedir. N267S mutantında ise merkez hattın (N268) daha dar kalması, uç fenilalaninlerin de daha istikrarlı korunmasına yol açmıştır. Böylece mutasyon, arayüzün hem merkezini hem de uç noktalarını kapsayan daha bütüncül bir sıkılaşmaya sebep olmuştur.

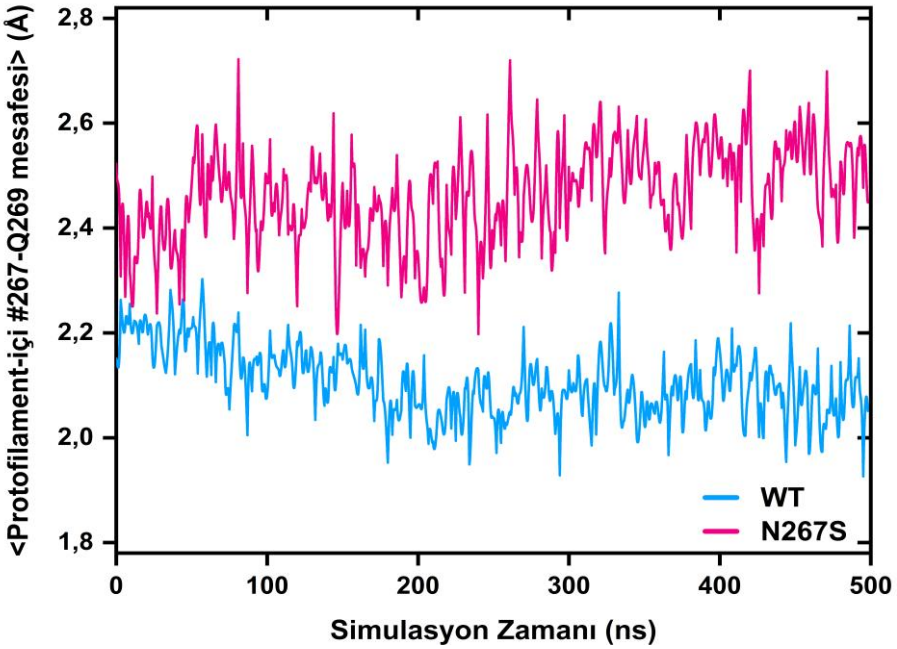
Sonuç olarak, N268–N268 analizi arayüzün merkezindeki hizalanma farklılıklarını, F263–F273 ölçümü ise uç fenilalaninlerin kilitlenme derecesini ortaya koymaktadır. WT formu her iki ölçütte de daha geniş dalgalanmalar sergilerken, N267S mutantı merkezde ve uç bölgede daha dar bir aralıkta kalmış ve arayüzün kompaktlığını pekiştirmiştir. Bu bulgular, 263–273 hattının fibril arayüzünde kritik bir sınır bölge oluşturduğunu ve mutasyonun bu sınırları da stabilize ederek uzun dönem yapısal istikrar sağladığını göstermektedir.

N267S mutasyonunun protofilament arayüzünü sıkılaştırıcı etkisi, yalnızca fibril stabilitesi açısından değil, hnRNPA1'in hücresel bağlamdaki faz davranışı açısından da önem taşımaktadır. hnRNPA1, LC domain aracılığıyla sıvı-sıvı faz ayrışmasına (LLPS) katılarak stres granülü oluşumunda merkezi bir rol oynamaktadır. Son yıllarda LC domain mutasyonlarının, koruyucu faz ayrışmasından patolojik fibrilizasyona geçişi hızlandırabildiği gösterilmiştir. Bu çalışmada N267S mutasyonunun inter-protofilament hidrojen bağlarını belirgin biçimde artırması ve arayüz geometrisini daha kompakt hâle getirmesi, söz konusu mutasyonun sıvı benzeri kondensatlardan daha katı fibril yapılara geçişi termodinamik olarak kolaylaştırabileceğini düşündürmektedir. Bu bağlamda N267S, stres granüllerinin

dinamik ve geri dönüşümlü yapısından ziyade, daha kalıcı ve çözünmeyen amiloid benzeri agregat oluşumunu teşvik eden bir yönelim sergileyebilir. Bu eğilim, hnRNPA1 ile ilişkili nörodejeneratif fenotiplerin moleküler temelini açıklamada önemli bir bağlayıcı mekanizma sunabilir.

3.3. Protofilament İçi Kalıntı Mesafeleri: Lokal Geometrik Yeniden Düzenlenmeler

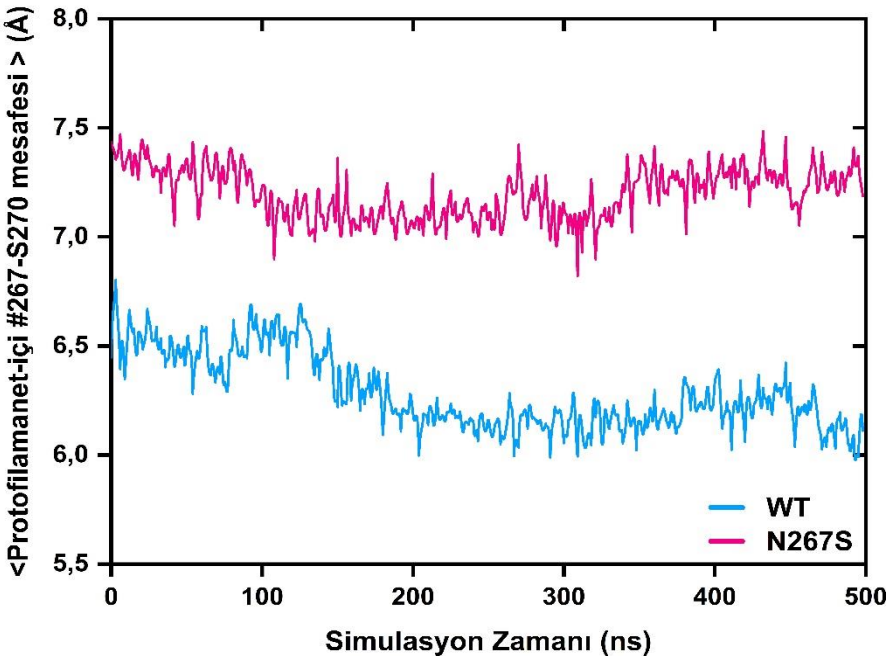
Arayüzde gözlenen bu farklılaşmaların zincir içi geometrilere nasıl yansıdığını anlamak için, protofilament-içi mesafeler incelenmiştir. Özellikle N267 kalıntısının hemen komşuluğunda yer alan Q269 ve S270 ile olan mesafeler, zincirlerin lokal hizalanmasını temsil eden kritik göstergeler olarak seçilmiştir. Bu seçim aynı zamanda yapısal gözlemlerden de beslenmektedir: 500 ns sonunda elde edilen yapısal görsellerde, WT formunda iplikçiklerin birbirine yaklaşarak daha sıkı bir yerleşim kazandığı, N267S mutantında ise başlangıç yapısına daha yakın bir düzenin korunduğu görülmüştür. Bu nedenle, söz konusu lokal mesafelerin zamana bağlı değişimleri analiz edilmiştir.



Şekil 8. Protofilament-içi N267–Q269 kalıntıları arasındaki mesafe değişimleri.

N267–Q269 mesafesi (Şekil 8) zaman pencerelerine ayrılarak incelendiğinde, WT ve N267S formlarında farklı dinamikler ortaya çıkmıştır. Simülasyonların başlangıcında (~0–50 ns) her iki form da benzer değerlerle başlamış, WT ~2,2 Å civarında, N267S ise ~2,3–2,4 Å aralığında seyretmiştir. Bu dönem, sistemlerin enerji minimizasyonu sonrası dinamik koşullara uyum sağladığı geçici adaptasyon fazı ile uyumludur. 50–200 ns aralığında WT formunda mesafenin giderek daraldığı ve ortalama ~2,0–2,1 Å seviyesinde sabitlendiği görülmüştür. N267S mutantı ise bu dönemde daha gevşek kalmış (~2,3–2,5 Å) ve yüksek genlikli dalgalanmalar sergilemiştir. Özellikle WT'de daralmanın hızlı gerçekleşmesi, coil-2 esnekliğinin zincir hizalanmasına katkısını yansıtırken, mutantta bu tür bir yeniden düzenlenmenin başlamadığı anlaşılmaktadır. 200–500 ns aralığında WT formundaki mesafe değerleri dar bantta korunmuş, mutasyonda ise daha geniş ve düzensiz dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu tablo,

WT'de lokal sıkılaşmanın kalıcı hale geldiğini, mutantta ise gevşek yapının sürdüğünü açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Protofilament-içi N267–S270 kalıntıları arasındaki mesafe değişimleri.

N267–S270 mesafesi (Şekil 9) daha uzun ölçekli yeniden düzenlenmeleri göstermesi açısından önemlidir. Simülasyonların başında (~0–50 ns) her iki form da ~6,5–7,0 Å bandında bulunmuş, ancak 100 ns'den itibaren WT formunda mesafe düzenli olarak daralmaya başlamış ve 300 ns civarında ~6,0 Å değerine oturmuştur. Bu daralma, fibril çekirdeğinin zamanla daha kompakt hale geldiğini göstermektedir. N267S mutantı ise 500 ns boyunca 7,2–7,4 Å bandında kalmış, başlangıçtaki daha geniş mesafeyi korumuştur. Bu durum, mutasyonun coil-2 esnekliğini sınırlayarak zincirlerin yeniden hizalanmasını engellediğini desteklemektedir. Özellikle WT'de 250–500 ns aralığında görülen istikrarlı düşüş, 500 ns sonundaki yapısal görsellerde izlenen iplikçik yakınlaşmasıyla uyumludur.

Elde edilen bu sonuçlar, WT formunda kısa mesafeli (N267–Q269) sıkılaşmalar ile başlayan sürecin zamanla uzun mesafeli (N267–S270) yeniden hizalanmalara evrildiğini, N267S mutantında ise her iki ölçekte de başlangıca yakın ve gevşek düzenin korunduğunu göstermektedir. Böylece WT'de coil-2 bölgesinin sağladığı esneklik, zincirlerin daha kompakt bir geometriye oturmasına aracılık etmiş; mutant formda ise bu esneklik sınırlanarak yeniden paketlenme potansiyeli zayıflamıştır. Bu farklılık, ilerleyen aşamalarda hidrojen bağı ağının yeniden kurulması açısından kritik bir zemin hazırlamaktadır.

3.4. Hidrojen Bağ Analizi: Stabiliteyi Belirleyen Yeniden-Dağılım

Hidrojen bağları, amiloid fibrillerin hem zincir içi düzenini hem de protofilamentler arası paketlenmesini belirleyen temel etkileşimlerden biridir. Bu nedenle WT ve N267S mutantında hidrojen bağlarının sayısı ve dağılımı ayrıntılı olarak incelenmiştir (Tablo 1 ve 2). Analizler, toplam bağ

sayılarında büyük farklar olmamasına karşın, bağların mekânsal dağılımında mutasyonun belirgin bir kaymaya yol açtığını göstermektedir.

Tablo 1. WT ve N267S mutasyonunda toplam hidrojen bağlarının dağılımı

Sistem	Run	Hidrojen bağ sayıları			
		Protofilament 1-içi	Protofilament 2-içi	Protofilamentler-arası	Toplam
WT	1	74,72[a] (6,26)[b]	82,22 (5,33)	9,94 (2,62)	166,88 (9,20)
	2	78,55 (5,68)	81,76 (5,72)	8,62 (2,34)	168,93 (8,65)
	3	83,87 (5,50)	76,19 (5,52)	9,53 (2,98)	169,61 (7,89)
	Ortalama	79,05	80,06	9,36	168,47
N267S	1	75,68 (5,41)	77,39 (5,88)	11,90 (2,17)	164,97 (8,80)
	2	82,97 (5,53)	74,09 (6,30)	12,04 (2,16)	169,09 (9,30)
	3	72,64 (8,04)	78,80 (5,60)	14,19 (2,89)	165,64 (9,94)
	Ortalama	77,10	76,76	12,71	166,57

[a] Ortalama değerler, [b] Standart Sapma

Tablo 1'de görüldüğü üzere WT'de toplam hidrojen bağı ortalama 168,47 iken, N267S mutantında bu değer 166,57'ye gerilemiştir (≈ −1,9 bağ; ~%1). Ancak bu küçük düşüşün arkasında niteliksel bir değişim vardır: WT'de bağların büyük bölümü protofilament-içi katkılardan gelirken (sheet-1: 79,05, sheet-2: 80,06), N267S'de bu değerler sırasıyla 77,10 ve 76,76'ya düşmektedir. Buna karşılık protofilamentler-arası bağlar WT'de ortalama 9,36 iken, N267S'de 12,71'e çıkarak ≈ +%36'lık bir artış göstermektedir. Böylece mutasyon, toplam bağ sayısında belirgin bir artış yaratmasa da, bağların protofilamentler-içinden protofilamentler-arasına doğru yeniden dağılımına neden olmaktadır. protofilamentler-içi bağlardaki ≈ −5 bağlık kayıp, arayüzde ≈ +3,3 bağ artışıyla dengelenmiştir. Sonuç olarak WT'de protofilamentler-arası bağların toplam bağlar içindeki payı ~%5,6 iken, N267S'de bu oran ~%7,6'ya yükselmektedir.

Tablo 2. WT ve N267S mutasyonunda protofilamentler-arası hidrojen bağlarının dağılımı

Sistem	Run	Protofilamentler-arası hidrojen bağ sayıları			
		Y-Y	A-Y	A-A	Toplam
WT	1	1,50[a] (1,21)[b]	0,25 (0,54)	8,19 (2,12)	9,94 (2,62)
	2	2,30 (1,30)	0,02 (0,13)	6,30 (2,29)	8,62 (2,34)
	3	2,14 (1,39)	0,64 (0,77)	6,75 (2,15)	9,53 (2,98)
	Ortalama	79,05	80,06	9,36	9,36
N267S	1	2,49 (1,49)	0,01 (0,01)	9,40 (1,76)	11,90 (2,17)
	2	2,18 (1,61)	0,04 (0,18)	9,82 (1,92)	12,04 (2,16)
	3	3,24 (1,66)	0,62 (0,83)	10,33 (2,22)	14,19 (2,89)
	Ortalama	77,10	76,76	12,71	12,71

[a] Ortalama değerler, [b] Standart Sapma

Arayüz bağlarının alt kategorilerine inildiğinde (Tablo 2), artışın kaynağı daha net ortaya çıkmaktadır. WT'de protofilament 1' deki yan zincir- yan zincir (Y-Y) bağları ortalama 1,98, protofilament 2' deki Y-Y bağları 7,08, A-Y bağları ise yalnızca 0,30 civarında seyretmektedir. N267S'de protofilament 1' deki Y-Y bağları 2,64'e, protofilament 2' deki Y-Y bağları ise 9,85'e çıkarak yaklaşık +%33 ve +%39 artış göstermiştir. Buna karşın ana zincir -yan zincir (A-Y) bağları WT'dekiyle aynı seviyede kalmıştır. Dolayısıyla mutasyonun arayüzde sağladığı ek stabilizasyonun büyük ölçüde karşı β-şeritler arasındaki düzenli Y-Y temaslarının artışından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu sonuç, N→S değişiminin doğrudan yeni bağlar oluşturmasından çok, arayüzdeki zincirlerin geometri ve hizalanmasının yeniden düzenlenmesiyle açıklanabilir.

Bu hidrojen bağı mimarisi, önceki yapısal ve dinamik gözlemlerle de doğrudan uyumludur. N268–N268 protofilamentler-arası mesafe analizinde WT formunun daha geniş dalgalanmalar ve 9,6–9,8 Å seviyelerine kadar çıkabilen açılmalar gösterdiği, N267S'nin ise ~9,0 Å civarında daha dar bir aralıkta sabit kaldığı bulunmuştu. Bu daralma, protofilamentler-arası hidrojen bağlarının artışı ile bire bir ilişkilidir; arayüzdeki daha güçlü H-bağ ağı, zincirlerin nefes alma hareketlerini sınırlayarak daha kompakt bir paketlenme sağlar. Buna karşın F263–F273 hattındaki mesafenin her iki sistemde de ~3,3–3,6 Å bandında korunması, π–π yığınlaşmanın mutasyondan bağımsız olarak istikrarlı kaldığını göstermektedir. Böylece mutasyon, aromatik çekirdeği bozmadan arayüz bağlarını güçlendirmiş olmaktadır.

Replika düzeyinde de tutarlı bir desen gözlenmiştir. N267S'nin her bir koşulunda protofilamentler-arası bağ sayıları (11,90–14,19), WT'nin değerlerinden (8,62–9,94) daha yüksek bulunmuştur. Örneğin WT-run2, toplam bağ sayısında en yüksek değeri (168,93) verirken, protofilamentler-arası bağlarda en düşük değere (8,62) sahiptir; bu, WT'de stabilitenin büyük ölçüde protofilament-içi bağlara dayandığını göstermektedir. Tersine N267S-run3, toplam bağlarda orta sıralarda kalsa da (165,64), en yüksek protofilamentler-arası bağ sayısını (14,19) vererek mutasyonun farklı bir stabilizasyon stratejisi izlediğini doğrulamaktadır.

Hidrojen bağ analizleri N267S mutasyonunun fibril stabilitesini artırıcı etkisini sayısal olarak ortaya koymaktadır. WT formunda bağlar ağırlıklı olarak protofilament-içi düzeyinde kümelenirken, N267S'de arayüz bağlarının payı anlamlı biçimde artmıştır. Bu, mutasyonun fibril yapısını daha kompakt, genlikleri sınırlanmış ve arayüz-ağırlıklı bir dengeye oturttuğunu göstermektedir. Bu bulgular, N267S mutasyonunun ayırt edici etkisinin bağların sayısal artışından ziyade, protofilament-içi merkezli bir ağdan protofilamentler-arası odaklı bir sıkılaşmaya doğru gerçekleşen mekânsal yeniden-örgütlenme olduğunu göstermektedir.

Asparajin (Asn) yan zinciri çift yönlü hidrojen bağı donör/akseptör özellik gösterebilirken, serin (Ser) daha kısa yan zinciri ve tek hidroksil grubu sayesinde daha yönlü ve sınırlandırılmış bir hidrojen bağı geometrisi sunmaktadır. N267→S dönüşümü, doğrudan bağ sayısını dramatik biçimde artırmaktan ziyade, arayüzde daha düzenli ve kalıcı hidrojen bağı ağlarının oluşmasına olanak tanımıştır.

Protofilamentler-arası Y-Y temaslarının artışı ve bağların daha dar bir dağılım göstermesi, bu yönlü hidroksil grubunun arayüz hizalanmasını geometrik olarak stabilize ettiğini düşündürmektedir
N267S mutasyonuna benzer şekilde, hnRNPA2 ve TDP-43 LC domainlerinde tanımlanan tekli polar mutasyonların da protofilament arayüzünü güçlendirerek fibril stabilitesini artırdığı daha önce rapor edilmiştir (Lu ve ark., 2020; Li ve ark., 2021; Bartolomé-Nafría ve ark., 2024). Bu çalışmalarla tutarlı olarak, mevcut çalışmada da N267S mutasyonunun fibril paketlenmesini daha dar, düzenli ve termodinamik olarak daha stabilize bir geometriye zorladığı gösterilmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada hnRNPA1 proteininin düşük komplekslik (LC) bölgesinde bulunan N267S mutasyonunun, fibril çekirdeğinin yapısal ve dinamik özellikleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, mutasyonun global konformasyon, lokal hizalanma, protofilamentler arası etkileşimler ve hidrojen bağı ağları üzerindeki farklılaştırıcı rolünü açık bir biçimde ortaya koymuştur.
İlk olarak küresel ölçekte yapılan RMSD ve Rg analizleri, WT formunda zaman içerisinde daha yüksek genlikli dalgalanmalar ve belirgin yeniden düzenlenmeler gerçekleştiğini, buna karşılık N267S mutantının daha dar aralıklarda seyreden ve başlangıç yapısına daha yakın bir kompaktlığı koruduğunu göstermiştir. Bu gözlemler, mutasyonun fibril mimarisini daha kararlı bir çerçevede tuttuğunu işaret etmektedir. RMSF sonuçları da bu bulgularla tutarlıdır: WT formunda özellikle coil-2 bölgesinde artan hareketlilik, yapının esnekliğini artırırken, mutant formda bu hareketlilik sınırlandırılmış ve coil-2 ile steric zipper arasındaki bağlantılar daha stabil bir şekilde korunmuştur.
Arayüz düzeyindeki analizler, mutasyonun fibril stabilitesine etkisini daha net biçimde ortaya koymuştur. N268–N268 mesafelerinin zaman içindeki değişimleri, WT formunda geniş genlikli açılmalar ve dalgalanmalarla daha gevşek bir hizalanma eğilimi olduğunu göstermiştir. Buna karşın N267S mutantı, bu mesafeleri daha dar aralıkta ve sabit bir düzeyde koruyarak protofilamentler arasındaki hizalanmayı sıkılaştırmıştır. F263–F273 mesafe analizi, fenilalanin hattındaki π-π yığınlaşmasının hem WT hem de mutant formda oldukça korunmuş olduğunu ortaya koymuş, mutasyonun bu çekirdek aromatik etkileşimleri doğrudan bozmadığını, ancak arayüz kompaktlığını artırarak genel stabiliteyi desteklediğini göstermiştir.
Protofilament-içi mesafe analizleri, mutasyonun lokal geometri üzerindeki etkilerini ayrıntılandırmıştır. WT formunda N267 komşuluğundaki Q269 ve S270 ile olan mesafelerde belirgin daralmalar gözlenmiş, bu da coil-2 esnekliği ile ilişkili yeniden hizalanmaları yansıtmıştır. Buna karşılık N267S mutantında bu yeniden düzenlenmelerin sınırlı kaldığı, zincir içi mesafelerin başlangıçtaki değerlerine daha yakın seyrettiği tespit edilmiştir. Böylece mutasyonun zincir içi düzenlemeleri kısıtladığı ve yapının daha rijit bir çerçevede korunduğu sonucuna ulaşılmıştır.
Hidrojen bağı analizleri, mutasyonun etkisini moleküler düzeyde destekleyen en güçlü bulgulardan birini sunmuştur. WT formunda hidrojen bağı sayıları daha düşük ve zamanla dalgalanmalara açıkken,

N267S mutantında özellikle protofilamentler arası hidrojen bağlarının belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bu artış, mutasyonun arayüz paketlenmesini kuvvetlendirdiğini ve fibril stabilitesini artırıcı yönde katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Tüm bu bulgular bir arada değerlendirildiğinde, N267S mutasyonunun hnRNPA1 fibril çekirdeğini hem global hem de lokal ölçekte daha kompakt, daha az esnek ve daha stabil bir mimariye yönlendirdiği ortaya konmuştur. Bu durum, mutasyonun amiloid fibrillerin uzun dönem stabilitesini artırıcı bir etki taşıyabileceğini düşündürmektedir. Özellikle steric-zipper mimarisinin korunması ve ek olarak arayüz hidrojen bağlarının kuvvetlenmesi, N267S'in fibril formasyonu ve olası patolojik birikim süreçlerinde kritik bir rol üstlenebileceğini işaret etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma N267S mutasyonunun hnRNPA1 fibril yapısı üzerindeki atomistik etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koyarak, amiloid oluşum mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasına önemli katkılar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, N267S mutasyonunun protofilament paketlenmesini belirgin biçimde sıkılaştırdığını, protofilamentler-arası hidrojen bağı ağlarını güçlendirdiğini ve fibril çekirdeğini daha kompakt bir geometriye yönlendirdiğini açıkça göstermektedir. hnRNPA1'in stres granülü dinamikleri ve RNA metabolizmasındaki merkezi rolü dikkate alındığında, bu düzeyde bir yapısal stabilizasyonun geri dönüşümlü faz ayrışmasından patolojik ve kalıcı fibril oluşumuna geçişi önemli ölçüde kolaylaştırabileceği anlaşılmaktadır. Bu yönüyle N267S mutasyonu, hnRNPA1 ile ilişkili ALS ve çoklu sistem proteinopatisi gibi nörodejeneratif hastalıkların moleküler kökenini açıklamada yalnızca yardımcı bir faktör değil, doğrudan yapısal bir tetikleyici olarak değerlendirilebilir. Elde edilen bu atomistik veriler, gelecekte yapılacak biyofiziksel ve hücresel çalışmalar için güçlü bir yapısal çerçeve sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2025-22794455-01 nolu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Abraham MJ., Murtola T., Schulz R., Páll S., Smith JC., Hess B., Lindahl E. GROMACS: high performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers. SoftwareX 2015; 1(2): 19-25.

Alıcı H. In silico analysis: structural insights about inter-protofilaments interactions for α-synuclein (50–57) fibrils and its familial mutation. Molecular Simulation 2020; 46(12): 867-878.

Alıcı H. Structural analyses and force fields comparison for NACore (68–78) and SubNACore (69–77) fibril segments of Parkinson's disease. Journal of Molecular Modeling 2020; 26(6): 132.

Alıcı H. Alpha-synuclein' in PreNAC(46-56) fibril bölütünün moleküler dinamik simülasyon yöntemi ile konformasyonel değerlendirmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi 2021; 24(1): 11-21.

Alıcı H. HnRNPA2'in LC(286-291) domain fibrili ve onun D290V mutasyonu hakkında teorik bir çalışma. Journal of the Institute of Science and Technology 2021; 11(2): 1080-1089.

Alıcı H., Demir K. Investigation of the stability and the helix-tail interaction of sCT and its various charged mutants based on comparative molecular dynamics simulations. Chemical Physics 2021; 542: 111057.

Alıcı H., Demir K. Parkinson hastalığı ile İlişkilendirilen PreNAC fibril kesiti ve onun A53C, A53E, A53G, A53T, A53V mutasyonlarının yapısal kararlılığın araştırılması. Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science 2021; 16(1): 66-76.

Aranda-Garcia D., Torrens-Fontanals M., Medel-Lacruz B., Lopez-Balastegui M., Peralta-García A., Dieguez-Eceolaza M., Morales-Pastor A., Sotillo-Núñez D., Abbondandolo D., Stępniewski TM., Selent J. Simulating time-resolved dynamics of biomolecular systems. In: Elsevier, Oxford 2022.

Bartolomé-Nafría A., García-Pardo J., Ventura S. Mutations in human prion-like domains: pathogenic but not always amyloidogenic. Prion 2024; 18(1): 28-39.

Beijer D., Kim HJ., Guo L., O'Donovan K., Mademan I., Deconinck T., Van Schil K., Fare CM., Drake LE., Ford AF., Kochański A., Kabzińska D., Dubuisson N., Van den Bergh P., Voermans NC., Lemmers RJ., van der Maarel SM., Bonner D., Sampson JB., Wheeler MT., Mehrabyan A., Palmer S., De Jonghe P., Shorter J., Taylor JP., Baets J. Characterization of HNRNPA1 mutations defines diversity in pathogenic mechanisms and clinical presentation. JCI Insight 2021; 6(14): e148363.

BIOVIA. (2025). Discovery Studio Visualizer (Version 2025) [Bilgisayar yazılımı]. Dassault Systèmes. https://www.3ds.com/products/biovia/discovery-studio/

Brooks CL., MacKerell AD., Post CB., Nilsson L. Biomolecular dynamics in the 21st century. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects 2024; 1868(2): 130534.

Bruun GH., Doktor TK., Borch-Jensen J., Masuda A., Krainer AR., Ohno K., Andresen BS. Global identification of HNRNP A1 binding sites for SSO-based splicing modulation. BMC Biology 2016; 14(1): 54.

Bussi G., Donadio D., Parrinello M. Canonical sampling through velocity rescaling. The Journal of Chemical Physics 2007; 126(1): 014101.

Chompoopong P., Milone M., Niu Z., Cui G., Mer G., Liewluck T. A novel missense HNRNPA1 variant in the PY-NLS domain in a patient with late-onset distal myopathy. Neuromuscular Disorders 2022; 32(6): 521-526.

Clarke JP., Thibault PA., Salapa HE., Levin MC. A comprehensive analysis of the role of HNRNP A1 function and dysfunction in the pathogenesis of neurodegenerative disease. Frontiers in Molecular Biosciences 2021; 8: 659610.

Dang M., Li Y., Song J. Tethering-induced destabilization and ATP-binding for tandem RRM domains of ALS-causing TDP-43 and HNRNPA1. Scientific Reports 2021; 11(1): 1034.

Darden T., York D., Pedersen L. Particle mesh Ewald: an N·log(N) method for Ewald sums in large systems. The Journal of Chemical Physics 1993; 98(12): 10089-10092.

Faidon Brotzakis Z., Löhr T., Truong S., Hoff S., Bonomi M., Vendruscolo M. Determination of the structure and dynamics of the fuzzy coat of an amyloid fibril of IAPP using cryo-electron microscopy. Biochemistry 2023; 62(16): 2407-2416.

Ferreon ACM., Quan MD., Liao SC., Tsoi P., Ferreon JC. Morphological evolution of HNRNPA1 pathological condensates. Biophysical Journal 2022; 121(3): 357a.

Garcia-Pardo J., Ventura S. Cryo-EM structures of functional and pathological amyloid ribonucleoprotein assemblies. Trends in Biochemical Sciences 2024; 49(2): 119-133.

Gonzalez A., Kim HJ., Freibaum BD., Fung HYJ., Brautigam CA., Taylor JP., Chook YM. A new Karyopherin-β2 binding PY-NLS epitope of HNRNPH2 linked to neurodevelopmental disorders. Structure 2023; 31(8): 924-934.e4.

Gui X., Luo F., Li Y., Zhou H., Qin Z., Liu Z., Gu J., Xie M., Zhao K., Dai B., Shin WS., He J., He L., Jiang L., Zhao M., Sun B., Li X., Liu C., Li D. Structural basis for reversible amyloids of HNRNPA1 elucidates their role in stress granule assembly. Nature Communications 2019; 10(1): 2006.

Huang J., Rauscher S., Nawrocki G., Ran T., Feig M., de Groot BL., Grubmüller H., MacKerell AD. Charmm36m: an improved force field for folded and intrinsically disordered proteins. Nature Methods 2017; 14(1): 71-73.

Humphrey W., Dalke A., Schulten K. VMD: visual molecular dynamics. Journal of Molecular Graphics 1996; 14(1): 33-38.

Jang H., Arce FT., Ramachandran S., Capone R., Azimova R., Kagan BL., Nussinov R., Lal R. Truncated beta-amyloid peptide channels provide an alternative mechanism for Alzheimer's disease and Down syndrome. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 2010; 107(14): 6538-6543.

Jean-Philippe J., Paz S., Caputi M. HNRNP A1: the Swiss Army knife of gene expression. International Journal of Molecular Sciences 2013; 14(9): 18999-19024.

Jorgensen WL., Chandrasekhar J., Madura JD., Impey RW., Klein ML. Comparison of simple potential functions for simulating liquid water. The Journal of Chemical Physics 1983; 79(2): 926-935.

Li Q., Babinchak WM., Surewicz WK. Cryo-EM structure of amyloid fibrils formed by the entire low complexity domain of TDP-43. Nature Communications 2021; 12(1): 1620.

Liu C., Zhao M., Jiang L., Cheng P-N., Park J., Sawaya MR., Pensalfini A., Gou D., Berk AJ., Glabe CG., Nowick J., Eisenberg D. Out-of-register β-sheets suggest a pathway to toxic amyloid aggregates. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 2012; 109(51): 20913-20918.

Lu J., Cao Q., Hughes MP., Sawaya MR., Boyer DR., Cascio D., Eisenberg DS. CryoEM structure of the low-complexity domain of HnRNPA2 and its conversion to pathogenic amyloid. Nature Communications 2020; 11(1): 4090.

Martin EW., Thomasen FE., Milkovic NM., Cuneo MJ., Grace Christy R., Nourse A., Lindorff-Larsen K., Mittag T. Interplay of folded domains and the disordered low-complexity domain in mediating HNRNPA1 phase separation. Nucleic Acids Research 2021; 49(5): 2931-2945.

Matsuura Y. Defective recognition of a nonclassical nuclear localization signal in neurodevelopmental disorders. Structure 2023; 31(8): 891-892.

Molliex A., Temirov J., Lee J., Coughlin M., Kanagaraj AP., Kim HJ., Mittag T., Taylor JP. Phase separation by low complexity domains promotes stress granule assembly and drives pathological fibrillization. Cell 2015; 163(1): 123-133.

Parrinello M., Rahman A. Polymorphic transitions in single crystals: a new molecular dynamics method. Journal of Applied Physics 1981; 52(12): 7182-7190.

Sharma K., Stockert F., Shenoy J., Berbon M., Abdul-Shukkoor MB., Habenstein B., Loquet A., Schmidt M., Fändrich M. Cryo-EM observation of the amyloid key structure of polymorphic TDP-43 amyloid fibrils. Nature Communications 2024; 15(1): 486.

Straub JE., Thirumalai D. Toward a molecular theory of early and late events in monomer to amyloid fibril formation. Annual Review of Physical Chemistry 2011; 62: 437-463.

Sun Y., Zhao K., Xia W., Feng G., Gu J., Ma Y., Gui X., Zhang X., Fang Y., Sun B., Wang R., Liu C., Li D. The nuclear localization sequence mediates HNRNPA1 amyloid fibril formation revealed by cryo-EM structure. Nature Communications 2020; 11(1): 6349.

Tarus B., Straub JE., Thirumalai D. Dynamics of Asp23−Lys28 salt-bridge formation in aβ10-35 monomers. Journal of the American Chemical Society 2006; 128(50): 16159-16168.

Topuz Ş., Demir K., Alıcı H. Unraveling the dynamic landscape of α-glucosidase: a molecular dynamics approach to enzyme stability and function. South African Journal of Chemistry 2025; 79(1): 107-116.

Vitalis A., Pappu RV. Assessing the contribution of heterogeneous distributions of oligomers to aggregation mechanisms of polyglutamine peptides. Biophysical Chemistry 2011; 159(1): 14-23.

Wang LQ., Ma Y., Yuan HY., Zhao K., Zhang MY., Wang Q., Huang X., Xu WC., Dai B., Chen J., Li D., Zhang D., Wang Z., Zou L., Yin P., Liu C., Liang Y. Cryo-EM structure of an amyloid fibril formed by full-length human SOD1 reveals its conformational conversion. Nature Communications 2022; 13(1): 3491.

Wang LQ., Zhao K., Yuan HY., Wang Q., Guan Z., Tao J., Li XN., Sun Y., Yi CW., Chen J., Li D., Zhang D., Yin P., Liu C., Liang Y. Cryo-EM structure of an amyloid fibril formed by full-length human prion protein. Nature Structural & Molecular Biology 2020; 27(6): 598-602.

Zheng L., Alhossary AA., Kwoh CK., Mu Y. Molecular dynamics and simulation. In: Academic Press, Oxford 2019.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1572-1584, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1572-1584, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Karbon Fiber/Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerinde Katman Yapılandırmasının ve Parçacık Ara Katmanlarının Etkisi

Ahmet YÖNETKEN[1*], Ahmet DEMİRER[2], Ayhan EROL[3], Günnur PEŞMEN[4]

[1]Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Mechatronics Engineering, Ahmet Necdet Sezer Campus, Afyonkarahisar/Türkiye, [2]Sakarya University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 54100, Sakarya, Türkiye
[3]Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Metallurgy and Materials Engineering, Ahmet Necdet Sezer Campus, Afyonkarahisar/Türkiye
[4]Afyon Kocatepe University, Şuhut Vocational School, Department of Laboratory and Veterinary Health, Şuhut/Afyonkarahisar/Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-1844-7233
[2]https://orcid.org/0000-0003-1252-9203
[3]https://orcid.org/0000-0003-4215-9303
[4]https://orcid.org/0000-0002-9164-6629
*Sorumlu yazar: yonetken@aku.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 25.09.2025
Kabul tarihi:22.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Epoksi reçine
Karbon fiber
El yapımı yöntemi
Hafif tasarım
İHA gövde malzemeleri

ÖZ

Bu çalışma, farklı katman yapılandırmalarına ve parçacık ara katmanlarına sahip karbon fiber/epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerini incelemiştir. Çekme testlerinde, katman sayısının artmasıyla birlikte çekme dayanımında belirgin bir artış gözlenmiş; en yüksek değer altı katmanlı numunelerde elde edilmiştir. Ancak, artan katman sayısı özgül çekme dayanımını azaltmıştır. Dört katmanlı standart laminat (4K CE), hafiflik-performans dengesi açısından en uygun özgül dayanımı göstermiştir. Parçacık ara katmanı içeren numunelerde çekme dayanımında %42,89 azalma görülürken, darbe dayanımında %27,23 artış elde edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle İHA gövde yapıları gibi hafif tasarım gerektiren uygulamalarda, optimal katman sayısı ve uygun ara katman mühendisliğinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Effect of Layer Configuration and Particle Interlayers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites

Research Article

Article History:
Received: 25.09.2025
Accepted: 22.12.2025
Published online: 15.06.2026

Keywords:
Epoxy resin
Carbon fiber
Hand lay-up method
Lightweight design
Drone body materials

ABSTRACT

This study examined the mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites with varying layer configurations and a particulate interlayer. Tensile tests revealed that tensile strength increased with layer number, reaching the highest value in six-ply laminates, while specific tensile strength decreased due to increased mass. The four-ply laminate (4K CE) demonstrated the most favorable balance between strength and lightweight characteristics. In the laminate with a particulate interlayer, tensile strength decreased by 42.89%, whereas impact strength improved by 27.23%. These findings highlight the critical role of optimizing layer number and interlayer design for lightweight structural applications, particularly drone and UAV fuselage components.

To Cite: Yönetken A., Demirer A., Erol A., Peşmen G. Effect of Layer Configuration and Particle Interlayers on the Mechanical Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1572-1584.

1.Introduction

Carbon fiber–reinforced polymer (CFRP) composites have become indispensable in aerospace, automotive, defense, and advanced engineering applications due to their exceptional specific strength, stiffness, and low density (Baker et al., 2004; Soutis, 2005). Among these applications, unmanned aerial vehicles (UAVs) and drone fuselage structures particularly benefit from lightweight yet mechanically robust composite designs. The mechanical performance of CFRP laminates is highly dependent on fiber orientation, stacking sequence, and interlaminar characteristics, all of which influence tensile strength, impact resistance, and interfacial integrity (Daniel & Ishai, 2006; Liu et al., 2006).

Recent studies have shown that advanced laminate engineering—especially through optimized lay-up configurations or the addition of interlaminar reinforcement—can significantly enhance the performance of load-bearing structures. Multilayered laminates with carefully arranged fiber orientations improve load transfer and delay crack propagation (Tsai & Hahn, 1980; Chen et al., 2015). Similarly, particulate and nano-reinforced interlayers, including short carbon fibers, graphene nanoplatelets, and carbon nanotubes, have been shown to increase fracture toughness and energy absorption capacity (Gojny et al., 2005; Zhang & Chaisombat, 2012). These modifications strengthen the fiber–matrix interface, reduce delamination, and improve impact performance—properties essential for UAV components subjected to dynamic loads.

Recent literature from 2020 to 2024 further reinforces the importance of interlaminar engineering and hybrid reinforcement strategies. Wang et al. (2020) demonstrated that optimized curing schedules and resin formulations significantly increase cross-link density and mechanical performance. Tiwari et al. (2021) highlighted considerable improvements in fracture toughness through multifunctional nanomaterial-enhanced interfaces. Li et al. (2022) reported that gradient and hierarchical interlayers can delay delamination onset and improve impact tolerance. UAV-specific composite research has also expanded, with Zhou et al. (2023) emphasizing hybrid laminate configurations that improve stiffness and impact resistance while keeping mass minimal. Most recently, Ahmed et al. (2024) demonstrated that advanced resin modification and thermal-assisted curing techniques significantly enhance fiber–matrix bonding strength.

Manufacturing parameters play an equally important role in determining composite performance. While the hand lay-up method is widely used due to its simplicity and cost-effectiveness, it may introduce defects such as voids or fiber misalignment, which reduce mechanical strength (Campbell, 2010). Curing conditions, particularly post-curing at elevated temperatures, have been shown to improve polymer cross-linking and interfacial adhesion, which recent studies confirm as a critical determinant of overall composite integrity (Wang et al., 2020; Ahmed et al., 2024).

Sustainability considerations have also encouraged the reuse of carbon fiber production waste. Short carbon fibers generated during cutting and trimming processes can be repurposed as interlayer reinforcement without compromising material quality, providing both mechanical benefits and environmental advantages (Koo, 2006; Chung, 2010). The recent study (Zhou et al., 2023) further

highlights that recycled fiber-based interlayers can contribute to lighter and more damage-tolerant UAV structural components.

In this context, the present study investigates how different layer configurations and a particulate interlayer influence the tensile and impact properties of carbon fiber/epoxy composites. By experimentally examining laminates produced with varying ply numbers and interlayer reinforcements, this study aims to identify design parameters that optimize the balance between strength and lightweight characteristics. The results provide valuable insights for the development of next-generation UAV fuselages and other advanced lightweight structural applications.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

In this study, woven carbon fiber fabric was used as the reinforcement material. The fabric, featuring an areal density of 200 g/m² (spread tow), was bidirectionally knitted at 90°. Composite laminates with two, four, and six plies were fabricated, in addition to a modified four-ply configuration incorporating a single interlayer of short carbon fiber particles (12 mm) placed between the plies. All composite plates were produced with dimensions of approximately 250 × 250 mm. The matrix system consisted of a commercial Hexion LR635/LH637 (A+B) epoxy set, and the two-component resin–hardener mixture was prepared according to the manufacturer's specifications prior to lamination.

The specimen designated **4K CE 30PE** was specifically developed to investigate the influence of a particulate-reinforced interlayer on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy laminates. This laminate comprised four plies of carbon/epoxy (4K CE) with an added interlayer containing **30 wt% short recycled carbon fiber particles** positioned between the middle plies. The particulate interlayer was incorporated to promote crack deflection and enhance impact energy absorption, enabling direct comparison with the unmodified 4K CE laminate. Additionally, this design allowed the evaluation of recycled carbon fiber utilization as a sustainable interlaminar toughening approach. For each laminate configuration, **five specimens (n = 5)** were prepared and tested for both tensile and impact experiments. All mechanical test results are presented together with their corresponding **standard deviations**, and error bars have been included in the graphical representations to reflect the variability among the tested specimens. "Theoretical densities of the laminates were calculated using the rule of mixtures, while experimental densities were obtained using the Archimedes immersion method. Porosity levels were calculated based on the deviation between theoretical (ρ_th) and measured densities (ρ_exp), using the formula:$Porosity(\%) = \frac{\rho th - \rho exp}{\rho th} x\ 100$ All measurements were repeated three times for accuracy.

2.2. Fiber Preparation and Shaping

Carbon fiber sheets were cut into uniform dimensions of 250 × 250 mm in accordance with the specified laminate configurations prior to lamination. The fiber strands were weighed, and the required resin-to-fiber ratio was calculated accordingly. Following sheet preparation, test specimens were cut using the

waterjet cutting method. This technique was selected because it enables high-precision cutting, produces smooth-edged geometries, and eliminates thermal damage to the fibers. Particulate carbon fibers with a length of 12 mm were also prepared for interlayer reinforcement.

2.3. Composite Production Method

The composites were fabricated using the hand lay-up method. This technique was selected due to its low investment cost, suitability for the production of large components, simple equipment requirements, and adaptability to manufacturing complex geometries such as drone structures. In addition, its efficiency improves significantly with operator experience.

During fabrication, carbon fiber sheets were impregnated with epoxy resin and placed into molds according to the target lay-up sequences (two, four, and six plies). For the particle-interlayered configuration, two woven fiber layers were first placed, followed by a single layer of particulate carbon fiber, and then covered with two additional woven fiber layers. In this configuration, 30 g of 12 mm-long particulate fibers were uniformly distributed across a 250 × 250 mm area. The short fibers were randomly dispersed in a manner similar to felt, forming a homogeneous interlayer that was manually spread to ensure uniformity. To stabilize the particulate layer, a hexagonal perforated PA6 mesh was placed both above and below the particle interlayer (Figure 1). To facilitate demolding and ensure a smooth surface finish, a mold release agent was applied prior to lamination. After curing, the composite plates were easily removed from the mold without damage

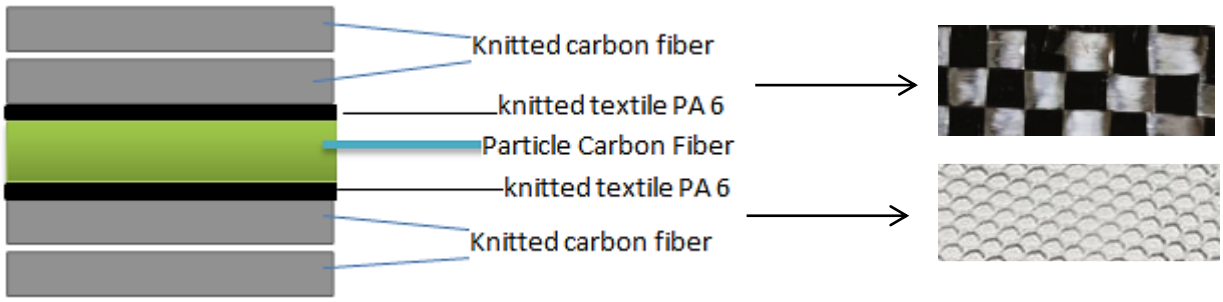


Figure 1. Schematic representation of the particulate carbon fiber interlayer structure with a hexagonal PA6 mesh placed on the upper and lower surfaces for stabilization

2.4. Curing Processes

The produced specimens were cured under two different conditions. In the first stage, the laminates were left to cure at room temperature for 24 hours. Subsequently, a thermal curing process was applied, in which the specimens were placed in an oven at 60 °C for 2.5 hours under a flat weight to ensure uniform pressure during curing. Previous studies have reported that room-temperature curing alone is insufficient to achieve adequate mechanical strength (Kim et al., 2001). Therefore, thermal curing was performed as a secondary step to enhance polymerization and improve the fiber–matrix interfacial bonding.

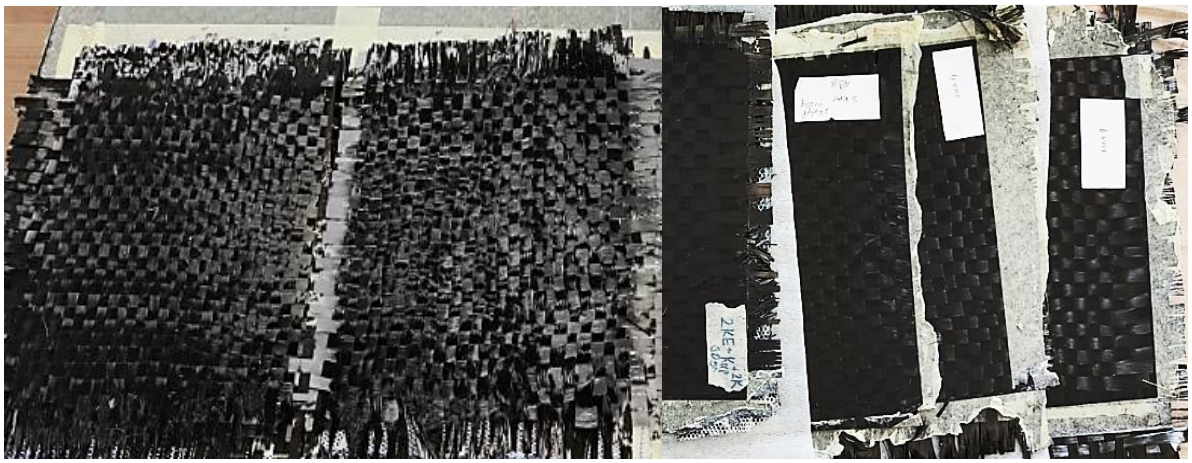


Figure 2. Composite plates before and after curing process

2.5. Sample Preparation

After curing, the composite plates were machined into tensile and impact test specimens with standard dimensions (ISO 527-2 and ISO 180). The specimens were prepared using a waterjet cutting technique, which ensured high dimensional accuracy and smooth edges without causing thermal or mechanical damage to the carbon fibers. Tensile test specimens were prepared in accordance with ASTM D3039, while impact test specimens were prepared following ASTM D7136.



Figure 3. Preparation of tensile and impact test specimens using the waterjet cutting method.

2.6. Experimental Characterization

Samples were tested in accordance with the following standards. Tensile Test: Tensile strength (MPa) and percentage elongation were determined according to the ISO 527-2 standard. Impact Test: Impact strength (kJ/m²) was measured according to the ISO 180 standard. Mass and sample thickness measurements: Masses were measured on a 0.001g scale, and thickness measurements were made with

a digital 1/50 caliper. For microstructural examination, scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze fiber-matrix interface interactions, void formations, and particle distribution.

3. Results

The test results of the epoxy/carbon fiber composite materials were analyzed, and both tensile and impact strengths were normalized with respect to the specimen mass to determine the specific tensile strength and specific impact strength.

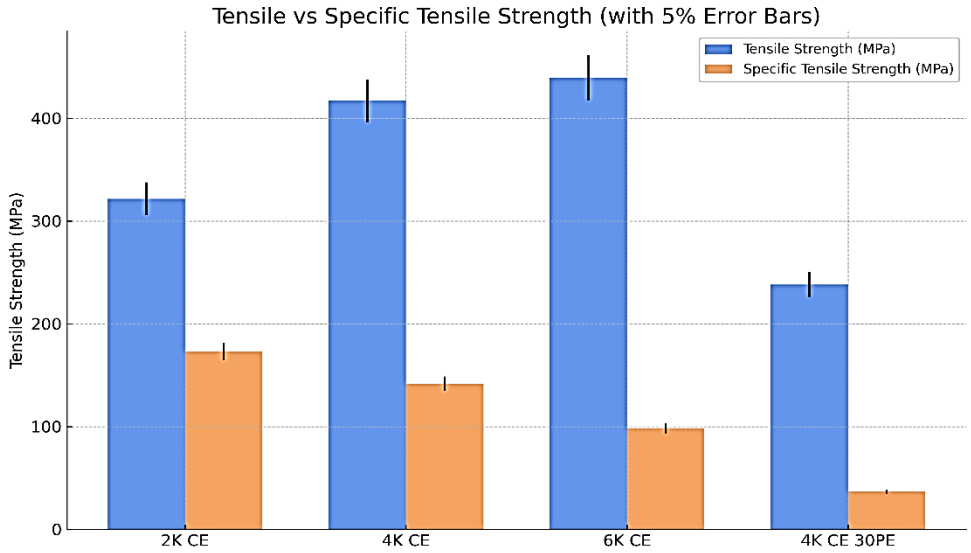


Figure 4. Comparison of tensile strength and specific tensile strength of the composite specimens.

Table 1. Number of layers and corresponding percentage elongation of the composite

Sample	ε % (Strain)
2K CE	2.40
4K CE	**3.58**
6K CE	3.87
4K CE 30PE	**3.44**

As shown in Figure 1, the tensile strength of the carbon fiber/epoxy laminates increases proportionally with the number of layers. The relatively low tensile strength observed in the two-ply specimens is attributed to the limited laminate thickness and fiber volume fraction. In the four-ply laminates, the increased number of layers resulted in a higher proportion of load-bearing fibers and a more uniform stress distribution, leading to a notable improvement in tensile strength. The six-ply laminates exhibited the highest tensile strength, which can be primarily attributed to the increased total fiber content and enhanced interlayer interactions.

However, increasing the number of layers also led to higher laminate thickness and weight, resulting in an inverse relationship between layer number and specific tensile strength. In the four-ply laminate with a particulate carbon fiber interlayer (4K CE 30PE), a reduction of 42.89% in tensile strength and 74.06%

in specific tensile strength was observed compared to the standard four-ply laminate (4K CE) (Figure 1). In terms of elongation at break (%ε), an increase was noted with higher layer numbers (Table 1). The particulate-interlayered sample exhibited elongation values close to the 4K CE laminate, indicating that its brittleness was not significantly affected. These results suggest that determining the optimal number of layers is a critical parameter for design, particularly in lightweight structural applications, highlighting the decisive role of material selection and layer configuration on performance.

Figure 5 shows that impact strength also increases with the number of layers. An inverse relationship between layer number and specific impact strength was observed, similar to the trend seen for specific tensile strength. In four-ply carbon fiber/epoxy laminates (4K CE 30PE), the particulate interlayer had a notable enhancing effect on impact performance. The particulate-reinforced specimens exhibited a 27.23% higher impact energy compared to laminates without the interlayer. This improvement is attributed to the particulate layer's ability to optimize load transfer between fibers, slow crack propagation, and enhance energy dissipation. Specifically, in regions subjected to impact, the particulate reinforcement reduces localized stress concentrations and allows the matrix–fiber interface to carry load more effectively.

In comparison with the tensile tests, the effect of particulate reinforcement on tensile strength was limited, whereas its contribution to impact strength was more pronounced. These findings indicate that particulate interlayers can be strategically employed in composite laminate design to enhance impact resistance and energy absorption performance.

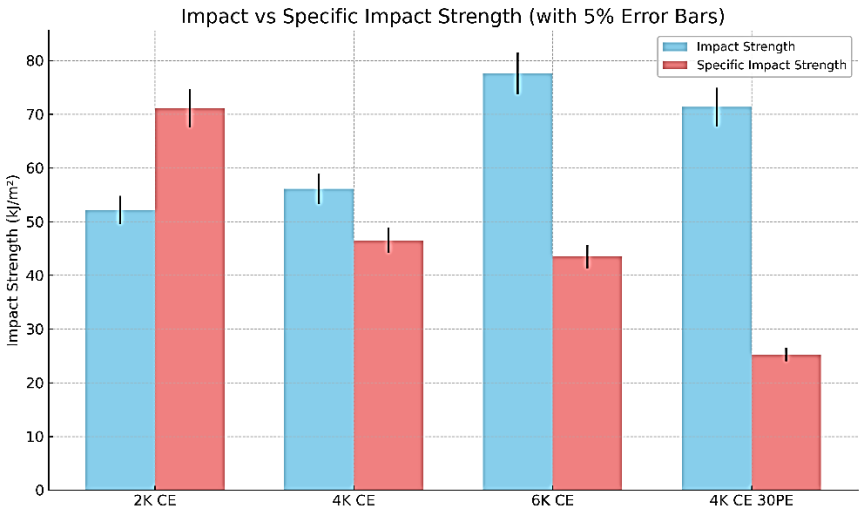


Figure 5. Comparison of impact strength and specific impact strength of the composite specimens.

Two-ply laminates exhibit good performance in terms of specific strength due to their low thickness and lightweight nature; however, their overall tensile strength is limited. In the four-ply laminates, the increased number of layers led to an optimized balance between tensile strength and weight, resulting in the highest specific strength. Although six-ply laminates demonstrated higher total strength, the

additional weight caused a reduction in specific strength. These findings highlight the critical importance of determining the optimal number of layers for design purposes; specifically, when aiming for both high strength and low weight, a four-ply laminate provides an ideal balance. This indicates that, in lightweight structural applications, both layer number and laminate thickness must be jointly optimized to maximize material performance.

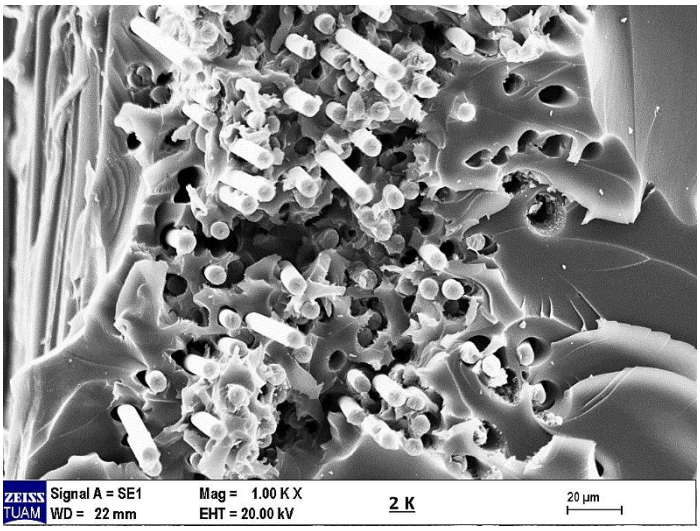


Figure 6. SEM image of the 2KCE–PE 30 g composite showing the dispersion of cylindrical particulate fibers within the epoxy matrix at the interlayer region (SE1, 1.00 kX).

SEM micrographs clearly indicate that the 30 g particulate fibrous interlayer (PE) was positioned within the epoxy matrix as an interlayer between the carbon fiber plies and laminated using the hand lay-up technique. The particulate fibers were distributed between the upper and lower epoxy layers, within the woven carbon fiber architecture, exhibiting a discontinuous yet generally homogeneous morphology along the interlayer region.

In the 2KCE–PE 30 g specimen, the particulate fibers formed localized agglomerations within the epoxy matrix, and voids were observed in certain regions. This microstructural feature suggests that during hand lay-up processing, the particulate fibers partially migrated with resin flow, resulting in non-uniform interfacial bonding across the laminate. Consequently, limited fiber–matrix adhesion and localized stress concentrations are likely to occur at the interfacial regions (Figure 6). For the 4KCE–PE 30 g specimen, the particulate fibers were more widely distributed between the carbon fiber layers; however, morphologically irregular interfacial regions were still present. The particulate fibers partially deflected crack propagation paths within the epoxy matrix and contributed to micro-scale energy dissipation mechanisms. This observation is consistent with the experimentally observed improvement in impact strength (Figure 7).

In the 6KCE–PE 30 g specimen, the increased fiber stacking density constrained the particulate fibers, forcing partial alignment along preferred directions and resulting in a more compact interlayer structure. Nevertheless, SEM images revealed void formation around the particulate fibers and fiber pull-out features, indicating that fiber–matrix interfacial bonding was not fully sufficient under mechanical

loading. While this microstructural configuration enhances energy absorption under impact loading, it reduces load transfer efficiency under uniaxial tensile loading (Figure 8).

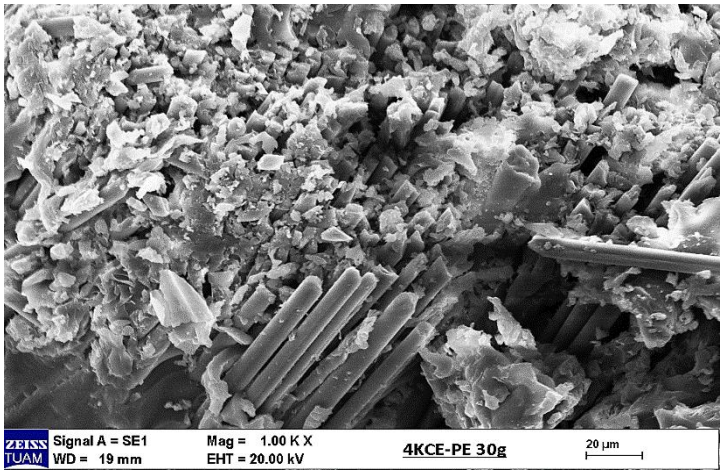


Figure 7. SEM image of the 4KCE–PE 30 g composite illustrating the heterogeneous dispersion of flake-like and rod-shaped particulate fibers within the epoxy matrix at the interlayer region (SE1, 1.00 kX).

The SEM micrograph (Mag = 1.00 KX, SE1 mode) of the 4KCE-PE 30g sample reveals a heterogeneous distribution of flake-like and rod-shaped inorganic filler particles embedded within the polyethylene matrix; the high accelerating voltage (20 kV) enhances surface topography, showing gaps and irregular interfaces between the fillers and the polymer, which suggests limited interfacial adhesion and indicates that such morphological features may locally weaken the mechanical integrity of the composite material.

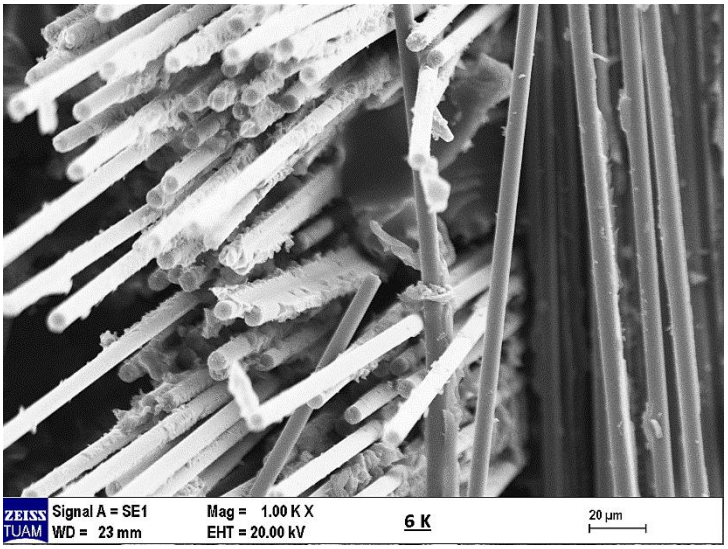


Figure 8. SEM image of the 6KCE–PE 30 g composite showing densely aligned cylindrical particulate fibers within the epoxy matrix at the interlayer region (SE1, 1.00 kX).

Overall, the SEM analyses demonstrate that the particulate fibrous interlayer acts as an effective mechanism for hindering crack propagation and dissipating impact energy in carbon fiber/epoxy laminates. However, the limited fiber–matrix interfacial bonding associated with the particulate

interlayer can lead to a reduction in tensile strength. These microstructural findings directly support the experimentally observed increase in impact strength and decrease in tensile strength.

3.1. General Evaluation

The findings of this study demonstrate that both the number of layers and the presence of a particulate interlayer play decisive roles in the mechanical performance of carbon fiber/epoxy laminates. Increasing the number of layers resulted in higher tensile and impact strength, with six-ply laminates exhibiting the highest overall mechanical performance. However, considering weight-dependent metrics, the four-ply laminate showed the most favorable specific tensile strength, aligning with previous reports indicating that excessive laminate thickness can reduce specific properties despite increasing absolute strength (Liu et al., 2006).

The incorporation of a particulate carbon-fiber interlayer produced contrasting effects on mechanical behavior. While tensile strength decreased by 42.89%, impact strength increased by 27.23%. This trend is consistent with earlier studies demonstrating that particulate and nano-reinforced interlayers enhance impact resistance and energy absorption by impeding crack propagation and improving interfacial energy dissipation (Sohn et al., 2000; Gojny et al., 2005). Conversely, the reduction in tensile strength parallels findings in the literature where discontinuous fibers or particulate additions disrupt load transfer efficiency under uniaxial tensile loading.

Overall, the results highlight that the optimal layer configuration depends on the balance between strength and lightweight requirements. For lightweight structural components such as UAV fuselages, the four-ply laminate offers an advantageous performance-to-weight ratio, while particulate interlayers can be strategically implemented in regions where enhanced impact resistance is required. The study contributes valuable insights into the design of next-generation lightweight composite structures by demonstrating how layer architecture and interlayer engineering can be tailored to specific performance needs.

1. Effect of Layer Number

The finding that six-ply laminates exhibit the highest tensile and impact strength aligns well with the results of Soutis (2005) and Daniel & Ishai (2006), who reported that increased fiber volume fraction improves load-carrying capacity in multilayer composites. However, the superior specific tensile strength observed in the four-ply laminate corresponds with the conclusions of Liu et al. (2006) and Wang et al. (2020), who noted that increased laminate thickness and mass can reduce specific mechanical performance despite improving absolute strength.

2. Effect of the Particulate Interlayer

The 42.89% reduction in tensile strength in the particulate-reinforced laminate is consistent with prior studies indicating that discontinuous or short-fiber interlayers may disrupt load transfer efficiency

(Zhang and Chaisombat, 2012). Conversely, the observed 27.23% increase in impact strength aligns closely with the findings of Sohn et al. (2000) and Gojny et al. (2005), which demonstrated that particulate and nano-reinforced interlayers impede crack propagation and enhance energy absorption under dynamic loading.

3. Effect of Curing Conditions

The hybrid curing approach used in this study—room-temperature curing followed by thermal post-curing—supports the observations reported by Kim et al. (2001) and Ahmed et al. (2024), who showed that thermal curing enhances polymer cross-linking and strengthens fiber–matrix interfacial bonding. These similarities validate the methodological choices and explain the mechanical improvements observed in the results.

4. Relevance to UAV Structural Design

Zhou et al. (2023) emphasized that UAV fuselages require laminate architectures that achieve both low weight and high impact resistance. The present findings correspond strongly with this requirement:

The four-ply laminate provides the most favorable strength-to-weight performance, which is critical for UAV mass constraints.

The particulate-interlayered laminate shows enhanced impact resistance, beneficial for UAV landing loads, crash zones, and dynamic flight conditions.

Overall, these comparisons strengthen the position of this study within the current composite materials literature, clearly demonstrating the scientific significance, methodological differences, and practical advantages of the presented results.

4. Conclusions

This study demonstrates that the mechanical performance of carbon fiber/epoxy laminates is strongly influenced by both the number of layers and the use of a particulate-reinforced interlayer. Increasing the number of layers enhanced tensile and impact strength, with six-ply laminates exhibiting the highest absolute mechanical performance. However, when specific mechanical properties are considered, the four-ply laminate provided the most favorable strength-to-weight ratio.

The incorporation of a particulate interlayer resulted in a significant reduction in tensile strength, while markedly improving impact resistance. This indicates that particulate reinforcement effectively enhances energy absorption and restricts crack propagation, although it may impair load transfer efficiency under uniaxial tensile loading.

SEM analyses revealed that the particulate fibrous interlayer promoted crack deflection and energy dissipation under impact loading, while local agglomeration and interfacial voids reduced load transfer efficiency under tensile loading, consistent with the mechanical test results.

Overall, the optimal laminate configuration depends on application-specific requirements. Four-ply laminates are advantageous for lightweight structural applications, whereas particulate interlayers can be strategically employed in regions where enhanced impact resistance is critical. These findings highlight the potential of tailoring laminate architecture and interlayer design to meet targeted performance demands in advanced composite structures.

Acknowledgements

This project entitled “23.TEKNOLOJİ.022 - Production and Characterization of Regionally Reinforced Composites Using Chicken Feather Epoxy/Carbon in Drone Fuselage Manufacturing” was supported by the Afyon Kocatepe University Scientific Research Projects Coordination Unit (AKÜ BAPK).

Conflict of Interest Statement

The author declares that there is no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Declaration

The authors declare that they have contributed equally to the article. It is the extended version of the paper presented at the 4th International Korkut Ata Scientific Research Congress.

References

Ahmed S., Kumar R., Patel M. Advanced thermal-assisted curing and resin modification effects on CFRP interfaces. Composites Science and Technology, 2024.

Baker A., Dutton S., Kelly D. Composite materials for aircraft structures. AIAA; 2004.

Campbell FC. Structural composite materials. ASM International; 2010.

Chen L., Jin H., Xu Z., Zhang X., Li Y. Role of a gradient interface layer in interfacial enhancement of carbon fiber/epoxy hierarchical composites. Journal of Materials Science 2015; 50(1): 112–121.

Chung DDL. Carbon fiber composites. Butterworth-Heinemann; 2010.

Daniel IM., Ishai O. Engineering mechanics of composite materials (2nd ed.). Oxford University Press; 2006.

Fu J., Zhang M., Jin L., Liu L., Li N., Shang L., Li M., Xiao L., Ao Y. Enhancing interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy composites via Layer-by-Layer self-assembly GO/SiO_2 multilayer films on carbon fibers surface. Applied Surface Science 2019; 470: 543–554.

Gay D., Hoa SV. Composite materials: Design and Applications (2nd ed.). CRC Press; 2007; USA.

Gojny FH., Wichmann MHG., Köpke U., Fiedler B., Schulte K. Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: Enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. Composites Science and Technology 2005; 65(15–16): 2300–2313.

Kim J. K., Hu C., Mai Y. W. Effect of curing conditions on the mechanical properties and fracture toughness of epoxy resins. Journal of Applied Polymer Science 2001; 80(14): 2798–2806.

Koo JH. Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization, and Applications. McGraw-Hill; 2006; USA.

Li Y., Ren X., Zhou H. Gradient and hierarchical interlayers for improved delamination resistance in CFRP laminates. Composite Structures, 2022.

Liu L., Zhang B. M., Wang DF., Wu ZJ. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. Composite Structures 2006; 73(3): 303–309.

Shokrieh MM., Saeedi A., Chitsazzadeh M. Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. Journal of Composite Materials 2014; 48(9): 1101–1110.

Sohn MS., Hu XZ., Kim JK., Walker L. Impact damage characterisation of carbon fibre/epoxy composites with multi-layer reinforcement. Composites Part B: Engineering 2000; 31(8): 681–691.

Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. Progress in Aerospace Sciences 2005; 41(2): 143–151.

Tsai SW., Hahn HT. Introduction to composite materials. Technomic Publishing; 1980.

Tiwari SK., Sahoo S., Tiwari A. Recent progress in the applications of carbon nanomaterials in composites: A review. Composites Part B: Engineering 2021; 212: 108674.

Wang L., Chen P., Xu J. Influence of optimized curing schedules on cross-link density and mechanical performance of epoxy-based composites. Journal of Applied Polymer Science, 2020.

Zhang J., Chaisombat K. Mechanical behaviour of carbon fibre composites with nanoparticle modified interfaces. Composites Part B: Engineering 2012; 43(1): 76–81.

Zhou Z., Tan Y., Liu Q. Hybrid composite laminates for UAV structural applications: improvements in stiffness and crashworthiness. Aerospace Science and Technology, 2023.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1585-1600, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1585-1600, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

$In_xGa_{1-x}N$/GaN Heteroyapılarının Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD) Yöntemiyle Yapısal Karakterizasyonu

Sabit KORCAK[1*], Süleyman ÖZÇELİK[2]

[1]Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, 08, Artvin
[2]Gazi Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Fotonik Bölümü, 06, Ankara

[1]https://orcid.org/0000-0003-1140-6391,
[2]https://orcid.org/0000-0002-3761-371
*Sorumlu yazar: skorcak@artvin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.07.2025
Kabul tarihi:23.11.2025
Online Yayınlanma: 15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
MOCVD
Yarıiletken büyütme
InGaN/GaN
GaN
X-Işını kırınımı
Kristal kusurlar

ÖZ

Bu çalışmada; elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılan $In_xGa_{1-x}N$/GaN çoklu kuantum kuyu (MQWs) LED kristal yapısının büyütülmesi hedeflenmiştir. Yapı, LED uygulamalarında kullanılmak üzere Bilkent Üniversitesi laboratuvarlarında, metal organik buhar fazı biriktirme (MOCVD) yöntemi ile bir safir (Al_2O_3) alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Büyütülen yapı; 100 nm kalınlığında, düşük sıcaklıkta büyütülen GaN nucleation tabakası, 700 nm kalınlığında yüksek sıcaklıkta büyütülmüş GaN tampon tabakası, 250 nm kalınlığında n-tipi GaN tabakası, 5 çift ($In_xGa_{1-x}N$/GaN) MQW yapısı ve 200 nm kalınlığında p-tipi GaN üst tabakadan oluşmaktadır. Bu katmanlar, c-düzlemine (0001) hizalanmış, 330 µm kalınlığındaki safir alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Büyütülen yapı; 100nm kalınlığında düşük sıcaklıklı GaN nucleation tabaka, 700nm kalınlığında yüksek sıcaklıklı GaN tampon tabaka, 250nm kalınlığında n-tipi GaN tabaka, 5x(InxGa1-xN/GaN) MQW tabaka ve 200nm kalınlığında p-tipi GaN üst tabakadan oluşmaktadır. Bu katmanlar (0001) c-düzlemli 330µm kalınlıklı safir alttaşı üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Yapının yapısal karakterizasyonu yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alttaşın simetrik (002) ve (004) yansımaları üzerine ölçülen Rocking eğrileri, hem dinamik hem de kinematik kırınım teorileri temelinde LEPTOS simülasyon programı kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca ters uzay haritalama (Reciprocal Space Mapping, RSM) analizi de gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, yapıdaki tabakaların gerilim (strain) altında olduğu hem rocking eğrileri hem de ters uzay haritası ile doğrulanmıştır. Katmanların çok ince olması nedeniyle asimetrik düzlem yansımaları gözlenememiş, ancak simetrik (002) ve (004) düzlem yansımaları net bir şekilde elde edilmiştir.

Structural Characterization of $In_xGa_{1-x}N$/GaN Heterostructures by High-Resolution X-Ray Diffraction (HR-XRD)

Research Article

Article History:
Received: 24.07.2025
Accepted: 23.11.2025
Published online: 15.06.2026

Keywords:
MOCVD
Semiconductor growth
InGaN/GaN
GaN

ABSTRACT

In this study, the growth of $In_xGa_{1-x}N$/GaN multiple quantum well (MQW) LED crystal structures, which are widely used in the fabrication of electronic and optoelectronic devices, was targeted. The structure was epitaxially grown on a sapphire (Al_2O_3) substrate using the metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) method at the laboratories of Bilkent University for potential LED applications. The grown structure consists of a 100 nm thick low-temperature GaN nucleation layer, a 700 nm thick high-temperature GaN buffer layer, a 250 nm thick n-type GaN layer, five pairs of

X-Ray diffraction
Crystal defects

($In_xGa_{1-x}N$/GaN) MQW layers, and a 200 nm thick p-type GaN top layer. These layers were epitaxially grown on a 330 μm thick sapphire substrate oriented along the c-plane (0001). The structural characterization of the grown sample was carried out using high-resolution X-ray diffraction (HR-XRD). Rocking curves measured around the symmetric (002) and (004) reflections of the substrate were modeled using the LEPTOS simulation software, based on both dynamic and kinematic diffraction theories. Additionally, reciprocal space mapping (RSM) analysis was performed. The results confirmed that the layers within the structure are under strain, as verified by both the rocking curves and the reciprocal space maps. Due to the very thin nature of the layers, asymmetric plane reflections could not be observed; however, clear symmetric (002) and (004) reflections were obtained.

To Cite: Korcak S., Özçelik S. $In_xGa_{1-x}N$/GaN Heteroyapılarının Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD) Yöntemiyle Yapısal Karakterizasyonu. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1585-1600

1. Giriş

Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge), doğada bulunan temel elementer yarıiletkenlerdir ve özellikle microchip üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanısıra ikili bileşik yarıiletkenler (örneğin indiyum fosfat-InP ve galyum arsenik-GaAs), üçlü (örneğin AlGaAs) ve dörtlü alaşımlar (örneğin InGaAlAs) da elektronik ve optoelektronik cihazların üretilmesinde önemli yapıtaşlarıdır. Ancak bu yarıiletkenlerin doğada saf halde bulunmaları mümkün değildir. Bu nedenle, yüksek teknoloji gerektiren yapay kristal büyütme teknikleri kullanılarak laboratuvar ortamında üretilmeleri gerekmektedir.

Günümüzde epitaksiyel olarak tabaka-tabaka büyütülmüş yarıiletken ince filmler, mikro elektronik teknolojisinde, üniversite ve diğer araştırma birimlerinde teknolojik uygulamalara sahiptirler. Bu tür yarıiletken kristalleri yüksek kalitede büyütmek, üretmek ve geliştirmek; Moleküler Demetle Kristal Büyütme (MBE), Kimyasal Buhar Birikim (CVD) ve Metal Organik Buhar Faz Birikimi (MOCVD) sistemi ile mümkündür. MBE tekniği, büyütme sırasında kimyasal reaksiyon gerçekleşmemesi ve yüksek kontrol imkânı sunması nedeniyle en gelişmiş ve hassas tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir (Cho, 1971). Bununla birlikte, özellikle GaN tabanlı yarıiletken yapıların büyütülmesinde, kristal yapının hekzagonal olması ve yüksek büyütme sıcaklıkları gerektirmesi nedeniyle MOCVD yöntemi daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Türkiye'de MOCVD yöntemi ilk olarak Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde kurulmuş ve kullanılmaya başlanmıştır.

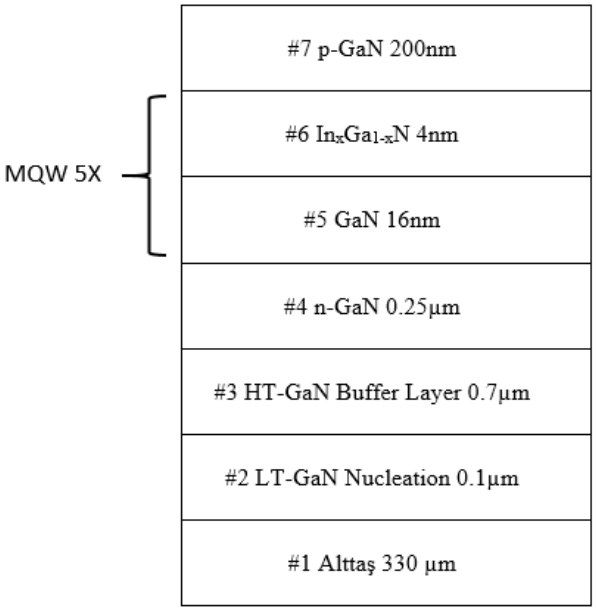
Yapay kristal büyütme tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte yarıiletken malzeme çeşitliliği önemli ölçüde artmış; GaAs tabanlı kristallerin yanı sıra GaN, InGaN, AlGaN, SiC gibi malzemelerde geliştirimiş ve bu malzemelerle mavi ışık yayan diyotlar elde edilmiştir (Morkoç ve ark., 1994; Nakamura ve ark., 1994; Foxon, ve ark., 1995; Akasaki ve ark., 1996). Bu gelişmeler kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları gibi nanoyapıların üretimini de mümkün kılmıştır (Bantien ve Weber, 1987; Strite ve Morkoç, 1992). Benzer yapılar, diğer yarıiletken cihaz teknolojilerinde de başarıyla uygulanabilmektedir. Örneğin, mikrodalga frekans aralığında ve dijital

devrelerde kullanılan SiGe alaşımı, heteroyapılı çift kutuplu transistörlerin üretilmesinde tercih edilmektedir (Fukatsu ve ark., 1992; Schuppen ve ark., 1994). Ayrıca, InGaAlAs alaşımı; optik yayıcılar, optik dalga kılavuzları, dedektörler, optiksel iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Borroff ve ark., 1988). GaAs ve AlxGa1-xAs yapıları ise LED üretiminde önemli yarıiletken malzemeler arasında yer almaktadır (Siegle ve ark., 1995; Rosa ve ark., 1998). Günümüzde, yarıiletken kuantum kuyu ve kuantum nokta yapıları, lazer teknolojilerinde kritik rol oynamakta olup, bu yapılara yönelik en yüksek kalitedeki üretim, MBE ve MOCVD teknikleri ile sağlanmaktadır (Arakawa ve Sakaki, 1995; Mirin ve ark., 1995; Bloch ve ark., 1999; Ghosh ve ark., 2001). Uzun dalga boylarında iletişiminin daha hassas ve kararlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi nedeniyle, bu tür gelişmiş yarıiletken malzemelerin kullanımı özellikle tercih edilmektedir.

Yapay büyütme teknikleriyle elde edilen yarıiletken malzemelerin kullanıldığı yerler: bilgisayar, uzay araçları, TV ler, radyolar, seyir sistemleri, telefonlar, cevaplama makineleri, aletlerde, araba ve diğer araçlarda, hava araçlarında, gemilerde, trenlerde, çamaşır makinelerinde, mikrodalga fırınlarda, görüntü oynatıcı aletlerde vb gibi (Mirin ve ark., 1995). Aynı teknikle elde edilen Lazer diyotlar ise tıpta (terapi, ameliyat, onkoloji, göz bilimi), malzeme üretiminde, baskıda, serbest uzayda yerel iletişim sistemlerinde, sensör ve alarm sistemlerinde, otomosyon ve robot biliminde, spektroskoplarda, araştırmalarda kullanılmaktadır (Bloch ve ark., 1999).

2. Materyal ve Metot

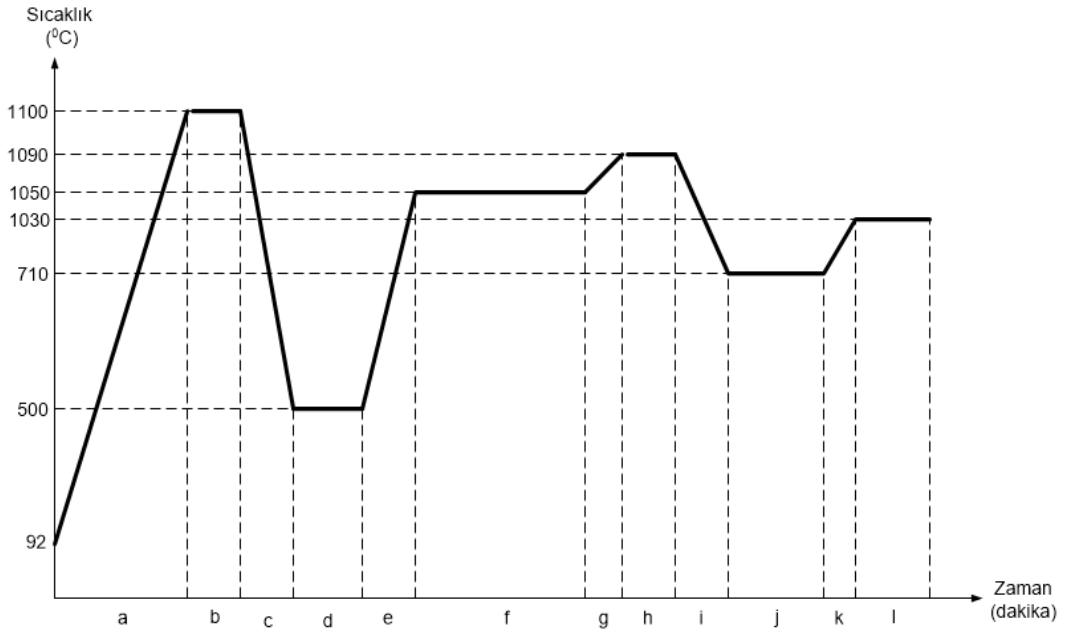
Bu çalışmada yapısal ve optik özellikleri belirlenen, Bilkent Üniversitesi Laboratuvarında MOCVD sistemi kullanılarak LED uygulamaları amacıyla büyütülen InxGa1-xN/GaN MQW LED yapısı Şekil 1'de sunulmaktadır. Yapının büyütme sürecine ilişkin zaman-sıcaklık değişimi ise Şekil 2'de verilmiştir (Korcak ve ark., 2007).



Şekil 1. $In_xGa_{1-x}N$/GaN LED yapısı

Şekil 2'de verilen LED yapısının büyütme süreci, farklı sıcaklık ve işlem koşullarına göre on iki ana bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler ve ilgili süreçler aşağıda sıralanmıştır (Bour ve ark., 1999; Korcak ve ark., 2007):

- a Bölgesi: Sistemin büyütme sıcaklığına ulaşabilmesi için gerçekleştirilen ısıtma evresidir.
- b Bölgesi: Nitridasyon işlemi, 1100 °C sıcaklıkta uygulanmıştır.
- c Bölgesi: Nitridasyon sonrası büyütme sıcaklığına uygun koşulları sağlamak amacıyla gerçekleştirilen soğutma evresidir.
- d Bölgesi: Düşük sıcaklıkta (500 °C) GaN nükleasyon (çekirdeklenme) tabakasının büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.
- e Bölgesi: Nükleasyon tabakasının ardından, sıcaklık kademeli olarak tampon tabaka büyütme sıcaklığına çıkarılmıştır.
- f Bölgesi: Yüksek sıcaklıkta (1050 °C) GaN tampon tabakanın büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.
- g Bölgesi: Takip eden evrede, sıcaklık n tipi GaN tabakanın büyütme sıcaklığına artırılmıştır.
- h Bölgesi: Yüksek sıcaklıkta (1090 °C) n tipi GaN tabakasının büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.
- i Bölgesi: LED aktif bölgesinin büyütülmesine geçilmeden önce, sıcaklık 710 °C'ye düşürülmüştür.
- j Bölgesi: 710 °C sıcaklıkta LED aktif bölgesi büyütülmüştür.
- k Bölgesi: Büyütme sürecinin son aşamasında, GaN üst tabakanın büyütülmesine geçmeden önce sıcaklık tekrar artırılmıştır.
- l Bölgesi: Yüksek sıcaklıkta (1030 °C) GaN üst tabakanın büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.



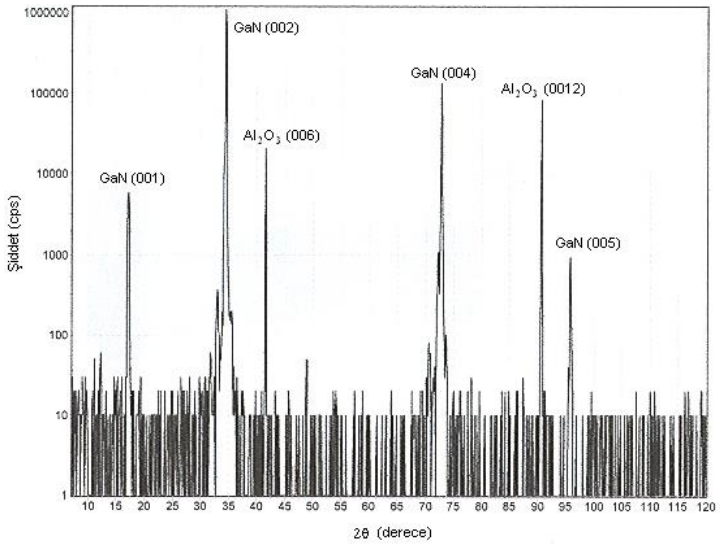
Şekil 2. MOCVD yöntemi ile safir alttaş üzerinde mavi LED yapısının büyütme sürecine ait zaman-sıcaklık diyagramı

Herhangi bir yöntemle sentezlenen kristalin karakterizasyonunda yapılması gereken ilk adım, kristalin birim hücre simetrisinin ve boyutlarının belirlenmesidir. Bu amaçla sıklıkla kullanılan X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemi ile birim hücrenin şekli, simetrisi ve boyutları otomatik olarak tayin edilebilmektedir. Buna ek olarak, numune kusursuz kristal yapıda veya tabakalı bir yapıya sahipse, X-ışınları demeti yalnızca belirli, dar açılarla saçılacaktır. Bu difraksiyon verileri kullanılarak, numunenin kimyasal bileşimi, kristal tabaka kalınlığı, örgü kusurları ve örgü uyuşmazlıkları gibi yapısal özellikler de otomatik olarak belirlenebilmektedir (Korcak ve ark., 2005; Kaganer ve ark., 2005; Korcak, 2007; Booker ve ark., 2010).

HR-XRD ölçümleri, Gazi Üniversitesinde Fotonik Laboratuvarında bulunan Bruker AXS-D8-Discover difraktometrsi ile yapılmıştır

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1'de şematik yapısı sunulan $In_xGa_{1-x}N$/GaN çoklu kuantum kuyusu (MQW) LED yapısına ait ω–2θ tarama sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Ölçümde gözlenen en yüksek yoğunluklu pik, (002) düzlemine karşılık gelmekte olup GaN tabakasına aittir.

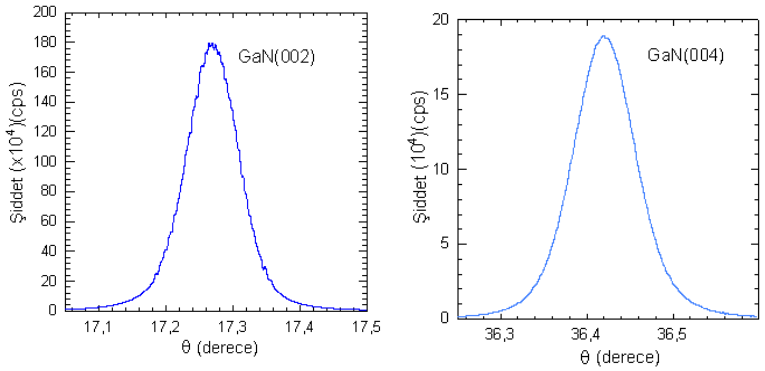


Şekil 3. $In_xGa_{1-x}N$/GaN LED yapısının ω-2θ grafiği

Tablo 1. InGaN tabakasına ait XRR ve HRXRD analizlerinden elde edilen karakterizasyon sonuçları

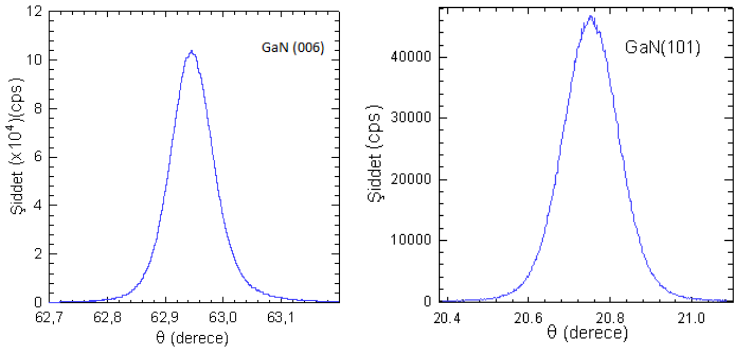
	ρ_{sim}	$\rho_{theo.}$	*T(nm)*		σ(nm)	X
	±0,03g/cm²	g/cm²	±1%		±0,1	
	XRR	-	XRR	HXRD	XRR	HXRD
p-GaN	5,02863	6,08840	193,5594	192,7642	0,14070	-
$In_xGa_{1-x}N$	5,14251	6,50361	2,2327	2,2330	1,47601	9,60
n-GaN	5,05121	6,08840	15,6551	-	0,54799	-

Tablo 1'de InGaN tabakasına ait XRR ve HRXRD analizlerinden elde edilen karakterizasyon sonuçları verilmektedir (Korcak, 2005; Korcak ve ark., 2006). Tüm yapıların yapısal parametrelerinin (örneğin, kalınlık, konsantrasyon, yoğunluk, gerinim vb.) belirlenebilmesi amacıyla yüksek çözünürlüklü monokromatörler kullanılmıştır.



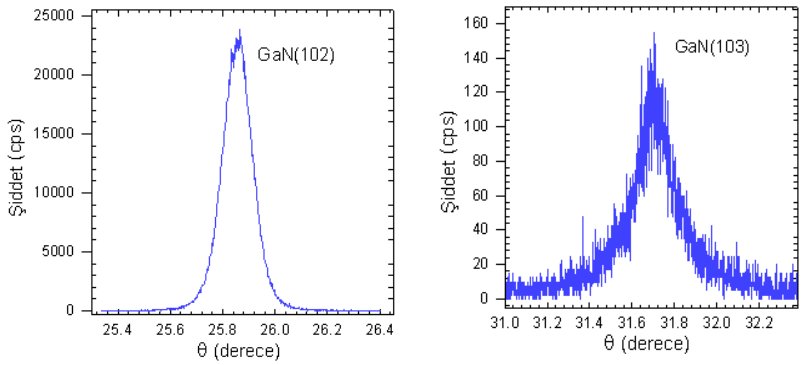
(a) (b)

Şekil 4. Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (002) ve b) (004) düzlemlerine ait simetrik rocking eğrileri



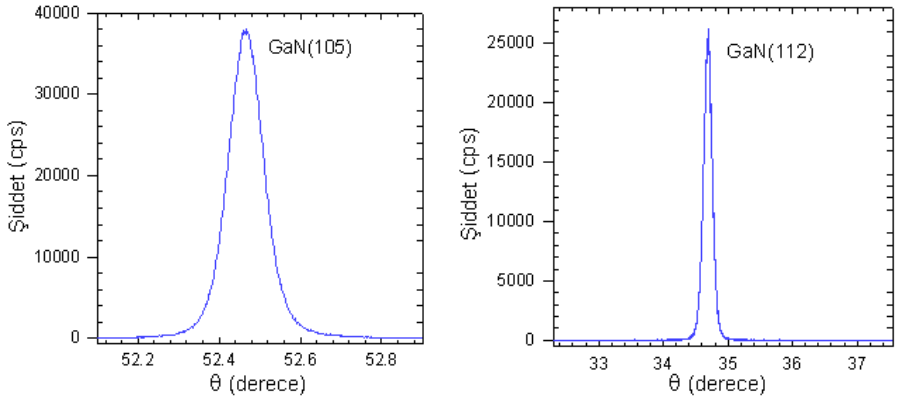
(a) (b)

Şekil 5. Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (006) ve b) (101) düzlemlerine ait asimetrik rocking eğrileri



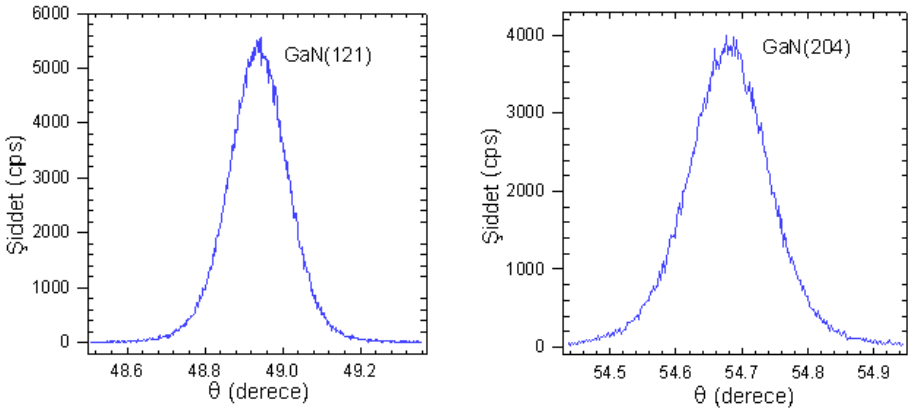
(a) (b)

Şekil 6. Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (102) ve b) (103) düzlemlerine ait asimetrik rocking eğrileri



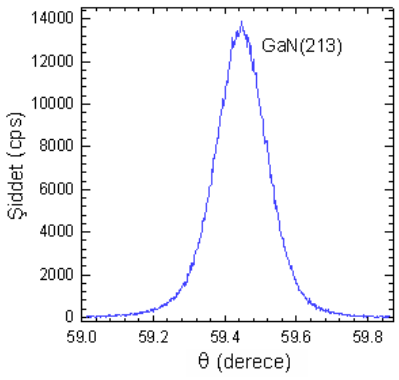
(a) (b)

Şekil 7. Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (105) ve b) (112) düzlemlerine ait asimetrik rocking eğrileri



(a) (b)

Şekil 8. Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (121) ve b) (204) düzlemlerine ait asimetrik rocking eğrileri



Şekil 9. Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için, GaN (213) düzlemine ait asimetrik rocking eğrisi

Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine büyütülmüş GaN filmleri için X-ışını kırınımı (XRD) ile elde edilen Şekil 4–5'de simetrik ve Şekil 6-9'da ise asimetrik rocking eğrileri sunulmaktadır (Korcak ve ark., 2007; Korcak, 2007; Öztürk ve ark., 2010). Şekil 4.a'da yer alan simetrik (002) ve Şekil 6.a'da verilen asimetrik (102) rocking eğrileri birlikte değerlendirildiğinde (Ekinci ve ark., 2018), XRD karakterizasyonunun GaN filmlerinin kristal kalitesini değerlendirmede güvenilir bir yöntem olduğu görülmektedir. Filmdeki kristal kusurlar, hem simetrik (002) hem de asimetrik (102) rocking eğrilerinde pik genişlemelerine neden olmaktadır (Hu ve ark., 2019). Yapılan ölçümler sonucunda, GaN (002) pikinin yarı genişlik (FWHM) değeri 309,6arcsec, GaN (102) pikinin ise 450arcsec olarak bulunmuştur. Diğer GaN piklerine ait FWHM ve θ (Bragg açısı) değerleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Burada Theta açı değerlerinin virgülden sonra üç ondalık hassasiyetle verilmesi, GaN gibi kristal yapısı hassas malzemelerde: Daha doğru örgü sabiti hesaplaması, daha düşük hata payı ile dislokasyon yoğunluğu analizi, gerilme ve kusur analizinin güvenirliliği ve simetrik/asimetrik piklerin doğru karşılaştırılması gibi kritik avantajlar sağlar.

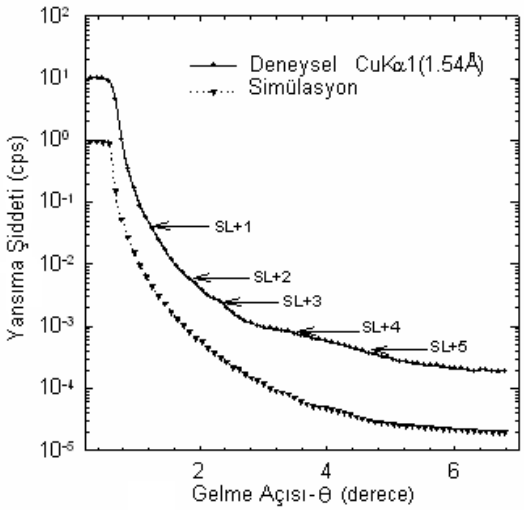
Tablo 2. GaN simetrik ve asimetrik yansıma piklerine ait FWHM ve θ (Theta) değerleri

	FWHM(degree)	**FWHM(arcsec)**	**Theta(degree)**
GaN(002)	0,086	309	17,268
GaN(004)	0,081	291	36,120
GaN(006)	0,083	298	62,946
GaN(101)	0,144	518	20,753
GaN(102)	0,125	450	25,853
GaN(103)	0,101	363	31,702
GaN(105)	0,097	349	52,463
GaN(121)	0,160	576	48,937
GaN(204)	0,128	460	54,679

Literatürde de (Öztürk ve ark., 2010) belirtildiği üzere, asimetrik rocking eğrilerinin yarı genişliği genellikle simetrik eğrilere kıyasla daha fazladır; bu durum çalışmamızda elde edilen sonuçlarla da örtüşmektedir. Rocking eğrilerindeki yarı genişliklerindeki genişlemeler; saf kenar (edge), saf dönme (screw) ve karışık (mixed) dislokasyonlardan kaynaklanmaktadır. Simetrik GaN (002) eğrisindeki genişleme screw dislokasyonlara işaret ederken, asimetrik GaN (102) eğrisindeki genişleme daha çok karışık dislokasyon tiplerini yansıtmaktadır.

Şekil 10'da ise $In_xGa_{1-x}N$/GaN LED yapısına ait X-ışını yansıma eğrileri sunulmaktadır. Bu eğriler, tabaka kalınlıkları, kimyasal bileşim ve ara yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin belirlenmesine olanak sağlar. 0–0,7° aralığında gözlenen plato bölgesi, yüzeyin oldukça düzgün ve üniform olduğunu göstermektedir. Yansıma eğrileri üssel azalma davranışı sergilemekte olup, Şekil 10'da SL+5 düzeyine kadar sıralı uydu pikleri net bir şekilde gözlemlenmiştir. Uydu piklerinin yüksekliği, ara

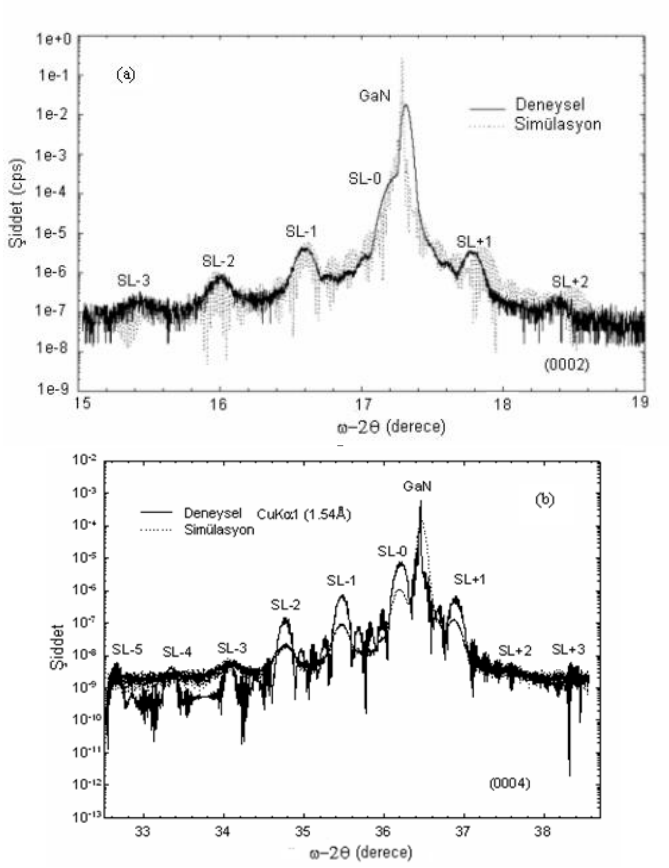
yüzey pürüzlülüğü ile tabakalar arası yoğunluk farkına bağlı, piklerin periyotları ise bireysel tabaka kalınlıkları ile ilişkilidir (Ekinci ve ark., 2018). Uydu piklerinin belirginliği, numunenin kristal yönelimi ve yapısal kalitesi hakkında da bilgi vermektedir.



Şekil 10. $In_xGa_{1-x}N$/GaN LED yapısının yansıma grafiği

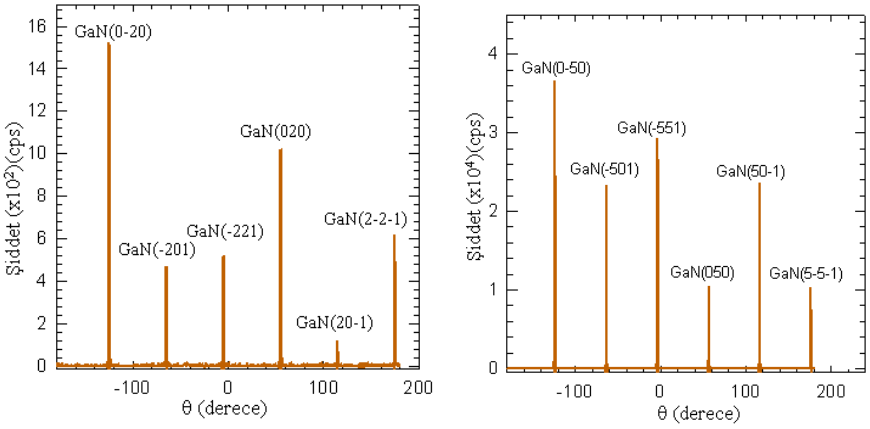
Şekil 11'de, GaN tabanlı yapıların (002) ve (004) düzlemlerine ait simetrik w-2q taramaları gösterilmektedir. Bu taramalara ait simülasyon eğrileri LEPTOS programı kullanılarak elde edilmiştir. (002) düzlemine ait taramada SL+2 ve SL-3, (004) düzlemine ait taramada ise SL+3 ve SL-5 uydu pikleri açıkça ayırt edilebilmektedir. Bu uydu piklerinin belirginliği, InGaN/GaN ara yüzeylerinin yüksek kalitede olduğunu göstermektedir. Ayrıca 36,410°'de gözlemlenen GaN ana piki oldukça keskindir ve tüm uydu piklerinin band genişliklerinin dar olması, yapının yüksek kristal kaliteye sahip olduğunu kanıtlamaktadır (Feaster, 2000). Ancak, uydu pikleri ile saçaklar arasında net bir ayrım oluşmaması durumunda, tabaka pürüzlülüğü hakkında kesin bilgi elde edilemeyebilir. Normal örgü hatası oranı GaN ve InN kristal parametreleri kullanılarak $2{,}367 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca LEPTOS simülasyonları aracılığı ile kuyu genişliği yaklaşık 2,2nm, bariyer genişliği 15,7nm ve In konsantrasyonu ise yaklaşık % 9,6 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 12.a'da safir alttaş üzerine büyütülen GaN filminin (102) düzlemine ait asimetrik θ taraması, Şekil 12.b'de ise GaN (105) düzlemine ait θ taraması gösterilmiştir. Şekil 12.b'de numune, (105) düzlemi etrafında döndürülerek analiz elde edilmiştir. Bu taramada, X-açısı 62° açısında, numune 17,739° açısında ve dedektör ise 36,963° açısında sabitlenmiştir. Taramada toplamda altı farklı pik gözlemlenmiştir. Bu pikler, (105) ve (102) düzlemlerinin döndürülmesiyle elde edilen hekzagonal yapının, düzlemleri dik (90°) açılarla kesmesi sonucu oluşan 6 simetri düzlemini temsil etmektedir. Bu verilerden, ince film yapısının hekzagonal simetriye sahip olduğu ve kristal yapının yüksek derecede düzenli (mükemmel) olduğu sonucu çıkarılabilir.



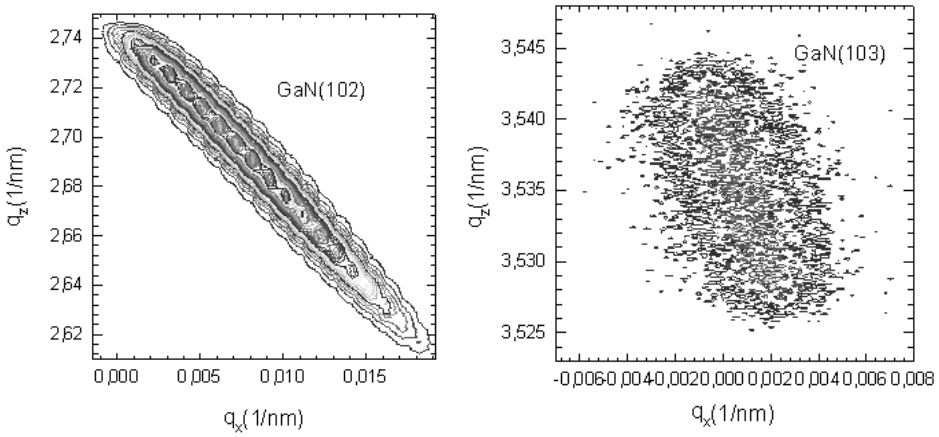
(a) (b)

Şekil 11. $In_xGa_{1-x}N$/GaN LED yapısına ait a) (002) ve b) (004) düzlemlerinin ω-2θ simetrik taramaları gösterilmektedir. Noktalı eğriler deneysel eğriye uyumlu bir şekilde fit edilerek bulunan eğriyi göstermektedir



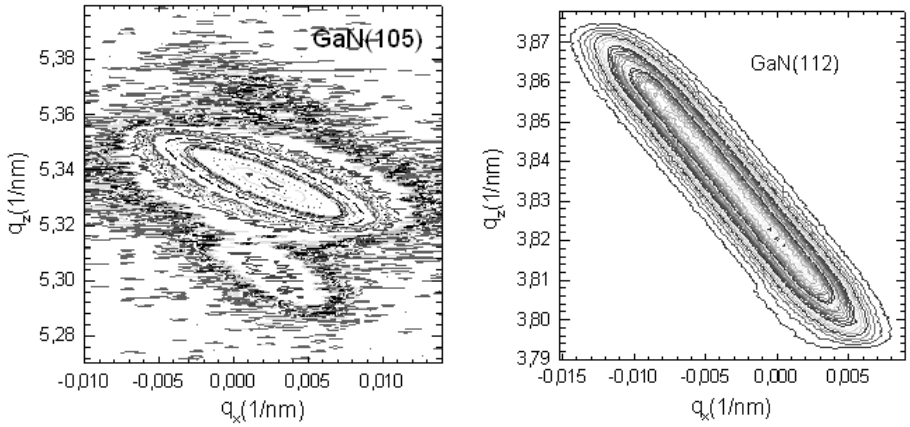
(a) (b)

Şekil 12. Safir alttaş üzerine büyütülen GaN filmine ait: a) GaN (102) düzleminin asimetrik θ açıları ve pik değerleri, b) GaN (105) düzleminin asimetrik θ açıları ve pik değerleri görülmektedir



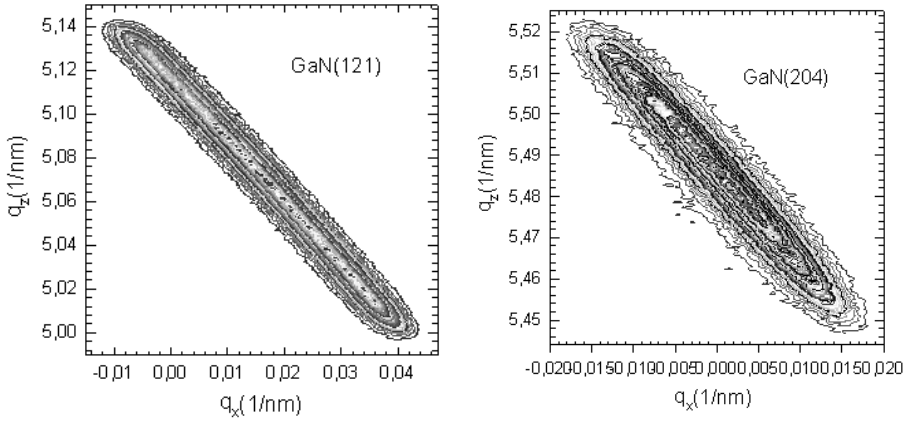
(a) (b)

Şekil 13. $In_xGa_{1-x}N$/GaN MQW yapısının, alttaşın a) (102), b) (103) yönelimlerinde elde edilen ters uzay haritaları



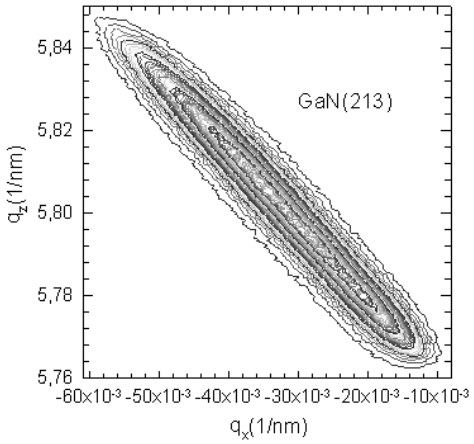
(a) (b)

Şekil 14. $In_xGa_{1-x}N$/GaN MQW yapısının, alttaşın a) (105), b) (112) yönelimlerinde elde edilen ters uzay haritası



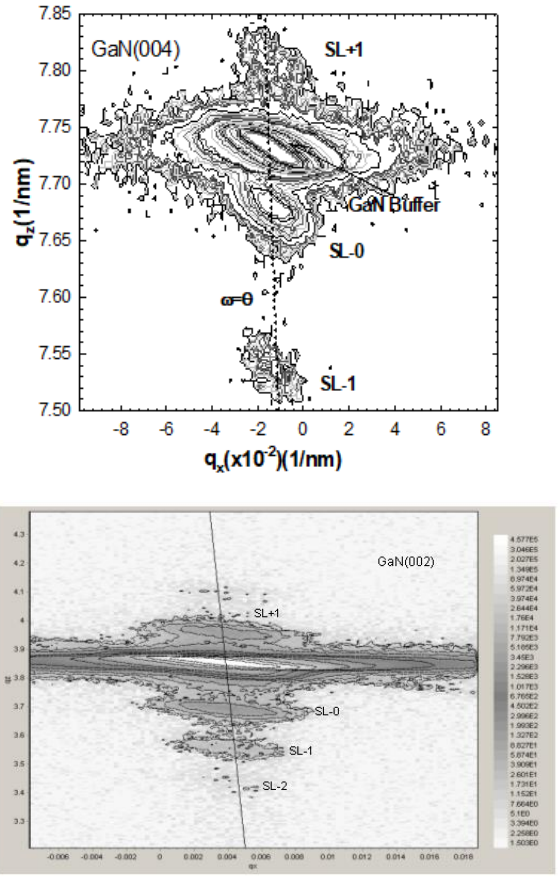
(a) (b)

Şekil 15. $In_xGa_{1-x}N$/GaN MQW yapısının, alttaşın a) (121) ve b) (204) yönelimlerinde elde edilen ters uzay haritası



Şekil 16. $In_xGa_{1-x}N$/GaN MQW yapısının, alttaşın (213) yöneliminde elde edilen ters uzay haritası

Şekil 13-16'da görselleştirilen ters uzay haritalarında, asimetrik kırınım piklerinin benzer (aynı yönlü) yönelimlere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum numunenin kristal kalitesinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Zira düşük kristal kalitesine sahip numunelerde asimetrik kırınım piklerinin ters uzay haritasında belirgin bir şekilde gözlemlenmesi genellikle zordur. Ayrıca, kristal kalitesi düşük olan yapılarda büyüme yönü tek yönlü olmayabilir ve bu da yapısal bozulmalara yol açabilir.



(a) (b)

Şekil 17. $In_xGa_{1-x}N$/GaN MQW yapısının, alttaşın, (a) (004), (b) (002) yöneliminde elde edilen ters uzay haritası

Şekil 17-(a)'da (In, Ga) N kuantum kuyulu yapıya ait (004) yansımasının ters uzay haritası gösterilmektedir. Haritada, GaN tampon tabakasına ait piki ile birlikte, kuantum kuyusu yapısına ait uydu pikleri net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Ters uzay haritasında, GaN tampon tabakası ve MQW sisteminin maksimum şiddeti w=q olarak ayarlanmıştır. Elde edilen veriler, MQW yapısının GaN tampon tabakaya göre oldukça üniform bir büyüme sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, XRR ve HXRD analizlerinden elde edilen sonuçlarla da uyum içerisindedir. Şekil 17-(b)'de ise alttaşın (002) yönelimine karşılık gelen InxGa1-xN/GaN MQW yapısına ait ters uzay haritası görülmektedir. Bu haritada da GaN tampon tabakasına ait ana pik ile uydu pikleri açıkça gözlemlenmektedir. Elde edilen bu RSM verileri, XRR ve HRXRD analizlerinden elde edilen grafiklerle yüksek düzeyde örtüşmekte olup, yapının kristal kalitesini ve tabakalar arası yapısal uyumu doğrulamaktadır.

5. Sonuçlar

Metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemiyle büyütülen $In_xGa_{1-x}N$ çoklu kuantum kuyusu (MQW) yapısı, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) yöntemi kullanılarak ayrıntılı biçimde karakterize edilmiştir. Yapılan XRD analizleri sonucunda, yapının periyot kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve aktif tabakadaki indiyum (In) konsantrasyonu belirlenmiştir. HR-XRD verilerinden elde edilen bulgular, yapının altıgen kristal sistemine sahip olduğunu ve zayıf dik gerinime (zorlamaya) maruz kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda, InGaN/GaN MQW yapısında dik gerinim oranı $2{,}367 \times 10^{-3}$ olarak, In bileşen oranı ise yaklaşık %9,60 olarak hesaplanmıştır. Ters uzay haritası (RSM) sonuçları, MQW yapısının yüksek düzeyde düzgün ve üniform olarak büyütüldüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgular, XRR ve HRXRD ölçümleri ile de tutarlılık göstermektedir. Sonuç olarak, yüksek sıcaklıkta büyütülen Si-katkılı GaN tampon tabakası üzerine büyütülen InGaN/GaN MQW yapısı, safir alttaş kullanımı ile birlikte yüksek kristal kalitesine sahip yapılara ulaşmak açısından uygun bir büyütme stratejisi sunmaktadır. Ayrıca, yapılan yapısal analizler doğrultusunda, karakterize edilen InGaN numunesinin LED tabanlı optoelektronik cihaz üretiminde kullanılmaya uygun olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, benzer yapıların yerli yöntemlerle üretilmesi, ülkemizin ileri teknolojiye dayalı ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine katkılarından dolayı, Gazi Üniversitesi Yarıiletken Fiziği ve Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı'nda görev yapan Prof. Dr. Mustafa Kemal Öztürk'e ve 2001K120590 numaralı proje kapsamında sağladığı destek için Devlet Planlama Teşkilatı'na teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Çalışmanın Tasarlanması	Yazar-1 (%55) - Yazar-2 (%45)
Veri Toplanması	Yazar-1 (%70) - Yazar-2 (%30)
Veri Analizi	Yazar-1 (%55) - Yazar-2 (%45)
Makalenin Yazımı	Yazar-1 (%90) - Yazar-2 (%10)
Makale Gönderimi ve Revizyonu	Yazar-1 (%95) - Yazar-2 (%05)

Yazarlar makaleye yukarıdaki oranlarda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Akasaki I., Detchprohm T., Hiramatsu K. Obsarvation of resonant raman lines during the photoluminesence. Applied Physics Letters 1996; 68(9): 1265-1267.

Arakawa Y., Sakaki H. Structural and optical properties of semiconductor superlattices. Applied Physics Letters 1995; 40*(4):* 3795–3797.

Bantien F., Weber J. Manganese luminescence in AlGaAs-alloys and AlGaAs/GaAs quantum wells. Solid State Communications 1987; 61(7): 423-426.

Bloch J., Shah J., Hobson WS., Lopata J., Chu SNG. Room-temperature 1.3 μm emission from InAs quantum dots grown by metal organic chemical vapor deposition. Applied Physics Letters 1999; 75(15): 2199–2201.

Booker ID., Khoshroo L.R., Woitok JF., Jansen RH., Kaganer V., Mauder C., Behmenburg H., Gruis J., Hauken M., Kalisch H. Dislocation density assessment via X-ray GaN rocking curve scans. Physica Status Solidi (C) Current Topic in Solid State Physics 2010; 7(7-8): 1787-1789.

Bour DP., Kneissl M., Hofstetter D., Romano LT., McCluskey M., Van de Walle CG., Krusor BS., Dunnrowicz C., Dolaldson R., Johnson NM. MOCVD growth and characterization of AlGaInN multiple quantum well heterostructures and laser diodes. Materials Science and Engineering. 1999; B59 (1-3): 33–38.

Borroff R., Merlin R., Chin H., Bhattacharya PK. Raman scattering by optical phonons in In1-y-zAlyGazAs lattice matched to InP. Applied Physics Letters 1998; 53(17): 1652-1653.

Cho A. Film deposition by moleculer beam technique. Journal of Vacuum Science and Technology 1971; 8(5): 31-38.

Ekinci H., Kuryatkov VV., Fotgey C., Dabiran A., Jorgenson R., Nikishin SA. Properties of InGaN/GaN MQW LEDs grown by MOCVD with and without hydrogen carrier gas. Journal of Vacuum Science and Technology 2018; 148: 168-172.

Feaster PF. X-Ray scattering from semiconductors. London: Imperial College Press;.2000.

Foxon CT., Cheng TS., Novikov SV. The growth and properties of group III nitrides. Journal of Crystal Growth 1995; 150(2): 892-898.

Fukatsu S., Yoshida H., Fujiwara A., Takahashi Y., Shiraki Y., Ito R. Spectral blue shift of photoluminescence in strained layer SixGe1-x/Si quantum well structure grown by gas source Si MB. Applied Physics Lett. 1992; 61(7): 804-806.

Hu H., Zhou S., Wan H., Liu X., Xu H. Effect of strain relaxation on performance of InGaN/GaN green LEDs grown on 4-inch sapphire substrate with sputtered AlN nucleation layer. Scientific Reports 2019; 9, Article number: 3447.

Ghosh S., Lenihan AS., Dutt G., Qasaimeh O., Steel DG., Bhattacharya P. Nonlinear optical and electro-optic properties of InAs/GaAs self-organized quantum dots. Journal of Vacuum Science & Technology B 2001; 19(4): 1455-1458.

Kaganer, VM., Brandt O., Ploog KH. X-ray diffraction peaks from threading dislocations in GaN epitaxial films. Physical Review B. 2005: 72(4): 045423.

Korcak S., Öztürk MK., Özçelik S. $In_xGa_{1-x}N$/GaN yapısının yüksek çözünürlükte yapısal analizi. 12. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı 2005; 51, Ankara Üniversitesi, Türkiye.

Korcak S., Öztürk MK., Çörekçi S., Akaoğlu B., Yu H., Çakmak M., Sağlam S., Özçelik S., Özbay E. Structural and optical properties of an $In_xGa_{1-x}N$/GaN nanostructure. Surface Science 2007; 601(18): 3892-3897.

Korcak S., $Al_xGa_{1-x}As$ ve $In_xGa_{1-x}N$ tabakalı yarıiletken yapıların optik ve yapısal özelliklerinin tayini (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 49, Ankara, Türkiye, 2007.

Leonard D., Krishanmurity M., Reavers CM., Denbaars SP., Petroff PM. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Applied Physics Letters 1993; 63(23): 3203-3205.

Mirin PP., Ibbetson JP., Nishi K., Gossard AC., Bowers JE. 1.3 μm photoluminescence from InGaAs quantum dots on GaAs, Applied Physics Letters 1995; 67(25): 3795-3797.

Morkoç H., Strite S., Gao GB., Lin ME., Sverdlov B., Burns M. Large band-gap SiC, III-V nitride and II-VI ZnSe based semiconductor device Technologies. Journal of Applied Physics 1994; 76 (3): 1363-1398.

Nakamura S., Mukai T., Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-hetero structure blue-light-emitting diodes. Applied Physics Letters 1994; 64(13): 1687-1689.

Öztürk MK., Yu H., Sarıkavak B., Korcak S., Özçelik S., Özbay E. Structural analysis of an InGaN/GaN based light emitting diode by X-ray diffraction. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 2010; 21(2): 185-191.

Rosa FR., Antonio M., Juan CM. Determination of the origin of the series resistance through electroluminescence measurements of GaAs and AlxGa1-xAs solar cells and LEDs. Solid-State Electronics 1998; 42 (4): 567-571.

Schuppen A., Gruhle A., Kibbel H., Erben U., Koing U. SiGe-HBTs with high fT at moderate current densities. Electronics Letters 1994; 30(14): 1187-1188.

Siegle H., Eckey L., Hoffmann A., Thomsen C., Meyer BK., Schikora D., Hankeln M., Lischka K. Quantitative determination of hexagonal minority phase in cubic GaN using Raman spectroscopy. Solid State Communications 1995; 96(12): 943-949.

Strite S., Morkoç H. GaN, AlN and InN: A review. Journal of Vacuum Science & Technology B 1992; 10 (4): 1237-1266.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1601-1609, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1601-1609, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Türkiye'de Sığır Eti ve İnek Sütü Üretimindeki Zamansal Değişimlerin Doğrusal Olmayan Modellerle İncelenmesi

Tolga TOLUN[1]*

[1]Sütçü İmam University, Faculty of Agriculture, Department of Bioengineering and Sciences, 46100, Kahramanmaraş

[1]https://orcid.org/0000-0003-4081-1222
*Sorumlu yazar: tolga_tolun@hotmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 04.07.2025
Kabul tarihi:13.01.2026
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Doğrusal olmayan regresyon modelleri
Sığır et ve inek süt üretimi (ton)
SAS
Yıl

ÖZ

Bu araştırmada, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayınlanan 2001-2023 yıllarına ait istatistiksel tablolardan elde edilen veri seti kullanılarak, sığır eti (ton) üretimi için 9 farklı model (McNally, Gompertz, Gamma, Bertalanffy, Orskov, Brody, Wood, Kuadratik, Wilmink) ve sığır sütü (ton) üretimi için de 8 farklı model (Lojistik, McNally, Gamma, Bertalanffy, Brody, Wood, Kuadratik, Wilmink) istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Modellerin uygunluğu; hata kareler ortalaması, düzeltilmiş belirleme katsayısı, doğruluk ve sapma faktörleri ile bilgi kriterleri (Akaike bilgi kriteri, düzeltilmiş Akaike bilgi kriteri, Bayesian bilgi kriteri) kullanılarak değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda, her iki veri seti için en uygun modelin, sığır eti üretimi için Brody modeli, sığır sütü üretimi için ise Lojistik model olduğu belirlenmiştir. Bu modeller, diğer modellere kıyasla en düşük hata kareler ortalaması ve bilgi kriterleri değerlerine sahip olduğu bildirmiştir. Araştırma, doğru model seçiminin yalnızca hata terimlerine dayanmak yerine, farklı istatistiksel kriterlerin birlikte değerlendirilmesiyle daha sağlıklı yapılabileceğini ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalarda, Brody ve Lojistik modellerin farklı veri setlerinde analiz edilmesi önerilmektedir.

Investigation of Temporal Changes in Beef Meat and Cow's Milk Production in Türkiye Using Nonlinear Models

Research Article

Article History:
Received: 04.07.2025
Accepted: 13.01.2026
Published online:15.06.2026

Keywords:
Nonlinear regression models.
Beef meat and cow milk production (tonnes).
SAS
Year.

ABSTRACT

In this study, using the data set obtained from the statistical tables for the years 2001-2023 published by the Turkish Statistical Institute (TUIK), 9 different models (McNally, Gompertz, Gamma, Bertalanffy, Orskov, Brody, Wood, Quadratic, Wilmink) for beef meat (tonnes) production and 8 different models (Logistic, McNally, Gamma, Bertalanffy, Brody, Wood, Quadratic, Wilmink) for cow milk (tonnes) production were compared statistically. The suitability of the models was evaluated using the mean square error, corrected coefficient of determination, accuracy and bias factors and information criteria (Akaike information criterion, corrected Akaike information criterion, Bayesian information criterion). As a result of the study, it was determined that the most suitable model for both data sets was the Brody model for beef meat production and the Logistic model for cow milk production. These models have been reported to have the lowest mean square error and information criteria values compared to other models. The research has revealed that the correct model selection can be made more soundly by evaluating different statistical criteria together, rather than relying solely on error terms. In future studies, it is recommended that Brody and Logistic models be analyzed on different data sets..

To Cite: Tolun T. Investigation of Temporal Changes in Beef Meat and Cow's Milk Production in Türkiye Using Nonlinear Models. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1601-1609.

1.Introduction

The livestock sector plays a critical role in economic development and increasing rural welfare as one of the cornerstones of food production worldwide (FAO, 2021). In particular, beef meat and milk production have an important place in human nutrition as a source of protein and constitute a significant part of the agricultural production structure in Türkiye (Engindeniz et al., 2021). The increasing population, urbanization rate and income level in our country in recent years have led to an increase in the demand for animal products (Demirbaş, 2020). This situation has made it necessary to increase production in a sustainable and efficient way. Understanding the temporal changes in beef meat and milk production is important for strategic planning in the sector and effective management of resources (Yılmaz and Şahin, 2022). Production processes are affected by biological and environmental factors and generally exhibit a non-linear development model (Seber and Wild, 2003). For this reason, non-linear regression techniques are widely preferred in modeling the time-dependent changes in production quantities. These models increase the accuracy and reliability of estimates by representing biological growth and production processes in a more realistic way (Pereira et al., 2019).

Research on beef meat and milk production in Türkiye is generally limited to short-term data and mostly focuses on classical linear models (Yılmaz and Şahin, 2022). However, non-linear modeling using long-term data provides an in-depth understanding of production trends and allows for healthier predictions for the future (FAO, 2021). In addition, determining the most appropriate model by comparing different models is seen as a critical step for increasing productivity in the livestock sector (Demirbaş, 2020).

This study examines the time-dependent changes in production quantities using various nonlinear models based on beef meat and cow milk production data published by the Turkish Statistical Institute (TUIK) between 2001 and 2023. The models used in the study, such as the Brody, Logistic, and Gompertz models, are frequently preferred methods in the literature for modeling biological growth curves (Pereira et al., 2019).

The Brody model is generally used to explain the slowing down of biological variables such as live weight or production that reach an asymptotic value over time, having a structure in which growth is rapid at the beginning and gradually decreases afterward. The Logistic model shows a symmetric S-curve form in which growth increases rapidly at the beginning, reaches a certain saturation point, and then stabilizes. The Gompertz model similarly exhibits S-shaped growth but is asymmetric compared to the Logistic model; growth is faster in the early period and slows down over time as it approaches the upper limit.

The effectiveness of the models was compared using statistical criteria such as mean square error (MSE), adjusted coefficient of determination ($\overline{R}^2$) ,Akaike information criterion (AIC), adjustedAkaike information criterion (AICc), Bayesian information criterion (BIC), Accuracy factor (AF) , Bias factor

(BF), Durbin-Watson Value (DW) and the most suitable models for beef meat and cow milk production were determined. The results obtained are expected to provide a scientific basis for the development and production planning of the livestock sector in Türkiye and to serve as a guide for short- and medium-term production forecasts. In addition, the use of these models will contribute to the more efficient management of animal production processes, the optimization of feed and health planning, and the maintenance of the supply-demand balance. In future studies, it is recommended that production data be analyzed on a regional basis and that environmental and economic factors be integrated into the model to make the analyses more comprehensive.

2. Material and Methods

This research is based on a dataset obtained from the data on beef meat production (tonnes) and cow milk (tonnes) production published by the TUIK between 2001-2023. In order to decide which model is the most suitable for the years determined in the research, the statistical equations and evaluation criteria used in the literature for model comparison criteria were calculated using the SAS 9.4 statistical package program and a detailed examination of the evaluation criteria of the models was conducted. In addition, the annual statistical data published by the TUIK constituted the main data source of the research and these data are given in Table 1.

Table 1. TUIK statistical tables of beef meat and cow milk production.

No:	Years	Beef Meat	Cow Milk
1	2001	493763	8489082
2	2002	496198	7490633
3	2003	489377	9514138
4	2004	488556	9609325
5	2005	491560	10026202
6	2006	514042	10867302
7	2007	549513	11279340
8	2008	581497	11255176
9	2009	608183	11583313
10	2010	647067	12418544
11	2011	710652	13802428
12	2012	790034	15977837
13	2013	798784	16655009
14	2014	815674	16998850
15	2015	862098	16933520
16	2016	956180	16786263
17	2017	1093841	18762319
18	2018	1281234	20036877
19	2019	1330169	20782375
20	2020	1341446	21749340
21	2021	1460719	21370115
22	2022	1572747	19912135
23	2023	1670606	19961908

In the research, in the modeling performed on the data set of beef meat production and cow milk production by year, curve models widely used in the literature were considered. For this purpose, 9 different models (McNally, Gompertz, Gamma, Bertalanffy, Orskov, Brody, Wood, Quadratic, Wilmink) were used in the modeling of production curves in beef meat production and 8 (Logistic, McNally, Gamma, Bertalanffy, Brody, Wood, Quadratic, Wilmink) in cow milk production. The equations used in the modeling of the curves are also given in Table 2.

Table 2. Equations used in the modeling of beef meatand cow milk production curves by year.

Models Names	**Equalities**
Logistic	$Y_t = \beta_0(1 + \beta_1 \exp(-\beta_2 t))^{-1}$
McNally	$Y_t = \beta_0 t^{\beta_1} \exp(-\beta_2 t + \beta_3 t^{1/2})$
Gompertz	$Y_t = \beta_0 \exp(-\beta_1 \exp(-\beta_2 t))$
Gamma	$Y_t = \beta_0{}^{\beta_1}(e^{-\beta_2 t})$
Bertalanffy	$Y_t = \beta_0(1 - \beta_1 \exp(-\beta_2 t))^3$
Orskov	$Y_t = \beta_0 + \beta_1(1 - e^{\beta_3 t})$
Brody	$Y_t = \beta_0(1 - \beta_1 \exp(-\beta_2 t))$
Wood	$Y_t = \beta_0 t^{\beta_1} * e^{-\beta_2 t}$
Quadratic	$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$
Wilmink	$Y_t = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 e^{-0.05*t}$

In Table 2, β_0, β_1, β_2, β_3 ve β_4 represent the model parameters, t represents the time, and the model comparison criteria, MSE, $\overline{R}^2$, AF and BF , DW, AIC, AICc and BIC used. Model comparison criteria are also given in Table 3.

Table 3. Model comparison criteria.

Criterion	**Equality**
Mean Square Error	$MSE = ESS/EDF$
Adjusted Coefficient of Determination	$\overline{R}^2 = 1 - (1 - R^2)(n - 1/(n - p - 1))$
Accuracy Factor	$AF = 10^{\sum_{i=1}^{n} \lvert \log(\widehat{Y}_i / Y_i) \rvert / n}$
Bias Factor	$BF = 10^{\sum_{i=1}^{n} \log(\widehat{Y}_i /) / n}$
Durbin-Watson Value	$DW = \frac{\sum_{i=2}^{n} (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{n} e_i^2}$
Akaike Information Criterion	$AIC = n x \ln\left(\frac{MSE}{n}\right) + 2k$
Corrected Akaike Information Criterion	$AICc = n x \ln\left(\frac{MSE}{n}\right) + \left(\frac{n(n+p)}{n-p-2}\right)$
Bayesian Information Criterion	$BIC = n x \ln\left(\frac{MSE}{n}\right) + k \ln(n)$

MSE: Mean Square Error, ESS: Error Sum of Squares, EDF: Error Degrees of Freedom, n: sample size, p: number of independent variables,

$\widehat{Y}_i$: estimated value, Y_i: observation value, e_i: error term and k: number of parameters.

3. Result and Discussion

In this study, nine different non-parametric models were examined using data on the temporal changes in beef meat production. Quantitative findings regarding the estimation accuracy and explanatory power

of the models are presented in detail in Table 4, the parameter estimation values are given in Table 5, and the resulting curves are shown in Figure 1.

Table 4. Comparison criteria for beef meat production.

Models	MSE	$\overline{R}^2$	AF	BF	DW	AIC	AICc	BIC
McNally	169800	0.82	1.02	1.00	1.57	279.76	281.02	276.89
Gompertz	248850	0.74	1.04	1.00	1.57	288.55	289.81	285.68
Gamma	169800	0.82	1.02	1.00	1.54	279.76	281.02	276.89
Bertalanffy	239800	0.75	1.04	1.00	1.56	287.69	288.96	284.83
Orskov	222300	0.77	1.04	1.00	1.56	285.95	287.21	283.09
Brody	36600	0.97	1.06	1.00	1.07	244.46	245.72	241.60
Wood	169800	0.82	1.02	1.00	1.57	279.76	281.02	276.89
Quadratic	147550	0.90	1.02	1.00	2.19	276.52	277.79	273.66
Wilmink	154600	0.90	1.02	1.00	1.68	277.60	278.86	274.73

MSE: Mean Square Error, $\overline{R}^2$: Corrected Coefficient of Determination, AF: Accuracy Factor, BF: Bias Factor, DW: Durbin-Watson, AIC: Akaike Information Criterion, AICc: Corrected Akaike Information Criterion, BIC: Bayesian Information Criterion.

Table 5. Parameters of beef meat production.

Models	β_0	β_1	β_2
McNally	466257	-0.23	-0.08
Gompertz	93266.8	-1.47	-0.02
Gamma	466250	-0.24	-0.06
Bertalanffy	170005	-0.34	-0.05
Orskov	422461	-144884	-0.10
Brody	2.40	-144884	-0.06
Wood	466242	-0.20	-0.07
Quadratic	505703	-14679.8	2882.6
Wilmink	-3531913	170087	4076473

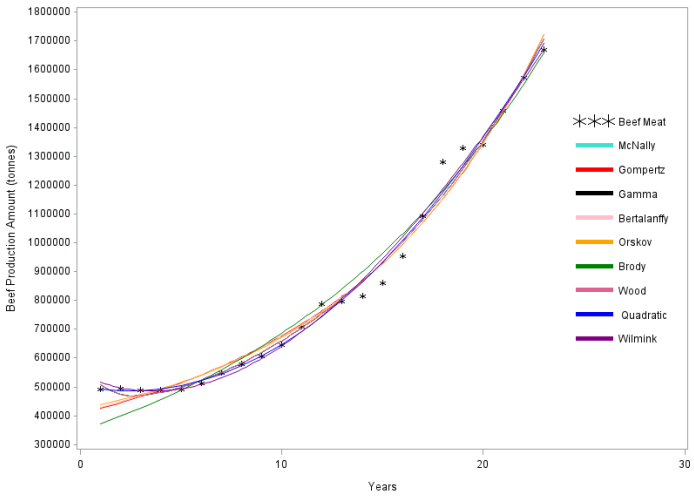


Figure 1. Curves obtained for beef meat production.

When Table 4 is examined, it is seen that the smallest mean square error values were obtained from the Brody and Quadratic models. In terms of the $\overline{R}^2$, the Brody, Quadratic, and Wilmink models had values of 0.90 or higher. Regarding the DW autocorrelation values, it was determined that all models except

the Brody model had values close to two, indicating the presence of a positive autocorrelation problem. In terms of AF and BF, all models were found to have values close to 1. Furthermore, according to the AIC, AICc and BIC the values obtained from the Brody, Quadratic, and Wilmink models were the smallest compared to the other models. Considering all comparison criteria together, the Brody model was determined to be the most suitable model for beef meat production.

Using the data on the temporal changes in cow milk production, eight different non-parametric models were examined. Quantitative findings regarding the estimation accuracy and explanatory power of the models are presented in detail in Table 6, the parameter estimation values are given in Table 7, and the resulting curves are shown in Figure 2.

Table 6. Comparison criteria for cow milk production.

Models	MSE	$\bar{R}^2$	AF	BF	DW	AIC	AICc	BIC
Logistic	90450	0.95	1.05	1.00	1.57	265.27	266.53	262.40
McNally	138950	0.94	1.06	1.00	1.57	275.14	276.41	272.28
Gamma	138950	0.94	1.06	1.00	1.54	275.14	276.41	272.28
Bertalanffy	106950	0.95	1.05	1.00	1.56	269.12	270.39	266.26
Brody	179300	0.93	1.06	1.01	1.56	281.01	282.27	278.14
Wood	138950	0.94	1.06	1.00	1.07	275.14	276.41	272.28
Quadratic	112650	0.94	1.06	1.00	1.57	270.32	271.58	267.45
Wilmink	114450	0.94	1.05	1.00	2.19	270.68	271.95	267.82

MSE: Mean Square Error, $\bar{R}^2$: Corrected Coefficient of Determination, AF: Accuracy Factor, BF: Bias Factor, DW: Durbin-Watson, AIC: Akaike Information Criterion, AICc: Corrected Akaike Information Criterion, BIC: Bayesian Information Criterion.

Table 7. Parameters of cow milk production.

Models	β_0	β_1	β_2
Logistic	8685526	3.16	0.05
McNally	6793191	0.19	-0.02
Gamma	6793188	0.20	-0.01
Bertalanffy	36509688	0.43	0.04
Brody	58.82	-144884	-0.04
Wood	6793190	0.19	-0.02
Quadratic	6511405	760028	-3993.5
Wilmink	10094036	566050	-3461011

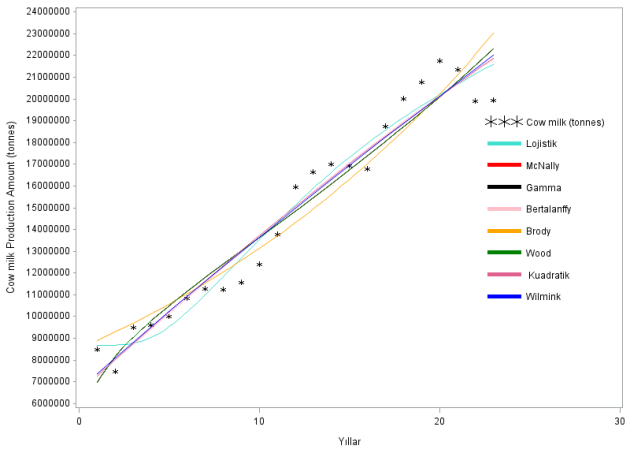


Figure 2. Curves obtained for cow milk production.

When all comparison criteria in Table 6 are taken into account, it is observed that the Logistic, Bertalanffy, and Quadratic models produced better results compared to the others. Among these three models, the Logistic model stands out. In other words, when all comparison criteria are considered, the Logistic model was determined to be the most suitable model for cow milk production.

When Tables 4 and 6 are examined, considering all comparison criteria together, the Brody model was determined to be the most suitable for beef meat production, while the Logistic model was found to be the most appropriate for cow milk production. This result indicates that the Brody model better represents the biological growth process in beef meat production, whereas the Logistic model more accurately reflects the asymptotic nature of the production curve in cow milk production.

The findings obtained are largely consistent with similar studies reported in the literature. In particular, research conducted by Bilgin and Esenbuğa (2003), Gbangboche et al. (2008), Daşkıran et al. (2010), Şahin and Efe (2010), Araujo et al. (2012), Şahin et al. (2014), Gök et al. (2019), Yalçınöz and Şahin (2020), Gök et al. (2021), Yağanoğlu (2022), Tolun et al. (2023), Yavuz et al. (2023), Ağyar (2024), Çetenak et al. (2024), Tolun et al. (2024), Şahin and Gök (2025) also reported that similar nonlinear models successfully explained animal production processes.

This parallel demonstrates that the models used possess strong explanatory power not only theoretically but also in reflecting the dynamics of animal production in Türkiye. The fact that the Brody model provided optimal results for beef meat production, and the Logistic model for cow milk production, highlights the sensitivity of these models to growth and production dynamics in different biological processes.

4. Conclusion

This study reliably modeled the temporal development of beef meat and cow milk production in Türkiye, providing a scientific basis for monitoring and forecasting production trends. The findings indicate that the Brody and Logistic models are preferable for beef production and cow milk production, respectively, and can serve as effective tools in production planning, short and medium term forecasting, and agricultural strategy development.

The use of these models can contribute to the optimization of feed and health planning, more efficient management of production processes, and maintenance of the supply-demand balance. Future studies could enhance prediction accuracy by testing the performance of the models under different regional conditions and incorporating external factors affecting production, such as feed costs, climate variables, and import-export policies. Additionally, evaluating production data on a monthly or seasonal basis would provide an opportunity to analyze the sensitivity of the models to short-term fluctuations.

In conclusion, this study presents an effective approach for modeling animal production processes in Türkiye and offers a valuable scientific contribution to planning, monitoring, and policy development in the livestock sector.

Conflict of Interest

The author declare that there is no conflict of interest.

Consent for Publication

The author has contributed 100%.

References

Ağyar O. Comparative analysis of the equations used in modeling indıvidual lactation curves in Anatolian water buffalo (bubalus bubalis). Black Sea Journal of Agriculture, 2024; 7(6): 671-678.

Araujo RO., Marcondes CR., DameMCF., Garnero AV., Gaunski RJ., Everling DM., Rorato, PRN. Classical nonlinear models to describe the growth curve for Murrah buffalo breed. Ciência Rural Santa Maria 2012; 42(3): 520-525.

Bilgin ÖC., Esenbuğa N. Parameter estimation in linear-nonlinear growth models, Animal Production 2003; 44(2): 81-90.

Çetenak T., Gök İ., Yavuz E., Şahin M. Statistical models and evaluation criteria used in poultry farming. Black Sea Journal of Agriculture, 2024; 7(6): 710-719.

Daşkıran G., Koncagül S., Bingol M. Growth characteristics of indigenous Norduz female and male lambs. Journal of Agricultural Sciences, 2010; 16(1): 62-69.

Demirbaş M. Sustainability of the livestock sector in Türkiye: Productivity and environmental impacts. Journal of Agriculture and Nature 2020; 23(1): 45-60

Engindeniz S., Taşkın T., Gbadamonsi AA., Ahmed AS., Cisse AS., Seioudy A., Kandemir Ç., Koşum N. Analysis of consumers' milk and dairy product preferences. Tekirdağ Faculty of Agriculture Journal, 2021; 18(3): 470–481.

FAO. The state of food and agriculture 2021: Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2021.

Gbangboche AB., Glele-Kakai R., Salifou,S., Albuquerque LG., Leroy P. Comparison of non-linear growth models to describe the growth curve in West African dwarf sheep. Animal 2008; 2(7): 1003–1012.

Gök T., Mikail N., Akkol S. Analysis of the first lactation curve in Holstein cows with different mathematical models. KSÜ Tarım ve Doğa Derg., 2019; 22(4): 601-608.

Gök Y., Şahin M., Yavuz E. Comparative analysis of individual lactation curve models in some cattle breeds. KSU J Agric Nat, 2021; 24(5): 1118-1125.

Pereira L., Costa A., Silva R. Nonlinear growth models applied to livestock production: A review. Journal of Animal Science and Biotechnology, 2019; 10(12): 1-15.

Seber GAF., Wild CJ. Nonlinear regression. Wiley-Interscience, 2003.

Şahin M., Efe E. Use of cubic spline regressions in modeling lactation curves in dairy cattle. KSU J Nat Sci 2010; 13(2): 17-22.

Şahin A., Ulutaş Z., Karadavut U., Yıldırım A., Arslan S. Comparison of growth curve in Anatolian buffalo calves using various nonlinear models. Kafkas University Veterinary Faculty Journal 2014; 20(3): 357-362.

Şahin M., Gök İ. Modeling of native sheep breeds in Türkiye by years with nonlinear mathematical models. International Journal of Pure and Applied Sciences 2025; 11(2): 527-533.

Tolun T., Yavuz E., Şahin M., Gök İ. Modeling egg curves in partridges. Black Sea Journal of Agriculture, 2023; 6(1): 21-25.

Tolun T., Gök İ., Şahin M. Modeling of some egg characteristics in henna partridges. Black Sea Journal of Agriculture, 2024; 7(6): 729-742

Yalçınöz E., Şahin M. Modeling of egg yield curves in laying hens. KSÜ Journal of Agriculture and Nature 2020; 23(5): 1373-1378

Yağanoğlu AM. A comparative study of the nonlinear methods for estimating body weight based on body measurements in different sample sizes in Morkaraman sheep. Journal of the Faculty of Veterinary Medicine, Caucasus University2022; 28(2): 261-265.

Yavuz E., Abacı SH., Erensoy K., Şahin M. Modeling of ındividual egg weights of Lohmann-Brown layer hens. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences 2023; 47(3): 229-335.

Yılmaz S., Şahin M. Long-term trend analysis of beef production in Türkiye: 2000-2020 period. Journal of Agricultural Economics 2022; 28(3): 112-126.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1610-1634, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1610-1634, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Güvenlik İklimi ve Güvenlik Performansı Arasındaki İlişkide Örgütsel Bağlılık ve Güvenlik Motivasyonunun Aracılık Rollerinin İncelenmesi: Elektrik Sektörü Çalışanları Üzerine Bir İnceleme

Hamdi Emre BAĞIRAN[1*], Reşit ERÇETİN[2]

[1]İstanbul Aydın Üniversitesi, Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, İstanbul
[2]İstanbul Aydın Üniversitesi, Anadolu Bil Meslek, Yüksekokulu, Elektrik Programı, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0003-2395-9700
[2]https://orcid.org/0000-0003-0432-6393
*Sorumlu yazar: emrebagiran@aydin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 20.10.2025
Kabul tarihi:18.01.2026
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Güvenlik iklimi
Güvenlik motivasyonu
Güvenlik performansı
Örgütsel bağlılık
Elektrik iletim ve dağıtım sektörü

ÖZ

Bu çalışma, güvenlik iklimi, örgütsel bağlılık, güvenlik motivasyonu ve güvenlik performansı arasındaki ilişkileri incelemeyi ve örgütsel bağlılığın bu ilişkilerdeki aracılık rolünü değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın örneklemini Türkiye'de elektrik iletim ve dağıtım sektöründe görev yapan 455 çalışan oluşturmaktadır. Veriler Yapısal Eşitlik Modellemesi (YEM) yöntemiyle analiz edilmiş; alt boyutlar arasındaki ilişkiler korelasyon ve yol analizleriyle test edilmiştir. Araştırma sonucunda, güvenlik ikliminin hem güvenlik motivasyonu hem de güvenlik performansı üzerinde doğrudan ve dolaylı etkileri olduğu, ayrıca güvenlik motivasyonunun güvenlik performansı üzerindeki belirleyici rolü ortaya konmuştur. Örgütsel bağlılık ile güvenlik performansı arasında doğrudan bir ilişki bulunmazken, güvenlik motivasyonu aracılığıyla dolaylı bir etkisi tespit edilmiştir. Bu çalışma, iş sağlığı ve güvenliği alanına sektörel düzeyde ampirik katkı sunarken, örgütsel faktörlerin güvenli davranışlar üzerindeki etkisine dair literatürdeki boşlukları da doldurmayı hedeflemektedir.

Examining The Mediating Roles of Organizational Commitment and Safety Motivation in The Relationship Between Safety Climate and Safety Performance: A Study on Electricity Sector Employees

Research Article

Article History:
Received: 20.10.2025
Accepted: 18.01.2026
Published online:15.06.2026

Keywords:
Safety climate
Safety motivation
Safety performance
Organizational commitment
Electricity Transmission and Distribution Sector

ABSTRACT

This study aims to examine the relationships between safety climate, organizational commitment, safety motivation, and safety performance, and to assess whether organizational commitment plays a mediating role in these relationships. The research sample consists of 455 employees working in the electricity transmission and distribution sector in Türkiye. Data were analysed using Structural Equation Modelling (SEM), and the relationships among sub-dimensions were tested through correlation and path analysis. Findings indicate that safety climate has both direct and indirect effects on safety motivation and safety performance, while safety motivation plays a key role in enhancing performance. Although no direct effect was found between organizational commitment and safety performance, an indirect relationship was identified through safety motivation. This study provides sector-specific empirical insights into the connection between occupational safety and organizational factors, contributing to the literature by addressing existing gaps in understanding how organizational variables influence safety behaviours in high-risk industries.

To Cite: Bağıran HE., Erçetin R. Examining The Mediating Roles of Organizational Commitment and Safety Motivation in The Relationship Between Safety Climate and Safety Performance: A Study on Electricity Sector Employees. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1610-1634.

1. Introduction

The rapid advancement of technology has significantly facilitated daily life; however, it has also introduced new dimensions of dangers and risks in various sectors. Recent studies have increasingly recognized the importance of addressing the health and safety needs of employees, who are the cornerstone of the workforce. Nations are developing their own Occupational Health and Safety (OHS) initiatives to ensure workers feel content, safe, and productive. Nonetheless, disparities exist among countries regarding advancements in OHS practices, mirroring trends observed in other domains. Notably, sectors classified as highly hazardous have witnessed escalating rates of work-related accidents resulting in injuries and fatalities annually. While OHS initiatives have the potential to mitigate these incidents, their effectiveness hinges on both the environments provided by employers and the attitudes and behaviours exhibited by employees.

Safety climate, which is a reflection of how employees perceive an organization's commitment to safety, is recognized as an important determinant in assessing safety outcomes, particularly in terms of the frequency and severity of workplace injuries (Beus et al., 2010). Some empirical studies continue to confirm that safety climate plays a critical role in shaping employees' safety-related behaviours and performance outcomes, especially in high-risk industries (Syed-Yahya et al., 2022; Arzahan et al., 2022). Safety performance refers to both the safety-oriented behaviours demonstrated by employees and the outcomes that result. It encompasses actions undertaken across various job roles to promote the well-being of workers, clients, the public, and the environment (Burke et al., 2002; Christian et al., 2009). Recent evidence suggests that shared psychological safety climate within workgroups strengthens safety-related behaviours and performance, particularly in high-risk industries (Xia et al., 2025).

Unsafe working environments not only jeopardize employee well-being but also impose substantial costs on organizations. Safety motivation, characterized by an individual's willingness to engage in safe behaviours and the values associated with these behaviours (Neal and Griffin, 2006), plays a pivotal role in enhancing safety behaviours among employees. Research indicates that safety training programs emphasizing active employee participation can bolster safety motivation (Hedlund et al., 2016). More recent empirical evidence indicates that safety motivation serves as an important mechanism through which safety climate influences safety performance, suggesting that improvements in safety outcomes are most sustainable when organizational safety priorities are internalized by employees (Xi et al., 2023; Wang et al., 2023). Research has demonstrated a strong link between safety motivation and safety performance, with higher performance levels correlating with fewer accidents and injuries (Christian et al., 2009).

Organizational commitment is a psychological factor that enables employees to be attached to their organizations and affects their attitudes and behaviours. With organizational commitment, its employees internalize the organization's goals and values for the organization's benefit. Organizational commitment, which reflects the quality of the existing relationship between individuals and their organizations, emerges as the members' belief and commitment to organizational values and their willingness to work harder for the organization and to continue in the organization. Individuals with high organizational commitment establish a strong bond with the goals and values of the organization and become willing to make efforts on behalf of the organization. Recent research suggests that organizational commitment is also indirectly associated with safety-related outcomes by strengthening employees' motivation and engagement in safety behaviours (Rodríguez-Fernández et al., 2024). In this manner, organizational commitment can function as a preliminary indication to predict internal actions, attitudes, and opinions (Ko et al., 2021).

Many experts agree that one of the key factors influencing occupational accidents is employees' risky behaviour at work. In recent years, researchers have suggested that specific organizational factors influence employees' safe or unsafe behaviours. Studies accept organizational safety climate as one of the factors that affect employees' safe or unsafe behaviours (Neal and Griffin, 2006; Choudhry et al., 2009; Beus et al., 2010; Clarke, 2010; Nahrgang et al., 2011; Alruqi et al., 2018). In addition, unsafe working environments can be both unhealthy for employees and costly for organizations. Another economic dimension of increased work accidents is the cost, loss of productivity, and labour force for workers, employers, and the state. Research has revealed the importance of creating a safety climate in workplaces to minimize these undesirable effects.

It is mentioned that factors such as organizational commitment, along with safety climate, are effective in increasing safe behaviours (Dejoy et al., 2010; Parker et al., 2001). Organizational commitment is an important factor that affects employee motivation and, in turn, enterprise productivity. Recent studies indicate that employees who perceive organizational support for safety are more likely to develop stronger commitment and demonstrate higher levels of safety participation (Syed-Yahya et al., 2022). An issue that needs to be examined is the extent to which workplace health and safety initiatives and the established safety climate influence employees' safety motivation and, consequently, their organizational commitment and safety behaviours.

A number of recent studies have examined the multifaceted relationships among safety climate, organizational commitment, and safety performance. Li and Griffin (2022) investigated the mediating roles of psychological ambiguity and managerial commitment in the context of the COVID-19 outbreak and determined that increased psychological uncertainty negatively affected safety behaviours and job satisfaction. They stated that managerial commitment played a critical role in reducing these effects. Paparisabet et al. (2023) examined the factors associated with organizational commitment among healthcare personnel. The study emphasized the importance of organizational justice, trust, and identification in encouraging commitment and revealed that this affected safety

performance. Moreover, research has shown that a positive safety climate can increase safety behaviours and job satisfaction, thereby reducing turnover intentions and promoting a safety culture within organizations (Ge, 2020; Yin et al., 2022). These findings align with recent multilevel and sector-specific studies emphasizing the indirect and mediating mechanisms linking organizational factors to safety performance (Arzahan et al., 2022; Wang et al., 2023).

The employees in the electricity transmission and distribution sector, which constitutes the study's sample, suffer a large number of occupational accidents each year. According to Social Security Institution (SSI) data, the sector records an annual average of 12976 lost work days and 86 fatal work accidents (ELDER, 2020). These incidents range from relatively minor injuries to critical accidents, some of which may result in long-term disability or mortality. The most frequent types of accidents include electric shocks, arc flash burns, electrical fires, and falls from heights caused by explosions. Given the inherent risks of electrical work, the industry is characterized by distinct occupational hazards that require targeted, preventive safety strategies. Although identifying existing risks, hazards, and dangers may appear straightforward, effectively controlling and managing them is a complex and challenging process. In light of these challenges, strategic planning and the establishment of a systematic and well-structured safety climate are crucial components in reducing accidents and ensuring workplace safety in the electrical sector.

An examination of the existing literature indicates that studies addressing occupational health and safety within the electricity transmission and distribution sector—particularly in the national context—are still relatively scarce. As a high-risk industry, this sector requires more comprehensive and multidimensional empirical studies. Accordingly, this study aims to contribute to the current literature by examining the relationships among safety climate, safety motivation, organizational commitment, and safety performance within the electricity distribution sector, thereby addressing both empirical gaps and recent calls for updated evidence.

2. Materials and Methods

2.1. Sample Size

The study’s target population comprises individuals employed in organizations operating within Türkiye’s electricity transmission and distribution sector. According to the 2023 report published by the Electricity Distribution Services Association (ELDER), a total of 21 distribution companies operating in the sector employ 65,501 individuals, including 27,200 permanent staff and 38,301 subcontracted workers (ELDER, 2023). Additionally, the 2023 annual report of the Turkish Electricity Transmission Corporation (TEİAŞ) indicates that the institution employs 7,999 personnel across the country (TEİAŞ, 2023). Taken together, these figures represent the total population from which the study sample was drawn.

The literature offers a range of methodological guidelines concerning optimal sample sizes for studies employing SEM. Tabachnick and Fidell (2007) suggest that the required sample size should follow the

formula "(number of variables × 8) + 50" for each variable included in the analysis. Similarly, Comrey and Lee (2013) classify a sample size of 200 as sufficient and 300 as good for multivariate statistical analyses. In light of these recommendations, a minimum sample size of 400 was considered appropriate for the present study. Following these guidelines, the data were collected through a structured questionnaire administered to 455 employees working in the electricity transmission and distribution sector in Türkiye between February and September 2022.

2.2. Ethical Approval

For this research, İstanbul Aydın University Ethics Committee Approval was obtained from the Ethics Committee with decision number: E-88083623-020-36769 and date 05.01.2022.

2.3. Data Collection Tools

A two-part structured questionnaire was developed to test the research hypotheses. The initial section of the questionnaire was structured to gather data on participants' sociodemographic characteristics. The second part comprised scale items measuring safety climate, safety motivation, safety performance, and organizational commitment. Each item in the scale was measured using a five-point Likert-type format, with response options ranging from 'Strongly disagree' to 'Strongly agree'.

The Safety Climate Scale was initially developed by Choudhry et al. (2009). It was adapted into Turkish by Türen et al. (2014) in their study titled "The Reliability and Validity of Safety Climate Scale." The scale includes two dimensions and a total of 14 items: "Management's Perspective and Rules" (10 items) and "Co-workers and Safety Training" (4 items). In their study involving employees in the electronics industry, the internal consistency reliability was demonstrated by Cronbach's alpha values of 0,911 for the first subscale, 0,838 for the second, and 0,915 for the overall instrument.

The Safety Motivation and Safety Performance scales were developed by Neal et al. (2000) and adapted into Turkish by Sakallı et al. (2022). The safety motivation scale comprised four items, while the safety performance scale included two subscales—Safety Compliance and Safety Participation—each consisting of four items. Reliability analysis indicated a Cronbach's alpha of 0,97 for both scales, reflecting high internal consistency.

The Organizational Commitment Scale, originally introduced by Meyer et al. (1993), was later adapted for use in Türkiye by Dağlı et al. (2018). The scale evaluates commitment across three dimensions: affective, continuance, and normative commitment, each represented by six items. Reliability analyses yielded Cronbach's alpha coefficients of 0,80 for affective commitment, 0,73 for continuance commitment, and 0,80 for normative commitment, with an overall reliability coefficient of 0,88.

2.4. Analysis of Data

In line with the research's purpose, descriptive analysis was first conducted in a statistical analysis software. Correlation analysis was then performed to determine the relationship between the scales. Finally, structural equation modelling and path analysis were conducted.

2.5. Research Model and Hypotheses

This study employed SEM to investigate whether organizational commitment mediates the relationship between safety climate perception and both safety motivation and safety performance among employees working in electricity transmission and distribution enterprises across the public and private sectors.

When the literature is examined, there are studies showing that the safety climate in workplaces affects both the safe behaviour of employees and their motivation that allows them to continue these behaviours (Griffin and Neal, 2000; Alruqi et al., 2018; Kalteh et al., 2021; Sakallı et al., 2022). Beyond behavioural outcomes, safety climate has also been associated with organizational commitment, as employees who perceive strong managerial concern for safety tend to develop stronger feelings of organizational support and attachment (Michael et al., 2005; Clarke, 2010; Haslam et al., 2016).

Previous studies have examined the relationship between employees' organizational commitment and motivation (Al-Madi et al., 2017; Kargün and Koç, 2021; Örücü et al., 2022; Yılmaz and Vardarlıer, 2021). However, the number of studies specifically focusing on the relationship between organizational commitment and safety motivation remains limited (Mengenci et al., 2019).

Existing studies suggest that organizational commitment influences employees' safety performance, leading to the adoption of safe behaviours (Dejoy et al., 2010; Hwang-Bo, 2013; Liu et al., 2020; Nahrgang et al., 2011; Mengenci et al., 2019). Subsequent empirical evidence continues to support this relationship, suggesting that committed employees are more likely to comply with safety procedures and participate in safety-related activities (Paparisabet et al., 2023). Numerous previous studies have indicated that safety motivation has a positive impact on safety performance and that safety motivation is the most crucial factor directly enhancing safety performance (Christian et al., 2009; Hedlund et al., 2010; Vinodkumar and Bhasi, 2010; Jiang and Probst, 2016; Luo, 2020; Xia et al., 2020; Sakallı et al., 2022).

Although some studies have suggested that organizational commitment mediates employees' safety motivation and safety performance (Clarke, 2010), a more detailed examination of the extent of these effects would be beneficial. The mediating role of employees' safety motivation plays a significant part in the impact of safety climate on safety performance (Neal et al., 2000; Braunger et al., 2015; Wen Lim et al., 2018; Lu, 2020; Maneechaeye and Potipiroon, 2022). Mediation-focused studies published in recent years further support the presence of indirect effects through safety motivation, indicating that safety climate influences safety performance primarily via motivational mechanisms

rather than direct effects alone (Xi et al., 2023; Wang et al., 2023). Whether safety motivation also mediates the relationship between organizational commitment and safety performance remains an important question that warrants further investigation.

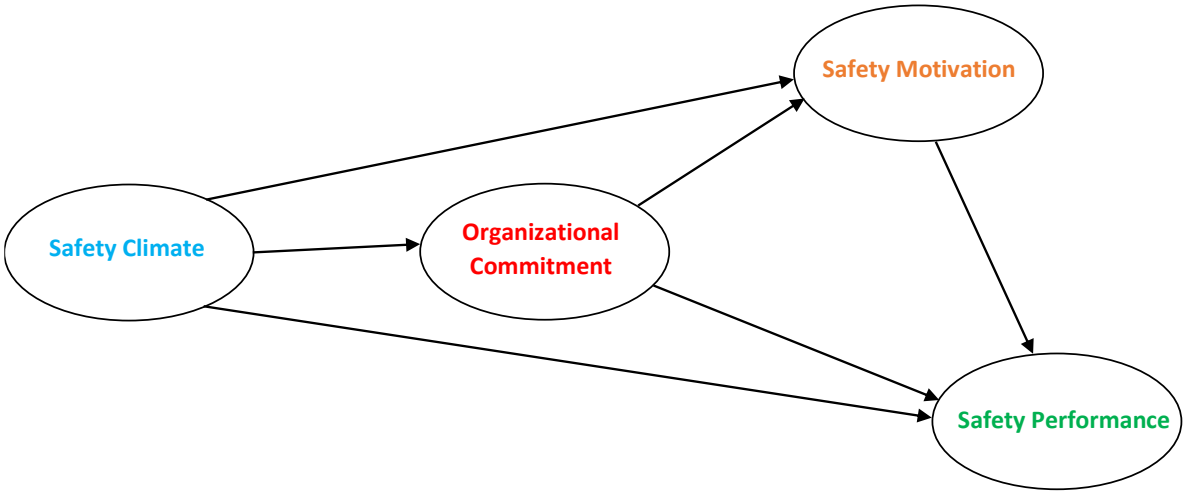


Figure 1. Conceptual research model

According to the research model given in Figure 1, the following hypotheses were tested:

- H_1 Safety climate affects organizational commitment.
- H_2 Safety climate affects safety motivation.
- H_3 Safety climate affects safety performance.
- H_4 Organizational commitment affects safety motivation.
- H_5 Organizational commitment affects safety performance.
- H_6 Safety motivation affects safety performance.
- H_7 Organizational commitment has a mediating role in the effect of safety climate on safety motivation.
- H_8 Organizational commitment has a mediating role in the effect of safety climate on safety performance.
- H_9 Safety motivation has a mediating role in the effect of safety climate on safety performance.
- H_{10} Safety motivation has a mediating role in the effect of organizational commitment on safety performance.

3. Results

3.1. Demographic Data Analysis of Participants

In this section, frequency analysis of demographic data was conducted.

Table 1. Demographic characteristics of participants

	Variable	Frequency (N=455)	%
Gender	Male	415	91,2
	Female	40	8,8
Age	18-30	162	35,6
	31-39	147	32,3
	40 and over	146	32,1
Education Level	High school	142	31,2
	Associate degree	154	33,9
	License	137	30,1
	Postgraduate	22	4,8
Marital Status	Single	312	68,6
	Married	143	31,4
Duration of Work in the Company	Less than 1 year	66	14,5
	1-5 years	139	30,5
	6-10 years	96	21,1
	11 years and over	154	33,9
Total Working Time	Less than 1 year	26	5,7
	1-5 years	95	20,9
	6-10 years	90	19,8
	11 years and over	244	53,6
Job Position	Technician	170	37,4
	Technician - associate degree	126	27,7
	Engineer	65	14,3
	Specialist	27	5,9
	Chief	28	6,2
	Manager/Deputy manager	6	1,3
	Other	33	7,3
Weekly Working Hours	Less than 45 hours	54	11,9
	45 hours	236	51,9
	More than 45 hours	165	36,3

Table 1 presents the demographic information of the participants as well as the frequency and percentage values of their job-related information.

3.2. Reliability Study

For the internal consistency analysis of the scales, reliability coefficients (Cronbach's alpha) of all sub-dimensions were calculated. A Cronbach's alpha coefficient between 0 and 1 means that the scale is unreliable, while a coefficient close to 1 means that the scale is more reliable. A Cronbach's Alpha coefficient above 0,7 means that it is reliable, while values of 0,8 and above are considered satisfactory (Cevahir, 2020).

Table 2. Cronbach's alpha values of scale subscales

	MPR	CST	SM	SCo	SPa	AC	CC	NC
Cronbach's Alpha (α)	0,94	0,81	0,95	0,93	0,83	0,77	0,81	0,79

(Note: AC: Attractive commitment; CC: Continuance commitment; CST: Co-workers and safety training; MPR: Management perspective and rules; NC: Normative commitment; SCo: Safety compliance; SM: Safety motivation; SPa: Safety participation.)

When Table 2 is examined, it is determined that all scale sub-dimensions are at the reliability level since the reliability values are 0,7 and above.

3.3. Correlation Test

In the study's correlation analysis, Spearman's correlation, the nonparametric equivalent of Pearson's correlation, was used when the quantitative variable data did not show normal distribution. In the analysis, the confidence interval is set as 99% and the p significance value is set as 0,01 ($p<0,01$).

Table 3. Correlation table

		MPR	CST	AC	CC	NC	SM	SCo	SPa
MPR	Spearman Correlation	1.000	,714**	,370**	,348**	,397**	,361**	,503**	,500**
	Sig.(2-tailed)	.	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
CST	Spearman Correlation	,714**	1.000	,279**	,266**	,298**	,327**	,548**	,508**
	Sig.(2-tailed)	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
AC	Spearman Correlation	,370**	,279**	1.000	,334**	,417**	,235**	,192**	,235**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	.	,000	,000	,000	,000	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
CC	Spearman	,348**	,266**	,334**	1.000	,647**	,058	,236**	,265**

	Correlation								
	Sig.(2-tailed)	,000	.000	.000	.	,000	,217	,000	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
NC	Spearman Correlation	,397**	,298**	,417**	,647**	1.000	,050	,177**	,229**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	,000	.	,290	,000	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
SM	Spearman Correlation	,361**	,327**	,235**	,058	,050	1.000	,412**	,433**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	,217	,290	.	,000	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
SCo	Spearman Correlation	,503**	,548**	,192**	,236**	,177**	,412**	1.000	,725**
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.	,000
	N	455	455	455	455	455	455	455	455
SPa	Spearman Correlation	,500**	,508**	,235**	,265**	,229**	,433**	,725**	1.000
	Sig.(2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.
	N	455	455	455	455	455	455	455	455

****** $p < 0{,}01$ (2-tailed).

*(Note: AC: Attractive Commitment, CC: Continuance Commitment, CST: Co-workers and Safety Training, MPR: Management Perspective and Rules, NC: Normative Commitment, SCo: Safety Compliance, SM: Safety Motivation, S**P**a: Safety Participation.)*

3.4. Structural Equation Modelling

When the fit index values of the research model given in Table 4 are examined, it is understood that the $X^{2/sd}$ fit index is acceptable, all other fit indices provide a good fit and the model is suitable for the fit indices.

Table 4. Fit criteria of the applied structural equation model

Fit Indices	Model's Fit Indices	Interpretation
$X^{2/sd}$	2,31	Acceptable fit
SRMR	0,04	Good fit
AGFI	0,944	Good fit
NFI	0,975	Good fit
NNFI	0,980	Good fit
CFI	0,986	Good fit
RMSEA	0,050	Good fit

(Note: AGFI: Adjusted goodness-of-fit statistic; CFI: Comparative fit index; NFI: Normed-fit index; NNFI: Non-normed Fit Index; RMSEA: Root mean square error of approximation; SRMR: Standardized root mean square residual; $X^{2/sd}$ = The ratio of the chi-square statistic to the respective degrees of freedom.)

The primary aim of the SEM in the research model is to account for measurement errors and unexplained variances inherent in regression analysis. As illustrated in Figure 2, the loading values related to the safety climate construct range between 0,84 and 0,85; the safety motivation dimension exhibits loadings from 0,89 to 0,93; the organizational commitment construct shows indicator weights between 0,54 and 0,86; and the safety performance factor presents loadings ranging from 0,88 to 0,91.

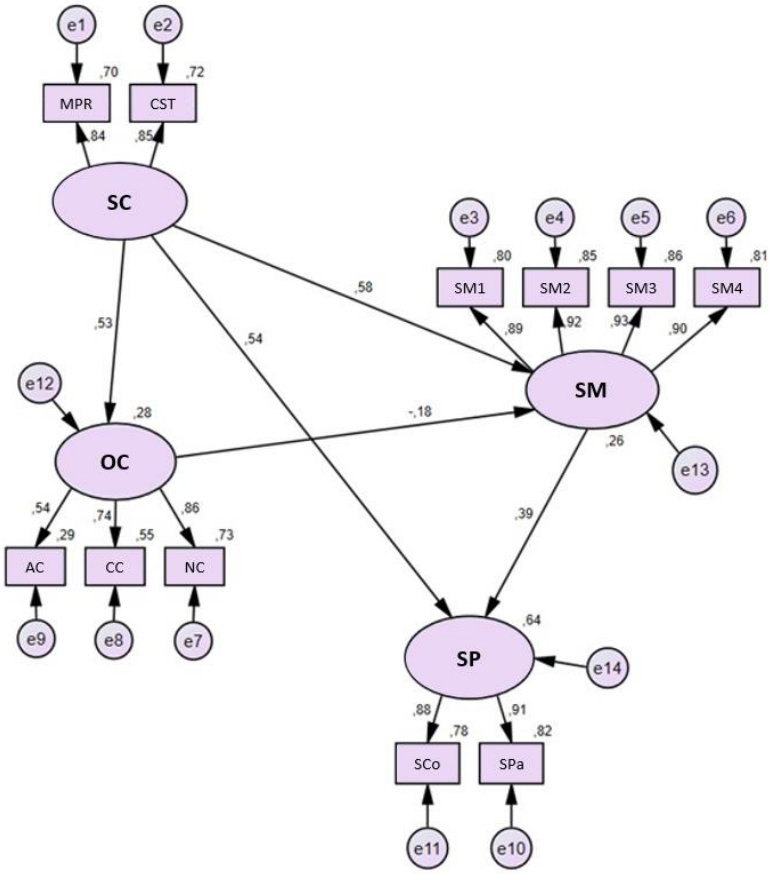


Figure 2. Structural equation model of the study

(Note: AC: Attractive Commitment, CC: Continuance Commitment, CST: Co-workers and Safety Training, MPR: Management Perspective and Rules, NC: Normative Commitment, SC: Safety Climate, SCo: Safety Compliance, SM: Safety Motivation, SP: Safety Performance, SPa: Safety Participation.)

The model explained 64% of the variance explained for safety performance latent variables, 26% of the variance explained for safety motivation latent variables and 28% of the variance explained for organizational commitment latent variables. According to this model, safety climate affects safety performance directly (β=0,54; p<0,05) and indirectly through safety motivation. Moreover, safety climate directly affects organizational commitment (β= 0,53; p<0,05) and safety motivation (β= 0,58; p<0,05). While organizational commitment negatively and directly affects safety motivation (β= -0,18; p<0,05), it indirectly affects safety performance through safety motivation. Safety motivation directly affects safety performance (β= 0,39; p<0,05).

Examining the research model's fit index values, it can be seen that the $X^{2/sd}$, NNFI, and RMSEA fit indices are acceptable, while the other fit indices offer a good fit and the model is appropriate for the fit indices.

In the path analysis presented in Figure 3, the relationships between the sub-dimensions of the scales addressed in the study were examined. In this way, the interactions of all observed values put forward in the model were examined.

Table 5. Fit criteria of the applied path analysis model

Fit Indices	Model's Fit Indices	Interpretation
$X^{2/sd}$	3,94	Acceptable fit
SRMR	0,04	Good fit
AGFI	0,97	Good fit
NFI	0,95	Good fit
NNFI	0,95	Acceptable fit
CFI	0,98	Good fit
RMSEA	0,08	Acceptable fit

(Note: AGFI: Adjusted goodness-of-fit statistic; CFI: Comparative fit index; NFI: Normed-fit index; NNFI: Non-normed Fit Index; RMSEA: Root mean square error of approximation; SRMR: Standardized root mean square residual; $X^{2/sd}$ = The ratio of the chi-square statistic to the respective degrees of freedom.)

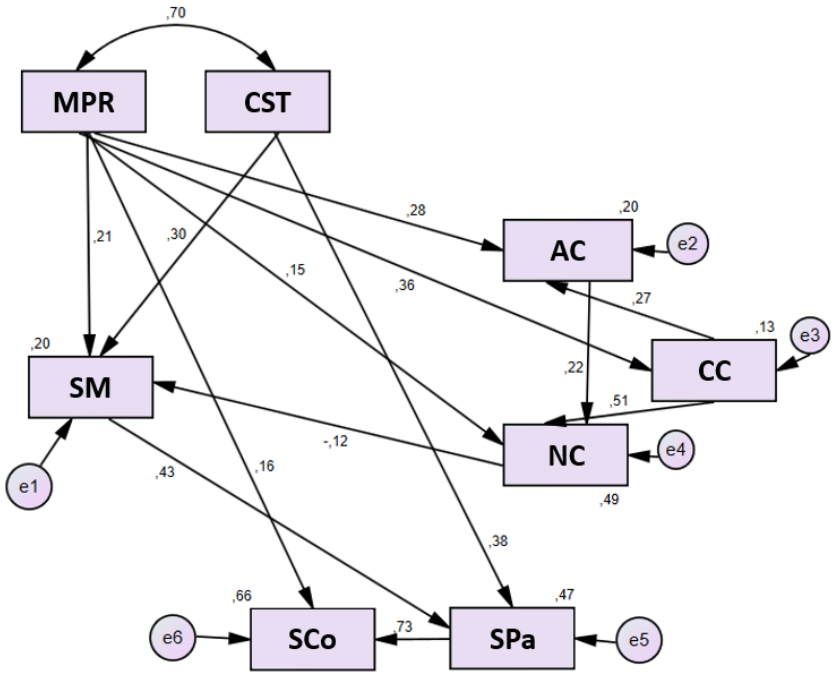


Figure 3. Path analysis of the applied model

(Note: AC: Attractive Commitment, CC: Continuance Commitment, CST: Co-workers and Safety Training, MPR: Management Perspective and Rules, NC: Normative Commitment, SCo: Safety Compliance, SM: Safety Motivation, SPa: Safety Participation.)

According to the path analysis model, it is seen that 20% of safety motivation is explained by management perspective and rules, co-workers and safety trainings and normative commitment, 49% of normative commitment is explained by management perspective and rules, affective commitment and continuance commitment, 20% of affective commitment is explained by management perspective and rules and continuance commitment, 66% of safety compliance is explained by management perspective and rules and safety participation, 47% of safety participation is explained by co-workers and safety trainings and safety motivation.

Table 6. Standardized regression coefficients

Sub-dimension	Direction	Sub-dimension	Standardized Regression Coefficient (β)	*p*
MPR	⟶	*SM*	0,21	***
MPR	⟶	*SCo*	0,16	***
MPR	⟶	*NC*	0,15	***
MPR	⟶	*CC*	0,36	***
MPR	⟶	*AC*	0,28	***
CST	⟶	*SM*	0,30	***
CST	⟶	*SPa*	0,38	***
AC	⟶	*NC*	0,22	***
CC	⟶	*AC*	0,27	***
CC	⟶	*NC*	0,51	***
NC	⟶	*SM*	-0,12	***
SM	⟶	*SPa*	0,43	***
SPa	⟶	*SCo*	0,73	***

*** $p < 0,01$.

(Note: AC: Attractive Commitment, CC: Continuance Commitment, CST: Co-workers and Safety Training, MPR: Management Perspective and Rules, NC: Normative Commitment, SCo: Safety Compliance, SM: Safety Motivation, SPa: Safety Participation.)

In the path analysis model, the standardized correlation coefficient between the sub-dimensions of SC, namely MPR, and CST was found to be 0,70. The standardized regression coefficients (β) between the sub-dimensions of the scales considered in the model are shown in Table 6. It is also stated that each regression is significant ($p<0,01$). Accordingly, β between MPR and SM is 0,21; the β between MPR and SCo is 0,16; and β between NC, CC and AC are 0,15, 0,36 and 0,28, respectively. β between CST and SM is 0,30; β between CST and SPa is 0,38. β between AC and NC is 0,22; β between CC and AC

is 0,27; β between CC and NC is 0,51; and β between NC and SM is -0,12. β between SM and SPa is found to be 0,43, while β between SPa and SCo, which are sub-dimensions of SP, is found to be 0,73.

Table 7. Standardized total effects

	MPR	CST	CC	AC	NC	SM	SPa
CC	0,359						
AC	0,372		0,269				
NC	0,413		0,569	0,218			
SM	0,164	0,302	-0,069	-0,026	-0,121		
SPa	0,071	0,511	-0,030	-0,011	-0,052	0,432	
SCo	0,213	0,372	-0,022	-0,008	-0,038	0,315	0,728

(Note: AC: Attractive Commitment, CC: Continuance Commitment, CST: Co-workers and Safety Training, MPR: Management Perspective and Rules, NC: Normative Commitment, SCo: Safety Compliance, SM: Safety Motivation, SPa: Safety Participation.)

Table 7 shows the total impact of direct and indirect impacts.

4. Discussion and Conclusion

Overall, the findings indicate that safety performance in high-risk industries is largely shaped by psychosocial and motivational processes rather than by isolated organizational factors. The SEM results show that safety climate influences safety performance both directly and indirectly, primarily by enhancing employees' safety motivation, while organizational commitment operates as a conditional factor whose effect becomes evident mainly through motivational mechanisms. These findings indicate that safety outcomes are more likely to improve when a positive safety climate is transformed into employees' intrinsic motivation to behave safely. Rather than operating in isolation, organizational conditions and individual psychological processes appear to interact in shaping safety performance within the electricity transmission and distribution sector.

In this context, the present study explored the mediating role of organizational commitment in the relationships among safety climate, safety motivation, and safety performance in Türkiye's electricity transmission and distribution industry. The findings reveal that employees generally reported high levels of safety climate perception, safety motivation, and safety performance, while organizational commitment was observed at a moderate level. One plausible explanation for the high levels of safety-related perceptions and behaviours is the vocational and technical training that many employees in this sector receive beginning at the secondary education level, as well as the OHS training provided in their workplaces. The fact that most employees enter the sector through early-stage vocational education

and remain in the field either through internships or permanent employment suggests a long-standing familiarity with working in electrical environments.

The primary aim of the study was to investigate the extent to which safety motivation and organizational commitment influence safety performance, either directly or indirectly, in organizations characterized by a strong safety climate. The level at which these effects are realized varies according to variables such as the sector and demographic differences of employees.

When the hypotheses put forward according to the research model are analysed;

H_1: Safety climate positively affects organizational commitment (β=0,53). In some studies, in the literature, it has been determined that safety climate positively affects organizational commitment (Michael et al., 2005; Clarke, 2010; Dejoy et al., 2010; Haslam et al., 2016; Yasım and Işık, 2020). Clarke (2010) emphasized that a strong safety climate can foster trust and enhance commitment by reinforcing management's dedication to safety. Similarly, Dejoy et al. (2010) demonstrated that employees' perceptions of a supportive safety climate are associated with increased morale and organizational attachment. Michael et al. (2005) also showed that perceived managerial support for safety leads to greater organizational commitment. The findings of this study are consistent with these conclusions, confirming that safety climate has a significant and positive influence on organizational commitment (β = 0,53). Empirical studies conducted after 2020 further support these findings, indicating that a strong safety climate enhances employees' organizational attachment and safety-related attitudes, particularly in high-risk sectors (Li and Griffin, 2022). Generally, employees with positive perceptions of safety in their organizations are more likely to recognize management's proactive role through rules, training, and preventative measures. Thus, those who feel safe in their work environment tend to be more loyal to their organization. (Hypothesis 1: Supported)

H_2: Safety climate positively affects safety motivation (β=0,58). This result is supported by several studies in the literature (Bunner et al., 2018; Chen and Chen, 2014; Neal and Griffin, 2002; Neal and Griffin, 2006; Sakallı et al., 2022). Neal and Griffin (2002, 2006) argued that a positive safety climate enhances safety motivation by increasing employees' readiness to comply with safety protocols. Chen and Chen (2014) confirmed that safety climate shapes safety-related attitudes and motivation. Bunner et al. (2018) emphasized the motivational role of safety climate in encouraging proactive safety behaviour. It is known that safety climate has an increasing effect on individuals' safety motivation (Brown and Leigh, 1996). In line with these findings, this study confirmed that a positive safety climate significantly enhances employees' motivation to act safely. (Hypothesis 2: Supported)

H_3: Safety climate positively affects safety performance (β=0,54). This study found that a positive safety climate significantly improves safety performance, which is consistent with numerous previous studies (Alruqi et al., 2018; Brondino et al., 2012; Griffin and Neal, 2000; Hon et al., 2014; Kalteh et al., 2021; Lallemand, 2012; Lu et al., 2020; Wu et al., 2008; Zohar et al., 2015). Griffin and Neal (2000) provided a theoretical model linking safety climate to safety performance through individual-level psychological processes. Zohar et al. (2015) highlighted that shared perceptions of safety climate

at the group level predict safety compliance and participation. Wu et al. (2008) found a direct positive effect of safety climate on safety behaviour and performance. In line with these results, this study shows that safety climate significantly improves safety-related behaviours. Additional evidence suggests that safety climate operates not only at the individual level but also as a shared group-level construct. Xia et al. (2025), demonstrated that shared psychological safety climate perceptions at the group level significantly influence safety-related outcomes, highlighting that collective interpretations of safety priorities strengthen safety performance. This finding reinforces the present study's results by indicating that both individual and shared safety climate perceptions play a critical role in shaping safety performance in high-risk industries. (Hypothesis 3: Supported)

H_4: Organizational commitment negatively affects safety motivation (β= -0,18). Although many studies have shown a positive relationship between organizational commitment and motivation (Al-Madi et al., 2017; Amdan et al., 2016; Caldwell et al., 1990; Kargün and Koç, 2021; Örücü et al., 2022; Yılmaz and Vardarlıer, 2021), some studies have reported negative associations (Bilge et al., 2015). Bilge et al. (2015), for instance, observed that in certain contexts, higher organizational commitment may result in lower motivation towards specific safety protocols. In the study, the relationship between organizational commitment and safety motivation was examined and it was determined that organizational commitment affects safety motivation negatively (β= -0,18). The increase in individuals' sense of belonging to their organizations leads to low motivation in terms of safety. In contrast, Mengenci et al. (2019), in a study conducted within the aviation sector, identified a positive association between organizational commitment and employees' safety motivation. Although limited research has directly explored this relationship, investigating it across diverse industries remains an important avenue for future studies. Recent empirical evidence suggests that commitment does not automatically translate into safety-oriented motivation unless reinforced by supportive leadership and motivational mechanisms (Ko et al., 2021; Paparisabet et al., 2023). (Hypothesis 4: Supported)

H_5: Organizational commitment does not affect safety performance (p>0,05). Therefore, the assumption is not accepted. Although there are studies in the literature stating that organizational commitment will be reflected on the safety performance of employees and thus, they will exhibit safe behaviours (Hwang-Bo, 2013; Lee et al., 2014; Liu et al., 2020; Mearns et al., 2010; Nahrgang et al., 2011; Parker et al., 2001), but according to the SEM result of the study, it was revealed that organizational commitment does not affect employees' safety performance. Mearns et al. (2010) noted that such a relationship could be mediated through variables such as involvement or motivation. Similarly, Nahrgang et al. (2011) emphasized that the effect of commitment on performance is often indirect. Therefore, although organizational commitment is often viewed as a positive force in workplace behaviour, its direct impact on safety performance may be limited. Contemporary findings also indicate that organizational commitment alone may be insufficient to directly improve safety performance (Paparisabet et al., 2023). (Hypothesis 5: Not supported)

H_6: Safety motivation positively affects safety performance (β=0,39). As a result of many studies in the literature, it has been stated that safety motivation positively affects safety performance and that safety motivation is the most important factor that directly increases safety performance (Christian et al., 2009; Guo et al., 2016; Hedlund et al., 2010; Jiang and Probst, 2016; Luo, 2020; Vinodkumar and Bhasi, 2010; Xia et al., 2020). Christian et al (2009) identified safety motivation as a key predictor of safety outcomes in a meta-analysis. Vinodkumar and Bhasi (2010) showed that motivated employees showed higher compliance and participation in safety activities. In the path analysis of the study, it was determined that safety motivation positively affects safety participation, one of the components of safety performance, and similar results were obtained with other studies examining this relationship (Jiang and Probst, 2016; Mengenci et al., 2019; Peker et al., 2022; Maneechaeye and Potipiroon, 2022). These findings highlight the importance of promoting safety motivation to improve overall safety performance. (Hypothesis 6: Supported)

H_7: Organizational commitment has a "partial mediating" role in the effect of safety climate on safety motivation. In the study, it was determined that organizational commitment has a "partial mediating" role in the effect of safety climate on safety motivation. It is understood that the safety climate affects safety motivation both directly and indirectly through organizational commitment. This finding is consistent with previous studies that emphasize the mediating role of commitment-related variables in safety contexts. Lu (2020) demonstrated that safety motivation mediates the relationship between safety climate and safety behaviour, emphasizing how employees' perceptions of safety commitment from management contribute to motivational pathways. This supports the notion that fostering organizational commitment may enhance the motivational impact of a strong safety climate. (Hypothesis 7: Supported)

H_8: Organizational commitment does not mediate the effect of safety climate on safety performance (p>0,05). The findings of this study indicated that organizational commitment did not serve as a mediating variable between safety climate and safety performance, primarily due to its lack of a significant direct effect on safety performance. As a result, the corresponding hypothesis was not validated. Nonetheless, prior research has produced inconsistent results regarding this relationship. For instance, Clarke (2010) reported a partial mediating effect of organizational commitment in the linkage between safety climate and safety performance. Similarly, Karimpour et al. (2021) found that safety attitudes can mediate the pathway from safety climate to safety-related behaviours. Although this study did not replicate these findings, the contrasting results suggest that more industry-specific studies are needed to fully understand the conditions under which organizational commitment may play a mediating role. (Hypothesis 8: Not Supported)

H_9: Safety motivation has a "partial mediating" role in the effect of safety climate on safety performance. The findings indicate that safety motivation partially mediates the relationship between safety climate and safety performance. This hypothesis, supported by the study, aligns with similar studies (Neal et al., 2000; Braunger et al., 2015; Wen Lim et al., 2018; Lu, 2020; Maneechaeye and

Potipiroon, 2022). It has been determined that safety climate affects safety performance both directly and through safety motivation. Increasing employees' motivation towards safety can increase the effect of the existing safety climate on safety performance (Neal et al., 2000). Based on this, it would be beneficial to carry out studies to increase employees' motivation towards safety in order to increase their safety performance. (Hypothesis 9: Supported)

H_{10}: Safety motivation has a "full mediating" role in the effect of organizational commitment on safety performance. The study revealed that safety motivation fully mediates the relationship between organizational commitment and safety performance. Although organizational commitment does not exert a direct influence on safety performance, its impact is realized indirectly through safety motivation. Supporting this result, Dönmez (2019) identified safety motivation as a serial mediator between individual factors and job performance, emphasizing its pivotal role in shaping safety-related outcomes. These findings highlight the importance of promoting intrinsic safety motivation to enhance not only organizational commitment but also overall safety performance. (Hypothesis 10: Supported)

This study investigated the effects of safety climate perceptions on safety performance among employees in the electricity transmission and distribution sector in Türkiye through the mediating roles of organizational commitment and safety motivation. According to the results of the SEM analysis, 8 out of 10 hypotheses were supported, while 2 were not supported. The results indicated that safety climate had a positive influence on both employees' motivation toward safety and their safety performance. Furthermore, safety motivation was found to serve as a full mediator in the relationship between organizational commitment and safety performance. Accordingly, the study suggests that organizational commitment alone may not be sufficient to improve safety performance, but may create indirect effects through motivation.

Moreover, the use of SEM provides a comprehensive analysis of the complex interrelationships among the study variables, contributing to the development of more nuanced theoretical models within the OHS discipline. As such, the research serves as a valuable resource for both practitioners aiming to enhance workplace safety and scholars seeking to build upon theoretical frameworks in the field.

While many of the results are in line with existing literature, some findings—such as the negative effect of organizational commitment on safety motivation—highlight relatively underexplored relationships and offer new directions for future research. This indicates that the impact of employee commitment on safety behaviours should be further examined within the contexts of sectoral dynamics, organizational culture, and individual differences.

The study makes important contributions to the field of occupational health and safety, by examining the direct and indirect relationships among safety climate, motivation, and commitment within a holistic model, it deepens the conceptual understanding of key constructs in the OHS literature. Conducted within a high-risk and under-researched industry in Türkiye, the study also addresses a gap in empirical research and broadens the contextual scope of OHS investigations. The findings regarding

the mediating role of organizational commitment provide new perspectives on how commitment is structured within the context of safety climate, inviting further theoretical discussion.

Overall, this study builds on existing research by showing that psychosocial and motivational mechanisms play a central role in shaping safety outcomes in high-risk industries. Recent reviews and empirical studies highlight the increasing emphasis on psychosocial safety climate, psychological safety, and motivational pathways in occupational safety research (Dong et al., 2024; Zhao and Li, 2024). Consistent with this perspective, evidence from different industry contexts indicates that safety climate affects safety performance mainly through behavioural and motivational processes rather than through direct effects alone (Putra et al., 2022).

In conclusion, this study offers valuable implications not only from a theoretical standpoint but also in terms of practical applications. The results suggest that organizations aiming to improve safety behaviours should implement incentive-based and motivational practices that enhance safety motivation while also reinforcing organizational commitment. Employers must go beyond merely setting rules and instead cultivate psychosocial environments that encourage voluntary compliance. In doing so, they can foster a workplace culture where safe behaviours are internalized and sustained. In this sense, the study offers guidance for both academics and practitioners seeking to strengthen safety performance through organizational and motivational strategies.

Conflict of Interest Statement

The authors of the article declare that there is no conflict of interest.

Authors' Contribution Declaration

Hamdi Emre BAĞIRAN: 80%; Reşit ERÇETİN: 20%

This article is derived from Hamdi Emre Bağıran's PhD thesis titled “The Mediating Role of Organizational Commitment in the Effect of Employees' Perception of Safety Climate on Safety Motivation and Safety Performance: A Research in the Electric Transmission and Distribution Sector”.

References

Al-Madi FN., Assal H., Shrafat F., Zeglat D. The impact of employee motivation on organizational commitment. European Journal of Business and Management 2017; 9(15): 134-145.

Alruqi WM., Hallowell MR., Techera U. Safety climate dimensions and their relationship to construction safety performance: a meta-analytic review. Safety Science 2018; 109: 165-173. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.019

Amdan S., Rahman RA., Shahid SAM., Bakar SA., Khir MM., Demong NAR. The role of extrinsic motivation on the relationship between office environment and organisational commitment.

Procedia Economics and Finance 2016; 37: 164-169. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(16)30108-3

Arzahan ISN., Ismail Z., Yasin SM. Safety culture, safety climate, and safety performance in healthcare facilities: a systematic review. Safety Science 2022; 147: 105624. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105624

Beus JM., Payne SC., Bergman ME., Arthur Jr W. Safety climate and injuries: an examination of theoretical and empirical relationships. Journal of Applied Psychology 2010; 95(4): 713-727. https://doi.org/10.1037/a0019164

Bilge H., Bal V., Gönlügür A. İçsel-dışsal motivasyon ile örgütsel bağlılık arasındaki ilişkinin araştırılması. Maliye Finans Yazıları 2015; 1(104): 83-104.

Braunger P., Korunka C., Kubicek B., Frank H., Lueger M. The perspective of safety engineers on safety climate. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries 2015; 25(2): 198-210. https://doi.org/10.1002/hfm.20538

Brondino M., Silva SA., Pasini M. Multilevel approach to organizational and group safety climate and safety performance: co-workers as the missing link. Safety Science 2012; 50(9): 1847-1856. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.04.010

Brown SP., Leigh TW. A new look at psychological climate and its relationship to job involvement, effort, and performance. Journal of Applied Psychology 1996; 81(4): 358-366.

Bunner J., Prem R., Korunka C. How work intensification relates to organization-level safety performance: the mediating roles of safety climate, safety motivation, and safety knowledge. Frontiers in Psychology 2018; 9(2575). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02575

Burke MJ., Sarpy SA., Tesluk PE., Smith-Crowe K. General safety performance: a test of a grounded theoretical model. Personnel Psychology 2002; 55(2): 429-457. https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.2002.tb00116.x

Caldwell DF., Chatman JA., O'Reilly CA. Building organizational commitment: a multifirm study. Journal of Occupational Psychology 1990; 63(3). https://doi.org/10.1111/j.2044-8325.1990.tb00525.x

Cevahir E. SPSS ile nicel veri analizi rehberi. İstanbul: Kibele Yayınları; 2020.

Chen CF., Chen SC. Measuring the effects of safety management system practices, morality leadership and self-efficacy on pilots' safety behaviors: Safety motivation as a mediator. Safety Science 2014; 62: 376-385. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.09.013

Choudhry RM., Fang D., Lingard H. Measuring safety climate of a construction company. Journal of Construction Engineering and Management 2009; 135(9): 890-899. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000063

Christian MS., Bradley JC., Wallace JC., Burke MJ. Workplace safety: a meta-analysis of the roles of person and situation factors. Journal of Applied Psychology 2009; 94(5): 1103-1127. https://doi.org/10.1037/a0016172

Clarke S. An integrative model of safety climate: linking psychological climate and work attitudes to individual safety outcomes using meta-analysis. Journal of Occupational and Organizational Psychology 2010; 83(3): 553-578. https://doi.org/10.1348/096317909X452122

Comrey A., Lee H. A first course in factor analysis. 2nd ed. New York, NY: Psychology Press; 2013.

Dağlı A., Elçiçek Z., Han B. Örgütsel bağlılık ölçeği'nin Türkçeye uyarlanması: geçerlik ve güvenirlik çalışması. Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi 2018; 17(68): 1765-1777. https://doi.org/10.17755/esosder.445932

Dejoy DM., Della LJ., Vandenberg RJ., Wilson MG. Making work safer: testing a model of social exchange and safety management. Journal of Safety Research 2010; 41(2): 163-171. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2010.02.001

Dong RK., Li X., Roxas Hernan, B. Psychological safety and psychosocial safety climate in workplace: a bibliometric analysis and systematic review towards a research agenda. Journal of Safety Research 2024; 91: 1-19. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.08.001

Dönmez D. Predicting job performance through personal factors: the mediating role of safety motivation and safety performance. Middle East Technical University The Graduate School of Social Sciences Master Thesis, Ankara, Türkiye, 2019.

ELDER (Elektrik Dağıtım Hizmetleri Derneği). Türkiye'de elektrik dağıtım sektöründe kaza kök neden analizi ve nedensellik ilişkisi final raporu 2020. Website: https://www.elder.org.tr/ebulten/elder-ebrd-final-raporu-tr.pdf (Accessed on: April 10, 2025)

ELDER (Elektrik dağıtım hizmetleri derneği). Sektör Raporu 2023. Website: https://www.elder.org.tr/Content/files/df7e73fd-07f2-4e84-b386-c846ecb499fa.pdf (Accessed on: April 10, 2025)

Ge Y. An assessment of safety climate, job satisfaction and turnover intention relationships using a national sample of workers from the United States. Journal of Safety Research 2020; 74: 233–241. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.06.011

Griffin MA., Neal A. Perceptions of safety at work: a framework for linking safety climate to safety performance, knowledge, and motivation. Journal of Occupational Health Psychology 2000; 5(3): 347–358. https://doi.org/10.1037//1076-8998.5.3.347

Guo BH., Yiu TW., González VA. Predicting safety behavior in the construction industry: development and test of an integrative model. Safety Science 2016; 84: 1-11. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.020

Haslam C., O'hara J., Kazi A., Twumasi R., Haslam R. Proactive occupational safety and health management: promoting good health and good business. Safety Science 2016; 81: 99-108. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.06.010

Hedlund A., Åteg M., Andersson M., Rosén G. Assessing motivation for work environment improvements: internal consistency, reliability and factorial structure. Journal of Safety Research 2010; 41(2): 145-151. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2009.12.005

Hedlund A., Gummesson K., Rydell A., Andersson M. Safety motivation at work: evaluation of changes from six interventions. Safety Science 2016; 82: 155-163. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.09.006

Hon CK., Chan AP., Yam MC. Relationships between safety climate and safety performance of building repair, maintenance, minor alteration, and addition (RMAA) works. Safety Science 2014; 65: 10-19. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.12.012

Hwang-Bo J. The effects of emotional burnout and empowerment, and organizational commitment on cooperation behavior and safety behavior: focus on railway controllers and railway engineers. Journal of The Korean Society for Railway 2013; 16(5): 430-438. https://doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.5.430

Jiang L., Probst TM. Transformational and passive leadership as cross-level moderators of the relationships between safety knowledge, safety motivation, and safety participation. Journal of Safety Research 2016; 57: 27-32. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2016.03.002

Kalteh HO., Mortazavi SB., Mohammadi E., Salesi M. The relationship between safety culture and safety climate and safety performance: a systematic review. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2021; 27(1): 206–216. https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1556976

Kargün S., Koç H. İşgörenlerin motivasyon düzeylerinin örgütsel bağlılık ve iş performansı üzerine etkileri: konaklama işletmelerinde bir inceleme. İşletme Araştırmaları Dergisi 2021; 13(4): 3786-3800. https://doi.org/10.20491/isarder.2021.1356

Karimpour S., Jahani F., Shirali GA. The relationship between safety attitude and safety performance in the petrochemical industry: the mediating role of safety climate. Work 2021; 68(2): 507-517. https://doi.org/10.3233/WOR-203353

Ko J., Jang H., Kim SY. The effect of corporate social responsibility recognition on organisational commitment in global freight forwarders. The Asian Journal of Shipping and Logistics 2021; 37(2): 117-126. https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2020.12.005

Lallemand C. Contributions of participatory ergonomics to the improvement of safety culture in an industrial context. Work 2012; 41(Supplement 1): 3284-3290. https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0595-3284

Lee YJ., Lee IC., Lin CL. The effects of employees' satisfaction and leadership styles on organizational performance: organizational commitment as a dual mediator. Asian Journal of Empirical Research 2014; 4(2): 104-124.

Li Y., Griffin MA. Safety behaviors and job satisfaction during the pandemic: the mediating roles of uncertainty and managerial commitment. Journal of Safety Research 2022; 80: 123–134. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.05.008

Liu S., Yang X., Mei Q. The effect of perceived organizational support for safety and organizational commitment on employee safety behavior: a meta-analysis. International Journal of

Occupational Safety and Ergonomics 2020: 27(4): 1154-1165. https://doi.org/10.1080/10803548.2019.1694778

Lu Y., Taksa L., Jia H. Influence of management practices on safety performance: the case of mining sector in China. Safety Science 2020; 132: 104947. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104947

Luo T. Safety climate: current status of the research and future prospects. Journal of Safety Science and Resilience 2020; 1(2): 106-119. https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.09.001

Maneechaeye P., Potipiroon W. The impact of fleet-level and organization-level safety climates on safety behavior among Thai civilian pilots: the role of safety motivation. Safety Science 2022; 147. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105614

Mearns K., Hope L., Ford MT., Tetrick LE. Investment in workforce health: exploring the implications for workforce safety climate and commitment. Accident Analysis & Prevention 2010; 42(5): 1445-1454. https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.08.009

Mengenci C., Gökçe SG., Kutanis RÖ., Emhan A. İş güvenliğinin geliştirilmesi ve yerleştirilmesinde iş memnuniyeti ve örgütsel bağlılığın önemi: havacılık sektöründe bir uygulama. Uluslararası Yönetim ve Sosyal Araştırmalar Dergisi 2019; 6(11): 85-102. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31334.88646

Meyer JP., Allen NJ., Smith CA. Commitment to organizations and occupations: extension and test of a three-component conceptualization. Journal of Applied Psychology 1993; 78(4): 538-551. https://doi.org/10.1037/0021-9010.78.4.538

Michael JH., Evans DD., Jansen KJ., Haight JM. Management commitment to safety as organizational support: relationships with non-safety outcomes in wood manufacturing employees. Journal of Safety Research 2005; 36(2): 171-179. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2005.03.002

Nahrgang JD., Morgeson FP., Hofmann DA. Safety at work: a meta-analytic investigation of the link between job demands, job resources, burnout, engagement, and safety outcomes. Journal of Applied Psychology 2011; 96(1): 71-94. https://doi.org/10.1037/a0021484

Neal A., Griffin MA. Safety climate and safety behaviour. Australian Journal of Management 2002; 2(1_suppl): 67-75. https://doi.org/10.1177/031289620202701S08

Neal A., Griffin MA. A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior and accidents at the individual and group levels. Journal of Applied Psychology 2006; 91(4): 946-953. https://doi.org/10.1037/0021-9010.91.4.946

Neal A., Griffin MA., Hart PM. The impact of organizational climate on safety climate and individual behavior. Safety Science 2000; 34(1-3): 99-109. https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00008-4

Örücü E., Tokyay M., Hasırcı I. İş motivasyonu-örgütsel bağlılık ilişkisi: bir alan araştırması. Akademik Hassasiyetler 2022; 9(8): 177-198.

Paparisabet M., Jalalpour AH., Farahi F., Gholami Z., Shaygani F., Jalili N., Rashid Beigi, S., Marzaleh MA., Elyaderani HD. Investigating the organizational commitment and its associated

factors among the staff of the health sector: a cross-sectional research. BMC Health Services Research 2023; 24: 1373. https://doi.org/10.1186/s12913- 024-11893-1

Parker SK., Axtell CM., Turner N. Designing a safer workplace: importance of job autonomy, communication quality, and supportive supervisors. Journal of Occupational Health Psychology 2001; 6(3): 211-228.

Peker M., Doğru OC., Meşe G. Role of supervisor behavioral integrity for safety in the relationship between top-management safety climate, safety motivation, and safety performance. Safety and Health at Work 2022; 13(2): 192-200. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.03.006

Putra PS., Wijayanti R., Hadiwidjojo D. The effect of safety knowledge and workplace safety climate on safety performance with safety behavior as a mediator: a study on operations worker of Pindad. International Journal of Research in Business and Social Science 2022; 11(3): 112-119. https://doi.org/10.20525/ijrbs.v11i3.1705

Rodríguez-Fernández M., Herrera J., de Las Heras-Rosas C., Ciruela-Lorenzo AM. Practical implications of the organizational commitment model in healthcare: the case of nurses. Journal of Nursing Management 2024; 1: 6455398. https://doi.org/10.1155/2024/6455398

Sakallı AE., Temur S., Badem M., Karataş E. Güvenlik ikliminin güvenlik performansına olan etkisi: Türkiye'deki çalışanlar arasında bir çalışma. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2022; 33: 93-106. https://doi.org/10.31590/ejosat.1023484

Syed-Yahya SNN., Idris MA., Noblet AJ. The relationship between safety climate and safety performance: a review. Journal of Safety Research 2022; 83: 105–118. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.08.008

Tabachnick BG., Fidell LS. Using multivariate statistics. 5th ed. New York, NY: Pearson; 2007.

TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi). TEİAŞ Faaliyet Raporu 2023. Website: https://www.teias.gov.tr/faaliyet-raporlari (Last Access: 10.04.2025)

Türen U., Gökmen Y., Tokmak İ., Bekmezci M. Güvenlik iklimi ölçeği'nin geçerlilik ve güvenilirlik çalışması. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2014; 19(4): 171-190.

Vinodkumar MN., Bhasi M. Safety management practices and safety behaviour: assessing the mediating role of safety knowledge and motivation. Accident Analysis & Prevention 2010; 42(6): 2082-2093. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.06.021

Wang D., Mao W., Zhao C., Wang F., Hu Y. The cross-level effect of team safety-specific transformational leadership on workplace safety behavior: the serial mediating role of team safety climate and team safety motivation. Journal of Safety Research 2023; 87: 285-296. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.05.001

Wen Lim H., Li N., Fang D., Wu C. Impact of safety climate on types of safety motivation and performance: multigroup invariance analysis. Journal of Management in Engineering 2018; 34(3). https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000595

Wu TC., Chen CH., Li CC. A correlation among safety leadership, safety climate and safety performance. Journal of Loss Prevention in The Process Industries 2008; 21(3): 307-318. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.11.001

Xi Y., Hu S., Yang Z., Fu S., Weng J. Analysis of safety climate effect on individual safety consciousness creation and safety behaviour improvement in shipping operations. Maritime Policy & Management 2023; 50(7): 941–956. https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2059718

Xia N., Xie Q., Hu X., Wang X., Meng H. A dual perspective on risk perception and its effect on safety behavior: a moderated mediation model of safety motivation, and supervisor's and coworkers' safety climate. Accident Analysis & Prevention 2020; 134. https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105350

Xia N., Ding S., Zhai F., Xia M. Sharing psychological safety climate at the group level among construction workers: the roles of group identification and interactional justice. Journal of Construction Engineering and Management 2025; 151(5): 04025038. https://doi.org/10.1061/jcemd4.coeng-14933

Yasım YK., Işık U. Taşeron işçilerin örgütsel bağlılık ile duygusal emekleri arasındaki ilişkide güvenlik ikliminin aracılık rolü: kamu hastaneleri örneği. Çalışma ve Toplum 2020; 1(64): 147-168.

Yılmaz M., Vardarlıer P. Motivasyon araçlarının örgütsel bağlılık üzerine etkisi: perakende sektörü çalışanlarına yönelik bir araştırma. Business & Management Studies: An International Journal 2021; 9(4): 1347-1365. https://doi.org/10.15295/bmij.v9i4.1900

Yin C., Zhao G., Li Y. Impact of job control on hospital workers' safety performance: a moderated mediation analysis of the influences of hospital safety climate and social support. Nursing Open 2022; 9(1): 781–789. https://doi.org/10.1002/nop2.1345

Zhao W., Li S. How does psychosocial safety climate affect safety behavior in the construction industry? A cross-level analysis. Frontiers in Public Health 2024; 12: 1473449. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1473449

Zohar D., Huang YH., Lee J., Robertson MM. Testing extrinsic and intrinsic motivation as explanatory variables for the safety climate–safety performance relationship among long-haul truck drivers. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 2015; 30: 84-96. https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.01.014

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1635-1650, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1635-1650, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Karahindiba (*Taraxacum officinale*) Katkılı Tarhana Üretimi ve Kalite Parametreleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması

Melisa KUYTAN[1], Şule Azime YENİÇERİ[2], Ebru AKKEMİK[3*]

[1,3]Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 56100, Siirt
[2]Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Gıda İşleme Bölümü, 56100, Siirt

[1]https://orcid.org/0009-0002-0370-2887
[2]https://orcid.org/0000-0003-4014-5274
[3]https://orcid.org/0000-0002-4177-4884
*Sorumlu yazar: eakkemik@siirt.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 30.09.2025
Kabul tarihi:27.01.2026
Online Yayınlanma: 15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Antioksidan kapasite
Fenolik bileşikler
Fizikokimyasal analiz
Fonksiyonel gıda
Karahindiba
Tarhana

ÖZ

Bu çalışma, geleneksel fermente bir gıda olan tarhananın besin içeriğini ve fonksiyonel özelliklerini artırmak amacıyla karahindiba (*Taraxacum officinale*) bitkisi ile zenginleştirilmesini amaçlamaktadır. Karahindiba, yüksek antioksidan kapasitesi, fenolik bileşik içeriği ve çeşitli biyoyararlılık özellikleri ile bilinen bir bitki olup, bu potansiyel özellikleri nedeniyle tarhana formülasyonuna farklı oranlarda (%4,8; %9,1 ve %16,7) taze formda ilave edilmiştir. Üretilen örnekler, kontrol grubu ile karşılaştırmalı olarak fizikokimyasal, antioksidan ve mikrobiyolojik analizlere tabi tutulmuştur. %16,7 karahindiba katkılı tarhana örneğinde FRAP, toplam fenolik madde miktarı ve ABTS radikal giderme kapasitesi en yüksek düzeyde ölçülmüştür. Tüm örneklerde maya, küf ve laktik asit bakterisi gelişimi tespit edilmemiştir. Elde edilen bu sonuçlar, karahindibanın fonksiyonel bir bileşen olarak tarhana üretiminde kullanılabileceğini ve özellikle yüksek oranda ilave edildiğinde ürünün besin değerini ve antioksidan aktivitesini artırabileceğini göstermektedir. Çalışmada karahindiba taze formda kullanılmış olup, ilerleyen çalışmalarda kurutulmuş karahindiba veya ekstrakt formunun kullanılması durumunda daha etkili sonuçlar elde edilebileceği öngörülmektedir.

Investigation of Tarhana Production with Dandelion (*Taraxacum officinale*) Additive and Its Effects on Quality Parameters

Research Article

Article History:
Received:30.09.2025
Accepted:27.01.2026
Published online:15.06.2026

Keywords:
Antioxidant activity
Dandelion
Functional food
Phenolic compounds
Physicochemical properties
Tarhana

ABSTRACT

This study aims to enrich tarhana, a traditional fermented food, with dandelion (*Taraxacum officinale*) in order to improve its nutritional content and functional properties. Dandelion is known for its high antioxidant capacity, phenolic compound content, and various bioactive properties. For this reason, it was added to the tarhana formulation in fresh form at different concentrations (4.8%, 9.1%, and 16.7%). The produced samples were subjected to physicochemical, antioxidant, and microbiological analyses, and the results were compared with a control group. In addition, the tarhana sample containing 16.7% dandelion had the highest values for FRAP, total phenolic content, and ABTS radical scavenging capacity. No yeast, mold, or lactic acid bacteria growth was detected in any of the samples. These results indicate that dandelion can be used as a functional ingredient in tarhana production and that, particularly at higher concentrations, it can enhance the nutritional value and antioxidant activity of the product. In this study, dandelion was used in its fresh form. It is anticipated that more effective results could be obtained in future studies through the use of dried dandelion or dandelion extracts.

To Cite: Kuytan M., Yeniçeri ŞA., Akkemik E**.** Karahindiba (*Taraxacum officinale*) Katkılı Tarhana Üretimi ve Kalite Parametreleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3):1635-1650.

1. Giriş

Karahindiba (*Taraxacum officinale*), papatyagiller (*Asteraceae*) familyasına ait, çiçekli ve tek yıllık otsu bir bitkidir. Türkiye florasında 16'sı endemik olmak üzere toplam 51 türü bulunduğu bildirilmektedir. Halk arasında bu bitki; acı günek, ak günek, ak güneyik, güneyik, ak hindiba, çıtlık, hindibağ, hindibahar, radika, yabani hindiba ve karakavuk gibi çeşitli isimlerle de anılmaktadır. A, B, C ve D vitaminleri bakımından zengin olan karahindiba; kalsiyum, sodyum, magnezyum, demir, çinko, fosfor, bakır ve manganez gibi mineraller açısından da yüksek bir içeriğe sahiptir (Jedrejek ve ark., 2019; Sabuncu ve ark., 2024). Karahindibanın tıpta kullanımı Osmanlı dönemine kadar uzanmaktadır (Asa, 2023). Bazı hastalıkların tedavisinde kullanıldığı, hatta kimi kaynaklarda panzehir olarak değerlendirildiği belirtilmektedir (Asa, 2023; Sabuncu ve ark., 2024). Karahindiba, içeriğinde bulunan luteolin, saponin, gallik asit, sinapik asit, kafeik asit, kumarik asit, karotenoidler, tanenler ve flavonoidler gibi çeşitli ikincil metabolitler sayesinde antioksidan, antidiyabetik, antihipertansif ve antidepresan özellikler göstermektedir (Hu ve Kitts, 2005; Gül, 2014; Sahan ve ark., 2017; Yıldırım, 2018; Gao ve ark., 2019). Ayrıca, yakın dönemli bilimsel çalışmalar, karahindibanın *Staphylococcus aureus* gibi patojenlere karşı antimikrobiyal etkilerinin yanı sıra antioksidan, antikanser, prebiyotik ve antienflamatuvar aktiviteler gösterdiğini ortaya koymuştur (Demirci Kayıran ve ark., 2020). Bununla birlikte, bitki zayıf bir alerjen olarak kabul edilmekte ve bilinçsiz tüketim sonucunda gastrit rahatsızlıklara yol açabileceği ifade edilmektedir (Demirci Kayıran ve ark., 2020). Karahindiba bitkisinin mevcut gıdaları fonksiyonel açıdan zenginleştirmek amacıyla kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, kek ve ekmek hamuruna ilave edildiği (Baltacıoğlu ve ark., 2020; Sabuncu ve ark., 2024) tespit edilmiştir. Mevcut çalışmalar karahindibanın fonksiyonel gıda üretiminde yeterince değerlendirilmediğini, gıda maddesi olarak tüketiminin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Karahindibanın sahip olduğu vitamin, mineral ve biyoaktif bileşikler açısından zengin içeriği ile fonksiyonel özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, bu bitkinin geleneksel fermente bir ürün olan tarhana üretiminde kullanılmasının ürünün besin değerini artırabileceği ve karahindibanın gıda maddesi olarak tüketimine yönelik bir alternatif sunacağı düşünülmektedir. Tarhana, Türkiye'de yaygın olarak tüketilen ve yüksek besleyici özellikleriyle bilinen bir gıda olması nedeniyle fonksiyonel gıda geliştirme çalışmalarında uygun bir taşıyıcı matris olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca karahindiba kahve, çay, çikolata, detoks suyu, lateks kauçuk matriksi olarak kullanılabileceğine dair patent çalışmalarının olması (Garcia-Oliveira ve ark. 2021) karahindibanın güçlü bir fonksiyonel gıda bileşeni olduğunu göstermektedir (Liu ve ark. 2020). Bu doğrultuda, karahindiba ilavesiyle zenginleştirilmiş tarhana üretiminin hem ürünün fiziksel ve kimyasal parametrelerini etkileyeceği hem de fonksiyonel özelliklerini güçlendirerek insan sağlığına katkı sağlayabileceği hipotezi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Tarhana standardına göre (TS 2282) tarhana; "*buğday unu, kırması, irmik veya bunların karışımı ile yoğurt, biber, tuz, soğan, domates ve tat, koku verici, sağlığa zararsız bitkisel maddelerin karıştırılıp yoğrulduktan ve fermente edildikten sonra kurutulması, öğütülmesi ve elenmesiyle elde edilen bir besin maddesidir*" şeklinde tanımlanmıştır (Anonim 2004). Formülasyonunda yer alan bileşenler sayesinde önemli bir protein, vitamin ve lif kaynağı olması sebebiyle oldukça geniş bir coğrafyada üretilip tüketilmektedir. İçeriğinde bulunan makro ve mikro besin ögeleri, damar hastalıkları, yüksek tansiyon ve kolesterol gibi kronik hastalıkların görülme sıklığının azalmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çocukların bağışıklık sistemi ve kemik gelişimini destekleyici etkisi nedeniyle beslenmede önemli bir yer tutmaktadır (Altun, 2015; Karahan ve ark., 2019; Çılgınoğlu ve Çılgınoğlu, 2023). Aynı zamanda fermente bir gıda olması sebebiyle tarhana, kolay sindirilebilen bir ürün niteliğindedir (Güngör, 2023). Raf ömrü iki yıla kadar çıkabilen bir ürün olmasının yanında bu çorbanın antioksidan, antimikrobiyal gibi biyoaktif özelliklerinin arttırılması için üretiminde keçiboynuzu (Işık Erol, 2010), nar çekirdeği (Erol, 2016), maş fasulyesi (Kurt, 2023), kızılcık (Şahin, 2024), şeker pancarı (Ünlü, 2017), bal kabağı (Felek, 2019) nar kabuğu (Felek, 2019) ve kumkuat (Erilmez İlter, 2022) gibi birçok meyve sebze kullanılmıştır. Ancak karahindiba ilaveli tarhana yapılmadığı ekibimizce tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmanın amacı, karahindiba (*Taraxacum officinale*) ilavesiyle zenginleştirilmiş tarhana üretimi gerçekleştirerek ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemek ve böylece tarhananın fonksiyonel özelliklerini geliştirmektir. Bu kapsamda, karahindibanın gıda maddesi olarak kullanımına yeni bir alternatif sunulması ve tarhananın besin değerinin artırılarak fonksiyonel bir ürün hâlinde tüketime kazandırılması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında tarhana yapımında kullanılan karahindiba bitkisi ile diğer malzemeler (baharatlar, yoğurt, un, sebzeler, salça,) Siirt ilinden ticari olarak temin edilmiştir. Analizlerde kullanılan tüm kimyasallar *Emsure ACS, Reag. Ph Eur* veya *Sigma Aldrich* firmalarından temin edilmiştir.

2.2. Tarhana Üretimi

Buna göre, tarhana hamurunun hazırlanmasında buğday unu (%39,1, %37,3, %34,2), yoğurt (%23,8, %22,7, %20,8), soğan (%9,5, %9,1, %8,3), domates (%4,8, %4,6, %4,2), domates salçası (%2,0, %1,9, %1,8), kırmızı toz biber (%0,9, %0,8, %0,8), yaş maya (%1,0, %0,9, %0,8), dereotu (%0,5, %0,5, %0,4), nane (%0,5, %0,5, %0,4), tuz (%1,9, %1,8, %1,7) ve su (%11,4, %10,9, %10,0) kullanılmış; karahindiba katkısı ise sırasıyla %4,8, %9,1 ve %16,7 oranlarında uygulanmıştır. Sebzeler ön işlem kapsamında öncelikle fiziksel yabancı maddelerden arındırılmış, musluk suyu altında yıkanarak temizlenmiştir. Temizlenen sebzeler türüne uygun homojen parçalanma sağlamak amacıyla yaklaşık 0,5-1 cm boyutlarında doğranmıştır. Doğranan soğan ve domates 120 mL su ile 5-10 dk haşlanmıştır. Üzerine taze dere otu ve nane karışımı eklenmiştir. Daha sonra diğer bileşenlerle karıştırılarak yoğurulmuş, elde

edilen hamur 30°C'de 3 gün fermantasyona bırakılmıştır. Fermantasyon süresince hamur belirli aralıklarla karıştırılmış, ardından yağlı kâğıt üzerine ince tabaka halinde serilerek 55°C'de etüvde 2 gün kurutulmuştur. Kurutma işlemi tamamlanan örnekler manyetik öğütücüde öğütülmüş ve 0,5 mm'lik elekten geçirilerek analizlerde kullanılmak üzere toz haline getirilmiştir (Felek, 2019).

2.3. Tarhana Örneklerinde Fiziksel ve Kimyasal Analizler

Protein analizleri, Dumas metodu kullanılarak Leco FP 528 (Texas, US) cihazında gerçekleştirilmiştir (Anonymous, 2017). Analiz öncesinde tarhana örnekleri homojenize edilmiş, ince elekten geçirilmiş ve her bir numuneden yaklaşık 50–250 mg tartılarak tin foil içerisine yerleştirilmiştir. Numuneler cihazın yakma ünitesine aktarılmış ve burada oksijen varlığında 900°C'de yakılmıştır. Yakma sonucunda gaz fazına geçen bileşikler çeşitli filtrelerde tutulmuş, azot ise helyum taşıyıcı gazı ile termal iletkenlik dedektörüne iletilerek ölçülmüştür. Cihaz tarafından belirlenen $\%N_2$ değeri, örneğe özgü protein dönüşüm faktörü ile çarpılarak % ham protein içeriği hesaplanmıştır. Her bir numunenin analiz süresi yaklaşık 3-4 dakika olup sonuçlar cihaz tarafından doğrudan "% nitrojen" olarak raporlanmıştır. Toz tarhana örneklerinde renk ölçümleri renk ölçüm cihazı (PCE-CSM1) kullanılarak (Felek, 2019) renk değerleri (L^*(parlaklık), a^*(kırmızılık), b^*(sarılık) belirlenmiştir. Viskozite analizi için tarhana örneklerinden 6 g tartılarak üzerine 90 mL saf su eklenmiş ve 15 dakika süreyle pişirilmiştir. Yaklaşık 60°C sıcaklığa ulaşan örneklerin viskoziteleri, 100 rpm dönüş hızında DV-II Pro Brookfield viskozimetreye ait 63 numaralı prob kullanılarak cP cinsinden ölçülmüştür (Anıl ve ark., 2016; Felek, 2019). Tuz tayini, Mohr yöntemi ile yapılmıştır (Felek, 2019). Hazırlanan karışımların pH değerleri, pH metre (Bante Instrument-PHS-3BW Microprocessor) ile ölçülmüş ve analizler üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir (Felek, 2019). Örneklerin su aktivitesi değerleri, su aktivitesi cihazı (Novasina Lab Touch-A6-CH8853Lachen-1404022) kullanılarak belirlenmiştir (Lang ve Steinberg, 1980; Felek, 2019). Titrasyon asitliği analizi için 10 g örnek üzerine %67'lik etanolden 50 mL eklenmiş ve 5 dakika karıştırılmıştır. Karışım süzgeç kâğıdından geçirilmiş, süzüntüden 10 mL alınarak üzerine saf su ilave edilmiştir. Fenolftalein indikatörü damlatıldıktan sonra 0,1 M NaOH çözeltisi ile renk açılıncaya kadar titrasyon yapılmıştır. Analiz üç tekerrürlü yürütülmüş ve harcanan NaOH hacmi 5 ile çarpılarak sonuçlar hesaplanmıştır (Anonim, 2004; Gül, 2010; Felek, 2019). Nem analizi, AOAC (2000)'de tanımlanan gravimetrik yöntem esas alınarak 105±2°C'de etüvde sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar kurutma ile; kül analizi ise aynı kaynağa göre 550±25°C'de kül fırınında yakma ile gerçekleştirilmiştir.

2.4. Antioksidan Analizler

Ekstraksiyon prosedürü: Numune ekstraksiyonu için 0,5 g öğütülmüş tarhana numunesi, 5 mL ekstraksiyon çözeltisi (%80 metanol) ile karıştırılmıştır. Ekstraksiyon, çalkalayıcılı etüvde (MCİ 120, Mipro) oda sıcaklığında (24±1°C) bir saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Çalkalamanın ardından karışım 5000 rpm'de 15 dakika santrifüj (Bioprep-6 homogenizer, Allsheng) edilmiş ve elde edilen üst faz kullanılarak toplam fenolik içerik (TPC), FRAP ve ABTS belirlenmiştir (Çiftçi, 2021).

ABTS radikal giderme aktivitesi, Re ve ark. (1999) tarafından bildirilen yöntem temel alınarak, pipetleme hacimleri ve konsantrasyonlar modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. Analiz için pH 7,4'e ayarlanmış KH_2PO_4 tamponu hazırlanmış ve bu tamponun bir kısmı kullanılarak ABTS çözeltisi (0,1097 g ABTS ve 0,066 g $K_2S_2O_8$) hazırlanmıştır. Hazırlanan ABTS radikal çözeltisi karanlık ortamda 12 saat inkübe edilmiştir. Örnek ve reaktiflerin pipetlemesi 96 kuyucuklu mikroplak üzerinde paralel olarak yapılmış ve absorbans değerleri Multiskan Go (Thermo Scientific, SN:14247028) cihazında 734 nm'de ölçülmüştür.

Ferrik iyonlarının (Fe^{3+}) ferröz iyonlarına (Fe^{2+}) indirgenme kapasitesi (FRAP metodu), Benzie ve Strain (1996) ile Benzie ve Szeto (1999) tarafından tanımlanan yöntem esas alınarak 593 nm'de spektrofotometrik olarak belirlenmiştir. FRAP reaktifi, 0,3 M asetat tamponu pH 3,6, 10 mM TPTZ (40 mM HCl çözeltisi içinde çözüldü) ve 20 mM $FeCl_3$ çözeltilerinin sırasıyla 10:1:1 oranında karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Hazırlanan reaktif örneklerle reaksiyona sokulmuş ve oluşan Fe^{2+}-TPTZ kompleksinin absorbansı 593 nm'de Multiskan Go (Thermo Scientific) cihazında ölçülerek indirgeme kapasitesi hesaplanmıştır. 1,6-64 mM Aralığında troloks kullanılarak standart grafik hazırlanmış R^2 0,9951 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar troloks eşdeğeri olarak verilmiştir.

Toplam fenolik madde tayini, tarhana örneklerindeki fenolik bileşiklerin belirlenmesi amacıyla Yoo ve ark. (2004) yöntemine bazı modifikasyonlar yapılarak Folin–Ciocalteu (FC) reaktifi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz için 0,5 N Folin–Ciocalteu reaktifi hazırlanmış, %10'luk Na_2CO_3 çözeltisi ve gallik asit standart çözeltileri oluşturulmuştur. Her bir örnek ekstraktının 0,5 mL'sine sırasıyla 2,5 mL seyreltilmiş FC reaktifi ve 2 mL %20'lik Na_2CO_3 çözeltisi eklenmiş, vorteksle homojenize edildikten sonra karanlık ortamda 25°C'de 30 dakika inkübe edilmiştir. Reaksiyon sonunda absorbans değerleri Multiskan Go (Thermo Scientific) cihazında 760 nm'de ölçülmüş ve toplam fenolik madde miktarı gallik asit (0,0012-0,094 mM gallik asit aralığında; R^2 0,9977) standart eğrisi kullanılarak gallik asit eşdeğeri (GAE) cinsinden hesaplanmıştır.

2.5. Tarhanada mikrobiyolojik analizler

Laktik asit bakteri sayımı; tarhana örneklerinin her birinden 10 g tartılmıştır. Örnekler 90 mL steril fizyolojik tuzlu su ile homojenize edilmiştir. Tarhana örnekleri ile hazırlanan 10^{-1} seyreltiden 1'er mL 9 mL'lik steril fizyolojik tuzlu suya alınarak seyreltme işlemine devam edilmiştir. 45-50ºC'ye kadar soğutulduktan sonra steril petri kaplarına dökülen besiyeri üzerine aseptik koşullar altında 0,1'er mL örnekten alınarak yayma yöntemi ile MRS agar'a (*Lactobacillus spp*. için) ekim yapılarak anaerobik koşullarda petri kutuları 30ºC'de, 2 gün süresince inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon işleminden sonra petri kutularına bakılarak koloniler sayılmıştır (Gençer Özyılmaz, 2022). Maya ve küf sayımı; önceden hazırlanan ve otoklavlayarak steril edilen PDA steril petri kaplarına aktarılmıştır. Tarhana örneklerinden hazırlanan dilüsyonlardan 0,1 mL alınarak PDA agar besiyerlerine yayma yöntemi ile ekim yapılmıştır. Ekim işleminden sonra petri kutuları 3-5 gün süreyle 25ºC'de inkübasyona bırakılmıştır. Bu süre sonunda petrilerde oluşan koloniler sayılmıştır (Gül Dikme ve Sağdıç, 2024).

2.6. İstatistiksel analiz

Verilerin varyans analizi (ANOVA) yoluyla analiz edilmiş, aralarında önemli ($p<0.05$) farklılıklar bulunan ortalamalar "Duncan çoklu karşılaştırma testi" ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel analizde IBM SPSS Statistics for Windows Version 20.0, (Statistical Package for the Social Sciences, IBM Corp., Armonk, NY, USA) programı kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada tarhana, geleneksel yönteme uygun olarak yoğurma, fermantasyon, kurutma ve öğütme aşamalarından geçirilerek üretilmiştir. Üretim süreci tamamlandıktan sonra analizlerde kullanılmak üzere elde edilen tarhanalar uygun forma getirilmiş, 500 g'lık porsiyonlar hâlinde ambalajlanarak kontrollü koşullarda muhafaza edilmiştir. Böylece numunelerin dış etkenlerden etkilenmesi önlenmiş, fizikokimyasal ve mikrobiyolojik standardizasyon sağlanmıştır. Karahindiba katkısının tarhana üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla kontrol grubu (karahindibasız) ve üç farklı karahindiba konsantrasyonu kullanılarak üretim gerçekleştirilmiş, her bir grup için tekrarlı üretim uygulanmış ve toplamda sekiz adet tarhana örneği elde edilmiştir. Bu tasarım, deneysel güvenilirliği artırmış ve verilerin istatistiksel açıdan anlamlı karşılaştırılmasına olanak tanımıştır. Özellikle kurutma ve öğütme sonrası ambalajlama süreci, nem ve mikrobiyal kontaminasyon risklerini minimize ederek ürünlerin raf ömrünü uzatmayı hedeflemiş, karahindiba katkılı tarhana örneklerinin kurutulduktan sonra ambalajlanmış hali Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Karahindibalı tarhana örnekleri

Çalışma kapsamında karahindiba ile zenginleştirilmiş tarhana örneklerinin L^*, a^* ve b^* değerleri ölçülmüş ve çıkan sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. L^* değerleri incelendiğinde örnekler arasındaki farkın istatistiksel olarak önemli olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). Karahindiba oranı arttıkça tarhana parlaklığının düzenli olarak azaldığı tespit edilmiştir ($p<0.05$). %9,1 oranına kadar karahindiba ilavesinin meydana getirdiği a^* değerlerindeki artışın ise istatistiksel olarak önemli bir farklılık oluşturmadığı ($P>0.05$) en yüksek konsantrasyonda karahindiba katkılı (%16,7) tarhana örneklerinin ise en düşük a^* değerine sahip olarak istatistiksel olarak önemli fark oluşturduğu ($p<0.05$) belirlenmiştir. Kontrol ve en yüksek düzeyde karahindiba katkısı içeren örneklerin b^* değerleri arasında anlamlı bir

fark görülmezken (P>0.05) %4,8 ve %9,1 düzeyde katkılı örneklerin daha yüksek *b** değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Tarhana örneklerinin renk, pH ve kül analiz sonuçları

Örnek	*L**	*a**	*b**	pH	% kül değeri
Kontrol	$69,47^{d}$ ±0,49	$4,68^{b}$± 0,36	$14,95^{a}$± 0,52	$4,80^{b}$± 0,03	$6,43^{a}$± 0,54
%4,8 KT	$66,41^{c}$±0,56	$5,28^{b}$± 0,54	$17,06^{b}$± 1,41	$4,81^{b}$ ± 0,06	$6,47^{a}$± 0,52
%9,1 KT	$64,71^{b}$±0,93	$5,38^{b}$± 1,42	$16,51^{b}$± 1,50	$4,80^{b}$ ± 0,01	$6,54^{a}$± 0,75
%16,7 KT	$63,79^{a}$±0,77	$3,66^{a}$± 0,10	$13,79^{a}$± 0,84	$4,49^{a}$ ± 0,21	$7,26^{a}$± 0,80

*KT Karahindibalı Tarhana

*a, b, c; Aynı sütunda farklı küçük harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (P<0.05)

Tarhana üretiminde kullanılan hammaddeler renk üzerinde farklı etkiler sergileyebilmektedir. Tarhana reçetesine ilave edilen havuç ve şeker pancarı lifinin *L** değerini arttırdığı (Ünlü, 2017), Taro unu ve yer elması ununun (Cankurtaran ve ark. 2020), kumkuat ununun ise *L** değerini azalttığı (Erilmez İlter, 2022) belirtilmiştir. Benzer şekilde havuç, şeker pancarı lifinin (Ünlü 2017) ve kumkuat (Erilmez İlter, 2022) ununun *a** değerini arttırdığı (Ünlü, 2017), yulaf (Kişi, 2015) ve kumkuat ilavesinin (Erilmez İlter, 2022) ise *b** değerini arttırdığı belirtilmiştir. Tarhana reçetesine ilave edilen hammaddeye göre renk parametrelerinin değişkenlik gösterebileceği görülmektedir. Bunun başlıca nedenin, üretim şekli, üretim yöntemi, üretim süresi ve tarhana reçetesindeki hammaddelerin karakteristik özelliği olduğunu söyleyebiliriz.

Bu çalışmada elde edilen pH aralığı (Tablo 1), literatürde yer alan diğer geleneksel ve alternatif tarhana formülasyonlarıyla uyum göstermektedir (Kurt, 2023; Güven, 2023; Altıparmak, 2023). Tablo incelendiğinde, en yüksek oranda karahindiba katkısı yapılan örneğin en düşük pH değerine sahip olduğu görülmektedir (p<0.05). Buna karşın, kontrol örneği ile %4,8 ve %9,1 karahindiba katkılı örnekler arasındaki pH farklılıklarının istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir (p>0.05). En yüksek karahindiba oranında elde edilen düşük pH değeri, ürünün mikrobiyolojik stabilitesi açısından olumlu bir özellik olarak değerlendirilebilir; çünkü düşük pH, özellikle zararlı mikroorganizmaların gelişimini baskılayan önemli bir faktördür. Bu bağlamda, karahindiba katkısı hem fonksiyonel bir katkı sağlamakta hem de ürüne asidik bir denge kazandırmaktadır.

Kül analizine ilişkin elde edilen bulgular, karahindiba katkı oranındaki artışın tarhana örneklerinin mineral içeriği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle %16,7 oranında karahindiba ilavesiyle üretilen tarhana örneğinde kül oranının en yüksek seviyeye ulaşması, bu bitkinin doğal mineral zenginliğini yansıtmaktadır. Kül oranı, gıdalarda mineral madde içeriğini temsil ettiğinden, artan kül miktarı tarhananın besin değerini pozitif yönde etkileyebilecek bir unsur olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, elde edilen değerler literatürdeki çeşitli katkı maddeleriyle yapılan çalışmalarla benzerlik göstermekte; özellikle Öney (2015)'in bayat ekmek katkılı tarhana örnekleriyle yüksek oranda örtüşmektedir. Ancak, istatistiksel analiz sonuçları değerlendirildiğinde, karahindiba

katkı düzeylerinin kül miktarı üzerinde anlamlı bir farklılık oluşturmadığı tespit edilmiştir ($p>0.05$). Bu bağlamda, karahindiba katkısı tarhananın mineral yapısını zenginleştirme potansiyeline sahip olsa da uygulanan konsantrasyon aralığında bu değişim istatistiksel olarak anlamlı düzeye ulaşmamıştır.

Karahindiba katkılı tarhana örneklerinin protein içeriğine ilişkin bulgular Tablo 2'de sunulmuştur. Elde edilen protein değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamış ($p>0.05$), bu da karahindiba ilavesinin protein içeriği üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Protein açısından zengin olmamasına rağmen, yüksek mineral, lif, vitamin ve esansiyel yağ asidi içeriği ile düşük toksisite göstermesi, karahindibanın potansiyel bir gıda kaynağı olarak önerilmesine olanak sağlamaktadır (Van Ginkel, 1998; Escudero ve ark., 2003). Karahindiba katkılı tarhana örneklerinin tümünde tuz içeriği ve nem oranı TS 2282 tarhana standardında belirlenen sınırlar aralığında tespit edilmiştir (Anonim 2004). Tarhana örneklerinde karahindiba ilavesi arttıkça nem değerlerinde bir azalma gözlenmiş, ancak bu azalışın istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir ($p>0.05$). Tuz oranı açısından ise, kontrol ve %4,8 karahindiba katkılı örnekler (3,25 ve 3,20) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p>0.05$). Buna karşın %9,1 karahindiba katkılı örnek, 3,75 tuz oranı ile kontrol ve %4,8 katkılı örneklerden anlamlı derecede daha yüksek tuz oranı göstermiştir ($p<0.05$). Bu sonuçlar, karahindiba katkısının miktarına bağlı olarak ürünün tuz oranını etkileyebileceğini ve orta düzeyde katkıda tuz dengenin kısmen değiştiğini göstermektedir.

Karahindiba oranı arttıkça titrasyon asitliğinin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Tablo 2). Elde edilen asitlik değerleri; Erinç ve Çifçi (2018), Öney (2015), Oğurlu (2019), Ertan (2018) ve Erol (2016) tarafından bildirilen değerlere kıyasla daha yüksek, Felek (2019) ve Erdem (2008) çalışmalarındaki değerlere göre ise daha düşük bulunmuştur. Analiz sonuçlarına göre, kontrol ile %4,8 ve %9,1 karahindiba katkılı örnekler arasında (13,08; 13,58; 14,25) istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmezken %16,7 karahindiba katkılı tarhana örneğinin titrasyon asitliği değerlerinin (17,66) diğer tarhana örneklerinden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklı olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$). %16,7 karahindiba katkılı tarhana örneğinde düşük pH değerinin yüksek asitlikle ilişkili olması, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu bulgu, yüksek oranda karahindiba ilavesinin fermantasyonu hızlandırabileceğini ya da içerdiği organik asitler nedeniyle asitliği artırabileceğini düşündürmektedir. Atar ve Özsisli (2022) benzer şekilde tarhanaların pH değerinin, haşhaş tohumu ilavesi ile artarken, asitlik değerinin azaldığını belirlemiştir. Aktaş ve Akın (2020), tarhana üretiminde farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15) pirinç ve mısır kepeklerini kullanarak yaptıkları çalışmalarında, numunelerin pH değerlerinde, kepek ilavesi miktarı arttıkça bir azalma gözlenmiş; özellikle %15 pirinç ve mısır ikâmeli numunelerde pH değerinin 4,29 olarak ölçüldüğünü ve bu durumun yüksek kepek seviyelerinde artan mikrobiyolojik aktivite ile ilişkili olabileceğini bildirmişlerdir.

Mevcut çalışmada elde edilen viskozite değerleri (Tablo 2), literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde özellikle Oğurlu (2019), Ertan (2018) ve Güven (2023) çalışmalarındaki değerlere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, kullanılan karahindiba oranının ve üretim

formülasyonunun viskozite üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Ancak genel olarak örnekler arasında viskozite değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir ($p>0.05$).

Tarhana örneklerinde ölçülen su aktivitesi değerleri, karahindiba ilavesiyle birlikte konsantrasyona bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Özellikle düşük ve orta düzeyde karahindiba katkısı (%4,8 ve %9,1) su aktivitesinde hafif bir artışa yol açarken, en yüksek düzeyde katkı (%16,7) ile birlikte belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu bulgu, karahindibanın tarhananın su tutma kapasitesi üzerinde doğrudan etkili olabileceğini ve belirli bir katkı oranının üzerinde nemin bağlanmasında daha etkin rol oynadığını düşündürmektedir. Elde edilen veriler, karahindiba katkısının tarhananın su aktivitesi değerleri üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. %4,8 karahindiba katkılı örnek; kontrol ve %16,7 katkılı örneklerden anlamlı derecede daha yüksek su aktivitesi değeri göstermiştir ($p<0.05$).

Tablo 2. Tarhana örneklerinin protein, tuz, nem, vizkozite, titrasyon asitliği ve su aktivitesi sonuçları

Örnek	Protein (%)	Tuz (%)	Nem (%)	Vizkozite (cP)	Titrasyon Asitliği (%)	Su aktivitesi (aw)
Kontrol	$12,72^{a}\pm0,961$	$3,25^{a}\pm0,21$	$7,46^{a}\pm0,674$	$1064,96^{a}\pm87,99$	$13,08^{a}\pm0,80$	$0,270^{ab}\pm0,007$
%4,8 KT	$11,83^{a}\pm0,650$	$3,2^{a}\pm0,14$	$7,31^{a}\pm0,522$	$1139^{a}\pm124,84$	$13,58^{a}\pm0,86$	$0,281^{c}\pm0,007$
%9,1 KT	$12,24^{a}\pm0,311$	$3,75^{b}\pm0,21$	$7,21^{a}\pm0,495$	$1047,96^{a}\pm83,16$	$14,25^{a}\pm1,12$	$0,279^{bc}\pm0,006$
%16,7 KT	$12,75^{a}\pm0,077$	$3,55^{ab}\pm0,07$	$7,09^{a}\pm0,99$	$1032,93^{a}\pm128,85$	$17,66^{b}\pm1,50$	$0,269^{a}\pm0,006$

*KT Karahindibalı Tarhana

*a, b, c; Aynı sütunda farklı küçük harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.05$).

Tarhana örneklerinin metal indirgeme kapasitesi FRAP yöntemiyle belirlenmiş ve analizde standart olarak trolox kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, oluşturulan standart eğri yardımıyla hesaplanarak trolox eşdeğeri (TE) cinsinden ifade edilmiştir (Tablo 3). Bu sonuçlar, düşük ve orta düzeydeki karahindiba ilavelerinin antioksidan kapasiteyi kontrol grubuna göre artırmadığını, hatta az da olsa düşürdüğünü göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek konsantrasyonda karahindiba ilavesi, FRAP değerlerinde belirgin bir artış sağlamıştır. Bu durum, karahindiba bitkisinde bulunan fenolik bileşiklerin ve diğer antioksidan bileşenlerin belirli bir eşik düzeyin üzerinde tarhana matrisine etkili biçimde entegre olabildiğini ve bu noktadan itibaren indirgeme gücünü artırdığını düşündürmektedir. Bununla birlikte kontrol ve %4,8, %9,1 karahindiba katkılı tarhana örneklerinin FRAP değerleri arasında istatistiki olarak önemli fark görülmezken en yüksek düzeyde katkılı (%16,7) tarhana örneğinin FRAP değerinin diğer örneklerden anlamlı düzeyde daha yüksek olduğu ($p<0.05$) ve yüksek karahindiba oranının tarhananın antioksidan kapasitesini belirgin şekilde artırdığı ortaya konmuştur.

Düşük ve orta düzeyde karahindiba katkısı yapılan tarhana örneklerinde toplam fenolik madde içeriğinde kontrol örneğine göre bir düşüş gözlemlenmiş, ancak katkı oranı %16,7'ya çıkarıldığında artış meydana gelerek toplam fenolik madde içeriği maksimum düzeye ulaşmıştır. Bu durum, düşük düzeyde karahindiba ilavesinin tarhana matrisinde fenolik bileşiklerin etkisini sınırlı tutabileceğini, ancak yüksek konsantrasyonda katkı yapıldığında karahindibanın fenolik bileşikçe zengin yapısının ürünün toplam

fenolik madde içeriğini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir. Özellikle %16,7 katkılı tarhana örneği, tüm gruplar içinde en yüksek toplam fenolik madde içeriğine sahip olması bakımından dikkat çekicidir. Bu bulgular, karahindiba bitkisinin yüksek fenolik madde içeriği ile tarhana gibi geleneksel bir fermente ürüne fonksiyonel özellik kazandırabileceğini ve sağlık açısından daha değerli hale getirebileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen toplam fenolik madde değerleri istatistiksel olarak değerlendirildiğinde düşük ve orta düzeyde karahindiba katkılı ürünler hariç gruplar arasında anlamlı farklılıklar olduğu görülmüştür ($P<0.05$).

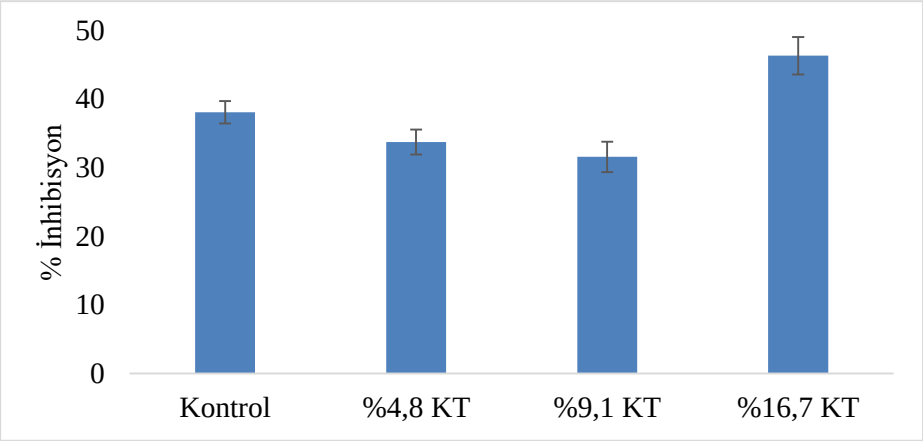
Tarhana örneklerinin radikal giderme aktivitesi ABTS yöntemi ile belirlenmiştir (Tablo 3). Sonuçlar % inhibisyon cinsinden verilmiştir. Özellikle %16,7 karahindiba içeren tarhana örneğinin kontrole göre etkili bir radikal giderme aktivitesine sahip olduğunu ve karahindiba ilavesinin doğru konsantrasyonlarda antioksidan etkiyi arttırdığı söylenebilmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, tarhana örneklerine eklenen karahindiba miktarının antioksidan kapasite üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmektedir (Tablo 3 Şekil 2-Şekil 3). ABTS değerleri istatistiksel olarak değerlendirildiğinde ise düşük ve orta düzeyde karahindiba katkılı ürünler arasında fark görülmezken diğer gruplar arasında anlamlı farklılıklar olduğu tespit edilmiştir ($P<0.05$) Özellikle %16,7 oranında karahindiba içeren tarhana örneği, kontrol grubuna göre anlamlı düzeyde daha yüksek bir antioksidan aktivite göstermiştir. Buna karşın orta katkı seviyelerinde (özellikle %9,1) gözlenen düşüş, karahindibanın fenolik bileşenlerinin matriks içerisindeki etkileşimlerinden ya da formülasyondaki diğer bileşenlerin antioksidan kapasiteyi baskılamasından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, karahindibanın kurutulmuş toz veya ekstre formunda tarhana üretiminde kullanılmaması, formülasyonda homojen bir dağılım sağlamayı güçleştirdiği ve bu durumun antioksidan sonuçlarda düzenli bir eğri elde edilememesine yol açabileceği düşünülmektedir. Literatürde de antioksidan çalışmaların ürün formülasyonuna bağlı olarak dalgalanmalar gösterdiği çalışmalar mevcuttur (Kilci Yükselci, 2012; Aktaş ve Akın, 2020).

Tablo 3. Tarhana örneklerinin antioksidan analiz sonuçları

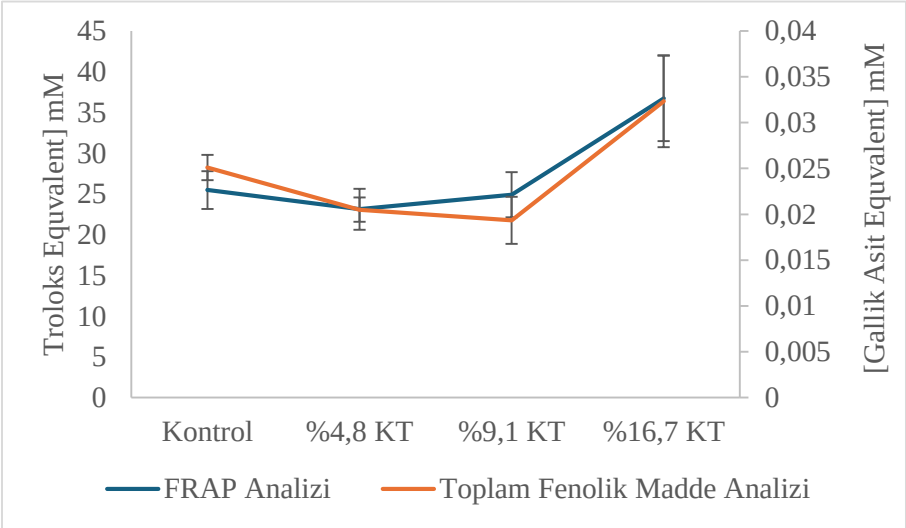
Tarhana Örnekleri	FRAP (mM TE)	Toplam Fenolik (mM GAE)	ABTS (%inhibisyonu)
Kontrol	25,47±2,33^{a}	0,0251±0,0014^{b}	38,102±1,634^{b}
%4,8 KT	23,12±2,52^{a}	0,0205±0,0013^{a}	33,743±1,814^{a}
%9,1 KT	24,89±2,76^{a}	0,0193±0,0026^{a}	31,589±2,236^{a}
%16,7 KT	36,74±5,26^{b}	0,0323±0,0050^{c}	46,351±2,727^{c}

*KT Karahindibalı Tarhana, GAE gallik asit eşdeğeri, TE Troloks eşdeğeri

*a, b, c; Aynı sütunda farklı küçük harfler ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.05$)



Şekil 2. Tarhana örneklerinin ABTS radikal giderme aktivitesi (%inhibisyon)



Şekil 3. Tarhana örneklerinin FRAP ve toplam fenolik madde analiz sonuçları

Karahindiba ile zenginleştirilmiş tarhana örneklerinde yapılan mikrobiyolojik analizler sonucunda hem maya ve küf hem de laktik asit bakterileri açısından herhangi bir mikroorganizma gelişimi tespit edilmemiştir. Bu durum, tarhana üretiminde uygulanan kurutma işleminin etkinliğini ve ürünlerin sahip olduğu düşük su aktivitesi (aw) değerlerinin mikrobiyal çoğalmayı engelleyici rolünü göstermektedir. Gençer Özyılmaz (2022)'de açık havada kurutulan tarhanalarda $2.6x10^3$-$3.5x10^4$ kob/g laktik asit bakterisi (LAB) tespit ederken; etüvde ve vakum altında kurutma yöntemlerinde laktik asit bakterisine rastlamamıştır. Ayrıca en yüksek ortalama su aktivitesi değeri açık havada kurutulan örneklerde (0.511) tespit edilirken, bunu sırasıyla vakum altında (0,222) kurutulan örnekler ve etüvde kurutulan örnekler (0.140) takip etmiştir. Yine Coşkun (1996) Trakya'nın farklı yörelerinden toplanan ev yapımı 51 tarhana örneğinden 14 tanesinde maya küf olmadığını bildirmiştir. Soyyiğit (2004) ise incelemiş olduğu Isparta ve yöresinde üretilen ev yapımı 27 adet tarhananın 12 tanesinde, maya-küf sayının, 9 tarhanada ise laktik asit bakteri sayısının <10 kob/g kuru maddenin altında olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda,

tarhana formülasyonunda yer alan tuz, baharatlar ve karahindiba gibi doğal antimikrobiyal etki gösterebilen bileşenlerin de ürünün mikrobiyolojik stabilitesine katkı sağladığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar, ürünlerin mikrobiyolojik açıdan güvenli olduğunu ve uygun saklama koşulları sağlandığı sürece raf ömrü boyunca bozulma riskinin azaldığını göstermektedir. Bu bağlamda, karahindiba katkılı tarhanaların hijyenik üretim koşulları altında hazırlandığı ve TS 2282 standardına (Anonim 2004) uygun, güvenli gıda ürünleri olduğu söylenebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, karahindiba ilavesinin tarhana formülasyonunda fonksiyonel bir bileşen olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymakla birlikte, ileride yürütülecek Ar-Ge çalışmaları için çeşitli araştırma alanlarına da işaret etmektedir. Karahindiba bu çalışmada yaş (taze) formda kullanılmıştır. Ancak literatürde yer alan benzer çalışmalarda, fonksiyonel katkı maddelerinin genellikle kurutulmuş veya toz formda kullanıldığı görülmektedir. Bu durumun, ürünün stabilitesi, homojen dağılımı ve analiz sonuçlarının güvenilirliği üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda karahindibanın kurutularak kullanılması, fonksiyonel bileşenlerin daha homojen dağılmasını sağlayabilir ve ölçümlerdeki varyasyonu azaltarak daha tutarlı sonuçlar elde edilmesine imkân tanıyabilir. Bu öneriye ek olarak farklı kurutma yöntemleri (dondurarak kurutma, vakumlu kurutma, açık havada, güneşte kurutma vb.) ile elde edilen kurutulmuş karahindiba materyalinin ve karahindiba ekstraktlarının tarhana formülasyonuna ilavesi, antioksidan kapasite, fenolik bileşik stabilitesi ve duyusal kalite açısından karşılaştırmalı olarak araştırılmalıdır. Böylece, fonksiyonel bileşen kaybını en aza indirecek ve teknolojik açıdan uygulanabilir optimum form belirlenebilecektir. Çalışmada mikrobiyolojik açıdan güvenli bir ürün elde edilmiş olsa da karahindiba ilavesinin farklı depolama koşulları (sıcaklık, nem, ambalaj tipi) altında raf ömrü, kalite değişimleri ve olası duyusal geri dönüşler üzerindeki etkilerinin uzun dönemli olarak izlenmesi önemlidir. Bu kapsamda, karahindiba katkılı tarhanaların farklı ambalaj materyalleri ile (oksijen bariyerli, ışık geçirmez, modifiye atmosfer vb.) paketlenmesi ve raf ömrü çalışmalarının yürütülmesi, ürünün ticarileştirilmesi sürecinde yol gösterici olacaktır. Bunun yanında, karahindiba katkılı tarhananın tüketici kabulü, duyusal analizler ve hedef kitle odaklı tercihler (renk, tat, koku, acılık, bitkisel aroma toleransı vb.) açısından detaylı olarak değerlendirilmelidir. Farklı yaş grupları veya fonksiyonel ürünlere ilgi duyan tüketici segmentlerinde yapılacak duyusal testler ve pazar araştırmaları, ürünün konumlandırılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, karahindibanın farklı geleneksel tarhana çeşitleri (örneğin maraş tarhanası gibi yöresel formülasyon farklılıkları) ile birlikte kullanıldığı çalışmalar hem bölgesel ürün çeşitliliği hem de fonksiyonel ürün geliştirme açısından yeni açılımlar sunabilir.

Teşekkür

Tarhana üretimi esnasındaki yardımlarından dolayı Cemile SAYYİĞİT'e teşekkürler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Bu çalışma, Melisa KUYTAN'ın 2025 yılında Doç. Dr. Ebru AKKEMİK danışmanlığında yürüttüğü yüksek lisans tez çalışmasından oluşturulmuştur. Mikrobiyolojik ve İstatistik analizler Dr. Öğr. Üyesi Şule Azime YENİÇERİ eşliğinde yapılmıştır.

Kaynakça

Aktaş K., Akın N. Influence of rice bran and corn bran addition on the selected properties of tarhana, a fermented cereal based food product. LWT- Food Science and Technology 2020; 129: 109574.

Altıparmak D. Fermente artık havuç tozlarının tarhana üretiminde kullanılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:92, Niğde, Türkiye, 2023.

Altun İ. Kahramanmaraş-Elbistan'da geleneksel olarak yapılan tarhana ve tarhana çorbası. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2015; 5: 45-49.

Anıl M., Durmuş Y., Tarakçı Z. Farklı gamlar içeren mısır unlu ve fırınlanmış mısır unlu tarhanaların viskozitelerinin kıyaslanması. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2016; 6: 128-135.

Anonim. TSE Tarhana Standardı TS 2282 Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2004.

Anonymous. Approved methodologies, https://lecoperu.com/wp-content/uploads/2018/04/FP528_209-137.pdf . 2017. Erişim Tarihi: 05 Aralık 2025

AOAC. Official Methods of Analysis. 17th Edition, The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA. Methods 2000;925.10, 65.17, 974.24, 992.16.

Asa HK. Osmanlı tıp literatüründe hindiba ve kullanım alanları. International Journal of Social and Humanities Sciences Research (JSHSR) 2023; 10: 3072-3080.

Atar Ş., Özsisli B. Determination of some characteristics of traditional Beyşehir tarhana production with poppy seed substitution. Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology, 2022; 10(7): 1293-1299.

Baltacıoğlu C., Temizsoy B., Kanbur M., Doğan M., İbili S. Hindiba kökü ekstraktı ve Trabzon hurma tozunun kek üretiminde kullanılması ve kalite parametrelerinin incelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2020; 9: 297-307.

Benzie IF., Strain JJ. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. Analytical Biochemistry 1996; 239: 70-76.

Benzie IF., Szeto YT. Total antioxidant capacity of teas by the ferric reducing/antioxidant power assay. Journal of Agricultural and Food Chemistry 1999; 47: 633-636.

Cankurtaran T., Ceylan H., Bilgiçli N. Effect of partial replacement of wheat flour by taro and Jerusalem artichoke flours on chemical and sensory properties of tarhana soup. Journal of Food Processing and Preservation 2020, 44: e14826.

Coşkun F. Trakya' nın değişik yörelerinde üretilen ev tarhanalarının kimyasal, mikrobiyolojik ve duyusal özellikleri üzerine bir araştırma, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:87, Tekirdağ, Türkiye, 1996.

Çılgınoğlu H., Çılgınoğlu Ü. Fast food, slow food akımları arasında bir Türk gastronomi lezzeti hazır çorbaların atası: tarhana ve tarhana manileri. Safran Kültür ve Turizm Araştırmaları Dergisi 2023; 6: 75-88.

Çiftçi R. Uşak tarhanasının bazı kalite karakteristiklerinin belirlenmesi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 45, Karaman, Türkiye, 2021.

Demirci Kayıran S., Çakır N., Yakut Y. Karahindiba (*Taraxacum officinale* Weber ex Wiggers) bitkisinin botanik özellikleri, kimyasal bileşimi ve geleneksel tedavide kullanılışı. Türk Farmakope Dergisi, 2020; 5(3): 18-31.

Erdem E. Tarhana üretiminde balık etinin kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:68, Denizli, Türkiye, 2008.

Erilmez İlter B. Kumkuat unu ilavesi ile fonksiyonel tarhana geliştirilmesi. Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:74, Kocaeli, Türkiye, 2022.

Erinç H., Çifçi S. Maraş tarhanası üretiminde kefir kullanımının son ürün üzerine etkileri. Gıda 2018; 43(1): 114-121.

Erol T. Farklı oranlarda nar çekirdeği ekstraktı ile zenginleştirilmiş tarhana örneklerinin depolama boyunca bazı kimyasal özelliklerinin belirlenmesi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:93, İzmir, Türkiye, 2016.

Ertan E. Geleneksel tarhana üretiminde yoğurt ikamesi olarak kefirin kullanılması üzerine bir araştırma. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:68, Afyon, Türkiye, 2018.

Escudero NL., De Arellano ML., Fernández S., Albarracín G., Mucciarelli, S. *Taraxacum officinale* as a food source. Plant Foods for Human Nutrition 2003; 58(3): 1-10.

Felek İ. Bal kabağı ve zivzik nar kabuğu unu ile zenginleştirilmiş hazır tarhana çorbası üretimi. Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:80; Siirt, Türkiye, 2019.

Gao C., Kong S., Guo B., Liang X., Duan H., Li D. Antidepressive effects of taraxacum officinale in a mouse model of depression are due to inhibition of corticosterone levels and modulation of mitogen-activated protein kinase phosphatase-1 (mkp-1) and brain-derived neurotrophic factor (bdnf) expression. Medical Science Monitor :İnternational Medical Journal of Experimental and Clinical Research 2019; 25: 389-394.

Garcia-Oliveira, P., Barral, M., Carpena, M., Gullón, P., Fraga-Corral, M., Otero, P., Prito MA, Simal-Gandara, J. Traditional plants from Asteraceae family as potential candidates for functional food industry. Food & Function 2021; 12(7): 2850-2873.

Gençer Özyılmaz S. Farklı ekmeklik buğday unları kullanılarak üretilen tokat kırmızıbiber tarhana örneklerinin fiziksel, kimyasal, fonksiyonel ve mikrobiyolojik özelliklerinin araştırılması.

Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:99, Gümüşhane, Türkiye, 2022.

Gül Dikme T., Sağdıç, O. Impact of stale bread utilization on the quality attributes of tarhana production. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 2024; 28(1): 659-672

Gül T. Bayat ekmeklerin tarhana üretiminde değerlendirilmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:23, Kayseri, Türkiye, 2010.

Gül V. Rize yöresine ait tıbbi ve aromatik bitkilere genel bir bakış. Igdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2014; 4: 97-107.

Güngör KK. Beslenme engeli kapsamında fonksiyonel gıda: glutensiz tarhana. Ankara Hacı Bayramı Veli Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Kampüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:52, Ankara, Türkiye, 2023.

Güven F. Bonkalite un kullanılarak tarhananın besleyicilik ve fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi ve instant tarhana üretimi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:49, Karaman, Türkiye, 2023.

Hu C., Kitts DD. Dandelion (*Taraxacum officinale*) flower extract suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide and prevents lipid oxidation in vitro. Phytomedicine 2005;12: 588-597.

Işık Erol N. Keçiboynuzlu tarhana üzerine bir araştırma. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:98, Afyon, Türkiye, 2010.

Jedrejek D., Bernadetta L., Agata R., Anna S., Beata O. Comparative phytochemical, cytotoxicity, antioxidant and haemostatic studies of Taraxacum officinale root preparations. Food and Chemical Toxicology 2019; 126: 233–247.

Karahan AM., Köten M., Eren Karahan L., Yazman MM. Tarhananın besinsel önemi ve fonksiyonel bileşenlerce zenginleştirilmesi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi 2019; 4, 121.

Kilci Yükselci, A. Yulaf katkısının tarhana kalitesine etkisi Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek lisans tezi, sayfa no: 66, Bursa, Türkiye, 2012.

Kişi NR. Yulaf katkılı tarhanaların bazı özelliklerinin belirlenmesi ve geleneksel maraş tarhanası ile karşılaştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:65, Kahramanmaraş, Türkiye, 2015.

Kurt E. Ultrason destekli çimlendirilmiş maş fasulyesi ununun tarhana üretiminde kullanımı. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:98, Karaman, Türkiye, 2023.

Lang KW., Steinberg MP. Calculation of moisture content of a formulated food system to any give water activity. Journal of Food Science 1980; 45: 1228-1230.

Liu N, Song M, Wang N, Wang Y, Wang R, An X, Qi J. The effects of solid-state fermentation on the content, composition and in vitro antioxidant activity of flavonoids from dandelion. PLoS ONE 2020; 15(9): e0239076.

Oğurlu MN. Tarhana üretiminde farklı oranlarda kullanılan yağı azaltılmış fındık posasının ürünün fizikokimyasal ve duyusal özelliklerine etkisi. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:72, Ordu, Türkiye, 2019.

Öney A. Bayat ekmeklerin instant tarhana çorbası üretiminde kullanılması. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 32-67, Konya, Türkiye, 2015.

Re R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology & Medicine 1999; 26: 1231-1237.

Sabuncu M., Özdemir G., Dülger Altıner D., Şahan Y. Civanperçemi ve karahindiba ile zenginleştirilen ekmeklerin bazı fizikokimyasal ve in-vitro biyoalınabilir özelliklerinin araştırılması. Gıda 2024; 49: 101-118.

Sahan Y., Gürbüz O., Güldaş M., Değirmencioğlu N., Begenirbaş A. Türkiye'de yetiştirilen hindiba çeşitlerinin (*Cichorium* spp.) fenolikleri, antioksidan kapasitesi ve biyoerişilebilirliği. Gıda Kimyası 2017; 217: 483-489.

Soyyiğit, H. Isparta ve yöresinde üretilen ev yapımı tarhanaların mikrobiyolojik ve teknolojik özellikleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:60, Isparta, 2004.

Şahin M. Kızılcık tarhanasının atıştırmalık ürün formunda değerlendirilmesi: kızılcık tarhanası ile zenginleştirilmiş bisküvi. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:64, İstanbul, Türkiye, 2024.

Ünlü MU. Havuç lifi ve şeker pancarı lifinin tarhana kalitesine etkisi. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:48, Aksaray, Türkiye, 2017.

Van Ginkel A. Monografía Diente de León. Fitomédica. Plantas Medicinales y Salud Natural 1998, 13: 66–77.

Yıldırım A. Ülkemizde yetiştiriciliği yapılan hindiba (*Cichorium* spp.) türlerinin fenolik bileşiklerinin, antioksidan kapasitelerinin ve antioksidan bileşenlerin biyoalınabilirliğinin araştırılması. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:1-36, Bursa, Türkiye,2018.

Yoo KM., Lee KW., Park JB., Lee HJ., Hwang IK. Variation in major antioxidants and total antioxidant activity of yuzu (*citrus junos sieb ex tanaka*) during maturation and between cultivars. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2004; 52: 5907-5913.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1651-1662, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1651-1662, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilim4 eri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

pH Değişiminin TiO_2 Nano Taneciklerinin Sol-Jel Sentezi Üzerine Olan Etkisi: Yapısal, Morfolojik ve Yüzey Özellikleri

Nazli TURKTEN[1], Yunus KARATAS[2], Yelda Yalcin GURKAN[3], Simal KURUMOGLU[4*]

[1,2]Kirsehir Ahi Evran University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, 40100, Kirsehir, Türkiye.
[3,4]Tekirdag Namik Kemal University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, 59030, Tekirdag, Türkiye.

[1]https://orcid.org/0000-0001-9343-3697
[2]https://orcid.org/0000-0002-3826-463X
[3]https://orcid.org/0000-0002-8621-2025
[4]https://orcid.org/0000-0001-9456-5456
* Sorumlu yazar: skurumoglu@nku.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 05.12.2025
Kabul tarihi:02.03.2026
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Katalizör
pH etkisi
Sol-jel
Su kirliliği
TiO_2 parçacıkları

ÖZ

Çalışmada, TiO_2 nano taneciklerinin yapısal, morfolojik ve yüzey özelliklerini etkileyen farklı asidik pH değerlerinde hazırlanan çözelti etkisi incelenmiştir. Bu nedenle, titanyum (IV) izopropoksit (TIP) ile sol-jel işlemi kullanılarak üç farklı asidik pH değerinde (pH=2, pH=4 ve pH=6) TiO_2 nano tanecikleri sentezlenmiştir. Üç farklı pH değerinde hazırlanan TiO_2 nanotanecikleri FTIR, Raman spektroskopisi, XRD, SEM, XPS ve BET analitik yöntemleri kullanılarak sistematik bir şekilde karakterize edilmiştir. pH=2'de elde edilen TiO_2 nano tanecikleri (TiO_2-2) başlıca kristal fazı olarak anatazdan ve az miktarda rutilden oluşan çoklu faz içermekte olup, pH=4 (TiO_2-4) ve pH=6 (TiO_2-6) değerlerinde hazırlanan TiO_2 örnekleri ise sadece anataz fazından oluşmaktadır. TiO_2 örneklerinin kristalit tanecik boyutlarının pH değeri arttıkça azaldığı gözlenmiştir. TiO_2-4 ve TiO_2-6 numuneleri, TiO_2-2 örneğine kıyasla daha düz ve kümelenmiş taneciklerden oluşmuş bir yüzey morfolojisine sahiptir. Örneklerin izoterm eğrileri Tip IV izotermine uymaktadırlar. TiO_2-2, TiO_2-4 ve TiO_2-6 örneklerinin BET yüzey alanları sırasıyla 50 m2/g, 54 m2/g ve 59 m2/g olarak bulunmuştur.

Influence of pH on the Sol-Gel Synthesis of TiO_2 Nanoparticles: Structural, Morphological, and Surface Properties

Research Article

Article History:
Received: 05.12.2025
Accepted: 02.03.2026
Published online: 15.06.2026

Keywords:
Catalyst
pH effect
Sol-gel
TiO_2 particles
Water pollution

ABSTRACT

This study focused on the effects of acidic pH on the precursor solution, impacting the structural, morphological, and surface features of TiO_2 nanoparticles. Therefore, TiO_2 nanoparticles at three different acidic pH levels (pH=2, pH=4, and pH=6) using a sol-gel process from a titanium (IV) isopropoxide (TIP) precursor were synthesized. The synthesized TiO_2 nanoparticles at three different pH levels were systematically characterized by FTIR, Raman spectroscopy, XRD, SEM, XPS, and BET analytical techniques. The obtained TiO_2 nanoparticles at pH=2 (TiO_2-2) exhibited a multi-phase pattern of dominant anatase and minor rutile, while TiO_2 specimens prepared at pH=4 (TiO_2-4) and pH=6 (TiO_2-6) consisted only of a single anatase phase. The crystallite particle sizes of TiO_2 specimens decreased as the pH level increased. The TiO_2-4 and TiO_2-6 specimens revealed smoother and agglomerated surface morphologies compared to the TiO_2-2 specimen. All the isotherm curves were Type IV, and the BET surface areas of TiO_2-2, TiO_2-4, and TiO_2-6 specimens were 50 m^2/g, 54 m^2/g, and 59 m^2/g

To Cite: Turkten N., Karatas Y., Gurkan YY., Kurumoğlu S. Influence of pH on the Sol-Gel Synthesis of TiO_2 Nanoparticles: Structural, Morphological, and Surface Properties. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3):1651-1662.

1. Introduction

In today's world, access to clean water has become a major global concern due to the increased population and industrialization. It is well known that the discharge of insufficiently treated domestic and industrial wastewater causes a threat to the ecosystem. Therefore, the contamination of natural resources by hazardous chemicals associated with untreated wastewater effluents, particularly those containing dyes, pharmaceutically active compounds, and chlorinated solvents from industrial facilities, as well as pollution related to local agriculture, such as the use of pesticides and herbicides, is one of the primary environmental challenges present worldwide. Moreover, the introduction of even small quantities of these toxic and carcinogenic compounds into both the soil and water bodies can lead to significant health problems and genetic mutations. Hence, the adoption of efficient water treatment technologies is a prerequisite for ensuring public and environmental well-being (Shukla et al., 2021; Balakrishnan et al., 2022; Singh et al., 2022; Tuama et al., 2024).

TiO_2 is a unique metal oxide recognized for its high chemical stability, easy availability, and non-toxic features. In this context, TiO_2 nanoparticles and TiO_2-based materials have been studied for the decomposition of pollutants in water and the neutralization of organic compounds in air (Turkten & Cinar, 2017; Mamaghani et al., 2019; Bakbolat et al., 2020; Turkten et al., 2022; Turkten et al., 2023). Adsorption studies focused on the removal of heavy metals, particularly arsenic, from wastewater and groundwater using the TiO_2 nanoparticles and TiO_2-based materials (Yan et al., 2016; Arora, 2019). Besides, TiO_2-supported adsorbent materials, including activated carbon, zeolites, alumina, and silica, have been utilized to improve photocatalytic performance (MiarAlipour et al., 2018). Research has highlighted that photocatalysis can effectively eliminate dyes and persistent organic pollutants from water by forming electron/hole pairs and facilitating redox reactions on the catalyst surface (Turkten & Cinar, 2017; Gurkan et al., 2017; Khan et al., 2024). Gurkan et al. reported an efficient photocatalytic degradation of 4-nitrophenol using selenium/nitrogen codoped TiO_2 (Gurkan et al., 2017), selenium(IV) ion -doped TiO_2 (Gurkan et al., 2013), nitrogen, carbon, sulfur-doped TiO_2 (Yalçın et al., 2010b), and iron-doped TiO_2 (Yalçın et al., 2010a) photocatalysts.

To date, various synthesis strategies have been employed to prepare TiO_2 nanoparticles, enabling the customization of their crystal structures, sizes, and shapes (Mustapha et al., 2020; Shang et al., 2022). Wet chemical methods are classified into microemulsion, hydrothermal/solvothermal, precipitation, and sol-gel techniques. Among these approaches, sol-gel is known as chemical solution deposition, which is a widely used procedure for synthesizing TiO_2 nanoparticles. This popular process can be categorized into either aqueous or non-aqueous sol–gel methods based on the reaction procedure. In the aqueous sol–gel method, water is only used in the reaction, while non-aqueous solvents such as alcohol, ketones, and ethers are utilized in the non-aqueous sol–gel method. The final product is obtained through five steps: hydrolysis, polycondensation, aging, drying, and calcination. The reaction is initiated by the

hydrolysis of titanium alkoxides, which serve as precursors in a solvent or water reaction medium. This step is followed by a condensation reaction that removes alcohol or water, increasing the viscosity of the solvent and retaining liquid-phase gel. These two steps occur concurrently to obtain a sol or a colloidal suspension. Afterwards, the formed sol follows aging and drying steps, yielding a gel. In the calcination step, the organic residues are finally removed, resulting in the acquisition of the desired crystalline TiO_2 particles. The molar ratio of precursor to water, pH of the solution, and calcination temperature and time are the sol-gel parameters that impact the characteristics of the obtained TiO_2 particles. TIP is primarily used as a precursor, enabling the control of synthesis due to its high reactivity and ability to form a stable colloidal solution. It was reported that pH and the calcination process affected the crystalline structure and phase composition of TiO_2 particles. Furthermore, the chosen type of acid catalyst influences the reaction pathway due to its dissociation constant and coordination ability (Velardi et al., 2019; Mustapha et al., 2020; Shang et al., 2022; Singh et al., 2022; Gatou et al., 2024; Lim et al., 2026).

This study focused on synthesizing and characterizing TiO_2 nanoparticles using the sol-gel method. The pH influence on the sol-gel process for synthesizing TiO_2 nanoparticles was evaluated at three different acidic pH levels of the precursor solution: pH=2, pH=4, and pH=6. A systematic characterization was conducted to analyze the impact of pH variations on structural, morphological, and surface features of the obtained TiO_2 specimens. The synthesized TiO_2 nanoparticles were characterized systematically using FTIR, Raman, XRD, SEM, XPS, and BET spectroscopic analysis.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

TIP (Aldrich), acetic acid (Merck), ethanol (Merck), and hydrochloric acid (Merck) were utilized without further purification.

2.2. Methods

TiO_2 nanoparticles were synthesized via a sol-gel process at a pH of 2, referred to as TiO_2-2, and characterized as detailed in our previous study (Turkten & Cinar, 2017). A similar synthesis procedure was repeated at pH=4 and pH=6, and the resulting specimens were denoted TiO_2-4 and TiO_2-6, respectively. The representative synthesis of the TiO_2-4 specimen was conducted at a reaction pH of 4, as follows: TIP and acetic acid were used as a precursor and an acid catalyst, respectively. Briefly, Solution A was prepared by adding 0.1 mol of TIP to 100 mL of ethanol in a dropping funnel. Deionized water (10 mL), acetic acid (10 mL), and ethanol (80 mL) were added to a flat-bottomed flask to obtain Solution B. Afterwards, prepared Solution A was added slowly into Solution B under stirring, maintaining a pH of pH=4 using a hydrochloric acid solution. Then, the TiO_2 sol was stirred for 2 h, aged for 48 h, and dried at 105ºC. The white powder was washed with extensive water and calcined at 500ºC for 5h.

2.3. Characterization

FTIR-ATR analysis was carried out using a Thermo Scientific Nicolet 6700 Spectrometer (32 scans, 4 cm^{-1} resolution). Raman measurements were attained using a Thermo Scientific DXR Raman Microscope (Ar+ laser, 10 mW, λ = 532 nm). SEM images were obtained on FEI-Philips XL30 Environmental Scanning Electron Microscope. BET analysis was conducted on a Quantachrome Nova 2200e. XPS profiles were performed by a Thermo Scientific K-Alpha X-ray Photoelectron Spectrometer (Al Kα radiation, hν = 1486.6 eV). XRD analysis was recorded on a Rigaku-D/MAX-Ultima diffractometer (Cu Kα X ray, λ=1.54 Å). Crystallite sizes (D, nm) of TiO_2 nanoparticles were determined employing the Scherrer equation (Eq. (1)) (Scherrer, 1918).

$$D = K\lambda / (\beta \cos\theta) \quad (1)$$

where, K: 0.9, λ: 1.5418 Å, θ: Bragg angle, and β: full width at half maximum intensity in radians.

3. Results and Discussion

FTIR spectra of TiO_2 nanoparticles prepared at three different acidic pH levels are presented in Figure 1 (a). The peak at around 1550 cm^{-1} was ascribed to the bending mode of adsorbed water. The peaks below 1000 cm^{-1} corresponded to the Ti–O stretching and O–Ti–O bending vibrations (Turkten et al., 2022).

XRD patterns of TiO_2 specimens at three different acidic pH values are shown in Figure 1 (b). In the diffractogram of the TiO_2-2 specimen, a multi-phase pattern was observed, featuring a dominant anatase phase and a minor rutile phase. The anatase diffraction peaks of TiO_2-2 specimen at 2θ=25.53º, 37.92º, 38.05º, 48.25º, 54.21º, 55.29º, 62.89º, 69.26º related to the (1 0 1), (0 0 4), (1 1 2), (2 0 0), (1 0 5), (2 1 1), (0 0 2), and (1 1 6) planes (JCPDS No. 73–1764), respectively. The observed rutile peaks at 2θ=27.50º, 36.27º, 41.29º, 44.7º, and 56.71º corresponded to (1 1 0), (1 0 1), (1 1 1), (2 1 0), and (2 0 0) planes (JCPDS No. 99–0090), respectively. The multi-phase transitioned into a single anatase phase, and the rutile diffraction peaks diminished as the pH increased to pH=4 and pH=6. Velardi et al. reported that both anatase and rutile phases were present at a calcination temperature of 450ºC and a pH preparation level of pH=2 (Velardi et al., 2019). At higher pH levels (pH=3, pH=5, pH=8, and pH=10), the rutile peaks disappeared completely, and only detectable anatase peaks remained. The reason could be the rapid oxidation, resulting in the formation of the $Ti(OH)_{3+x}$ compound, which facilitated the transformation of the anatase phase (Cassaignon et al., 2007; Yalcin, 2022).

The crystallite particle sizes of TiO_2-2, TiO_2-4, and TiO_2-6 specimens were 33 nm, 16 nm, and 14 nm, respectively. This situation was evident in that the crystallite particle size of TiO_2 nanoparticles was influenced by the pH adjustment during their preparation condition. The results indicated that the crystallite particle size decreased as the pH increased, consistent with the literature (Velardi et al., 2019).

Raman spectra of TiO_2 specimens at three different pH values are presented in Figure 1 (c). TiO_2 specimen exhibited five anatase bands at 631 cm^{-1} (E_g), 508 cm^{-1} (A_{1g}), 389 cm^{-1} (B_{1g}), 189 cm^{-1} (E_g), and 137 cm^{-1} (E_g), and a low-intensity rutile band at 439 cm^{-1} (E_g) (Turkten et al., 2019). The rutile band

disappeared at the TiO_2-4 and TiO_2-6 specimens, and these findings were compatible with the XRD data.

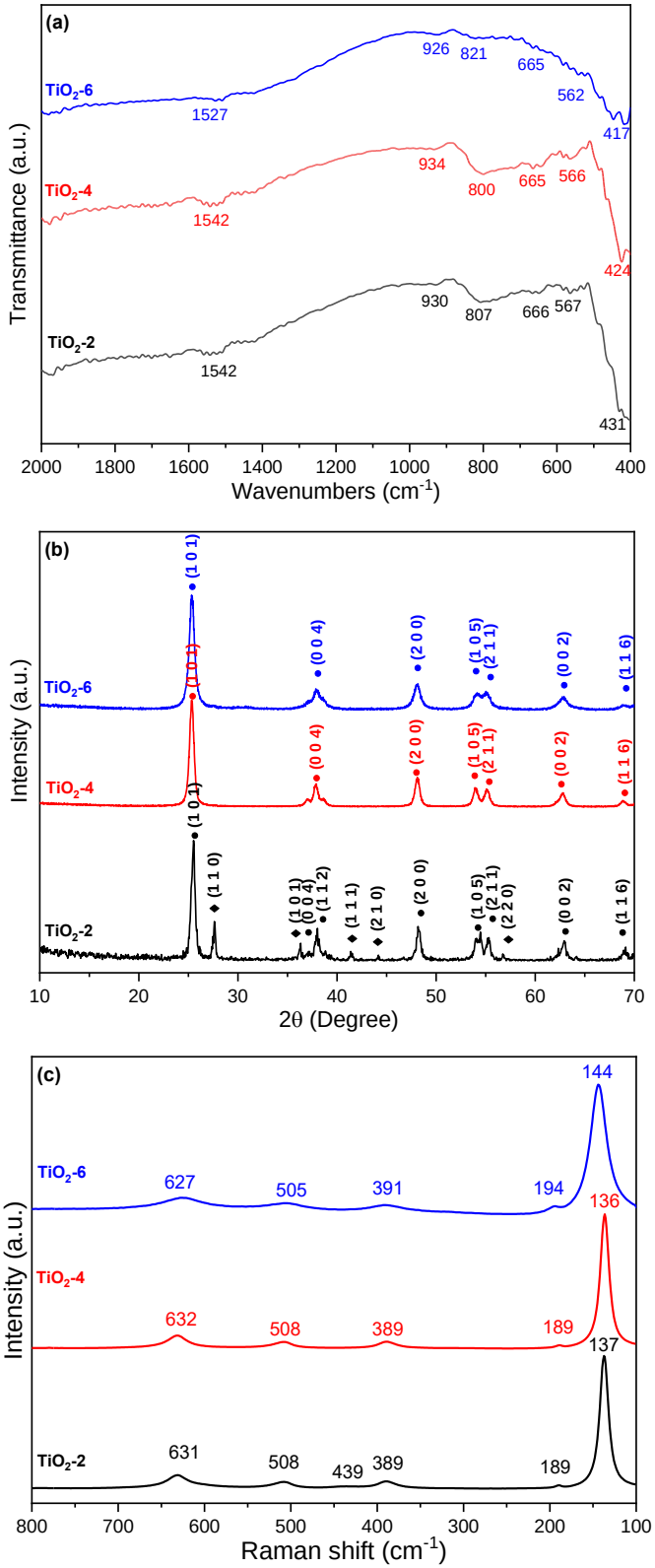


Figure 1. TiO_2 specimens of (a) FTIR spectra, (b) XRD diffractograms (●anatase, ♦rutile), and (c) Raman spectra.

SEM images of the TiO_2 specimens under three different pH conditions are presented in Figure 2. At a pH of 2, the spherical particles were nearly uniform, revealing only an insignificant tendency to agglomerate. As the pH increased to pH=4 and pH=6, a smoother surface with a high agglomeration was observed.

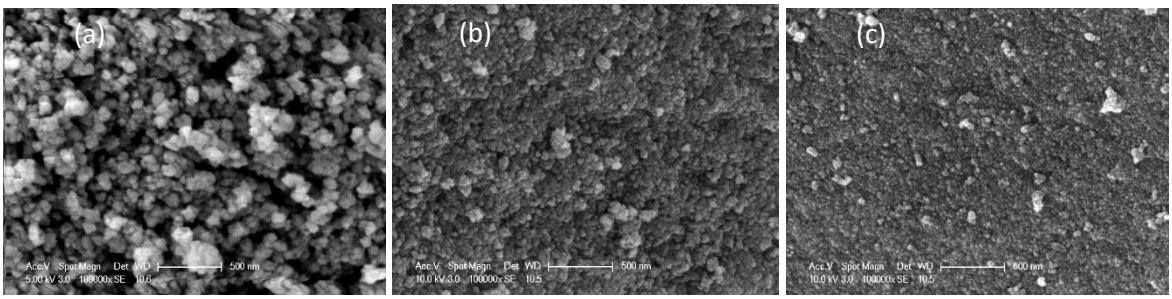
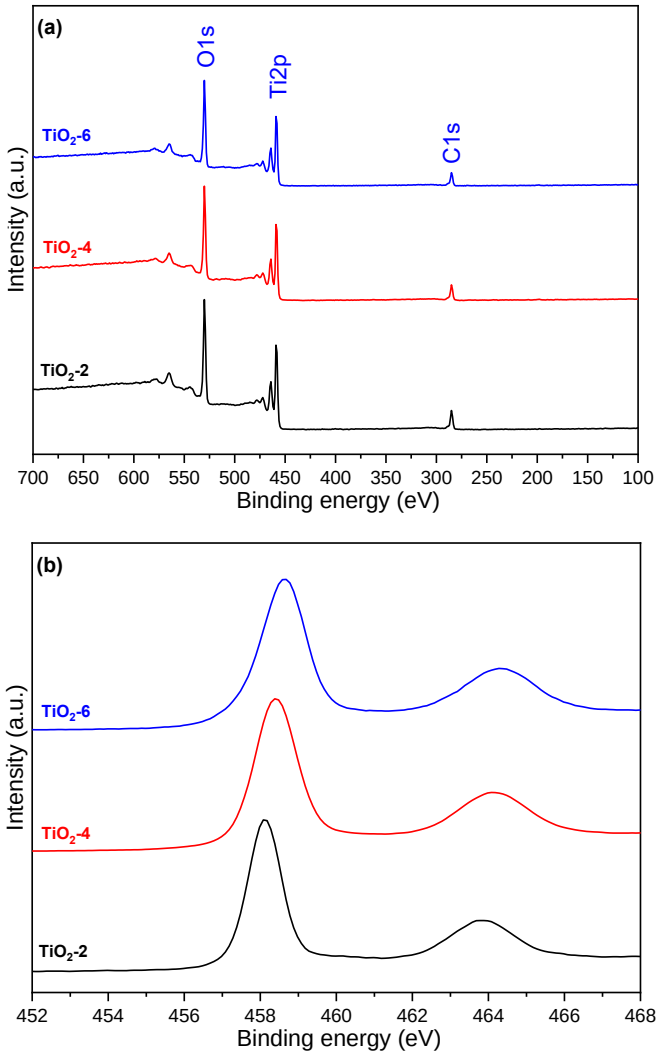


Figure 2. SEM images of TiO_2 specimens (a) pH=2, (b) pH=4, and (c) pH=6.

The XPS spectra of TiO_2 specimens prepared at three different pH values are presented in Figure 3.



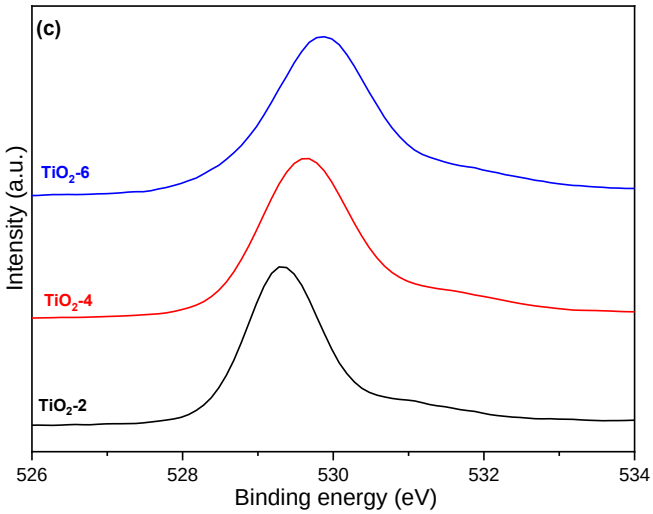


Figure 3. XPS spectra of TiO_2 specimens (a) all survey, (b) Ti 2p, and (c) O 1s.

The survey XPS spectra mainly consisted of Ti 2p and O 1s regions (Figure 3(a)). The peak at 285 eV could be related to the C 1s level of the adventitious carbon sourced from environmental contamination. Ti $2p_{1/2}$ and Ti $2p_{3/2}$ core levels appeared at binding energies of ~458 eV and ~464 eV, respectively, verifying Ti^{4+} state. (Figure 3 (b)). The core level of O 1s peaks at ~529 eV could belong to the metallic oxides (Figure 3 (c)) (Turkten et al., 2022). The peaks corresponding to Ti 2p and O 1s were shifted to slightly higher binding energies at pH levels of pH=4 and pH=6.

N_2 adsorption-desorption isotherms of TiO_2 specimens at three different pH levels are presented in Figure 4.

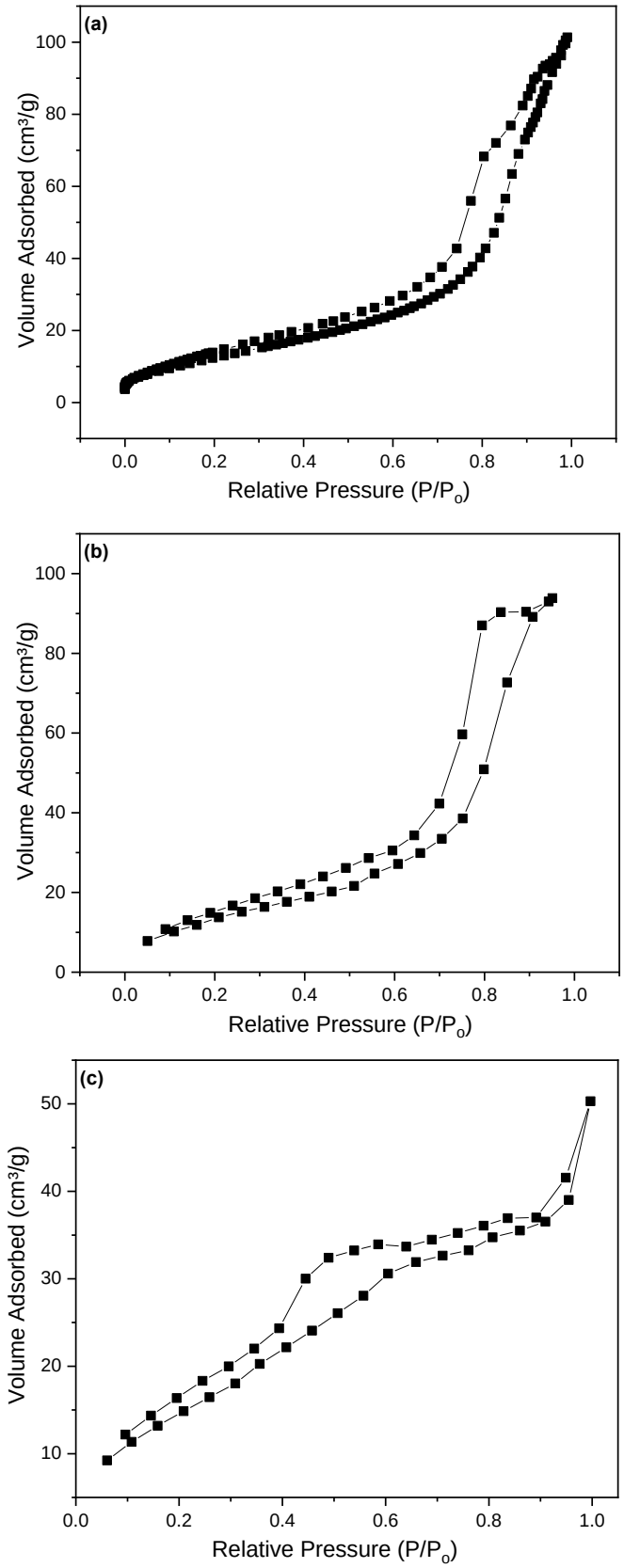


Figure 4. N_2 adsorption-desorption isotherms of TiO_2 specimens (a) pH=2, (b) pH=4, and (c) pH=6.

All the isotherms belonged to Type IV according to IUPAC classification (Sing, 1985). BET surface areas of TiO_2-2, TiO_2-4, and TiO_2-6 specimens were 50 m^2/g, 54 m^2/g, and 59 m^2/g, respectively. Tryba

et al. prepared TiO_2 nanoparticles using the sol-gel method at pH=3 and pH=10, resulting in surface areas of 179 m^2/g and 406 m^2/g, respectively (Tryba et al., 2016). In another sol-gel study, the influence of pH and the titanium precursor on the preparation of TiO_2 nanoparticles was investigated (Simonsen & Søgaard, 2010). It was reported that the surface area of TiO_2 nanoparticles under acidic conditions (pH=3) from TIP precursor was very low (6 m^2/g), while the surface areas of TiO_2 nanoparticles at pH=7 and pH=10 were found to be 130 m^2/g and 196 m^2/g, respectively. The surface areas of TiO_2 nanoparticles prepared at pH values of pH=5, pH=6, pH=8, and pH=9 were reported as 125 m^2/g, 157 m^2/g, 146 m^2/g, 142 m^2/g, and 140 m^2/g, respectively (Khan, 2017).

4. Conclusion

TiO_2 nanoparticles at three different acidic pH levels from the precursor solution were synthesized via a sol-gel procedure. The impact of pH in the sol-gel method on TiO_2 nanoparticles was investigated. It was observed that the pH variation influenced the structural, morphological, and surface properties of the TiO_2 specimens. The TiO_2-2 specimen was composed of a multi-component system containing both anatase and rutile phases, while the TiO_2-4 and TiO_2-6 specimens were a single phase of anatase. Raman results confirmed the XRD analysis. A notable alteration was noted, especially in the crystallite particle size of the TiO_2-2 (33 nm) specimen, whereas the crystallite particle sizes of the TiO_2-4 and TiO_2-6 specimens reduced to 16 nm and 14 nm, respectively. In comparison to the TiO_2-2 specimen, the TiO2-4 and TiO2-6 specimens exhibited smoother and more agglomerated morphology. BET surface areas of TiO_2 specimens were slightly increased with rising pH levels. It was found that the surface areas of TiO_2-2, TiO_2-4, and TiO_2-6 specimens were 50 m^2/g, 54 m^2/g, and 59 m^2/g, respectively. The designed TiO_2 specimens can be further applied in various areas such as water treatment, self-cleaning surfaces, and sterilization.

Declarations

Ethical Approval Certificate

Not applicable.

Author Contribution Statement

Nazli Turkten: Conceptualization, investigation, formal analysis, writing the original draft, review, and editing

Yunus Karatas: Supervision, Conceptualization, Methodology, writing the original draft, review, and editing

Yelda Yalcin Gurkan: Methodology, writing the original draft, review, and editing

Simal Kurumoglu: Methodology, investigation, writing the original draft

Fund Statement

There is no financial support and commercial support.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Arora R. Adsorption of heavy metals–A review. Materials Today: Proceedings 2019; 18: 4745–4750.

Bakbolat B., Daulbayev C., Sultanov F., Beissenov R., Umirzakov A., Mereke A., Chuprakov I. Recent developments of TiO2-based photocatalysis in the hydrogen evolution and photodegradation: A Review. Nanomaterials 2020; 10(9): 1790.

Balakrishnan A., Appunni S., Chinthala M., Vo DVN. Biopolymer-supported TiO2 as a sustainable photocatalyst for wastewater treatment: a review. Environmental Chemistry Letters 2022; 20(5): 3071–3098.

Cassaignon S., Koelsch M., Jolivet JP. From TiCl3 to TiO2 nanoparticles (anatase, brookite and rutile): Thermohydrolysis and oxidation in aqueous medium. Journal of Physics and Chemistry of Solids 2007; 68(5): 695–700.

Gatou MA., Syrrakou A., Lagopati N., Pavlatou EA. Photocatalytic TiO2-based nanostructures as a promising material for diverse environmental applications: A Review. Reactions 2024; 5(1): 135–194.

Gurkan Y., Kasapbasi E., Turkten N., Cinar Z. Influence of Se/N Codoping on the Structural, Optical, Electronic and Photocatalytic Properties of TiO2. Molecules 2017; 22(3): 414.

Gurkan YY., Kasapbasi E., Cinar Z. Enhanced solar photocatalytic activity of TiO2 by selenium(IV) ion-doping: Characterization and DFT modeling of the surface. Chemical Engineering Journal 2013; 214: 34–44.

Khan H. Sol–gel synthesis of TiO2 from TiOSO4: characterization and UV photocatalytic activity for the degradation of 4-chlorophenol. Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis 2017; 121(2): 811–832.

Khan S., Noor T., Iqbal N., Yaqoob L. Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: A review. ACS Omega 2024; 9(20): 21751–21767.

Lim HS., Kim SW., Kuppusamy M., Muthu S., Kim WJ. Influence of synthesis and optimization parameters on NOx degradation performance of TiO2 nanoparticles via sol-gel method. Journal of Physics and Chemistry of Solids 2026; 208: 113005.

Mamaghani AH., Haghighat F., Lee CS. Hydrothermal/solvothermal synthesis and treatment of TiO2 for photocatalytic degradation of air pollutants: Preparation, characterization, properties, and performance. Chemosphere 2019; 219: 804–825.

MiarAlipour S., Friedmann D., Scott J., Amal R. TiO2/porous adsorbents: Recent advances and novel applications. Journal of Hazardous materials 2018; 341: 404–423.

Mustapha S., Ndamitso MM., Abdulkareem AS., Tijani JO., Shuaib DT., Ajala AO., Mohammed AK. Application of TiO2 and ZnO nanoparticles immobilized on clay in wastewater treatment: a review. Applied Water Science 2020; 10(1): 49.

Scherrer P. Estimation of the size and internal structure of colloidal particles by means of röntgen. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen 1918; 2: 96–100.

Shang C., Bu J., Song C. Preparation, antimicrobial properties under different light sources, mechanisms and applications of TiO2: A review. Materials (Basel) 2022; 15(17): 5820.

Shukla S., Pandey H., Singh P., Tiwari AK., Baranwal V., Pandey AC. Synergistic impact of photocatalyst and dopants on pharmaceutical-polluted waste water treatment: a review. Environmental Pollutants and Bioavailability 2021; 33(1): 347–364.

Simonsen ME., Søgaard EG. Sol–gel reactions of titanium alkoxides and water: influence of pH and alkoxy group on cluster formation and properties of the resulting products. Journal of Sol-Gel Science and Technology 2010; 53(3): 485–497.

Sing KSW. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). Pure and Applied Chemistry 1985; 57: 603.

Singh P., Mohan B., Madaan V., Ranga R., Kumari P., Kumar S., Kumar K. Nanomaterials photocatalytic activities for waste water treatment: a review. Environmental Science and Pollution Research 2022; 29(46): 69294–69326.

Tryba B., Tygielska M., Colbeau-Justin C., Kusiak-Nejman E., Kapica-Kozar J., Wróbel R., Guskos N. Influence of pH of sol-gel solution on phase composition and photocatalytic activity of TiO2 under UV and visible light. Materials Research Bulletin 2016; 84: 152–161.

Tuama AN., Alzubaidi LH., Jameel MH., Abass KH., bin Mayzan MZH., Salman ZN. Impact of electron–hole recombination mechanism on the photocatalytic performance of ZnO in water treatment: A Review. Journal of Sol-Gel Science and Technology 2024; 110(3): 792–806.

Turkten N., Cinar Z. Photocatalytic decolorization of azo dyes on TiO2: Prediction of mechanism via conceptual DFT. Catalysis Today 2017; 287: 169–175.

Turkten N., Cinar Z., Tomruk A., Bekbolet M. Copper-doped TiO2 photocatalysts: application to drinking water by humic matter degradation. Environ Sci Pollut Res Int 2019; 26(36): 36096–36106.

Turkten N., Karatas B., Karatas Y., Cinar Z., Bekbolet M. A facile synthesis of bio-inspired hierarchical microstructure TiO2: Characterization and photocatalytic activity. Environmental Progress & Sustainable Energy 2022; 42(3): e14054.

Turkten N., Karatas Y., Uyguner-Demirel CS., Bekbolet M. Preparation of PANI modified TiO2 and characterization under pre- and post-photocatalytic conditions. Environmental Science and Pollution Research 2023; 30(51): 111182–111207.

Velardi L., Scrimieri L., Serra A., Manno D., Calcagnile L. The synergistic role of pH and calcination temperature in sol–gel titanium dioxide powders. Applied Physics A 2019; 125(10): 735.

Yalcin M. The effect of pH on the physical and structural properties of TiO2 nanoparticles. Journal of Crystal Growth 2022; 585: 126603.

Yalçın Y., Kılıç M., Çınar Z. Fe+3-doped TiO2: A combined experimental and computational approach to the evaluation of visible light activity. Applied Catalysis B: Environmental 2010; 99(3-4): 469–477.

Yalçın Y., Kılıç M., Çınar Z. The role of non-metal doping in TiO2 photocatalysis. Journal of Advanced Oxidation Technologies 2010; 13(3): 281–296.

Yan L., Hu S., Jing C. Recent progress of arsenic adsorption on TiO2 in the presence of coexisting ions: A review. Journal of Environmental Sciences 2016; 49: 74–85.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1663-1682, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1663-1682, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

İklim Değişikliği ve Kentsel Açık Yeşil Alanlar: Birecik/Şanlıurfa Örneğinde Odunsu Bitki Taksonlarının Ekolojik Tolerans Kriterleri Açısından Değerlendirilmesi

Gamze KARADAŞ[1*], Nermin Merve YALÇINKAYA[2]

[1,2]Çukurova Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Adana

[1]https://orcid.org/ 0000-0002-5550-6522
[2]https://orcid.org/0000-0002-0860-1498
*Sorumlu yazar: gakaradas@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 01.10.2025
Kabul tarihi:08.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Ekolojik tolerans
Kentsel ekosistemler
Kentsel açık yeşil alanlar
Kurak iklim
Birecik

ÖZ

Kentsel ekosistemlerin üzerindeki iklim değişikliğine bağlı gelişen kültürel baskıların etkisi gün geçtikçe artmaktadır. Bitkilendirme süreçlerinde doğal yurtlu olmayan bitki seçimleri ise mevcut sorunları şiddetlendirmede doğrudan etkilidir. Bu nedenle, özellikle kurak iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerde, ağaçlandırma çalışmaları ve/veya bitkisel tasarım süreçlerinde ekolojik toleransı yüksek türlerin kullanımı iklim değişikliği ile mücadele süreçlerinde kritik bir gerekliliktir. Bu çalışmada, anılan gerekçeden yola çıkılarak, Şanlıurfa ili Birecik ilçesinde yer alan altı park ve açık yeşil alanda (A, B, C, D, E, F) bulunan ağaç ve ağaççık taksonlar; hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr, sıcaklık, düşük sıcaklık ve tuzluluk gibi ekolojik tolerans kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma alanlarında bulunan odunsu taksonlar, 2025 yılının Ağustos ve Eylül aylarında doğrudan saha gözlemleri ve listeleme tekniği kullanılarak tespit edilmiştir. Tespit edilen türlerin ekolojik tolerans kriterleri, literatür verileri ile karşılaştırılarak analiz edilmiş ve duyarlılıkları belirlenmiştir. Çalışmada 15 familyaya ait toplam 24 takson belirlenmiş olup, bunların 12'si doğal, 12'si ise egzotik kökenlidir. Bulgular, 11 taksonun (3 doğal, 8 egzotik) en az bir ekolojik faktöre duyarlı olduğunu göstermiştir. Bu grupta *Washingtonia filifera* H.Wendl., *Melia azedarach* L., *Salix alba* L., *Salix babylonica* L., *Albizia julibrissin* Durazz., *Cercis siliquastrum* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Callistemon linearis* Sweet, *Juniperus communis* L., *Pinus brutia* Ten. ve *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don yer almaktadır. Buna karşılık, 13 taksonun (9 doğal, 4 egzotik) tüm faktörlere karşı yüksek tolerans gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, kurak iklim kuşağında yer alan Birecik ilçesi kentsel yeşil alanlarında ekolojik açıdan risk taşıyan türlerin varlığı, iklim değişikliği ile mücadele süreçlerinde dikkat edilmesi gereken bir konu olarak öne çıkmaktadır. Kentsel açık yeşil alanların iklim krizi çözüm önerileri kapsamındaki önem ve etki boyutunu anlayarak, bölgenin iklimsel koşullarına uyumlu, doğal yurtlu ve dolayısıyla yüksek toleranslı türlerin tercih edilme farkındalığı, ağaçlandırma çalışmaları ve bitkisel tasarım süreçlerinde izlenen metodolojiye entegre edilmelidir.

Climate Change and Urban Open Green Spaces: Evaluation of Woody Plant Taxa in Terms of Ecological Tolerance Criteria in the Example of Birecik/Şanlıurfa

Research Article

Article History:
Received: 01.10.2025
Accepted: 08.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Ecological tolerance

ABSTRACT

The impact of cultural pressures arising from climate change on urban ecosystems is increasing daily. Selecting non-native plants in planting processes directly exacerbates existing problems. Therefore, especially in regions where arid climates prevail, the use of species with high ecological tolerance in afforestation and/or planting design is a critical requirement in the fight against climate change. In this study, based on the aforementioned

Urban ecosystems
Urban open green spaces
Arid climate
Birecik

rationale, tree and shrub taxa in six parks and open green areas (A, B, C, D, E, and F) in Birecik district of Şanlıurfa province were evaluated in terms of ecological tolerance criteria such as air pollution, drought, wind, temperature, low temperature, and salinity. Woody taxa in the study areas were identified using direct field observations and the listing technique in August and September 2025. The ecological tolerance criteria of the identified species were analyzed by comparing them with literature data, and their sensitivities were determined. A total of 24 taxa belonging to 15 families were identified in the study, 12 of which were native and 12 were exotic. The findings showed that 11 taxa (3 native, 8 exotic) were sensitive to at least one ecological factor. This group included *Washingtonia filifera* H.Wendl., *Melia azedarach* L., *Salix alba* L., *Salix babylonica* L., *Albizia julibrissin* Durazz., *Cercis siliquastrum* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Callistemon linearis* Sweet, *Juniperus communis* L., *Pinus brutia* Ten., and *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don. In contrast, 13 taxa (9 native, 4 exotic) were determined to have high tolerance to all factors. As a result of the study, the presence of ecologically risky species in the urban green areas of Birecik district, located in the arid climate zone, stands out as an issue that requires attention in the processes of combating climate change. By understanding the importance and impact of urban open green spaces within the scope of climate crisis solution proposals, awareness of preferring species that are compatible with the climatic conditions of the region, have natural habitats and therefore have high tolerance should be integrated into the methodology followed in afforestation studies and planting design processes.

To Cite: Karadaş G., Yalçınkaya NM. İklim Değişikliği ve Kentsel Açık Yeşil Alanlar: Birecik/Şanlıurfa Örneğinde Odunsu Bitki Taksonlarının Ekolojik Tolerans Kriterleri Açısından Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1663-1682.

1. Giriş

Küresel perspektifte, özellikle kent merkezlerinde gözlenen hızlı nüfus artışı, düzensiz kentleşme, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanılmaması vb. kültürel temelli sorunlar, küresel iklim değişikliğine uzanan bir çevresel sorunsalın oluşum sürecinin temel bileşenleri olarak dikkat çekmektedir (Özdemir ve Özekicioğlu, 2006; Say ve Yalçınkaya, 2018; Tokgöz ve ark., 2018; Ege ve Özgen, 2024; Yalçınkaya ve ark., 2025).

Günümüzde iklim değişkenliğine bağlı olarak artan sıcaklık ortalamaları, farklı kuraklık türlerinin ortaya çıkmasında belirleyici bir faktör hâline gelmiştir. Meteorolojik kuraklık düzeyinde; yağış miktarlarında ve süresinde azalma, yüksek sıcaklıklara bağlı olarak şiddetli rüzgârlar, düşük bağıl nem, artan güneşlenme süresi ve azalan bulutluluk gibi iklimsel koşullar gözlemlenmektedir. Bu durum yer altı su seviyelerinde düşüşe, buharlaşma ve terleme oranlarında ise artışa neden olmaktadır. Tarımsal kuraklık düzeyinde ise toprakta mevcut su oranının azalmasıyla birlikte bitkiler su stresi yaşamakta ve buna bağlı olarak ürün verimliliğinde düşüş meydana gelmektedir. Hidrolojik kuraklık ise yüzey-ve yer altı su kaynaklarındaki azalmaya, akarsularda debi düşüklüğüne ve doğal ekosistemlerin daralmasına yol açmaktadır (Maity ve ark., 2016; Partigöç ve Soğancı, 2019; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).

Son kırk yıl içerisinde kuraklık kaynaklı sorunların diğer doğal afet türlerine kıyasla toplumlar üzerindeki tahribatının daha yoğun ve etkili olması (FAO, 2017), iklim değişikliğinin kent ekosistemleri için bir tehdit unsuru niteliği taşıdığının göstergesi olarak yorumlanabilir. Bu çerçevede, iklim değişikliğine uyum çabaları kapsamında birçok kurum tarafından stratejik yönelimler belirlenmiştir: örneğin Avrupa Çevre Ajansı (EEA), su kıtlığı ve kuraklık risklerine dikkat çekerek kent

ve ekosistemlerin adaptasyon kapasitesinin güçlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır (EEA, 2024). Türkiye'de ise T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı; "İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030)" kapsamında kentlerde alt yapı, yeşil alan yönetimi ve su yönetimi süreçlerinin adaptasyona uygun hale getirilmesi hedeflenmiştir (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2024). Ayrıca, TMMOB Peyzaj Mimarları Odası, "Kurakçıl Peyzaj Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslar" başlıklı Cumhurbaşkanı Kararı (No: 10502, 18 Ekim 2025 tarihli Resmî Gazete) ile kamu ve yarı özel yeşil alanlarda su verimliliği, kuraklığa dayanıklı bitki türleri kullanımı, alternatif su kaynaklarının entegrasyonu, otomasyonlu sulama gibi kurallar belirlenmiş olduğunu duyurmuştur (TMMOB, 2025). Bu durum, kuraklığın kent peyzajı ve alt yapı üzerinde yaratabileceği baskıların hukuki ve teknik çerçevede önceden tanımlanmış olmasını göstermektedir; böylece çalışmanın bağlamını, kuramsal argüman ile uygulama politikaları arasında köprü kuracak biçimde güçlendirmiş olur. Kentleşmeye bağlı olarak yoğunlaşan çevresel baskılar, artan sıcaklık, su kıtlığı, toprak tuzluluğu, don olayları, kuvvetli rüzgârlar ve hava kirliliği gibi abiyotik stres faktörlerinin etkisini daha da şiddetlendirmektedir (Bita ve Gerats, 2013; Raza ve ark., 2020). Bu faktörler yalnızca doğal ekosistemlerin işleyişini değil, aynı zamanda kentsel peyzajların sürdürülebilirliğini de doğrudan tehdit etmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalar göstermektedir ki (Meerow ve Stults, 2016; Güzel ve Ulus, 2021; Hardy ve ark., 2022; Pandey ve Ghosh, 2023; Ali ve ark., 2025; Liu ve ark., 2025; Mills-Novoa ve Mikulewicz, 2025) kentsel ekosistemlerin iklim değişikliğine bağlı stres faktörlerine dayanıklılığının artırılması, kentlerin yaşanabilirliğinde temel gereklilikler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, kentsel açık ve yeşil alanların ekolojik ve sosyo-kültürel işlevleri her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Kent parkları, rekreasyon alanları, koridor niteliğindeki yeşil altyapılar ve küçük ölçekli yeşil dokular; oksijen üretimi, hava kalitesinin iyileştirilmesi, biyolojik çeşitliliğin desteklenmesi, su döngüsünün düzenlenmesi, kentsel ısı adası etkisinin azaltılması, karbon depolama ve estetik değerlerin güçlendirilmesi gibi çok yönlü ekosistem hizmetleri sunmaktadır (Çetinkaya ve Uzun, 2014; Manoli ve ark., 2019; Zencirkıran ve Sönmez, 2023; Karadaş, 2025).

Kentsel ekosistem hizmetlerinin sürekliliği, kentsel peyzajlarda kullanılan bitki türlerinin ekolojik tolerans özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Kentlerde yürütülen rekreasyonel tasarım süreçlerinde, ekolojik koşullara uyumlu olması nedeniyle tolerans düzeyi yüksek, düşük su tüketimine sahip ve çevresel stres faktörlerine dirençli bitki türlerinin seçilmesi sürdürülebilir kentleşme stratejilerinin temel dayanaklarından birini oluşturmaktadır (Kösa ve ark., 2019; Jin ve ark., 2021; Söğüt ve Yalçınkaya, 2022; Doğan ve Eroğlu, 2025). Diğer bir ifadeyle, yerel florada doğal olarak bulunan taksonların tasarım çalışmalarında tercih edilmesi; bakım maliyetlerinin azaltılmasına, su ve toprak kaynakları üzerindeki baskıların hafifletilmesine, bölgesel ekosistemlere hızlı uyum sağlanmasına ve biyoçeşitliliğin korunmasına katkı sağlamaktadır (Zencirkıran, 2009; Zencirkıran ve Seyidoğlu Akdeniz, 2017; Söğüt ve Yalçınkaya, 2022; Yalçınkaya ve ark., 2022). Bu nedenle, ekolojik toleransı yüksek türlerin tercih edilmesi aynı zamanda iklim değişikliği ile mücadele süreçlerinde kentsel peyzajların dirençliliğini artırarak sürdürülebilirliğini desteklemektedir.

Dünya genelinde kent ekosistemlerinde yeşil alanların su kıtlığı, kuraklık ve artan sıcaklık stresine karşı adaptasyon kapasitesi giderek artan bir araştırma konusu olmuştur. Örneğin, Kuzey Almanya / Almanya'nın şehir alanlarında yapılan bir çalışmada, şehir ağaçlarının gövde çapı büyümesi, kararlı izotop kompozisyonu (karbon ve oksijen izotopları) ve su kullanımı verilerine bakılarak türlerin kuraklık etkisine dayanıklılıkları karşılaştırılmış; bazı türlerin kuraklık ve hava kirliği ile (örneğin NO_x emisyonları gibi) etkileşim içinde stres altına girdiği gözlemlenmiştir (Hirsch ve ark., 2023). Ayrıca, Kore'de 27 odunsu tür üzerinde yapılan bir çalışmada, ardışık kuraklık ve yüksek sıcaklık stres koşullarında hangi odunsu taksonların yüksek tolerans gösterdiği test edilmiştir; bu sayede kuraklık + ısı kombinasyonuna dayanıklı türlerin belirlenmesi öne çıkan bir yöntem olmuştur (Park ve ark., 2025). Bu global yaklaşımlarla paralel olarak, Türkiye'de de farklı kentlere yönelik bilimsel çalışmalar bu gerekliliği desteklemektedir. Hatipoğlu ve Ekren (2022), Haliliye ilçesindeki kentsel yeşil alanlarda egzotik türlerin (%60) doğal türlere kıyasla daha yoğun kullanıldığını, ancak yarı kurak iklim ve kireçli toprak nedeniyle bazı türlerin gelişiminde sorunlar yaşandığını bildirmiştir. Benzer biçimde, Zencirkıran ve Akdeniz (2017) Bursa'daki kent parklarında odunsu bitki taksonlarının su tüketimi, ışık ihtiyacı ve kuraklık, don, sıcaklık, tuz, rüzgâr ile kirlilik gibi faktörlere toleranslarını incelemiş; bitkilerin dona, kirliliğe ve rüzgâra karşı yüksek, ısı ve tuza karşı düşük tolerans gösterdiğini belirtmiştir. Ateş ve Demiroğlu (2024) Kilis'teki parklarda kuraklık toleransının iklim değişikliğine uyum açısından kritik olduğunu vurgulamış, Kösa (2023) ise Antalya'da yürüttüğü çalışmada 112 odunsu taksonun kuraklık, ısı ve rüzgâra yüksek, tuza düşük tolerans sergilediğini saptamıştır. Güzel ve Ulus (2021), Ordu'da dona, rüzgâra ve hava kirliliğine yüksek, kuraklığa orta düzeyde tolerans gösteren türlerin ağırlıkta olduğunu; Ekren ve ark. (2024) ise Rize'de yerli taksonların şehirleşme ve iklim değişikliğine dayanıklılık açısından öncelikli olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Gür ve Kahraman (2024) tarafından Aliağa'da yürütülen çalışmada da, endüstriyel kentsel alanlarda sıcaklık, rüzgâr ve kirliliğe dayanıklı türlerin seçiminin önemine dikkat çekilmiştir.

Bu çalışmada araştırma alanı olarak Şanlıurfa'nın Birecik ilçesi seçilmiştir. Birecik, yarı kurak iklimi, yüksek sıcaklık rejimi ve kireçli toprak yapısı nedeniyle ekolojik stres faktörlerinin yoğun olarak gözlendiği, ancak bu özellikleri temel alan kapsamlı bir analiz çalışmasının bulunmadığı bir bölgedir. Bu çalışmanın amacı, Birecik ilçesindeki kentsel açık ve yeşil alanlarda kullanılan bitki taksonlarını ekolojik tolerans kriterleri açısından incelemeyi; yerel çevresel koşullar çerçevesinde sürdürülebilir peyzaj planlaması için bilimsel bir temel oluşturulmasıdır. Çalışmanın hipotezi, "odunsu bitki taksonlarının ekolojik tolerans düzeyleri ile kentsel çevre koşullarına uyum başarıları arasında anlamlı bir ilişki bulunduğu" varsayımına dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle, yerel iklimsel ve edafik faktörlerle uyumlu bitki taksonlarının seçilmesi durumunda, yarı kurak kentlerde yeşil alanların sürdürülebilirliği ve ekolojik dayanıklılığı önemli ölçüde artacaktır. Bu yönüyle araştırma, yalnızca mevcut türlerin tolerans özelliklerini analiz etmekle kalmayıp, aynı zamanda iklim, toprak ve kentsel baskılar çerçevesinde bütüncül bir değerlendirme sunarak literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Böylece elde edilen bulguların hem yerel düzeyde hem de benzer ekolojik özelliklere

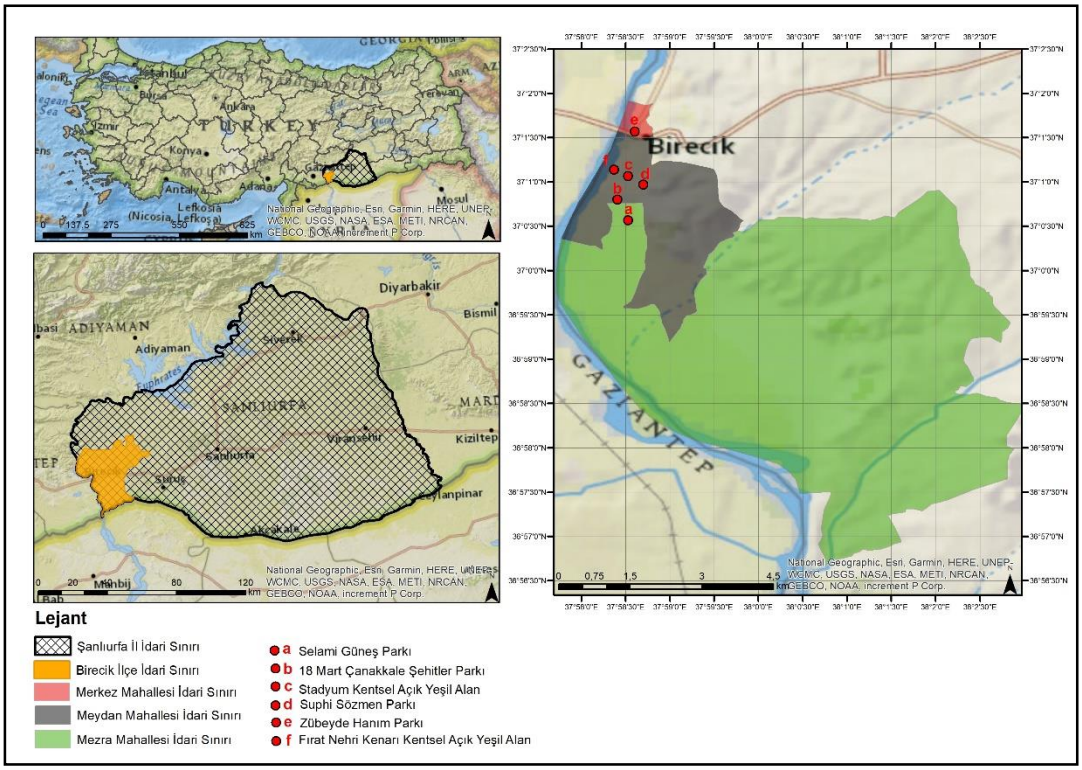
sahip diğer yarı kurak kentlerde uygulanabilir bitki seçimi stratejilerine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu araştırmanın materyalini, Şanlıurfa ili Birecik ilçesinde farklı büyüklük ve işlevlere sahip altı park ile kentsel açık yeşil alanlar oluşturmaktadır. Birecik ilçesi, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin batısında, Fırat Havzası içerisinde yer almakta olup 37° 01' – 37° 35' kuzey enlemleri ile 37° 55' – 38° 15' doğu boylamları arasında konumlanmaktadır (Şekil 1). İlçenin yüzölçümü yaklaşık 85.790 hektardır. Türkiye'nin en önemli akarsularından biri olan Fırat Nehri, Birecik sınırları içerisinden geçerek bölgenin ekolojik çeşitliliğini şekillendirmekte ve sosyo-ekonomik yapısını belirleyen temel doğal unsur niteliğini taşımaktadır.

Birecik, Köppen-Trewatha İklim Sınıflandırmasına (1991-2020 iklim periyodu değerlendirmesi) göre, Cs-Subtropikal kuru yaz iklimi, Akdeniz iklimi özellikleri taşımaktadır (MGM, 2025). Birecik'in doğal dinamiklerinde çeşitlilik, klimatolojik yapısının da değişkenlik göstermesinde etkili olmuştur. Karasal iklim kuşağında yer alan ilçenin belirli bölgelerinde Akdeniz iklimi özelliklerinin hakim olması; yazların uzun, sıcak ve kurak, kışların ise ılıman ve az yağışlı olmasına neden olmaktadır. İlçeyi çevreleyen dağların yüksek kesimleri ve gerisindeki alanlarda karasal iklim etkisi belirginleşmektedir. Yağış dağılımında mevsimsel farklılıklar söz konusu olup; yağış yoğunluğu Temmuz ayında neredeyse 0 mm ile en düşük, Ocak ayında ortalama 78 mm ile en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Meteorolojik veriler, Birecik'te yıllık ortalama sıcaklığın 18,6 °C, ortalama nispi nemin %54 ve yıllık toplam yağış miktarının yaklaşık 445 mm olduğunu göstermektedir; denizden uzaklık ve topoğrafik koşullar ilçede yazların kurak ve sıcak, kışların ise ılıman ve az nemli geçmesine yol açmaktadır (Akbaş, 2020; Korkut, 2022; Weather Spark, 2025).



Şekil 1. Çalışma alanın konumu

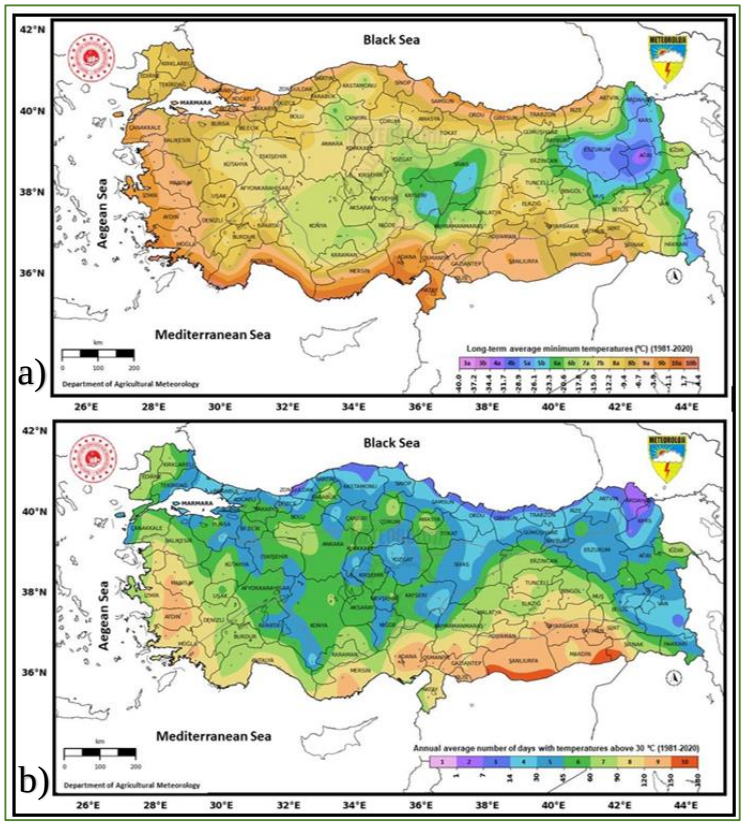
Çalışma alanları, kentsel doku içerisinde yoğun olarak kullanılan rekreasyonel nitelikli yeşil alanlardan seçilmiştir. Araştırmada kullanılan bitki listesi, söz konusu alanlarda gerçekleştirilen arazi gözlemleri ile mevcut bitki envanteri verilerine dayanmaktadır. Çalışma alanlarında yer alan tüm ağaç ve ağaççık taksonlar değerlendirmeye dâhil edilmiştir. İncelenen kentsel açık yeşil alanlar ve bu alanlarda tespit edilen takson sayılarına ilişkin bulgular Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Çalışma alanı olarak belirlenen kentsel açık yeşil alanlarda tespit edilen bitki takson sayıları

Sıra	Kentsel Açık Yeşil Alanlar	Büyüklük	Bitki Takson Sayıları
1.	(A) Selami Güneş Parkı	6,500 m^2	17
2.	(B) 18 Mart Çanakkale Şehitler Parkı	6,000 m^2	16
3.	(C) Stadyum Kentsel Açık Yeşil Alan	30,000 m^2	17
4.	(D) Suphi Sözmen Parkı	5,000 m^2	13
5.	(E) Zübeyde Hanım Parkı	2,500 m^2	10
6.	(F) Fırat Nehri Kenarı Kentsel Açık Yeşil Alan	80,000 m^2	24

Bitki taksonlarının hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr, sıcaklık, soğuk ve tuzluluğa karşı dayanıklılık düzeyleri, ulusal ve uluslararası literatürden yararlanılarak belirlenmiştir (Horaginamani ve ark.,2012; Chen ve ark.,2017; Ganesan ve Arul Pragasan, 2017; Zencirkıran ve Seyidoğlu Akdeniz, 2017; Bharti ve ark., 2018; Aslan ve Akan, 2019; Çorbacı ve Ekren, 2022; MGM, 2022; Kösa, 2023; Zencirkıran ve Sönmez, 2023; Ekren ve ark., 2024). Ayrıca, Zencirkıran ve Seyidoğlu Akdeniz (2017) tarafından önerilen sınıflandırma esas alınarak, taksonların çevresel stres faktörlerine (hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr ve tuzluluk) karşı dayanıklılıkları Toleranssız, Az Toleranslı, Orta Derecede Toleranslı ve Toleranslı olmak üzere dört düzeyde değerlendirilmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (MGM, 2022) hazırladığı haritalar doğrultusunda (Şekil, 2), Birecik ilçesi Bitki Dayanıklılık Haritası

kapsamında 9a–9b bölgesi sınırları içerisinde yer almakta olup, uzun dönem ortalama en düşük sıcaklık değerleri -6,7°C ile -3,9°C arasında değişmektedir. Bitki Isı Tolerans Haritası'na göre ise ilçe, 10. Bölge içerisinde bulunmakta ve yıllık ortalama 120–150 gün boyunca hava sıcaklıkları 30°C'nin üzerinde seyretmektedir.



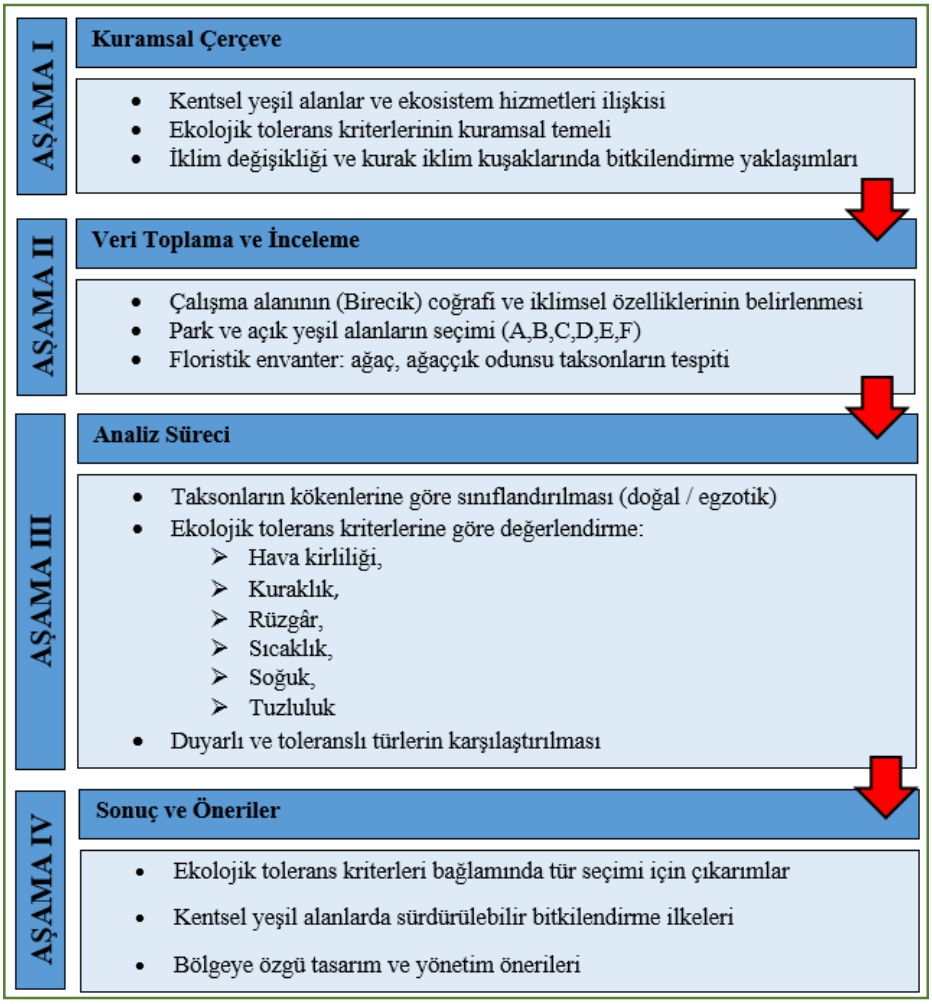
Şekil 2. Bitki dayanıklılık haritası (a), Bitki ısı tolerans haritası (b) (MGM, 2022)

2.2. Yöntem

Araştırma, Şanlıurfa ili Birecik ilçesinde yer alan altı park ve açık yeşil alanı (A, B, C, D, E, F) kapsamaktadır. Çalışmada parklarda bulunan ağaç ve ağaççık taksonlar belirlenmiş; bu taksonlar hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr, yüksek sıcaklık, düşük sıcaklık ve tuzluluk gibi ekolojik tolerans kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Veri toplama sürecinde alan gözlemleri yapılmış, elde edilen bulgular literatür verileri ile desteklenerek analiz edilmiştir. Bu yöntemsel yaklaşım, kentsel yeşil alanlarda kullanılan bitki türlerinin ekolojik uygunluğunu ortaya koymayı hedeflemiştir.

Çalışmanın araştırma ve değerlendirme sürecinin, sistematik ve bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesini sağlamak amacıyla dört temel aşama izlenmiştir. İlk aşamada kuramsal çerçeve oluşturulmuş, ikinci aşamada veri toplama ve inceleme faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Şanlıurfa ili Birecik ilçesinde yer alan altı park ve açık yeşil alan, 2025 yılının Ağustos ve Eylül aylarında olmak üzere 2 farklı mevsimsel dönemde ziyaret edilmiştir. Her parkta bulunan bitki türleri, sahada yapılan doğrudan gözlemlerle tespit edilmiş; türlerin kaydı listeleme tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Park alanlarının küçük ölçekte olması, türlerin tamamına erişimi kolaylaştırmış ve gözlem-listeleme yönteminin doğruluğunu artırmıştır. Üçüncü aşamada elde edilen veriler ekolojik tolerans kriterleri

doğrultusunda analiz edilerek duyarlı ve toleranslı türler karşılaştırılmıştır. Son aşamada ise bulgular ışığında sonuç ve öneriler geliştirilmiştir. Çalışmanın yöntemsel kurgusu ve aşamalar arasındaki ilişki Şekil 3'te özetlenmiştir.



Şekil 3. Yöntem akışı

3. Bulgular

Birecik (Şanlıurfa) ilçesinin kentsel açık ve yeşil alanlarında kullanılan bitki taksonları, ekolojik tolerans kriterleri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Yapılan saha çalışmaları ve literatür taramaları sonucunda 15 farklı familyaya ait toplam 24 bitki taksonu tespit edilmiş olup, bu taksonların hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr, sıcaklık, soğuk ve tuzluluk gibi abiyotik stres faktörlerine karşı gösterdikleri tolerans düzeyleri Tablo 2'de detaylı olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular, bölgenin iklim koşullarına uyum sağlayabilecek ve kentsel peyzajda sürdürülebilir şekilde kullanılabilecek bitki türlerinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Çalışmada türlerin ekolojik tolerans düzeyleri, literatürde yer alan eşik değerler ve sınıflandırma kriterleri esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda kuraklık, sıcaklık, don, rüzgâr ve kirlilik toleransı gibi parametreler Horaginamani vd., 2012; Chen vd., 2017; Ganesan ve Arul Pragasan, 2017; Zencirkıran ve Seyidoğlu Akdeniz, 2017; Bharti ve ark., 2018; Aslan ve Akan, 2019; Çorbacı ve Ekren, 2022; MGM, 2022; Kösa, 2023; Zencirkıran ve Sönmez, 2023; Ekren ve ark., 2024 tarafından belirtilen kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Şanlıurfa ili Birecik ilçesinde tespit edilen bitki taksonları ve ekolojik toleransları

Familya	İsim	E/N	Hava Kirliliği	Kuraklık	Rüzgâr	Sıcaklık	Soğuk	Tuzluluk	Harita Konum
Vitaceae	*Parthenocissus quinquefolia* L. (Amerikan Sarmaşığı)	E	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	Toleranslı	1-9	3a-11b	Toleranslı	A,B,C,F
Arecaceae	***Washingtonia filifera* H. Wendl. Palmiye)**	E	Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	**8-12**	8a-11b	Toleranslı	A,C,F
Lauraceae	*Laurus nobilis* L. (Defne)	N	Orta Derecede Toleranslı	Toleranslı	Az Toleranslı	1-11	8a-11b	Orta Derecede Toleranslı	A,C,D,E,F
Meliaceae	***Melia azedarach* L. (Tespih Ağacı)**	E	Az Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	**7-12**	7a-10b	Toleranslı	A,B,D,E,F
Salicaceae	***Salix alba* L. (Ak Söğüt)**	E	Toleranslı	**Toleranssız**	Toleranslı	1-9	5b-9b	Orta Derecede Toleranslı	A,D,E,F
	***Salix babylonica* L. (Salkım Söğüt)**	E	Toleranslı	**Toleranssız**	Toleranslı	1-9	5b-9b	Orta Derecede Toleranslı	A,B,C,D,F
	Populus alba L. (Ak Kavak)	N	Toleranslı	Az Toleranslı	Toleranslı	1-9	3a-9b	Toleranslı	B,D,F
Fabaceae	***Albizia julibrissin* Durazz. (Gülibrişim Akasya)**	E	Orta Derecede Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	**6-10**	7b-10b	Orta Derecede Toleranslı	A,B,C,F
	***Cercis siliquastrum* L. (Erguvan)**	N	Orta Derecede Toleranslı	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	**7-9**	6b-9b	Az Toleranslı	A,B,C,E,F
Elaeagnaceae	***Elaeagnus angustifolia* L. (İğde)**	E	Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	1-8	**4a-8b**	Toleranslı	B,C,F
Rosaceae	*Pyracantha coccinea* M.Roem. (Ateş Dikeni)	N	Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	3-9	5a-9b	Orta Derecede Toleranslı	E,F
	Prunus cerasifera Ehrh. 'Pissardii' (Süs Eriği)	E	Az Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	Az Toleranslı	1-8	5b-8b	Orta Derecede Toleranslı	A,F
	Amygdalus communis L. (Badem)	N	Orta Derecede Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	1-8	5a-9b	Orta Derecede Toleranslı	C,F
	Pyracantha coccinea M.Roem. (Ateş Dikeni)	N	Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	3-9	5a-9b	Orta Derecede Toleranslı	A,B,D,F
Punicaceae	*Punica granatum* L. (Nar)	N	Az Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	1-12	7b-11b	Toleranslı	A,B,C,F
Moraceae	*Morus alba* L. (Ak dut)	E	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	Az Toleranslı	1-8	5a-9b	Toleranslı	A,B,C,D,E,F
	Ficus carica L. (İncir)	N	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	3-8	8a-10b	Toleranslı	C,D,F

Tablo 2. Şanlıurfa ili Birecik ilçesinde tespit edilen bitki taksonları ve ekolojik toleransları *(devamı)*

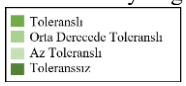
Apocynaceae	*Nerium oleander* L. (Zakkum)	N	Orta Derecede Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	1-12	8a-11b	Toleranslı	A,B,C,D,E,F
Myrtaceae	***Callistemon linearis* Sweet (Fırça Çalısı)**	E	Az Toleranslı	Az Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	**8-12**	9a-11b	Orta Derecede Toleranslı	A,B,C,D,E,F
Cupressaceae	*Cupressus sempervirens* L. 'Horizontalis' (Adi Servi)	N	Toleranslı	Toleranslı	Toleranslı	3-9	8a-10b	Orta Derecede Toleranslı	B,C,D,F
	***Juniperus communis* L. (Adi Ardıç)**	N	Toleranslı	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	1-6	**3a-8b**	Toleranslı	A,B,C,D,E,F
Pinaceae	***Pinus brutia* Ten. (Kızılçam)**	N	Toleranslı	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	1-9	7a-9b	**Toleranssız**	A,B,C,D,E,F
	***Cedrus deodara* (Roxb. ex D.Don) G.Don (Himalaya Sediri)**	E	**Toleranssız**	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	**7-9**	7a-11b	Az Toleranslı	A,F
Bıgnonıaceae	*Campsis radicans* (L.) Seem. (Acem Borusu)	E	Toleranslı	Toleranslı	Orta Derecede Toleranslı	3-9	5a-9b	Orta Derecede Toleranslı	B,C,F

Not: E: Egzotik, N: Doğal

*****Tablodaki ekolojik tolerans kritler bilgileri bu kaynaklardan derlenmiştir. Horaginamani vd., 2012; Chen vd., 2017; Ganesan ve Arul Pragasan, 2017; Zencirkıran ve Seyidoğlu Akdeniz, 2017; Bharti vd., 2018; Aslan ve Akan, 2019; Çorbacı ve Ekren, 2022; MGM, 2022; Kösa, 2023; Zencirkıran ve Sönmez, 2023; Ekren ve ark.,2024

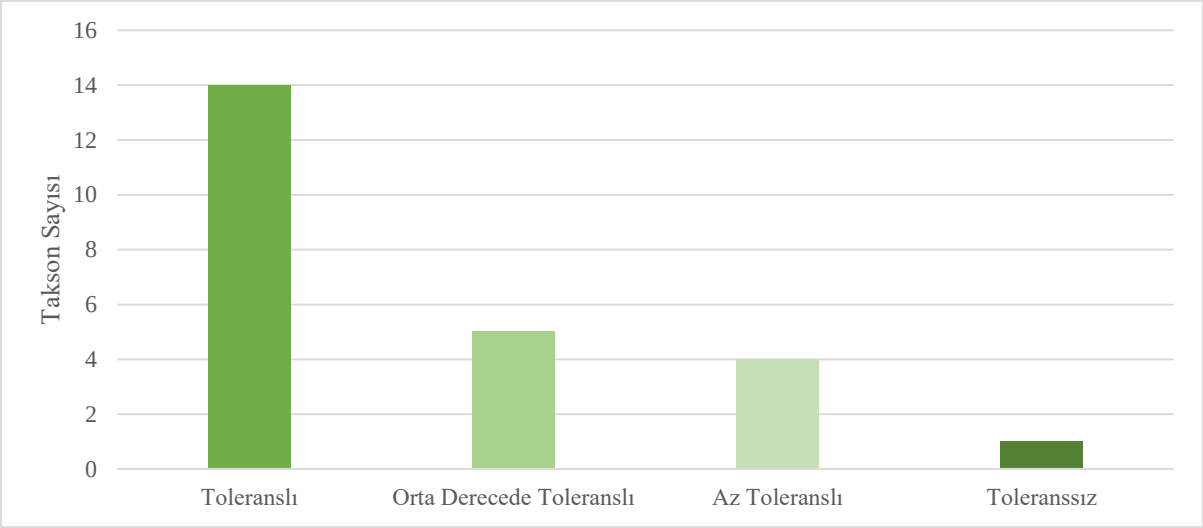
******Tabloda kalın (bold) olarak belirtilen türler, en az bir faktöre karşı toleranssız oldukları belirlenen veya bu yönde tespit edilen türleri göstermektedir.

Tolerans düzeyini gösteren renk skalası;



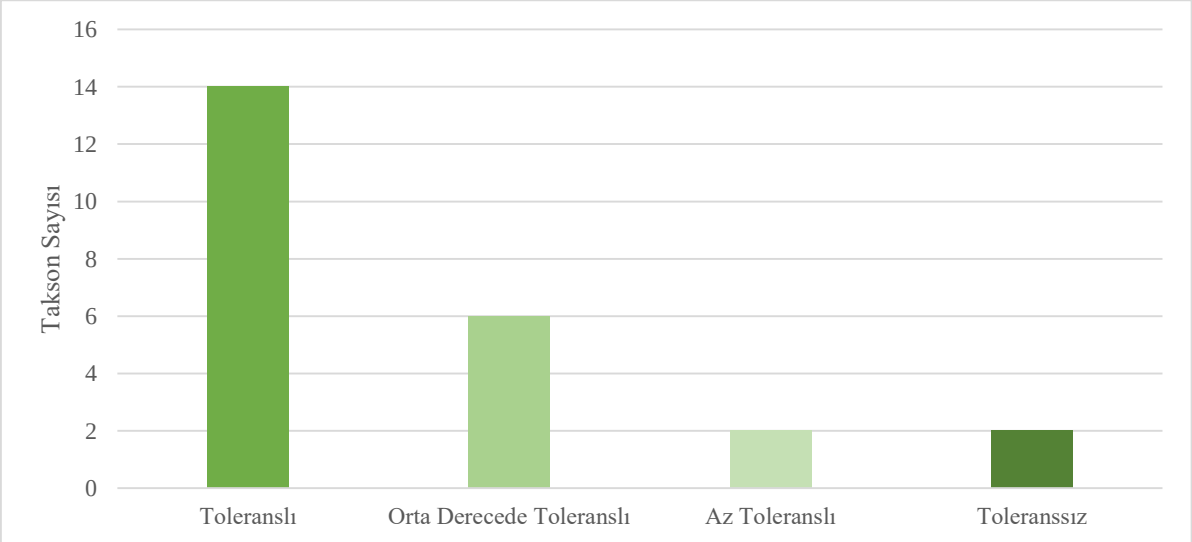
Çalışma alanlarında (A, B, C, D, E, F) gerçekleştirilen taksonomik envanter sonucunda, toplam 24 odunsu bitki taksonu tanımlanmıştır. Bu taksonların dağılımı incelendiğinde, 12'sinin doğal (N) ve 12'sinin egzotik (E) kökenli olduğu belirlenmiştir. Alan genelinde en yaygın temsil edilen familyalar Rosaceae (4 tür) ve Salicaceae (3 tür) olarak öne çıkmaktadır. Alanların biyolojik çeşitliliği incelendiğinde, F alanı (24 takson) en yüksek çeşitliliğe sahipken, A ve C alanları (her biri 17 takson) onu takip etmekte, E alanı (10 takson) ise nispeten daha az tür barındırmaktadır. Ekolojik tolerans kriterleri bağlamında, alanların büyük çoğunluğu, *Washingtonia filifera* H. Wendl, *Nerium oleander* ve *Morus alba* gibi türlerin yüksek temsil oranları sayesinde Hava Kirliliği, Kuraklık, Rüzgâr ve Tuzluluk gibi kentsel stres faktörlerine karşı genel olarak Toleranslı veya Orta Derecede Toleranslı bir adaptasyon kapasitesi sergilemektedir. Ancak, elde edilen veriler, tüm çalışma alanları için ortak ve en kritik ekolojik zayıflığın, *Salix alba* L. (Ak Söğüt) ve *Salix babylonica* L. (Salkım Söğüt) taksonlarının kuraklığa karşı Toleranssız olmasıyla ortaya çıktığını göstermektedir. Bu hassasiyet, özellikle kurak dönemlerde bu türlerin bulunduğu parklar için su yönetimi stratejilerinin revize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca, A,B,C,D,E,F alanlarındaki *Pinus brutia* Ten. (Kızılçam) türünün tuzluluğa karşı Toleranssız yapısı ve A ile F alanlarında yer alan *Cedrus deodara* (Roxb. ex D.Don) G.Don (Himalaya Sediri) taksonunun hava kirliliğine yönelik Toleranssız oluşu, ilgili alanlar için mikroklimatik ve toprak koşullarının hassasiyetle izlenmesi gerektiğini işaret etmektedir. Ek olarak, *Laurus nobilis* L. (Defne) rüzgâra ve *Cercis siliquastrum* L. (Erguvan tuzluluğa karşı Az Toleranslı olup, bu türlerin bulunduğu B, C, D ve E alanlarında özel bir koruma ve yönetim yaklaşımı gerekmektedir. Bu bulgular, kentsel peyzaj planlaması ve sürdürülebilir park yönetimi için tür seçimi ve çevresel stres faktörlerinin hafifletilmesi açısından bilimsel bir temel sağlamaktadır.

Birecik ilçesindeki açık ve yeşil alanlarda kullanılan odunsu bitkilerin önemli bir bölümünün hava kirliliğine karşı yüksek tolerans gösterdiği dikkat çekmektedir. Özellikle Cupressaceae ve Pinaceae familyalarına ait türler bu dayanıklılık özellikleriyle öne çıkmaktadır. Buna karşın, *Prunus cerasifera* Ehrh. 'Pissardii' (Süs Eriği) ve *Callistemon linearis* Sweet (Fırça Çalısı) gibi bazı egzotik türlerin hava kirliliğine karşı daha düşük tolerans sergilemesi dikkat çekici bir bulgudur. Bu durum, kentsel ekosistemlerde bitki türü seçiminde dikkate alınması gereken temel kriterlerden biri olarak değerlendirilmelidir. Hava kirliliğine toleranslı türlerin tercih edilmesi, yalnızca ekolojik ve yapısal sürdürülebilirliği güçlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda peyzaj estetiğine de katkı sağlamaktadır. Özellikle trafik yoğunluğu yüksek ulaşım aksları ve endüstriyel faaliyetlerin baskın olduğu bölgelerde, toleransı yüksek taksonların örneğin *Cupressus sempervirens* L. 'Horizontalis' (Adi Servi), *Populus alba* L. (Ak Kavak), *Nerium oleander* L. (Zakkum) kullanımı, yeşil alanların sürdürülebilirliğini sağlamada önemli avantajlar sunmaktadır. Buna karşılık, toleransı düşük türlerin ise hava kirliliği etkilerinin sınırlı olduğu bölgelerde veya süsleme amaçlı kontrollü alanlarda değerlendirilmesi daha uygun bir yaklaşım olacaktır (Şekil 4).



Şekil 4. Tespit edilen odunsu bitki taksonların hava kirliliğine karşı dayanıklılığı

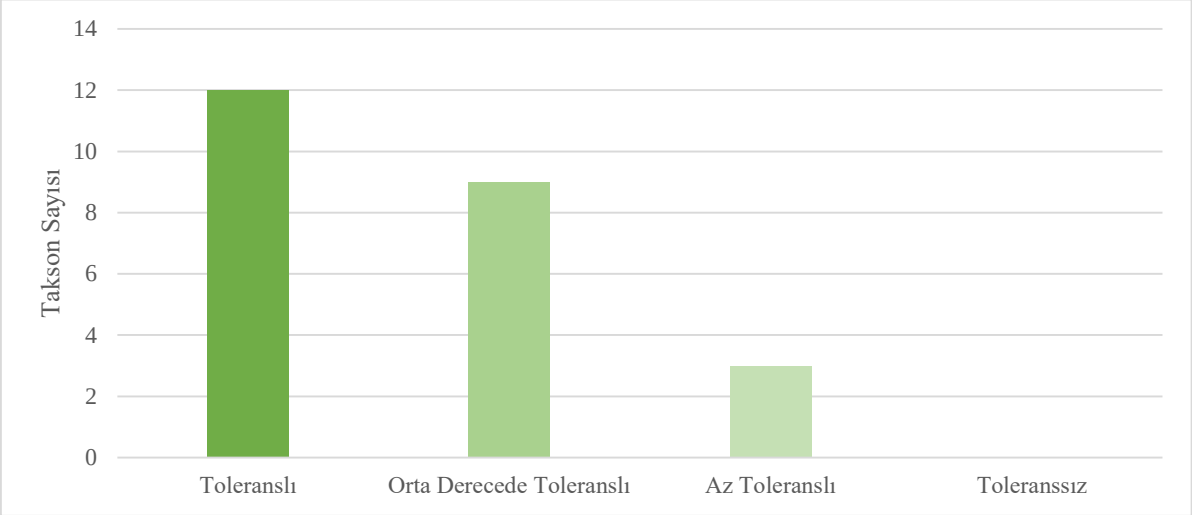
Şekil 5'te görüldüğü üzere, çalışma alanlarında tespit edilen odunsu taksonların büyük bir kısmı kuraklığa karşı toleranslılık göstermektedir. Özellikle *Elaeagnus angustifolia* L. (İğde), *Nerium oleander* L. (Zakkum), *Washingtonia filifera* H.Wendl. (Palmiye) ve Cupressaceae familyasına ait türlerin yüksek uyum düzeyine sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, *Salix alba* L. (Ak Söğüt) ve *Salix babylonica* L. (Salkım Söğüt) gibi doğal taksonların kuraklığa toleranssız olduğu; *Prunus cerasifera* 'Pissardii' (Süs eriği) türünün ise yalnızca orta düzeyde tolerans sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 5. Tespit edilen odunsu bitki taksonların kuraklığa karşı dayanıklılığı

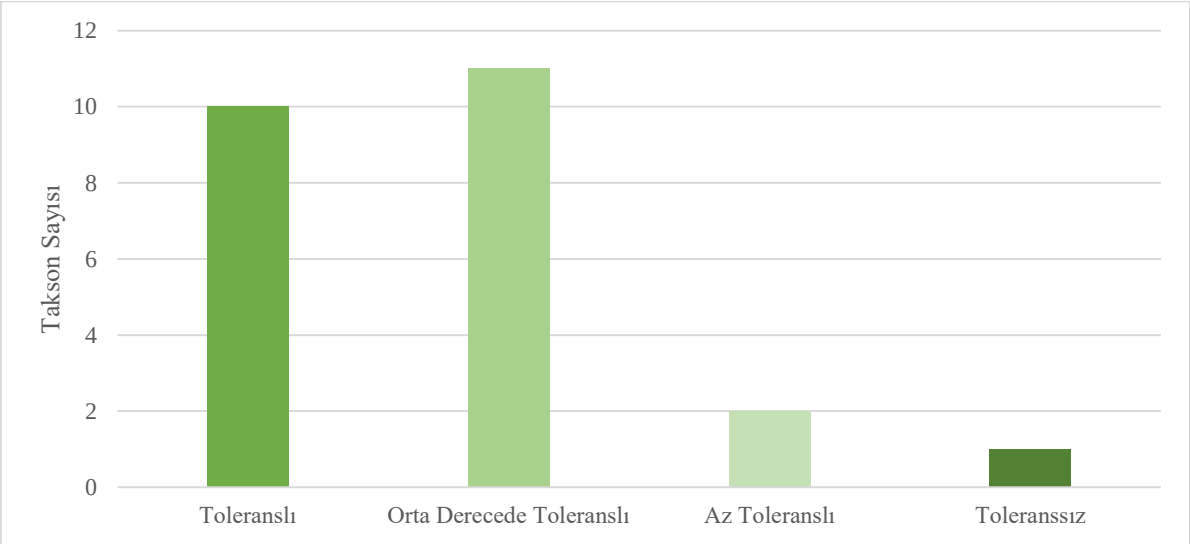
Rüzgâr toleransı açısından değerlendirildiğinde, Birecik ilçesinde kullanılan odunsu taksonların büyük bölümünün rüzgâra karşı dayanıklı olduğu belirlenmiştir (Şekil 6). Özellikle *Populus alba* L. (Ak kavak), *Elaeagnus angustifolia* L. (İğde), *Nerium oleander* L. (Zakkum) ve *Cupressus sempervirens* L. 'Horizontalis' (Adi Servi) türleri yüksek tolerans göstermektedir. Buna karşılık, *Laurus nobilis* L.

(Defne) ve *Callistemon linearis* Sweet (Fırça Çalısı) gibi bazı taksonların ise orta veya düşük düzeyde rüzgâr dayanıklılığına sahip olduğu tespit edilmiştir.



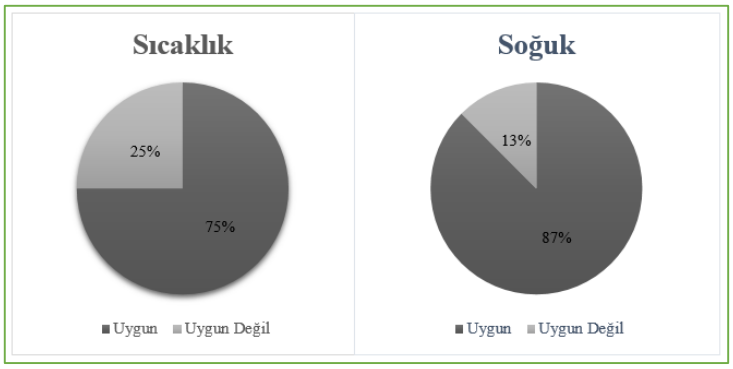
Şekil 6. Tespit edilen odunsu bitki taksonların rüzgâra karşı dayanıklılığı

Tuzluluk kriteri açısından değerlendirildiğinde, Birecik ilçesinde kullanılan odunsu bitki taksonlarının önemli bir bölümünün tuzluluğa karşı toleranslı olduğu gözlenmiştir (Şekil 7). Özellikle *Parthenocissus quinquefolia* L. (Amerikan sarmaşığı), *Elaeagnus angustifolia* L. (İğde), *Nerium oleander* L. (Zakkum), *Morus alba* L. (Ak dut) ve *Ficus carica* L. (İncir) türlerinin yüksek düzeyde dayanıklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Buna karşın, *Pyracantha coccinea* M.Roem. (Ateş Dikeni), *Prunus cerasifera* 'Pissardii' (Süs eriği), *Amygdalus communis* L. (Badem) ve *Callistemon linearis* Sweet (Fırça Çalısı) gibi bazı türlerin yalnızca orta düzeyde tolerans sergilediği, *Pinus brutia* var. (Kızılçam) gibi doğal türlerin ise tuzluluğa karşı toleransa sahip olmadığı görülmüştür.



Şekil 7. Tespit edilen odunsu bitki taksonların tuzluluğa karşı dayanıklılığı

Birecik ilçesinde kullanılan odunsu taksonların büyük bir kısmının yüksek sıcaklıklara toleranslı olduğu belirlenmiştir. Özellikle *Washingtonia filifera* H.Wendl. (Palmiye), *Nerium oleander* L. (Zakkum), *Elaeagnus angustifolia* L. (İğde) ve *Cupressus sempervirens* 'Horizontalis' (Adi servi) türleri yüksek sıcaklıklara dayanıklılık göstermektedir. Buna karşılık, *Albizia julibrissin* (Gülibrişim akasya) ve *Pinus brutia* var. (Kızılçam) türlerinin yalnızca orta düzeyde toleranslı olduğu, *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don (Himalaya Sediri) gibi egzotik türlerin ise sınırlı sıcaklık toleransına sahip olduğu saptanmıştır. Buna karşın, odunsu taksonların soğuk toleransı açısından belirgin farklılıklar görülmüştür. *Populus alba* L. (Ak kavak), *Salix alba* L. (Ak söğüt), *Salix babylonica* L. (Salkım söğüt) ve *Juniperus communis* L. (Adi ardıç) gibi türlerin yüksek düzeyde soğuk toleransı gösterdiği tespit edilmiştir. Buna karşın, *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don (Himalaya Sediri) ve *Cercis siliquastrum* L. (Erguvan) türleri orta düzeyde, *Callistemon linearis* Sweet (Fırça Çalısı) gibi egzotik taksonlar ise düşük soğuk toleransı sergilemektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Tespit edilen odunsu bitki taksonların sıcaklık ve soğukluğa karşı dayanıklılığı

4. Tartışma

Günümüzde çevresel duyarlılığın artmasıyla birlikte, park, bahçe ve mesire yerleri gibi kentsel yeşil alanların ekolojik ve sosyal işlevleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Şanlıurfa ilinin Birecik ilçesi, Fırat Nehri kıyısında konumlanması ve Karkamış Barajı'nın tamamlanmasının ardından kıyı boyunca yapılacak çevre düzenlemeleri sayesinde potansiyel olarak zengin bir peyzaj çeşitliliğine sahiptir. Buna karşın, mevcut bulgular ilçedeki kentsel parkların ve yeşil alanların bitki türü çeşitliliği açısından beklenen düzeyde zengin olmadığını göstermektedir. Fırat kıyısında kurulmuş bu yerleşimde, ekolojik ve estetik açıdan çok daha fazla sayıda taksonun kullanılma potansiyeli bulunmasına rağmen, alanlarda sınırlı sayıda türün tercih edilmesi, kentsel peyzajın genel çeşitliliğini ve çevresel direnç kapasitesini düşürmektedir. Literatür, kent parklarında odunsu bitki seçimine yönelik çalışmalarla (Zencirkıran ve Akdeniz, 2017; Güzel ve Ulus, 2021; Kösa, 2023) genellikle kuraklık, rüzgâr ve kirlilik gibi stres faktörlerine yüksek tolerans gösteren türlerin önemini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, Birecik'teki sınırlı tür kullanımı, kent peyzajının yalnızca estetik çeşitliliğini değil, aynı zamanda küresel iklim değişikliği ve şehirleşmenin yarattığı çevresel baskılara (Ateş ve Demiroğlu, 2024; Gür ve Kahraman, 2024) karşı direncini de zayıflatmaktadır. Fırat kıyısı gibi ekolojik potansiyeli yüksek bir

alanda, bölgenin ekolojisine uygun yerli (Ekren ve ark., 2024) ve çeşitli taksonların daha aktif kullanımı, kentsel peyzajın sürdürülebilirliğini ve dayanıklılık kapasitesini önemli ölçüde güçlendirecektir. Bu durum, gelecekteki peyzaj planlama ve tasarım süreçlerinde bitki seçimine yönelik ekolojik temelli, çeşitliliği artırıcı stratejilerin zorunlu olarak benimsenmesi gerektiğini işaret etmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Şanlıurfa ili Birecik ilçesi idari sınırı içinde üç farklı mahallede konumlanan, altı park ve açık yeşil alanda (A, B, C, D, E, F) bulunan ağaç ve ağaççık taksonlar; hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr, sıcaklık, düşük sıcaklık ve tuzluluk gibi ekolojik tolerans kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın kavramsal çerçevede tasarlanması; kentsel açık yeşil alanların iklim değişikliği ile mücadele çalışmalarında etkin bir role sahip olmasına dayanmaktadır. Çalışma kapsamında detaylandırıldığı üzere kuraklık günümüzde çok ciddi bir sorun olarak, etkisini mekânsal boyutu olan tüm sektörlerde somut olarak göstermektedir. Bu doğrultuda, kentsel ekosistemlerin üzerindeki iklim değişikliğine bağlı gelişen kültürel baskıların etkisi de gün geçtikçe artmaktadır. Bu sorunsala yönelik etkin bir araç olarak, ağaçlandırma çalışmaları ve bitkisel tasarım süreçlerinde izlenen metodolojinin iklim değişikliği ile mücadele önceliği ile kurgulanması temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Her çalışma özelinde belirlenen amaç doğrultusunda, uygun alanda-uygun bitki seçimi ile yürütülen aşamalar, ekolojik planlama boyutuna sahip bir kamu hizmeti niteliği taşımaktadır.

Kentsel açık yeşil alanlardaki bitkilendirme süreçlerinde doğal yurtlu olmayan bitki seçimleri, mevcut sorunları şiddetlendirmede doğrudan etkilidir. Bu nedenle, özellikle kurak iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerde, ağaçlandırma çalışmaları ve/veya bitkisel tasarım süreçlerinde ekolojik toleransı yüksek türlerin kullanımı iklim değişikliği ile mücadele süreçlerinde kritik bir gerekliliktir.

Bu çalışma kapsamında incelenen 24 taksonun ekolojik toleransları hava kirliliği, kuraklık, rüzgâr, sıcaklık, soğuk ve tuzluluk gibi temel çevresel faktörler açısından değerlendirilmiştir. Bulgular, 11 taksonun (3 doğal, 8 egzotik) bu faktörlerden en az birine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Söz konusu taksonlar arasında *Washingtonia filifera* H.Wendl. (Palmiye), *Melia azedarach* L. (Tespih Ağacı), *Salix alba* L. (Ak Söğüt), *Salix babylonica* L. (Salkım Söğüt), *Albizia julibrissin* Durazz. (Gülibrişim Akasya), *Cercis siliquastrum* L. (Erguvan), *Elaeagnus angustifolia* L. (İğde), *Callistemon linearis* Sweet (Fırça Çalısı), *Juniperus communis* L. (Adi Ardıç), *Pinus brutia* Ten. (Kızılçam) ve *Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don (Himalaya Sediri) yer almakta olup, bu türlerin bölge koşullarında kullanımı dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir. Buna karşılık, kalan 13 taksonun (9 doğal, 4 egzotik) incelenen tüm faktörler karşısında yüksek tolerans gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, doğru tür seçiminin ekosistem hizmetlerinin sürekliliği, düşük bakım maliyeti ve yeşil altyapının uzun vadeli dayanıklılığı açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen bulgular ifade etmektedir ki; Birecik koşullarında (ve yarı kurak iklim kuşağında yer alan kentlerde) salt estetik önceliklerin esas alındığı bitki seçimlerine dayalı bitkilendirme çalışmaları önemli sürdürülebilirlik önceliğine sahip değildir. Söğüt ve Yalçınkaya (2022)'nın da belirttiği üzere, yabancı

yurtlu bitkiler, yetiştiricilik ya da tasarım çalışmaları kapsamında, ülkemiz koşullarına uyum sağlayabilmek adına yüksek düzeyde bakım faaliyetleri gerektirmektedir. Bu bitkilerin gelişim desteği, genellikle yüksek düzeyde su ve bitki besin elementi ile sağlanabilir. Bununla birlikte çoğunlukla tropik ve subtropik familya üyesi olan bu türler, sıcaklık ve nem koşullarının da dikkatle takibinin yapılması ile yaşamını sürdürülebilir.

Çalışmanın sonucunda, çalışma alanından elde edilen bulgular doğrultusunda Birecik örneğinde kentsel peyzaj planlamasına yönelik çıkarımlar aşağıda sunulmuştur:

(i) Birecik'in ekolojik koşulları dikkate alındığında, ilçenin yüksek ekolojik değere sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, ilçe idari sınırları içerisinde yer alan park ve açık-yeşil alanların sayıca ve hacimce artırılması gerekmektedir.

(ii) Mevcut park ve açık-yeşil alanlarda bulunan bitki taksonu sayısı, ilçenin coğrafi özelliklerinin elverişliliği ve ekolojik temelli potansiyeli göz önünde bulundurulduğunda yetersizdir. Ağaçlandırma ve bitkisel tasarım ilkeleri doğrultusunda nitelikli bir planlama süreci yürütülerek mevcut durumun nicelik ve nitelik bakımından geliştirilmesi gerekmektedir.

(iii) Doğal yurtlu bitki türlerinin tercih edilmesi ve ekolojik faktörlere yüksek tolerans gösteren türlerle yapılacak bitkilendirme çalışmaları, bakım maliyetlerinin azaltılması açısından fayda-maliyet dengesini olumlu yönde etkileyecektir. Kentteki ekosistem hizmetleri potansiyelinden yararlanılması, bu kapsamda oluşan ekonomik giderlerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Estetik ve ekolojik kriterlerin bütüncül bir yaklaşımla birlikte ele alınması, kentsel alanlardaki rekreasyonel mekânların uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, iklim değişikliğinin küresel ölçekte tüm arazi kullanım türlerini etkilediği bugünün koşulları düşünüldüğünde, ilerleyen dönemlerde yürütülecek peyzaj planlama ve tasarım çalışmalarında türlerin yalnızca estetik değerlerinin değil, aynı zamanda ekolojik toleranslarının da gözetilmesi, karar vericiler ve uygulayıcılar açısından daha bütüncül ve yönlendirici bir çerçeve sunacaktır. Bu yaklaşımın benimsenmesiyle birlikte, dirençli ve sürdürülebilir peyzaj tasarım projelerinin üretildiği ve uygulandığı kentlerin sayısının artacağı öngörülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, iklim değişikliğine uyumlu tür seçimi, kentsel yeşil alanların ekosistem hizmetlerinin nicel olarak ölçülmesi ve yeşil altyapı yaklaşımının mekânsal analizlerle desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca kullanıcı memnuniyeti, bakım maliyeti–ekolojik fayda ilişkisi ve CBS tabanlı izleme sistemleri üzerinden yapılacak araştırmalar, kentsel peyzaj planlamasının uygulamaya dönük niteliğini güçlendirecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye benzer oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Akbaş S. Mikro kültür destinasyonlarında pazarlama sorunları ve çözüm önerileri: Birecik örneği. Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane. 2020.

Ali S., Niaz H., Ahmad S., Khan S. Investigating how rapid urbanization contributes to climate change and the social challenges cities face in mitigating its effects. Review of Applied Management and Social Sciences 2025; 8(1): 1-16.

Aslan M., Akan HA. study of natural woody plants of forest in Şanlıurfa–determination of detection and landscape values of parks and garden plants. Biological Diversity and Conservation 2019; 12(1): 50-65. https://doi.org/10.5505/biodicon.2019.43433.

Ateş Ü., Demiroğlu D. Evaluation of plant use with high ecological tolerance for climate change resistant landscape in Kilis Sample Parks. Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi 2024; 9(1): 568–584. https://doi.org/10.30785/mbud.1463782.

Bharti SK., Trivedi A., Kumar N. Air pollution tolerance index of plants growing near an industrial site. Urban Climate 2018; 1(24): 820-829.

Bita CR., Gerats T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fun damentals and production of heat stress-tolerant crops. Front Plant Sci 2013; 1(4): 273.

Chen L., Sun Y., Niu G., Liu Q., Altland J. Relative salt tolerance of eight Japanese barberry cultivars. HortScience 2017; 52(12): 1810-1815.

Çetinkaya G., Uzun O. Landscape planning. İstanbul: Birsen Publishing 2014.

Çorbacı ÖL., Ekren E. Evaluation of urban open green areas in terms of xeriscape: The case of Ankara Altınpark. Journal of Landscape Researches and Practices 2022; 1(2022): 1-11.

Doğan TG., Eroğlu E. Ruderal bitki türlerinin kentsel bitkisel tasarımda kullanım potansiyeli. Bahçe 2025; 54(Özel Sayı 1): 520-530.

EEA (European Environment Agency). Drought impact on ecosystems in Europe. Erişim adresi:https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/drought-impact-on-ecosystems-in-europe. 2024. Erişim tarihi: 07.11.2025

Ege SC., Özgen N. Çevre kalkınma ve sürdürülebilirlik. Cumhuriyetin 100. Yılında Çevre ve Toplum Endişe De Var, Umut Da 2024; 111.

Ekren E., Corbaci OL., Kordon S. Evaluation of plants based on ecologicaltolerance criteria: A case study of urban open green spaces in Rize. Turkiye, Turkish Journal of Forest Science 2024; 8(2): 108-132.

Food and Agriculture Organization (FAO). Water for sustainable food and agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany, 2017.

Ganesan N., Arul Pragasan, L. Assessment of air pollution tolerance levels of selected plants at Tamaka industrial site of Kolar, Karnataka, India. Indian Journal of Scientific Research 2017; 17(1): 25-29.

Gür N., Kahraman Ö. Evaluation of woody plant species in recreation areas in industrial cities within the scope of ecological tolerance criteria: the case of Aliağa (İzmir) the case of Aliağa (İzmir). Uluslararası Peyzaj Mimarlığı Araştırmaları Dergisi (IJLAR) 2024; 8(1): 34–46.

Güzel M., Ulus A. Ordu kent merkezi kamusal yeşil alanlarındaki odunsu bitkilerin su tüketimlerine ve ekolojik tolerans kriterlerine göre değerlendirilmesi. Akademik Ziraat Dergisi 2021; 10(1): 165–174. https://doi.org/10.29278/azd.786225.

Hardy C., de Rivera C., Bliss-Ketchum L., Butler EP., Dissanayake S., Horn DA., Karps JM. Ecosystem connectivity for livable cities: a connectivity benefits Framework for Urban Planning. Ecology and Society; 2022.

Hirsch M., Böddeker H., Albrecht A., Saha S. Drought tolerance differs between urban tree species but is not affected by the intensity of traffic pollution. Trees 2023; 37:111–131. https://doi.org/10.1007/s00468-022-02294-0.

Horaginamani SM., Ravichandran M., Kamdod ASM. Air pollution tolerance of selected plant species considered for urban green belt development in Tiruchy. World Journal of Environmental Bioscience 2012; 1(1): 51-54.

İklim Değişikliği Başkanlığı. İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030). 2024. Erişimadresi:https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fine%20Uyum%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan_%202024-2030.pdf. Erişim tarihi: 07.11.2025

Jin C., Hu S., Huang L., Huang J., Jim CY., Qian S., Pang M., Lin D., Zhao L., Hu Y., Song K., Chen S., Liu J., Ignatieva M., Yang Y. Landscape plants in major Chinese cities: Diverse origins and climatic congruence vis-à-vis climate change resilience. Urban Forestry and Urban Greening 2021; 1(64); 127292. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127292.

Karadaş G. Ekosistem hizmetlerinin korunan alanların sürdürülebilir yönetimindeki rolü: Belemedik Tabiat Parkı örneği. Mekânsal Araştırmalar Dergisi 2025; 3(1): 35-48. https://doi.org/10.71298/maddergi.1670016.

Kösa S. Antalya Bazı kent parklarındaki odunsu bitki taksonlarının ekolojik tolerans kriterleri açısından değerlendirilmesi. Bartın Orman Fakültesi Dergisi 2023; 25(1): 119–136. https://doi.org/10.24011/barofd.1177812.

Korkut M. Kentsel Açık Yeşil Alanların Kadınlar Tarafından Kullanımı Üzerine Bir Değerlendirme: Şanlıurfa, Birecik Örneği. Kapadokya Üniversitesi Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir. 2022.

Kordon S., Miller P. People's reasons not to participate in community gardens in disadvantaged neighborhoods of Roanoke, Virginia. ArtGRID-Journal of Architecture Engineering and Fine Arts 2023; 5(2): 110-125.

Kordon S., Miller PA., Bohannon, CL. Attitudes and perceptions of community gardens: Making a place for them in our neighborhoods. Land 2022; 11(10): 1762.

Liu S., Xie, Y., Lu, Y. Impact of urban expansion on the temporal adaptation and spatial connectivity of ecological security patterns: insights from a rapidly urbanizing metropolitan area. Ecol Process 2025; 14(84). https://doi.org/10.1186/s13717-025-00651-8.

Maity R., Suman M., Verma NK. Drought prediction using a wavelet based approach to model the temporal consequences of different types of droughts. Journal of Hydrology 2016; 539: 417-428.

Manoli G., Fatichi S., Schläpfer M., Kailiang Y., Crowther TW., Meili N., Burlando P., Katul GG., Bou-Zeid E. Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. Nature 2019; 573(7772): 55-60. https://www.nature.com/articles/s41586-019-1512-9.pdf.

MGM. Meteorological general directorate plant cold and heat tolerance maps. https://www.mgm.gov.tr/tarim/bitki-soguga-ve-sicaga-dayaniklilik.aspx?g=h Accessed: 18.08.2025.

MGM. İklim Sınıflandırması Şanlıurfa – Birecik. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=BIRECIK. Erişim tarihi: 07.11.2025

Meerow S., Stults M. Comparing conceptualizations of urban climate resilience in theory and practice. Sustainability 2016; 8(7): 701. https://doi.org/10.3390/su8070701.

Mills-Novoa, M., Mikulewicz M. The promise of resistance: A new lens for climate change adaptation research and practice. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 2025; 16(1): e922.

Özdemir DDZ., Özekicioğlu AGH. Kentleşme ve çevre sorunları. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2006; 11(1): 17-30.

Park DJ., Yong SH., Kim DH., Park KB., Cha SA., Lee JH., Kim SA., Choi MS. Assessment of drought–heat dualstress tolerance in woody plants and selection of stress-tolerant species. Life 2025; 15: 1207. https://doi.org/10.3390/life15081207.

Partigöç NS., Soğancı S. Küresel iklim değişikliğinin kaçınılmaz sonucu: Kuraklık. Resilience 2019. 3(2): 287-299.

Pandey B., Ghosh A. Urban ecosystem services and climate change: a dynamic interplay. Frontiers in Sustainable Cities 2023; 5:1281430. https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1281430.

Raza A., Ashraf F., Zou X., Zhang X., Tosif H. Plant adaptation and tolerance to environmental stresses: mechanisms and perspectives. In Plant Ecophysiology and Adaptation under Climate Change: Mechanisms and Perspectives; Hasanuzzaman, M., Ed.;Springer: Singapore 2020; pp. 117–145.

Say NP., Yalçınkaya NM. Evaluation of the rural tourism policies for sustainable rural development in Turkey. Global Review of Research in Tourism, Hospitality and Leisure Management (GRRTHLM). An Online International Research Journal 2018; 4(1).

Söğüt Z., Yalçınkaya NM. Ağaçlandırma dersi basılmamış ders notları. Çukurova Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü 2022. Adana.

Tarım ve Orman Bakanlığı. Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2023-2027), Tarım Reformu Genel Müdürlüğü 2022. Ankara.

TMMOB. "Kurakçıl peyzaj uygulamalarına ilişkin usul ve esaslar" Kararnamesi. https://www.peyzajmimoda.org.tr/icerik/202510181430. 2025. Erişim tarihi: 07.11.2025.

Tokgöz G., Say N., Yalçınkaya NM. Examination of the rural tourism oppourtunities in Adana-Karaisali. VII. National III. International East Mediterranean Tourism Symposium, Proceeding Book 2018; İskenderun.

Weather Spark. Birecik bölgesinde yıl boyu iklim ve hava durumu Türkiye. https://tr.weatherspark.com/y/100235/Birecik-T%C3%BCrkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Y%C4%B1l-Boyunca. Erişim tarihi: 08.11.2025

Yalçınkaya NM., Arca D., Keskin Citiroglu H. Producing alternative tourism routes using network analysis to promote Seferihisar cittaslow concept. Information Technology & Tourism 2025; 1-33.

Yalçınkaya NM., Çakar MM., Say N. Erozyon ile mücadele kapsamında ağaçlandırma projelerinin etkinliği: Atatürk Barajı Örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(1): 282-300.

Zencirkıran M. Determination of native woody landscape plants in Bursa and Uludağ. African Journal of Biotechnology 2009; 8(21): 5737-5746.

Zencirkıran M., Akdeniz NS. Bursa Kent Parkları odunsu bitki taksonlarının ekolojik tolerans kriterleri açısından değerlendirilmesi. DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals) 2017. https://doi.org/10.24011/barofd.321174.

Zencirkıran M., Sönmez AC. Evaluation of tolerance status of woody landscape plants against stress factors: The case of Ankara Altınpark. Duzce University Journal of Forestry 2023; 19(1): 116-137.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1683-1695, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1683-1695, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Simplektik Uzayda Equiform Diferensiyel Geometri Üzerine Fermi-walker Türev İle Özel Helisler

Esra ÇİÇEK ÇETİN[1*] Muhlis ÇETİN[2]

[1]Muş Alparslan Üniversitesi Varto GB MYO, Muş
[2]Munzur Üniversitesi Tunceli MYO, Tunceli

[1]https://orcid.org/0000-0001-8213-0156
[2]https://orcid.org/0000-0002-7413-0495
*Sorumlu yazar: e.cetin@alparslan.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 25.06.2025
Kabul tarihi: 20.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Helis
Fermi-Walker türev
Simplektik uzay

ÖZ

Bu çalışmada öncelikle, simplektik 4-boyutlu uzayda simplektik düzenli eğrilerin geometrik bir tanımını sunuyoruz. Ayrıca, eşbiçim (equiform) diferansiyel geometri çerçevesinde bir simplektik çerçeve oluşturuyor ve özellikle Fermi–Walker türevi ile eğrilerin Frenet alanları arasındaki ilişkiye odaklanıyoruz. Daha sonra, semplektik uzay-zamanda sıfırdan farklı vektör alanları boyunca Fermi–Walker taşınımlarıyla ilişkili farklı türde eğik helisler inşa ediyoruz. Ayrıca, simplektik düzenli eğriler için Fermi–Walker türevi kullanarak eğik helisler üzerine bazı yeni karakterizasyonlar elde ediyoruz. Bu yaklaşımla, (k, m)-tip helislerin Fermi–Walker türevi açısından gerekli ve yeterli koşulu sağladığını öne sürüyoruz. Son olarak, bir simplektik çatıya örnek veriyoruz..

Special Helices with Fermi-Walker Derivative on Equiform Differential Geometry in Symplectic Space

Research Article

Article History:
Received: 25.06.2025
Accepted: 20.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Helix
Fermi-Walker derivative
Symplectic space

ABSTRACT

In this paper, we first provide a geometrical description of symplectic regular curves in a symplectic 4-space. In addition, we construct a symplectic frame in equiform differential geometry and mainly focus on the relationship between the Fermi–Walker derivative and the Frenet fields of curves. Then, we construct different types of slant helices corresponding to Fermi–Walker transportations along non-vanishing vector fields in symplectic spacetime. Moreover, we obtain some new characterizations of slant helices by using the Fermi–Walker derivative for symplectic regular curves. With this representation, we suggest that (k,m)-type helices provide the necessary and sufficient conditions in terms of the Fermi–Walker derivative. Finally, we present an example of a symplectic frame.

To Cite: Çiçek Çetin E., Çetin M. Special Helices with Fermi-Walker Derivative on Equiform Differential Geometry in Symplectic Space. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1683-1695.

1. Introduction

The theory of curves is the basic subject of geometry, and it has a common field of study with many branches of science. In terms of mathematics, this has great meaning for both functional analysis and applied mathematics. In terms of other branches of science, it is known that in economics, numerical

data are interpreted with the help of curves, in economics, income functions are expressed with curves, and in medicine, The behavior of the curve provides valuable insights into various datasets. From the perspective of geometry, the differential geometric properties of curves, their relationships with various mathematical structures and the construction of geometric foundations play a crucial role. In differential geometry, which is an important field of study in geometry, extensive research has been carried out and continue to attract attention on the theory of curves in Euclidean space. Especially the characterizations of the theory of curves, involute-evolute curves, Bertrand curves, Mannheim curves, Adjoint curves, helical properties of curves, etc. The studies have been studied meticulously by geometers and continue to be studied. General and slant helices play a significant role in the fields of geometry, physics, and engineering. Building on this concept, researchers have extended their studies to slant helices, which can be viewed as a natural generalization defined by a constant angle condition between the normal and a fixed direction**.** General and slant helices play a significant role in the fields of geometry, physics, and engineering. General helices are curves characterized by the property that their tangent vector makes a constant angle with a fixed direction, and they play a fundamental role in differential geometry. While this notion provides a basic framework for the theory of helices, it can be extended to investigate more general geometric behaviors. In this context, slant helices—defined by the property that one of the Frenet vectors makes a constant angle with a fixed direction—arise as a natural generalization of general helices.

General helices are defined as tangent vector fields that create a constant angle with a fixed curve direction. Additionally, slant helix subjects are presented in different dimensional spaces (Ali et al., 2011; Çiçek Çetin et al., 2019). In addition, partial and pseudo-null curves in spacetime have been extensively studied. Numerous researchers have explored their applications in the context of Fermi–Walker parallelism. Furthermore, the geodesic nature of magnetic curves under the influence of a given magnetic field has been investigated, primarily because the generalized form of the Fermi–Walker derivative plays a significant role in the analysis of such curves. A deeper understanding of Fermi–Walker magnetic curves can also be achieved by computing the energy associated with their derivatives. This, in turn, facilitates a clearer interpretation of fundamental physical concepts such as mass–energy and kinetic energy **(**Kamran et al., 1960Pripoae, 2000). In our view, slant helices should be investigated within the context of the equiform frame in symplectic space, as symplectic curves play a significant role in modern geometry. Moreover, symplectic spaces have been the subject of study by several differential geometers in recent years. They proved that up to a rigid symplectic motion of $\boldsymbol{R^{2n}}$, there exists a unique curve with symplectic curvatures.

In this manuscript, we focus on $(\boldsymbol{k},\boldsymbol{m})$ -type slant helices by employing the Fermi–Walker derivative, and we also present several characterizations of $(\boldsymbol{k},\boldsymbol{m})-$ type slant helices associated with symplectic regular curves.

2. Matherials and Method

Symplectic geometry provides a fundamental framework for classical mechanics. With its remarkable recent development, it has established itself as an independent and rich field, forming a central branch of differential geometry and topology. Moreover, symplectic geometry serves as the mathematical foundation for various areas of physics, including classical mechanics, geometrical optics, and thermodynamics. In other words, symplectic geometry originally emerged from the study of mechanics and optics.

In this part, we present some fundamental definitions and properties of symplectic space,

for any vectors

$$u = (x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n), \quad v = (\mu_1, \dots, \mu_n, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \in R^{2n}$$

Symplectic inner product is defined as follows:

$$< u, v >= \varphi(u, v) = \sum_{i=1}^{n} (x_i \alpha_i \wedge y_i \mu_i)$$

(Kamran et al., 1960).

In this paper, we define certain notational conventions and perform foundational calculations for use in the forthcoming sections. In particular, we let $\dot{z}$ represent differentiation with respect to the parameter t:

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt}$$

Definition 2.1. If $z(t)$ is non-degeneracy, The following condition is satisfied

$$\langle \dot{z}, \ddot{z} \rangle \neq 0$$

for all $t \in R$.

Let z be a symplectic regular curve, which is parameterized by the symplectic arc length, and such that $H_2(s) \neq 0$. Then, the symplectic frame $\{a_1(s), a_2(s), a_3(s), a_4(s)\}$ defined along the image of z satisfies the following structure equations:

$$a_1{}'(s) = a_3(s)$$

$$a_2'(s) = H_2(s) a_4(s)$$

$$a_3'(s) = k_1(s) a_1(s) + a_2(s)$$
$$a_4'(s) = a_1(s) + k_2(s) a_2(s)$$

(Kamran et al., 1960).

Definition 2.2. Let be a symplectic regular curve with equiform Frenet frame $\{W_1, W_2, W_3 W_4\}$. We call α is $(k, m) -$ type

slant helix if there exists a nonzero constant vector field Usatisfies $\langle W_k;\ U\rangle = c_1$ (c_1 is a constant) and $\langle W_m;\ U\rangle = c_2$ (c_2 is a constant) for $1 \leq k, m \leq 4,\ \ k \neq m$. The constant vector U is on axis of α.

2.1. Equiform Differential of Curves in Symplectic Space

Although equiform geometry is of relatively lesser importance compared to the classical one, the curves that arise in this geometry can be regarded as generalizations of well-known curves in the aforementioned geometries and, therefore, have attracted research interest. In this part of the study, the equiform frame in symplectic space is derived through the use of the equiform parameter. The equiform parameter associated with the curve $z(s)$ is defined as follows:

$$\rho = \frac{1}{k_1}$$

It represents the radius of curvature corresponding to the curve $z(s)$

$$\sigma = \int \frac{ds}{\rho} = \int k_1\, ds$$

$$\frac{ds}{d\sigma} = \rho$$

Frenet vectors for curves are constructed under equiform differential geometry,

$$W_1 = \frac{dz}{d\sigma} = \frac{dz}{ds}\frac{ds}{d\sigma} = a_1\rho$$

$$W_2 = a_2\rho$$

$$W_3 = a_3\rho$$

$$W_4 = a_4\rho$$

If we use Frenet vectors and differentiating these equations and using Frenet frame we obtain,

$$W_1{}' = K_1W_1 + \rho W_3$$

$$W_2{}' = K_1W_2 + K_2W_4$$

$$W_3{}' = K_1W_3 + W_1 + \ \rho W_2$$

$$W_4' = \ \rho W_1 + K_3W_2 + K_1W_4$$

$$K_1 = \dot{\rho} \quad ,\ K_2 = \rho H_2, \qquad K_3 = \frac{K_2}{K_1}$$

are referred to as the symplectic curvature function.

3. Results

The definition of Fermi–Walker transport is given as follows:

$$\widetilde{\nabla}_{a_1} X = \nabla_{a_1} X - \langle a_1, X\rangle \nabla_{a_1} a_1 + \langle \nabla_{a_1} a_1, X\rangle a_1 \tag{3.1}$$

for X vector field.

Theorem 3.1. Assume that z is a symplectic regular curve in the context of equiform geometry on symplectic space. If z qualifies as a $(1,2)$ −type slant helix, then

$$\rho c_1 + K_3 c_2 - \frac{c_2 {K_1}^2}{K_2} = \left(-\frac{c_2 K_1}{K_2}\right)'$$

Proof . Suppose z is a $(1,2)$ −type slant helix. Consequently, for a constant vector field U, it can be written as

$$\langle W_1, U\rangle = c_1 \tag{3.1}$$

and

$$\langle W_2, U\rangle = c_2 \tag{3.2}$$

Differentiating eq. (3.1) and using Fermi-Walker derivative and the equiform Frenet equations in equiform geometry, we obtain

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_1, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_1 + \rho W_3 - \langle W_1, W_1\rangle (K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_1\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Therefore, it can be easily shown that

$$K_1 \langle W_1, U\rangle - \rho \langle W_3, U\rangle - \langle W_1, U\rangle = 0$$

Since the above equation, we get

$$\langle W_3, U\rangle = c_1 - \frac{c_1 K_1}{\rho}$$

Similarly, by differentiating equation (3.2) and applying the equiform Frenet equations within equiform geometry, we can express:

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_2, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_2 + K_2 W_4 - \langle W_1, W_2\rangle (K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_2\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Since the above equation, we get

$$\langle K_1 W_2 + K_2 W_4, U\rangle = 0$$

$$K_1\langle W_2, U\rangle + K_2\langle W_4, U\rangle = 0$$

we have the following equation

$$\langle W_4, U\rangle = -\frac{c_2 K_1}{K_2}$$

Differentiating above equation, we can easily find that

$$\rho c_1 + K_3 c_2 - \frac{c_2 {K_1}^2}{K_2} = \left(-\frac{c_2 K_1}{K_2}\right)'$$

which completes the proof.

Theorem 3.2. Assume that z is a symplectic regular curve in the context of equiform geometry on symplectic space. If z qualifies as a $(1,3)$ −type slant helix, then we get

$$\left[\frac{\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)' - K_1\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)}{K_2}\right]' - K_1\left[\frac{\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)' - K_1\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)}{K_2}\right]$$
$$- K_3\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right) - \rho c_1 = 0$$

Proof . Suppose that z is a (1,3)-type slant helix. Thus, for a constant vector field U, we may write

$$\langle W_1, U\rangle = c_1 \tag{3.3}$$

and

$$\langle W_3, U\rangle = c_3 \tag{3.4}$$

Differentiating eq. (3.3) and using Fermi-Walker derivative and the equiform Frenet equations, we have

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_1, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_1 + \rho W_3 - \langle W_1, W_1\rangle(K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_1\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Then it is easy to find that

$$K_1\langle W_1, U\rangle - \rho\langle W_3, U\rangle - \langle W_1, U\rangle = 0$$

Since the above equation, we can obtain

$$\langle W_3, U\rangle = c_1 - \frac{c_1 K_1}{\rho}$$

Similarly, differentiating (3.4) and using Fermi-Walker derivative and the equiform Frenet equations, we can write

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_3, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_3 + W_1 + \rho W_2 - \langle W_1, W_3\rangle (K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_3\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Since the last equation, we get

$$K_1\langle W_3, U\rangle + \langle W_1, U\rangle + \rho\langle W_2, U\rangle - \rho\langle W_3, U\rangle = 0$$

$$\langle W_2, U\rangle = \frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}$$

Differentiating the last equation, some algebraic calculus gives that theorem.

$$\left[\frac{\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)' - K_1\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)}{K_2}\right]' - K_1\left[\frac{\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)' - K_1\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right)}{K_2}\right]$$
$$- K_3\left(\frac{c_3\rho - c_1 - c_3K_1}{\rho}\right) - \rho c_1 = 0$$

The proof is completed.

Theorem 3.3. Assume that z is a symplectic regular curve in the context of equiform geometry on symplectic space. If z qualifies as a $(1,4)$ −type slant helix, then we get

$$K_1\left(\frac{-c_4K_1 - c_1\rho}{K_3}\right) + K_2c_4 - \left(\frac{-c_4K_1 - c_1\rho}{K_3}\right)' = 0$$

Proof. Suppose that z is a (1,4)-type slant helix, for a constant vector field U, we can write

$$\langle W_1, U\rangle = c_2 \tag{3.5}$$

$$\langle W_4, U\rangle = c_4 \tag{3.6}$$

Differentiating eq. (3.5) and using Fermi-Walker derivative and the equiform Frenet equations in equiform geometry, we obtain

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_1, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_1 + \rho W_3 - \langle W_1, W_1\rangle (K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_1\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Then it is easy to find that

$$K_1\langle W_1, U\rangle - \rho\langle W_3, U\rangle - \langle W_1, U\rangle = 0$$

Since the last equation, we get

$$\langle W_3, U\rangle = c_1 - \frac{c_1 K_1}{\rho}$$

Differentiating eq. (3.6) and using Fermi-Walker derivative and the equiform Frenet equations in equiform geometry, we can find

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_4, U\rangle = 0$$

$$\langle \rho W_1 + K_3 W_2 + K_1 W_4 - \langle W_1, W_4\rangle(K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle K_1 W_1 + \rho W_3, W_4\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Since the last equation, we get

$$\langle W_2, U\rangle = \frac{-c_4 K_1 - c_1\rho}{K_3}$$

Differentiating above equation, some algebraic calculus gives that theorem.

$$K_1\left(\frac{-c_4 K_1 - c_1\rho}{K_3}\right) + K_2 c_4 - \left(\frac{-c_4 K_1 - c_1\rho}{K_3}\right)' = 0$$

Theorem 3.4. Assume that z is a symplectic regular curve in the context of equiform geometry on symplectic space. If z qualifies as a $(2,3)$ $-$type slant helix, then we get

$$\rho^2 c_3 - \rho c_3 K_1 - \rho^2 c_2 + c_2 K_3 - \frac{c_2 {K_1}^2}{K_2} = \left(-\frac{c_2 K_1}{K_2}\right)'$$

Proof . Suppose that z is a (2,3)-type slant helix. Thus, for a constant vector field U, we may write

$$\langle W_2, U\rangle = c_2 \tag{3.7}$$

$$\langle W_3, U\rangle = c_3 \tag{3.8}$$

Differentiating eq. (3.7) and using Fermi-Walker derivative, we obtain

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_2, U\rangle = 0$$

$$\langle K_1 W_2 + K_2 W_4 - \langle W_1, W_2\rangle(K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_2\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Since the above equation, we get

$$\langle K_1 W_2 + K_2 W_4, U\rangle = 0$$

$$K_1\langle W_2, U\rangle + K_2\langle W_4, U\rangle = 0$$

we have the following equation

$$\langle W_4, U\rangle = -\frac{c_2 K_1}{K_2}$$

Differentiating eq. (3.8) and using Fermi-Walker derivative, we obtain

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_3, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_3 + W_1 + \rho W_2 - \langle W_1, W_3\rangle (K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_3\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Since the above equation, we get

$$K_1\langle W_3, U\rangle + \langle W_1, U\rangle + \rho\langle W_2, U\rangle - \rho\langle W_3, U\rangle = 0$$

$$\langle W_1, U\rangle = c_2\rho - c_1 - c_3 K_1$$

$$K_1\langle W_3, U\rangle + \langle W_1, U\rangle + \rho\langle W_2, U\rangle - \rho\langle W_3, U\rangle = 0$$

$$\langle W_1, U\rangle + \rho\langle W_2, U\rangle = c_3\rho - c_3 K_1$$

Differentiating above equation, some algebraic calculus gives that theorem,

$$\rho^2 c_3 - \rho c_3 K_1 - \rho^2 c_2 + c_2 K_3 - \frac{c_2 {K_1}^2}{K_2} = \left(-\frac{c_2 K_1}{K_2}\right)'$$

which completes the proof.

Theorem 3.5. Let z be a symplectic regular curve in equiform geometry of the symplectic space. If z is (2,4)-type slant helix , then we find,

$$\frac{K_1}{K_2} = -\frac{c_4}{c_2}$$

Proof . Assume that z be a (2,4)-type slant helix. Hence, for a constant vector field U, we can write

$$\langle W_2, U\rangle = c_2 \tag{3.9}$$

$$\langle W_4, U\rangle = c_4 \tag{3.10}$$

Differentiating eq. (3.9) and using Fermi-Walker derivative, we get

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_2, U\rangle = 0$$

and

$$\langle K_1 W_2 + K_2 W_4 - \langle W_1, W_2\rangle (K_1 W_1 + \rho W_3) + \langle (K_1 W_1 + \rho W_3), W_2\rangle W_1, U\rangle = 0$$

Since the last equation, we get

$$\frac{K_1}{K_2} = -\frac{c_4}{c_2}$$

this completes the proof.

Theorem 3.6. Let z be a symplectic regular curve in symplectic space. If z is (3,4)-type slant , then we may write,

$$\langle W_2, U\rangle = \frac{-\rho^2 c_3 + K_1\rho c_3 + \left(-\frac{c_2 K_1}{K_2}\right)' - \frac{c_2 {K_1}^2}{K_2}}{K_3 - \rho^2}$$

Proof.

Assume that z be a (3,4)-type slant helix. Hence, for a constant vector field U, we can write

$$\langle W_3, U\rangle = c_3 \tag{3.11}$$

$$\langle W_4, U\rangle = c_4 \tag{3.12}$$

Differentiating eq. (3.11) and (3.12) using Fermi-Walker derivative, we get

$$\langle \widetilde{\nabla}_{W_1} W_3, U\rangle = 0$$

and

$$\langle W_4, U\rangle = c_4$$

Some algebraic calculus gives that theorem.

Example 3.7. Let us take the curve

$$\Upsilon(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}\left(shs, \frac{1}{2}s^2 + 2s, chs, \frac{1}{2}s^2 - 2s\right).$$

Differntiating frenet vectors,

$$x_1(s) = \Upsilon'(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}(chs, s+2, shs, s-2)$$

and

$$x_3(s) = \Upsilon''(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}(shs, 1, chs, 1).$$

Hence, $\Upsilon(s)$ is a symplectic regular curve,

$$x_2(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}(\frac{4}{5}chs, -\frac{1}{5}(s+2), \frac{4}{5}shs, -\frac{1}{5}(s-2),$$

$$x_4(s) = \frac{5}{4\sqrt{5}}(4shs, -1, 4chs, -1).$$

Since, $\rho = 1$, we can easily write ,

$$x_1(s) = W_1(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}(chs, s+2, shs, s-2)$$

$$x_2(s) = W_2(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}(\frac{4}{5}chs, -\frac{1}{5}(s+2), \frac{4}{5}shs, -\frac{1}{5}(s-2)$$

$$x_3(s) = W_3(s) = \frac{1}{\sqrt{5}}(shs, 1, chs, 1)$$

$$x_4(s) = W_3(s) = \frac{5}{4\sqrt{5}}(4shs, -1, 4chs, -1)$$

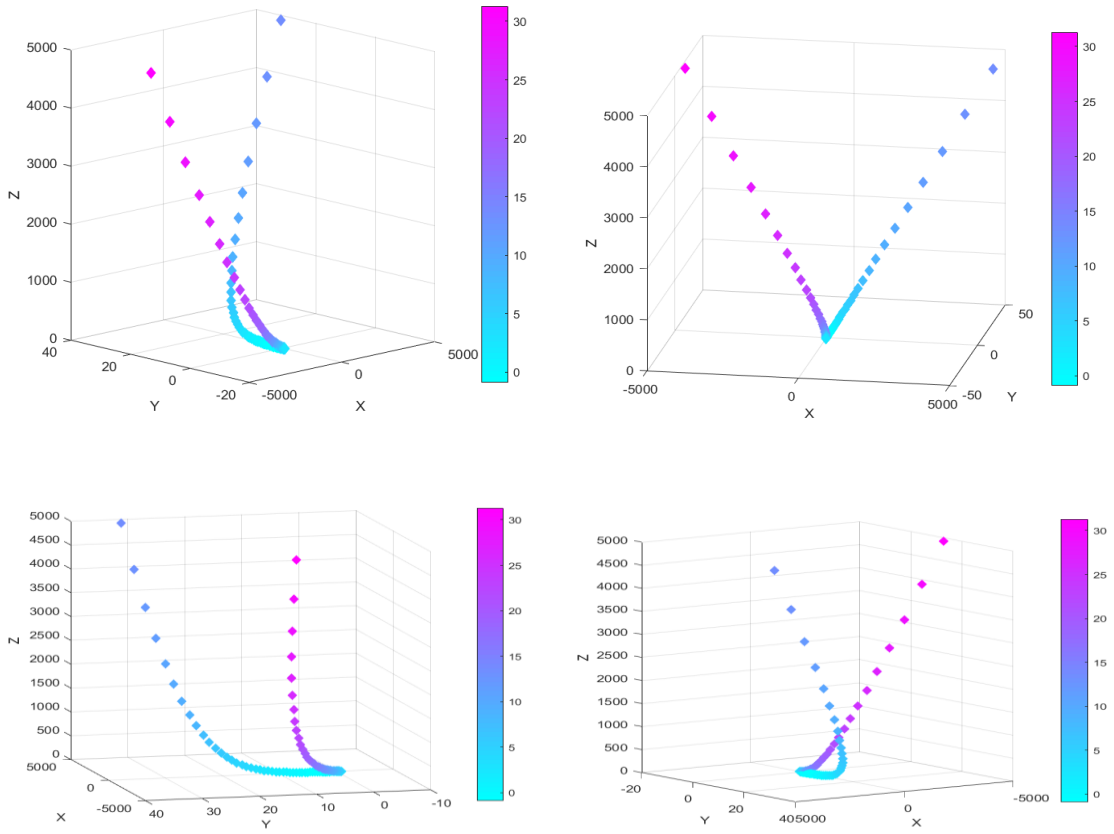


Figure 1. Symplectic regular curve $z(s)$.

Through this example, the corresponding vectors of symplectic vectors in equiform space have been explicitly computed.

4. Conclusion

In this study, helices were constructed by developing an equiform frame in symplectic space and employing the Fermi–Walker derivative. The results of this work contribute to the literature by demonstrating how geometric structures in various spaces can be obtained through the application of the Fermi–Walker derivative. Since the slant helices are determined through the Fermi–Walker derivative, this work paves the way for new studies in different spaces within the literature.

Acknowledgement

I would like to express my sincere gratitude to the referees for their valuable comments and constructive criticisms, which significantly improved the quality of the manuscript. I also thank the journal editors for their insightful suggestions, corrections, and contributions.

Conflict of Interest Statement

The author declares that there is no conflict of interest. The authors also state that they contributed equally to the preparation of this article.

References

Abdel-Aziz HS., Saad MK., Abdel-Salam AA. Equiform differential geometry of curves in minkowski space-time. arXiv.org/math/ arXiv:1501.02283.

Ali A., Lopez R. Slant helices in Minkowski space E_1^3. J. Korean Math. Soc. 2011; 48: 159-167.

Ali AT., Turgut M. Some characterizations of slant helices in Euclidean space E^n. Hacet. J. Math. Stat. 2010; 39(3): 327-336.

Çiçek Çetin E., Bektaş M. k-type slant helices for symplectic curve in 4-dimensional symplectic space. Facta Universitatis, Series: Mathematics and Informatics 2020; 641-646.

Çiçek Çetin E., Bektaş M. Some new characterizations of symplectic curve in 4-dimensional symplectic space. Communications in Advanced Mathematical Sciences 2020; 2(4): 331-334.

Çiçek Çetin E., Bektaş M. The characterizations of Affine symplectic curvesin R^4. Mathematics 2019; 7(1): 110.

Ferrandez A., Gimeněz A., Lucas P. Null generalized helices in Lorentz-Minkowski space. J. Phys. A: Math. Gen. 2010; 35: 8243-8251.

Kamran N., Olver P., Tenenblat K. Local symplectic invariants for curves. Commun. Contemp. Math. 1960; 11(2): 165-183.

Karakuş F., Yaylı Y. The fermi–walker derivative in minkowski space E_1^3. Advances in Applied Clifford Algebras 2017; 27,1353–1368.

Körpınar T. On the fermi walker derivative for inextensibleflows. Zeitschrift für Naturforschung A-A Journal of Physical Sciences 2015; 70a: 477-482.

Pripoae GT. Generalized fermi–walker parallelism ınduced by generalized schoute connections. Geometry Balkan Press Bucharest. 2000; 117-125.

Struik DJ. Lectures on classical differential geometry. Dover,1988; New York.

Önder M., Kazaz M., Kocayiğit H., Kılıç O. B_2-slant helix in Euclidean 4-space E^4. Int J. Cont. Mat. Sci. 2008; 3: 1443-1440.

Valiquette F. Geometric affine symplectic curve flows in R^4. Diff. Geo. Appl. 2012; 30(6): 631-641.

Yılmaz M., Bektaş M. (k,m) -type slant helices for partially null and pseudo null curves in Minkowski space E_1^4. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences 2020; 5(1): 515-520.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1696-1707, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1696-1707, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Dijital Dönüşüm Sürecinde Akıllı Üretim Planlama: Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma Bütünleşik Yaklaşımı

Kübra TÜMAY ATEŞ[1*]

[1]Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adana

[1]https://orcid.org/0000-0002-3337-7969
*Sorumlu yazar: ktumay@cu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 30.10.2025
Kabul tarihi:02.02.2026
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Yapay sinir ağları
Genetik algoritma
Optimizasyon
Akıllı üretim
Üretim planlama

ÖZ

Günümüzün yoğun rekabet ortamında üretim planlama süreçlerinin etkinliği, işletmelerin sürdürülebilirliği ve operasyonel verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, İstanbul'da faaliyet gösteren orta ölçekli bir makine üretim tesisinde üretim planlama kararlarını iyileştirmek amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Genetik Algoritma (GA) yöntemlerini bütünleştiren hibrit bir yapay zeka modeli geliştirilmiştir. Önerilen model iki aşamadan oluşmaktadır: ilk aşamada, sipariş adedi, ürün tipi, stok miktarı ve iş gücü kullanımı değişkenlerine dayalı olarak üretim süresi YSA modeli ile tahmin edilmiştir ($R^2 = 0.91$, MAPE = %8.7). İkinci aşamada ise, elde edilen tahmin değerleri GA tabanlı optimizasyonda kullanılarak siparişlerin üç üretim hattına kapasite kısıtları altında dengeli biçimde atanması sağlanmıştır. Evrimsel operatörler (seçim, çaprazlama, mutasyon) aracılığıyla çalışan GA modeli, iş yükü dengesizliğini minimize ederek genel planlama verimliliğini artırmıştır. Karşılaştırmalı analizler, önerilen yaklaşımın manuel planlamaya göre ortalama üretim süresini %18.6, teslimat gecikmelerini %45.6 ve toplam işçilik maliyetini %11.9 oranında iyileştirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, geliştirilen YSA–GA tabanlı model, küçük ve orta ölçekli işletmeler için düşük maliyetli, uygulanabilir ve dijital dönüşüm sürecine bir karar destek aracı olarak değerlendirilmektedir.

Intelligent Production Planning in the Digital Transformation Process: An Integrated Approach of Artificial Neural Networks and Genetic Algorithm

Research Article

Article History:
Received: 30.10.2025
Accepted: 02.02.2026
Published online:15.06.2026

Keywords:
Artificial neural networks
Genetic algorithm
Optimization
Intelligent manufacturing
Production planning

ABSTRACT

In today's highly competitive industrial environment, the efficiency of production planning processes plays a critical role in ensuring the sustainability and operational performance of enterprises. This study develops a hybrid artificial intelligence model that integrates Artificial Neural Networks (ANN) and Genetic Algorithms (GA) to enhance production planning decisions in a medium-sized machine manufacturing company operating in Istanbul. The proposed model consists of two stages: in the first stage, production time is predicted using an ANN model based on variables such as order quantity, product type, stock level, and labor utilization ($R^2 = 0.91$, MAPE = 8.7%). In the second stage, the predicted values are utilized in a GA-based optimization process to achieve a balanced assignment of orders to three production lines under capacity constraints. The GA model, operating through evolutionary operators (selection, crossover, and mutation), minimizes workload imbalance and improves overall scheduling efficiency. Comparative analyses indicate that the proposed approach reduces average production time by 18.6%, delivery

delays by 45.6%, and total labor costs by 11.9% compared to the manual planning method. Consequently, the developed ANN–GA-based model is evaluated as a low-cost, applicable decision-support tool that contributes to the digital transformation process of small and medium-sized enterprises (SMEs).

To Cite: Tümay Ateş K. Dijital Dönüşüm Sürecinde Akıllı Üretim Planlama: Yapay Sinir Ağları ve Genetik Algoritma Bütünleşik Yaklaşımı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1696-1707.

1. Giriş

Küresel rekabetin hızla arttığı günümüz endüstriyel ekosisteminde, üretim planlama süreçlerinin etkinliği işletmelerin sürdürülebilirliği ve rekabet gücü açısından kritik bir rol oynamaktadır. Üretim hatlarının dengeli şekilde çalıştırılması, teslimat sürelerinin kısaltılması ve kaynak kullanım verimliliğinin artırılması, özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler (KOBİ) için stratejik öncelikler arasında yer almaktadır. Ancak geleneksel üretim planlama yöntemleri, karmaşık ve dinamik üretim koşullarında optimal sonuçlar üretmekte yetersiz kalmaktadır (Pinedo, 2016). Bu nedenle, yapay zeka (YZ) tabanlı modelleme ve optimizasyon teknikleri, son yıllarda üretim sistemlerinin karar destek süreçlerinde yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır(Del Gallo ve ark., 2023).

Yapay sinir ağları (YSA), doğrusal olmayan ve çok değişkenli sistemlerin modellenmesinde önemli bir araç olarak görülmektedir. Özellikle üretim süresi, iş gücü tahmini ve operasyonel performans göstergelerinin öngörülmesinde YSA'nın yüksek doğruluk oranları sunduğu belirtilmektedir (Akyol ve Bayhan, 2007). Son yıllarda yapılan çalışmalar, YSA ve benzeri derin öğrenme modellerinin üretim süresi tahmininde artan doğruluk ve azalan belirsizlik düzeyleriyle umut verici sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir (Wang ve ark., 2024). Örneğin, dikkat mekanizmalı ağ yapılarının üretim süresi tahmininde hata oranlarını önemli ölçüde düşürdüğü belirlenmiştir. YSA'nın geçmiş verilerden öğrenme yeteneği sayesinde süreçlerdeki gizli ilişkileri yakalayarak tahminleme doğruluğunu artırdığı ve üretim planlama kararlarının güvenilirliğini yükselttiği vurgulanmaktadır.

Optimizasyon aşamasında ise genetik algoritma (GA) gibi evrimsel hesaplama yöntemleri, geniş çözüm uzaylarında global optimuma yakın çözümler üretebilme yetenekleriyle öne çıkmaktadır (Goldberg, 1989). GA, üretim planlama ve çizelgeleme problemlerinde hem hesaplama verimliliği hem de esnekliği nedeniyle sıklıkla tercih edilmekte; literatürde iş yükü dengeleme, üretim hattı ataması ve teslimat süresi minimizasyonu gibi problemlerde başarılı sonuçlar verdiği gösterilmektedir (Gen ve Cheng, 2020). Ayrıca, hibrit metasezgisel yaklaşımların üretim ortamındaki çoklu kısıtlar altında da etkin çözümler ürettiği ve GA'nın bu kapsamda en uyarlanabilir yöntemlerden biri olduğu ifade edilmektedir (Roeva ve ark., 2024).Ojstersek ve ark., (2020) evrimsel hesaplama tabanlı yaklaşımların bu tür problemlerde yüksek çözüm kalitesi ve esneklik sunduğunu, özellikle hibrit modellerin performans açısından öne çıktığını belirtmiştir.Diğer yandan, Huang (1999), yarı iletken üretiminde yapay sinir ağları ile üretim performansını tahmin etmeye yönelik bir sistem geliştirerek, bu yöntemin karmaşık üretim süreçlerinde doğruluk ve karar desteği açısından önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalar,

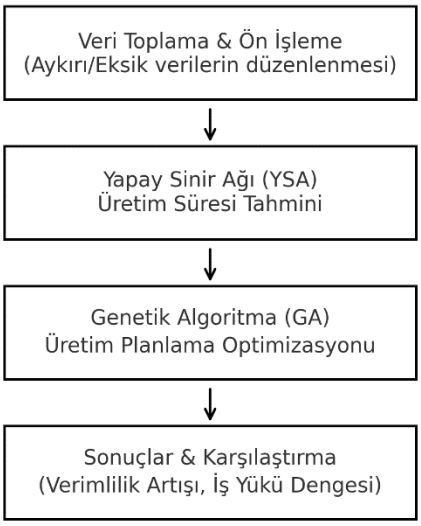
üretim sistemlerinin optimizasyonunda yapay zekâ tabanlı yöntemlerin bütünleşik kullanımının giderek artan bir eğilim olduğunu göstermektedir.

Son dönemde yapılan araştırmalar, YSA ve GA yöntemlerinin entegrasyonunun üretim planlama süreçlerinde hibrit bir yapay zeka çerçevesi sunduğunu ortaya koymaktadır.Zhang ve arkadaşları (2021), üretim çizelgeleme problemlerine yönelik genetik programlama (GP) yaklaşımını sistematik biçimde ele almıştır. Springer tarafından yayımlanan bu kapsamlı kitapta, GP'nin karmaşık çizelgeleme ortamlarında kural keşfi, dinamik karar verme ve çok amaçlı optimizasyon için nasıl kullanılabileceği açıklanmıştır. Çalışma, üretim çizelgelemede geleneksel genetik algoritmalardan farklı olarak, GP'nin doğrudan çizelgeleme kurallarını evrimleştirerek yeni, uyarlanabilir karar stratejileri geliştirdiğini göstermektedir. Benzer şekilde, Georgy ve Basily (2008), inşaat projelerinde malzeme teslimat planlarını optimize etmek amacıyla genetik algoritma tabanlı bir model geliştirmiştir. Çalışma, lojistik kısıtlar ve tedarik belirsizliklerini dikkate alarak maliyet ve süre optimizasyonu sağlamış, genetik algoritmaların karmaşık inşaat planlama problemlerinde etkili ve esnek çözümler sunduğunu göstermiştir. Güncel çalışmalarda da, LSTM ağlarının GA ile entegre edilerek çizelgeleme sürecinin hesaplama verimliliğini artırdığı ve tahminleme ile optimizasyonun bütünleşik olarak yürütülmesinin üretim performansını geliştirdiği gösterilmiştir (Bubak ve ark., 2025). Mahmud (2023), tedarik zinciri ve üretim çizelgeleme süreçlerinin entegrasyonunun sistem verimliliğini artırdığını göstermiş; hibrit optimizasyon yaklaşımlarının bu alanda etkili çözümler sunduğunu belirtmiştir.Kamble ve ark., (2023) yapay zekâ temelli karar destek sistemlerinin akıllı üretim ortamlarında dijital dönüşümün temel itici unsurlarından biri olduğunu vurgulamaktadır. Bu bağlamda, önerilen modelin KOBİ'ler için uygulanabilir bir dijital dönüşüm aracı sunduğu söylenebilir.

Bu çalışma, literatürdeki bu yaklaşımlardan esinlenerek İstanbul'da faaliyet gösteren orta ölçekli bir makine üretim tesisinde üretim planlama sürecini YSA ve GA yöntemlerinin bütünleşik kullanımıyla optimize etmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen model, üretim süresinin YSA ile tahmin edilmesi ve bu tahminlerin GA aracılığıyla üç üretim hattına optimal biçimde dağıtılması esasına dayanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, İstanbul'da faaliyet gösteren orta ölçekli bir makine üretim tesisinde üretim planlama süreçlerinin yapay zeka destekli yöntemlerle optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda iki aşamalı bir metodolojik yaklaşım benimsenmiştir. İlk aşamada üretim süresinin öngörülmesi için YSA tabanlı bir tahmin modeli geliştirilmiş; ikinci aşamada ise bu tahmin değerleri kullanılarak üretim hattı atamalarının GA temelli optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de önerilen yöntemin uygulama akış şeması görülmektedir.



Şekil 1. Önerilen Yöntem için Uygulama Akış Şeması

2.1. Yapay Sinir Ağı (YSA) Optimizasyon Yöntemi

Bu çalışmada üretim süresinin öngörülmesi amacıyla geliştirilen yapay sinir ağı modeli, denetimli öğrenme yaklaşımına dayalı, ileri beslemeli çok katmanlı ağ mimarisiyle tasarlanmıştır. Model, geçmiş 12 aylık üretim verileri üzerinde eğitilmiş olup, giriş katmanında üretim performansını doğrudan etkileyen sipariş adedi, ürün tipi, stok miktarı ve iş gücü kullanımı olmak üzere dört bağımsız değişken yer almaktadır: Bu değişkenler sırasıyla üretim yükünü, ürün çeşitliliğini, hammadde mevcudiyetini ve insan kaynağı kullanım düzeyini temsil etmekte olup, modelin tahmin doğruluğu açısından kritik girdiler olarak değerlendirilmiştir.

Modelin çıktı katmanında ise bağımlı değişken olarak tahmini üretim süresi (saat) yer almaktadır. Böylece ağ, verilen girdi kombinasyonlarına karşılık olarak üretim süresini nicel biçimde tahmin edebilmektedir. Ağ mimarisi, dört nöronlu bir giriş katmanı, beş nöronlu tek gizli katman ve bir nöronlu çıkış katmanından oluşmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu tercih edilmiş; bu sayede model, doğrusal olmayan ilişkileri yakalayabilme kapasitesine sahip olmuştur. Modelin ağırlıkları, Excel Solver aracılığıyla geriye yayılım algoritması mantığında optimize edilmiş, hata kareleri toplamı (SSE) minimize edilerek öğrenme süreci tamamlanmıştır.
Elde edilen tahmin fonksiyonu aşağıdaki şekilde formüle edilmiştir:

$$\hat{Y}=\sum_{i=1}^{5} v_j\, \sigma\left(\sum_{i=1}^{4} w_{ij} x_i\right) + b_0 \quad (1)$$

Burada $\hat{Y}$, tahmini üretim süresini; x_i terimleri modelin giriş değişkenlerini; w_i değerleri her değişkene ait ağırlıkları ve b ise bias terimini ifade etmektedir. Modelin performans değerlendirmesi, eğitim ve test verileri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

2.2. Genetik Algoritma Optimizasyon Yöntemi

Yapay sinir ağı modelinden elde edilen üretim süresi tahminleri, çalışmanın ikinci aşaması olan üretim planlama optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu aşamada, siparişlerin üç farklı üretim hattına nasıl dağıtılacağının belirlenmesi, evrimsel hesaplama temelli bir yaklaşım olan GA yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. GA, biyolojik evrim prensiplerine dayanan ve büyük çözüm uzaylarında optimal veya optimal yakınsama sağlayan bir meta-sezgisel optimizasyon tekniğidir(Goldberg, 1989). Optimizasyon problemi, her siparişin yalnızca bir iş istasyonuna atanabileceği ve siparişlerin parçalanamayacağı bir atama yapısı şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca her iş istasyonunun kapasitesi 300 saat ile sınırlandırılmıştır. Amaç fonksiyonu, üretim hatları arasındaki toplam iş yükü dengesizliğini ve maksimum yük farkını minimize etmeye yöneliktir. Bu kapsamda uygunluk fonksiyonu aşağıdaki biçimde formüle edilmiştir:

$$\text{Fitness}=\frac{1}{(\max(S_1,S_2,S_3)+\lambda\cdot\text{Dengesizlik})} \quad (2)$$

Burada S_i, i. iş istasyonunun toplam iş yükünü, λ ise dengesizlik bileşeninin göreceli ağırlığını ifade etmektedir. Bu fonksiyon, iş yükü dengesini iyileştiren çözümlere daha yüksek uygunluk değerleri atayarak arama sürecini yönlendirmiştir.Parametre değeri, ön deneme çalışmalarıyla iş yükü dengesi ve yakınsama davranışı göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. λ parametresi 0.5 olarak belirlenmiş olup, farklı değerler üzerinde yapılan ön denemeler sonucunda iş yükü dengesini en iyi sağlayan değer olarak seçilmiştir. Genetik algoritma süreci, rastgele oluşturulmuş 50 bireyden oluşan başlangıç popülasyonu ile başlatılmıştır. Her birey, siparişlerin üretim hatlarına atanma sırasını temsil eden bir üretim planı olarak değerlendirilmiştir. Her nesilde, uygunluk değeri en yüksek olan bireyler seçilmiş, çaprazlama işlemi ile yeni bireyler üretilmiş ve popülasyonun %10'u oranında mutasyon uygulanarak çözüm çeşitliliği korunmuştur. Bu evrimsel süreç toplam 200 nesil boyunca tekrarlanmış ve her nesilde en iyi birey kaydedilerek yakınsama eğrisi izlenmiştir. Algoritmanın yakınsama davranışı, 150. nesilden sonra uygunluk fonksiyonu değerlerinde durağanlaşma eğilimi göstermiştir. Bu durum, modelin küresel optimuma yakın bir çözüme ulaştığını ve parametre ayarlarının uygun biçimde belirlendiğini göstermektedir.

2.3.Yapay Sinir Ağı Modelleme Süreci

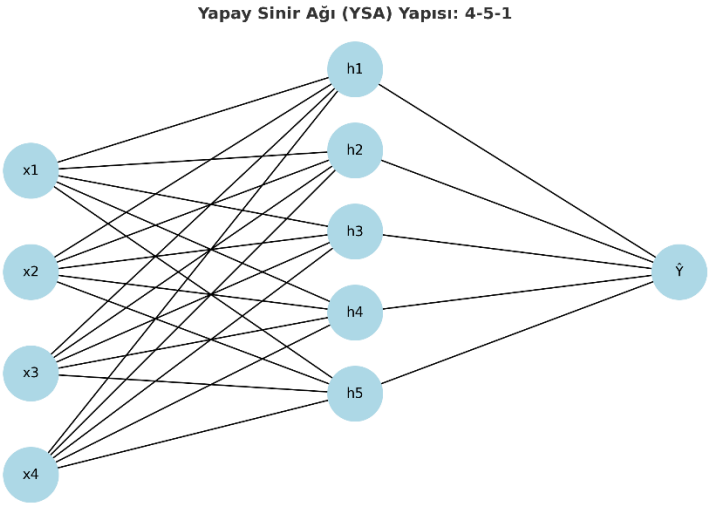
2.3.1. Modelin Genel Yapısı

Bu çalışmada üretim süresinin tahmin edilmesi amacıyla ileri beslemeli çok katmanlı algılayıcı yapısında bir YSA modeli geliştirilmiştir. Model, geçmiş 12 aylık üretim verilerinden öğrenerek sipariş bazında üretim süresini tahmin edecek şekilde yapılandırılmıştır (Şekil 2).Ağ yapısı; dört nöronlu giriş katmanı, beş nöronlu tek gizli katman ve bir nöronlu çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır.

Giriş katmanındaki değişkenler, üretim sisteminin temel girdilerini temsil etmektedir:

- **x_1:** Sipariş adedi – üretim yükünü belirler.
    - **x_2:** Ürün tipi – üretim sürecinin karmaşıklığını etkiler.
    - **x_3:** Stok miktarı – üretim hazırlık süresiyle ilişkili bir faktördür.
    - **x_4:** İş gücü – üretim süresine doğrudan etki eden bir emek girdisidir.

Modelin çıktısı, bu değişkenlerin etkileşimi sonucunda tahmin edilen üretim süresi ($\hat{Y}$) değeridir.



Şekil 2. Modelin YSA Ağ Yapısı

Aynı zamanda ürün tipi değişkeni (A, B ve C), yapay sinir ağı modeline one-hot encoding yöntemiyle sayısallaştırılarak dahil edilmiştir.

2.3.2. Modelin Matematiksel Gösterimi

Yapay sinir ağının çalışma prensibi, giriş değişkenlerinden elde edilen ağırlıklı toplamların bir aktivasyon fonksiyonuna uygulanmasıyla gerçekleşir. Gizli katmandaki her bir nöronun net girdisi aşağıdaki şekilde ifade edilir (Haykin, 1999):

$$Z_j=(\sum_{i=1}^{4} w_{ij}x_{ij}) + b_j j=1,2,3,4,5 \quad (3)$$

Burada w_{ij} her bir girdi değişkeni ile gizli nöron arasındaki bağlantı ağırlığını, $b_j$ise bias terimini göstermektedir. Aktivasyon fonksiyonu olarak doğrusal olmayan ilişkileri öğrenebilme yeteneği nedeniyle sigmoid fonksiyonu tercih edilmiştir (Bishop, 2006):

$$h_j=\sigma(z_j)=\frac{1}{1+ e^{-zj}} \quad (4)$$

Bu işlemin ardından gizli katmandan çıkan aktivasyon değerleri, çıkış katmanına iletilir ve tahmini üretim süresi şu şekilde hesaplanır:

$Y^{`}=\sum_{i=1}^{5} v_j h_j + b_0$ (5)

Burada v_j, gizli katmandaki j. nöron ile çıkış katmanı arasındaki ağırlığı, b_0 ise çıkış katmanına ait bias terimini göstermektedir. Elde edilen tahmini değer (Y'), her siparişin tamamlanma süresine ilişkin öngörü değeridir.

2.3.3.Modelin Eğitimi ve Performans Ölçümü

Modelin öğrenme süreci, Excel Solver aracı kullanılarak geri yayılım algoritmasımantığında gerçekleştirilmiştir. Veri seti, modelin genelleme kabiliyetini değerlendirmek amacıyla %70 eğitim ve %30 test verisi olacak şekilde rastgele bölünmüştür.Solver, hata fonksiyonu olarak tanımlanan ortalama karesel hatayı (MSE) minimize edecek şekilde ağırlık değerlerini optimize etmiştir:

$E=1/n(\sum_{i=1}^{n} yk - y'k)^2$ (6)

Bu süreçte ağın parametreleri güncellenmiş, her iterasyonda tahmin hatası azaltılarak modelin yakınsaması sağlanmıştır. Modelin doğruluk performansıR^2 ve Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) olmak üzere iki temel ölçütle değerlendirilmiştir:

2.3.4. Model Parametre Seçimi

Modelin mimarisi belirlenirken, farklı gizli katman nöron sayıları (3–8 arası) denenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deneysel değerlendirmeler sonucunda, 5 nöronlu yapı,MSE değerini en düşük, R^2 değerini ise en yüksek düzeyde gerçekleştirmiştir. Bu yapı, modelin karmaşıklığı ile tahmin doğruluğu arasında en uygun dengeyi sağlayarak aşırı uyum riskini minimize etmiştir. Dolayısıyla 5 gizli nöronun seçilmesi, hem giriş değişkenlerinin sayısına hem de veri setinin ölçeğine göre optimum hata düzeyini ve genel genelleme kabiliyetini sunmuştur. Elde edilen bulgular, daha az veya daha fazla nöron içeren alternatif yapılara kıyasla bu konfigürasyonun daha yüksek doğruluk ve daha düşük hata oranı sağladığını ortaya koymuştur. Modelleme sürecinde kullanılan tüm parametreler, ağ mimarisi, optimizasyon kısıtları ve performans ölçütleri ayrıntılı biçimde tanımlanmış; böylece deneysel kurgunun anlaşılabilirliği ve yeniden uygulanabilirliği desteklenmiştir.

3. Bulgular

Bu bölümde, yapay zeka destekli üretim planlama modelinin uygulanması sonucu elde edilen bulgular ayrıntılı biçimde sunulmaktadır. Çalışmanın amacı doğrultusunda, YSA modeliyle tahmin edilen üretim süreleri,GA tabanlı optimizasyon sürecine entegre edilerek üretim hatları arasında dengeli bir iş yükü dağılımı sağlanmıştır. Analiz, modelin tahmin doğruluğu, üretim sürelerinin optimize edilme düzeyi ve manuel planlama yöntemine kıyasla performans iyileşmelerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Böylece, üretim süreçlerinde veri odaklı ve öğrenebilir bir planlama mekanizmasının nasıl daha etkin sonuçlar üretebileceği ampirik olarak değerlendirilmiştir. Deneysel tasarım kapsamında,

YSA modelinin tahmin performansı eğitim ve test verileri üzerinde değerlendirilmiş; GA optimizasyon süreci ise yakınsama davranışı ve iş yükü dengesi açısından analiz edilmiştir.

Tablo 1, araştırma kapsamında kullanılan değişkenleri, bunların türsel özelliklerini ve analizde üstlendikleri rolleri sistematik biçimde ortaya koymaktadır. Çalışmada, üretim süresinin öngörülmesinde bağımlı değişken olarak üretim süresi tanımlanmış; bu değişkenin tahmini amacıyla dört temel bağımsız değişken kullanılmıştır: sipariş adedi, ürün tipi, stok miktarı ve iş gücü kullanımı. Söz konusu değişkenler, üretim sisteminin operasyonel yükünü, kaynak kullanım düzeyini ve ürün çeşitliliğini temsil etmektedir.

Tablo 1. Kullanılan Değişkenler ve Tanımları

Değişken	Açıklama
Sipariş Adedi	Bir siparişte üretilmesi gereken ürün miktarı
Ürün Tipi	Ürünün tipi (A, B, C)
Stok Miktarı	Mevcut stok durumu
İş Gücü Kullanımı	Üretim için harcanan işçilik süresi
Üretim Süresi	YSA modelinde tahmin edilmek istenen hedef değişken

Tablo 2, geliştirilen YSA modelinin performans göstergelerini sunmaktadır. Modelin eğitim ve test verisi üzerinde elde ettiği MAPE ve R^2 değerleri, modelin yüksek tahmin doğruluğu düzeyine ulaştığını göstermektedir. Özellikle $R^2 \approx 0.91$ değeri, modelin üretim süresi değişkenini açıklamada güçlü bir doğrusal ilişki yakaladığını göstermektedir. Bu sonuç, YSA modelinin üretim planlama süreçlerinde kullanılabilir bir öngörüsel araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 2. YSA Model Performans Sonuçları

Veri Seti	MAPE (%)	R^2	Ortalama Hata (Saat)	Doğruluk Oranı (%)
Eğitim Verisi	9.5	0.92	0.38	90.5
Test Verisi	8.7	0.91	0.34	91.3

Model performansı, tahmin edilen üretim sürelerinin gözlenen değerlere yakınlığını göstermekte olup, $R^2 \approx 0.91$ seviyesinde güçlü bir tahmin kapasitesi sunmuştur.

Tablo 3, GA tabanlı üretim planlama sürecinde kullanılan temel parametreleri özetlemektedir. Başlangıç popülasyonu, nesil sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranları, algoritmanın arama uzayındaki çeşitliliğini

ve yakınsama hızını belirleyen temel kontrol parametreleridir. Ayrıca, maksimum iş istasyonu kapasitesi kısıtı altında uygunluk fonksiyonunun tanımlanması, üretim hatları arasında iş yükü dengesini optimize etmeye yöneliktir. Bu parametrelerin uygun şekilde belirlenmesi, GA'nın çözüm kalitesini ve optimizasyon başarısını doğrudan etkilemektedir.

Tablo 3. GA Optimizasyon Sürecinin Temel Parametreleri

Parametre	Değer
Başlangıç Popülasyonu	50
Nesil Sayısı	200
Çaprazlama Oranı	%70
Mutasyon Oranı	%10
Maksimum İş İstasyonu Kapasitesi	300 saat
Uygunluk Fonksiyonu	$1 / (\max(S1,S2,S3) + \lambda \cdot \text{Dengesizlik})$

Tablo 4, yapay zeka destekli planlama modeli ile firmanın mevcut manuel üretim planlama yönteminin performans karşılaştırmasını göstermektedir. Sonuçlar, önerilen modelin ortalama üretim süresi, maksimum iş yükü, teslimat gecikme oranı, malzeme israfı ve toplam işçilik maliyeti gibi göstergelerde önemli iyileşmeler sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, geliştirilen yaklaşımın üretim verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda kaynak kullanım dengesini de optimize ettiğini göstermektedir.

Tablo 4. Üretim Planlama Sonuçlarının Karşılaştırması

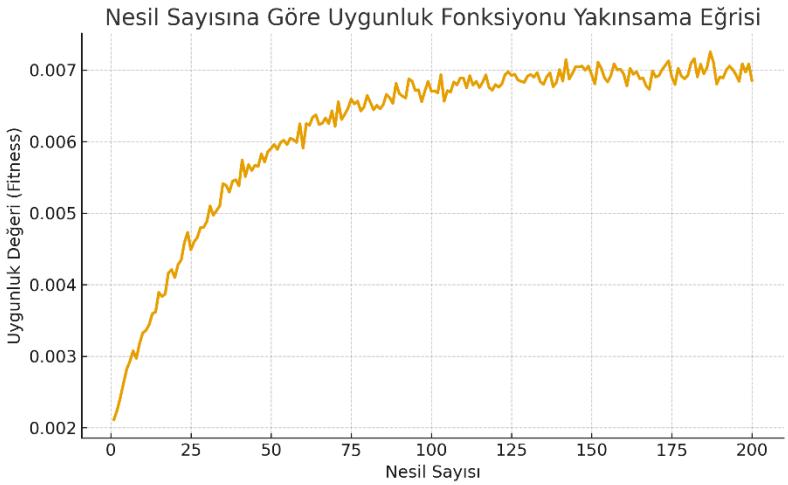
Performans Ölçütü	Mevcut (Manuel) Yöntem	Yapay Zeka Destekli Yöntem	İyileşme (%)
Ortalama Üretim Süresi (saat)	118	96	+18.6
Maksimum İş Yükü (saat)	310	276	+11.0
Teslimat Gecikme Oranı (%)	12.5	6.8	+45.6
Malzeme İsrafı (adet)	42	27	+35.7
Toplam İşçilik Maliyeti (€)	18,400	16,200	+11.9

Yapay zeka tabanlı planlama yaklaşımı, manuel planlamaya kıyasla üretim süresini kısaltmış, iş yükünü daha dengeli dağıtmış ve operasyonel maliyetleri azaltmıştır. Tablo 5, genetik algoritmanın yakınsama davranışını nicel olarak ortaya koymaktadır. Nesil sayısı arttıkça en iyi ve ortalama uygunluk

değerlerinin birbirine yaklaşması, algoritmanın istikrarlı bir çözüme ulaştığını göstermektedir. Bu durum, parametrelerin uygun biçimde ayarlandığını ve algoritmanın küresel optimuma yakın bir çözümü başarıyla yakaladığını göstermektedir.

Tablo 5. GA Optimizasyonunun Yakınsama Analizi

Nesil	En İyi Uygunluk Değeri	Ortalama Uygunluk	Standart Sapma
1	0.0023	0.0017	0.0004
50	0.0051	0.0042	0.0006
100	0.0064	0.0057	0.0003
150	0.0069	0.0061	0.0002
200	0.0071	0.0068	0.0001



Şekil 3. Nesil Sayısına Göre Uygunluk Fonksiyonu Yakınsama Eğrisi

Şekil 3, genetik algoritmanın 200 nesil boyunca yakınsama sürecini göstermektedir. Erken nesillerde uygunluk değerleri hızla artarken, 150. nesilden sonra artışın yavaşladığı ve modelin stabil bir çözüme ulaştığı görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada geliştirilen yapay zeka tabanlı üretim planlama modeli, küçük ve orta ölçekli üretim işletmelerinde dijital dönüşüm sürecine katkı sunabilecek pratik ve uygulanabilir bir karar destek aracı olarak değerlendirilmektedir. Çalışmanın özgün yönü, YSA ve GA yöntemlerinin Excel tabanlı, düşük maliyetli bir uygulama ortamında bütünleşik biçimde ele alınması ve tahmin ile optimizasyon süreçlerinin tek bir karar destek çerçevesi altında birleştirilmesidir. YSA modeli, geçmiş üretim ve sipariş verilerinden öğrenerek üretim süresini yüksek doğrulukla tahmin etmiş; elde edilen bu tahminler GA tabanlı optimizasyon sürecine girdi olarak kullanılarak üretim hatları arasında daha dengeli bir iş yükü dağılımı sağlanmıştır. Elde edilen bulgular, YSA modelinin üretim süresini yaklaşık %91

doğrulukla öngörebildiğini, GA algoritmasının ise maksimum kapasite dengesizliğini %11 oranında azalttığını göstermekte; bu durum hibrit yapay zeka modellerinin yalnızca tahmin doğruluğunu değil, aynı zamanda üretim sürecinin genel verimliliğini de artırdığını ortaya koymaktadır. Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşımın özellikle veri miktarının sınırlı olduğu küçük ölçekli işletmelerde, yüksek maliyetli yazılım altyapılarına ihtiyaç duyulmadan uygulanabilir olması önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Bubak ve ark., (2025) tarafından önerilen LSTM tabanlı genetik algoritma yaklaşımı, tahmin ve optimizasyon süreçlerinin bütünleşik ele alınmasının üretim ve tedarik planlama performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen YSA–GA tabanlı model de benzer biçimde, üretim süresi tahmini ile planlama optimizasyonunu tek bir karar destek çerçevesinde birleştirerek hibrit yapay zeka yaklaşımlarının üretim sistemlerindeki potansiyelini doğrulamaktadır. Li ve ark. (2023), üretim çizelgeleme problemlerinde yapay sinir ağları ile genetik algoritmaların bütünleşik kullanımının, kapasite kısıtları altında daha dengeli ve etkin çözümler ürettiğini göstermiştir. Bu bulgu, çalışmamızda önerilen YSA–GA tabanlı yaklaşımın üretim planlama süreçlerindeki etkinliğini destekler niteliktedir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan genetik algoritma parametreleri (popülasyon büyüklüğü, nesil sayısı, çaprazlama ve mutasyon oranları), literatürde yaygın kabul gören değerler esas alınarak belirlenmiş olup, bu parametrelerin farklı kombinasyonlar altındaki davranışlarının incelenmesi modelin performansını daha da iyileştirme potansiyeli taşımaktadır. Benzer şekilde, veri setinin daha uzun bir zaman aralığını kapsayacak şekilde genişletilmesi, mevsimsellik etkilerinin modele daha etkin biçimde yansıtılmasına olanak sağlayacaktır. Üretim sürecindeki insan faktörü, makine arızaları ve dış tedarik gecikmeleri gibi dinamik unsurların ise, bulanık mantık, pekiştirmeli öğrenme veya stokastik optimizasyon yaklaşımlarıyla modele entegre edilmesi, sistemin gerçek üretim ortamlarına uyum kabiliyetini artırabilecek önemli bir gelişim alanı olarak değerlendirilmektedir.

Kaynakça

Akyol DE., Bayhan GM. A review on evolution of production scheduling with neural networks. Computers & Industrial Engineering 2007; 53(1): 95-122.

Bishop CM. Pattern recognition and machine learning. New York, NY: Springer 2006.

Bubak A., Rolf B., Reggelin T., Lang S., Stuckenschmidt H. An LSTM network-based genetic algorithm for integrated procurement and scheduling optimisation. International Journal of Production Research 2025; 63(11): 4036-4065.

Del Gallo M., Mazzuto G., Ciarapica FE, Bevilacqua M. Artificial intelligence to solve production scheduling problems in real industrial settings: A systematic literature review. Electronics 2023; 12(23): 4732.

Gen M., Cheng R. Genetic algorithms and engineering optimization. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons 2020.

Georgy M., Basily SY. Using genetic algorithms in optimizing construction material delivery schedules. Construction Innovation 2008; 8(1): 23-45.

Goldberg DE. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley 1989.

Haykin S. Neural networks: A comprehensive foundation (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 1999.

Huang CL. The construction of production performance prediction system for semiconductor manufacturing with artificial neural networks. International Journal of Production Research 1999; 37(6): 1387-1402.

Kamble SS., Gunasekaran A., Sharma R. Analysis of the driving and dependence power of Industry 4.0 technologies in smart manufacturing. Technological Forecasting and Social Change 2023; 187: 122211.

Li J., Wang Y., Zhang X. A hybrid artificial neural network and genetic algorithm approach for production scheduling under capacity constraints. Expert Systems with Applications 2023; 213: 118935.

Mahmud S. Modelling and optimizing supply chain integrated production scheduling problems. University of New South Wales (Australia) 2023.

Ojstersek R., Brezocnik M., Buchmeister B. Multi-objective optimization of production scheduling with evolutionary computation: A review. International Journal of Industrial Engineering Computations 2020; 11(3): 359-376.

Pinedo M. Scheduling: Theory, algorithms, and systems. New York, NY: Springer 2016.

Roeva O., Zoteva D., Roeva G., Ignatova M., Lyubenova V. An effective hybrid metaheuristic approach based on the genetic algorithm. Mathematics 2024; 12(23): 3815.

Wang L., Liu H., Xia M., Wang Y., Li M. A machine learning-based EMA-DCPM algorithm for production scheduling. Scientific Reports 2024; 14(1): 20810.

Zhang F., Nguyen S., Mei Y., Zhang M. Genetic programming for production scheduling. Singapore: Springer 2021.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1708-1731, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1708-1731, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Fen Bilimleri Dersi Işık Kavramı Üzerine Türkiye'de Yapılan Lisansüstü Tezlerin İncelenmesi

Özge KOL[1*]

[1]İstanbul Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, 34500, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0002-3566-1074
*Sorumlu yazar: ozgekol@beykent.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 06.03.2026
Kabul tarihi:12.04.2026
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Fen bilimleri
Işık kavramı
Döküman analizi

ÖZ

Işık kavramı, görme duyusunun işleyişini açıklaması ve optik teknolojilerin temelini oluşturması nedeniyle fen eğitimi alanında önemli bir araştırma konusudur. Bu araştırmada, Ocak 2015–Aralık 2025 yılları arasında Türkiye'de fen bilimleri dersi kapsamında ışık kavramına yönelik gerçekleştirilen lisansüstü tezler doküman analizi yöntemiyle incelenmiştir. Ulusal Tez Merkezi veri tabanında "ışık", "ışık ünitesi", "ışık konusu", "ışığın madde ile etkileşimi", "ışık kirliliği", "ışığın kırılması ve mercekler" ve "ışığın yansıması ve aynalar" anahtar kelimeleri kullanılarak toplam 91 teze ulaşılmıştır. Tezler; yayın yılı, yayın türü, üniversite, anabilim dalı, araştırma yöntemi, anahtar kelimeler, çalışma kitlesi ve katılımcılar açısından analiz edilmiştir. Bulgular, tezlerin en yoğun 2024 yılında yapıldığını, çoğunlukla Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi anabilim dallarında yürütüldüğünü ve en fazla 7. sınıf düzeyine odaklanıldığını göstermektedir. Ayrıca fen eğitimi, akademik başarı, tutum ve motivasyon anahtar kelimelerinin yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların, araştırmacıların literatürdeki eğilimleri ve boşlukları daha net görmelerine katkı sağlayacağı; özellikle doktora düzeyinde çalışmaların sınırlı olması, 3. ve 4. sınıf düzeylerinde araştırmaların bulunmaması ve güncel eğitim yaklaşımlarını ele alan çalışmaların azlığı dikkate alınarak gelecekte yapılacak araştırmalara yön gösterici olacağı düşünülmektedir.

An Examination of Postgraduate Theses on the Concept of Light in Science Education in Türkiye

Research Article

Article History:
Received: 06.03.2026
Accepted: 12.04.2026
Published online:15.06.2026

Keywords:
Science
Light concept
Document analysis

ABSTRACT

The concept of light is an important research topic in the field of science education because it explains the functioning of the sense of vision and forms the basis of optical technologies. In this study, postgraduate theses on the concept of light within the scope of science course in Türkiye between January 2015 and December 2025 were analysed by document analysis method. A total of 91 theses were reached by using the keywords "light", "light unit", "the subject of light", "the interaction of light with matter", "light pollution", "refraction of light and lenses" and "reflection of light and mirrors" in the Council of Higher Education Thesis Center database. Theses were analysed in terms of publication year, publication type, university, department, research method, keywords, study population and participants. The findings show that the highest number of theses were published in 2024, mostly conducted in the departments of Mathematics and Science Education, and mostly focused on the 7th grade level. In addition, it was determined that the keywords science education, academic achievement, attitude and motivation were commonly used. It is thought that the results obtained will

contribute to the researchers to see the trends and gaps in the literature more clearly; especially considering the limited studies at the doctoral level, the lack of studies at the 3rd, and 4th grade levels, and the scarcity of studies addressing current educational approaches, it is thought that it will be a guide for future research.

To Cite: Kol Ö. An Examination of Postgraduate Theses on the Concept of Light in Science Education in Türkiye. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1708-1731.

1. Introduction

Rapid technological developments and transformations in today's world require individuals to gain some competence to keep up with the age they live in. Keeping up with these changes and transformations can only be made possible by raising individuals who conduct research, analyse the data obtained, question the results, produce a product at the point of solving the problem and have innovation skills. In this context, it should not be forgotten that science and science education play a critical role in raising individuals with the aforementioned skills (Orhan, 2019). Science education aims to enable individuals to recognise problem situations, make decisions about these problem situations, and gain experience in order to organise their daily life activities in line with the decisions they make. In order to gain the aforementioned experiences, in science education, individuals should make sense of the events and phenomena in daily life with science concepts and actively use scientific skills in this process. In this context, restructuring science education to support individuals' scientific thinking and use of skills has gained importance. The science curriculum was updated in 2024 in order to catch up with the age and to raise individuals with the needs of the age, and the The Century Of Türkiye Education Model was adopted. In this model, it is emphasised that knowledge and skills are in an interaction that feeds each other in the learning process, and a holistic educational approach is adopted in which these knowledge and skills are transferred to different disciplines and interdisciplinary connections are established (Ministry of National Education [MoNE], 2024).

In the science curriculum, it is expected that learning-teaching processes will be enriched by using classroom, in-school and out-of-school learning environments, and abstract concepts will be made concrete by establishing relationships both between disciplines and skills and with daily life. In this context, light is one of the science concepts that are frequently encountered in daily life and with which interdisciplinary relationships can be established. Since the concept of light is open to misconceptions due to its abstract content in subjects such as reflection, refraction and interaction of light with matter, it maintains its importance as a concept in which innovative teaching approaches are frequently used and meaningful learning is tried to be achieved through interdisciplinary studies. A literature review reveals that many publications on the concept of light have been produced in different years in Türkiye (Ayvacı and Candaş, 2018; Görgülü Arı and Arslan, 2019; Bozdemir Yüzbaşıoğlu et al., 2020; Demirel and Özcan, 2021; Aksoy and Aydın, 2022; Karapınar and Balım, 2023; Asa and Çalış, 2024; Kaçıra Türkeri and Hacıoğlu, 2025). When the studies on the related concept are examined, the fact that the number of both articles and postgraduate theses is considerably high supports that the concept maintains its importance and popularity. When the literature was examined,

it was found that there were only two studies in Türkiye in which systematic literature review was conducted on the concept of light within the scope of science course. The first of these studies; Ayvacı and Altınok (2019) examined 32 theses in the Council of Higher Education Thesis Center (YÖKTEZ) between 2005 and 2018. The other study was conducted by Acar (2023); 47 theses and 51 articles on the relevant subject between 2012-2022 were analysed. In this study, 91 postgraduate theses (76 master's theses and 15 doctoral theses) on the concept of light in the science course in Türkiye between 2015-2025 were examined in terms of various variables.

The main reason for choosing the concept of "Light" in this study is that, despite the limited number of reviews and comprehensive studies in the literature, there is significant interest in this unit in postgraduate theses. Although the concept of light is a fundamental topic in physics and science education, its abstract nature, strong connection to daily life, and the widespread misconceptions it causes among students make it a frequently discussed topic in the literature. The study conducted by Değirmençay and Şahin (2020) also found that students have a high level of misunderstanding and difficulty in comprehending the concept of light. However, the limited number of reviews that comprehensively reveal the general trends and focuses of studies in this area, and the scattered nature of information in existing theses, limit the reflection of these findings in teaching processes. This study aims to systematically examine the research in question over the last decade, identify trends in the literature, and provide a data-based framework for future research and teaching practices. The findings are expected to contribute, in particular, to teachers' planning of the teaching process and to researchers' identification of new areas of study. In this context, the questions sought to be answered in the research are as follows:

1. How are graduate theses distributed according to their types?
2. How are graduate theses distributed by year?
3. How are graduate theses distributed by university?
4. How are graduate theses distributed by department?
5. How are the keywords used in graduate theses distributed?
6. How are graduate theses distributed according to the research methods used?
7. How are graduate theses distributed according to study groups?
8. How are graduate theses distributed according to the number of participants?

2. Method/Materials

In this section, information about the method used in the research, data collection process and data analyses are given.

2.1. Research Model

In this study, postgraduate theses on the concept of light within the scope of science course in Türkiye were analysed in terms of different variables. In order to find answers to the research questions,

qualitative research approach was adopted, and document analysis method was used. Document analysis is a powerful method that enables the systematic examination and interpretation of written or visual materials (Morgan, 2022). The studies to be included in document analysis are not selected randomly but according to predetermined rules.

2.2. Data Collection

The studies examined in this research are limited to master's and doctoral theses that addressed the concept of light within the scope of science course in Türkiye between 2015-2025. In order to reach the doctoral and master's theses, the keywords “light”, “light unit”, “the subject of light”, “the interaction of light with matter”, “light pollution”, “refraction of light and lenses” and “reflection of light and mirrors” were used in the Council of Higher Education Thesis Center (YÖKTEZ) database. The studies that included these keywords in the title of the thesis were examined in terms of whether they were related to the science course or not and included in the scope of the research. Those that were understood to be related to the science course were included in the scope of the research, and those that were not understood were first read the abstract part and the relationship with the science course was tried to be determined. In cases where it could not be determined, the method sections of the theses were analysed.

The following criteria were used in the selection of the studies included in the current research:

- Theses conducted within the scope of Science Course,
- Theses on the concept of light,
- Theses conducted in Türkiye between 2015-2025,
- Theses with access permission,
- Theses conducted in Turkish and English languages.

In addition, document analysis studies such as content analysis and meta-analysis studies were excluded since they did not serve the purpose of the research. In the study, a PRISMA Flowchart was prepared for the studies examined according to the determined inclusion criteria and is presented in Figure 1.

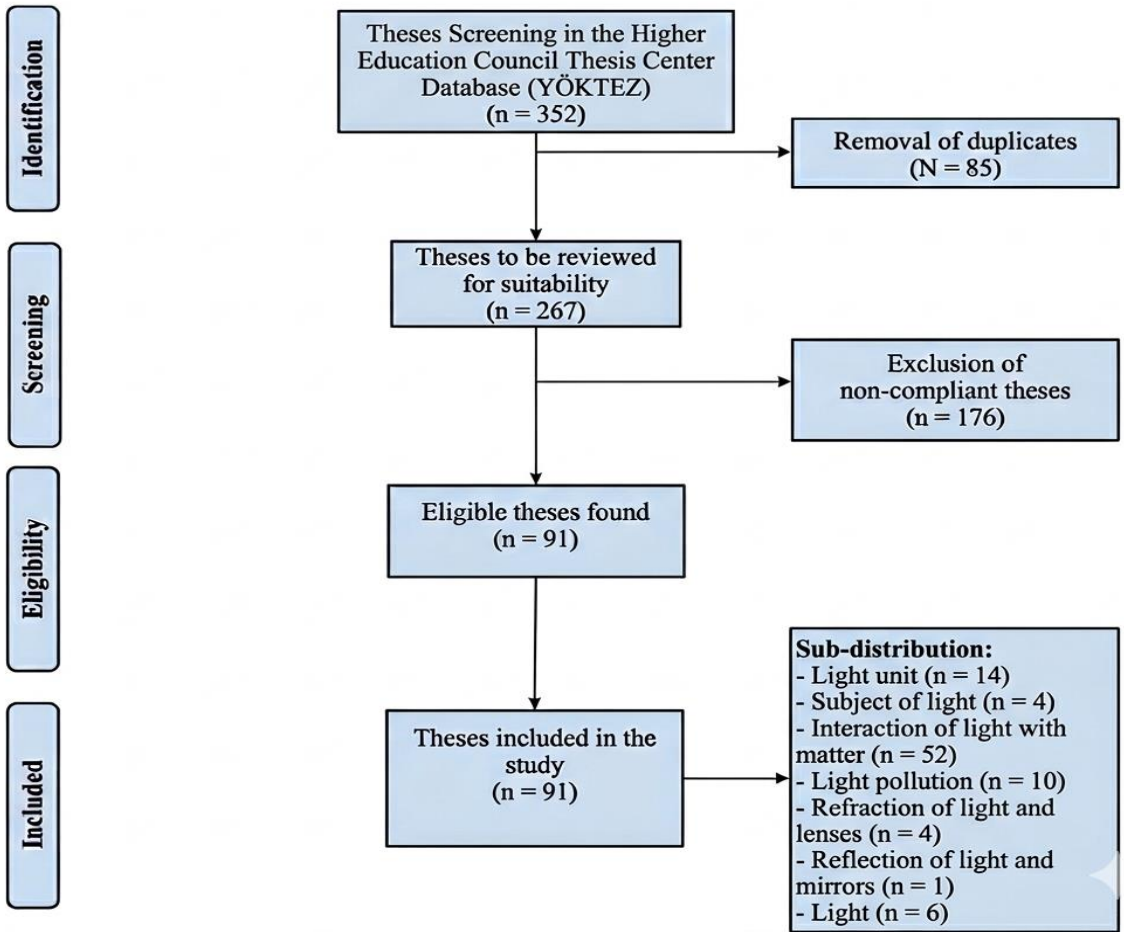


Figure 1. Prisma Flow Diagram (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews) (Page et al., 2021).

As a result, a total of 91 studies, 76 master's theses and 15 doctoral dissertations, which meet these criteria and which were studied on the concept of light in science, were analysed in this study. Information on the studies included in the analysis is presented in Table 1.

Table 1. Information about the studies included in the analysis

No	Author	Year	City	Research Type
1.	Absüsselam Z.	2022	Ankara	Doctoral Thesis
2.	Akça Z. A.	2023	Sakarya	Doctoral Thesis
3.	Akçimen Eren Z.	2024	Kilis	Master's Thesis
4.	Akdağ Z.	2024	Kayseri	Master's Thesis
5.	Akkaya S.	2020	Ordu	Master's Thesis
6.	Akkuş ÇS.	2025	Ankara	Master's Thesis
7.	Akgül G.	2018	Mersin	Master's Thesis
8.	Akın Yanmaz E.	2021	Giresun	Master's Thesis
9.	Arduç MA.	2023	Malatya	Doctoral Thesis
10.	Ateş S.	2019	Niğde	Master's Thesis
11.	Aydoslu M.	2018	Kırıkkale	Doctoral Thesis
12.	Aytekin A.	2018	Kocaeli	Doctoral Thesis
13.	Azaklı Şahin E.	2023	Ordu	Master's Thesis
14.	Balcı Çömez C.	2025	İstanbul	Doctoral Thesis
15.	Berberoğlu R.	2020	Uşak	Master's Thesis
16.	Çakır R.	2023	Ankara	Master's Thesis
17.	Çaldıran ÜG.	2022	Bursa	Master's Thesis

18.	Çalıkıranoğlu G.	2025	Kastamonu	Master's Thesis
19.	Çelik M.	2024	Antalya	Doctoral Thesis
20.	Çırak C.	2024	Giresun	Master's Thesis
21.	Çiftçi T.	2025	Adıyaman	Master's Thesis
22.	Çömez G.	2024	İstanbul	Master's Thesis
23.	Daş Ö.	2019	Kars	Master's Thesis
24.	Demirci E.	2023	Ankara	Master's Thesis
25.	Demirel R.	2021	Aksaray	Doctoral Thesis
26.	Demirer GM.	2015	Kırıkkale	Master's Thesis
27.	Deve F.	2015	Rize	Master's Thesis
28.	Doğan Ş.	2025	İstanbul	Master's Thesis
29.	Doğru M.	2023	Bursa	Master's Thesis
30.	Ekici S.	2025	Çanakkale	Master's Thesis
31.	Er Ö.	2018	Manisa	Master's Thesis
32.	Er SA.	2024	Konya	Master's Thesis
33.	Erol S.	2022	Trabzon	Master's Thesis
34.	Fidan S.	2024	Trabzon	Master's Thesis
35.	Gül ZO.	2019	Kocaeli	Master's Thesis
36.	Gülüm Y.	2024	Bolu	Master's Thesis
37.	Güner Ö.	2023	Giresun	Master's Thesis
38.	Güneş M.	2025	Konya	Master's Thesis
39.	Güneş Erez L.	2024	Rize	Master's Thesis
40.	Gürsel FG.	2016	İstanbul	Master's Thesis
41.	Hasanoğlu Z.	2025	İstanbul	Master's Thesis
42.	Hassan AH.	2015	Kırıkkale	Master's Thesis
43.	Ilıcan Ö.	2019	Ankara	Master's Thesis
44.	İşbaralı M.	2017	Kars	Master's Thesis
45.	Kaçıra Türkeri S.	2022	Giresun	Master's Thesis
46.	Kahveci I.	2024	Bayburt	Master's Thesis
47.	Kaplan E.	2017	Kayseri	Master's Thesis
48.	Kara E.	2024	Çanakkale	Master's Thesis
49.	Karacalı K.	2022	Bursa	Doctoral Thesis
50.	Karagöz E.	2024	Kastamonu	Master's Thesis
51.	Karakuzu B.	2021	Kayseri	Master's Thesis
52.	Karapınar A.	2023	İzmir	Doctoral Thesis
53.	Kayhan Ö.	2019	Konya	Master's Thesis
54.	Kesler S.	2021	Erzincan	Master's Thesis
55.	Kılınç D.	2024	Ankara	Master's Thesis
56.	Kol Ö.	2025	Samsun	Doctoral Thesis
57.	Köseoğlu E.	2015	Muğla	Master's Thesis
58.	Küçük A.	2016	Rize	Master's Thesis
59.	Mazlum E.	2015	Trabzon	Master's Thesis
60.	Mor S.	2016	Kars	Master's Thesis
61.	Namlı M.	2018	Elazığ	Master's Thesis
62.	Özdoğru Şenel S.	2016	Ankara	Master's Thesis
63.	Özer M.	2019	Giresun	Master's Thesis
64.	Sağlam A.	2019	Antalya	Master's Thesis
65.	Sak M.	2018	Kocaeli	Master's Thesis
66.	Sarı K.	2025	İzmir	Doctoral Thesis
67.	Sarıçetin Z.	2021	Mersin	Master's Thesis
68.	Savaş E.	2020	Balıkesir	Doctoral Thesis
69.	Sayın Ş.	2015	Manisa	Master's Thesis
70.	Serter Bal S.	2021	Aydın	Master's Thesis
71.	Söyleyici H.	2018	Edirne	Master's Thesis
72.	Sözen M.	2022	Denizli	Master's Thesis
73.	Subaşı Y.	2022	İstanbul	Doctoral Thesis
74.	Şeker Küçükoğlu B.	2024	Erzurum	Master's Thesis
75.	Tan E.	2019	Erzurum	Doctoral Thesis
76.	Tanrıverdi E.	2021	Ordu	Master's Thesis

77.	Tezcan E.	2022	İstanbul	Master's Thesis
78.	Tulum M.	2017	Antalya	Master's Thesis
79.	Tulum G.	2019	Samsun	Master's Thesis
80.	Yalınalp Z.	2023	Tokat	Master's Thesis
81.	Yaylacı R.	2024	Ankara	Master's Thesis
82.	Yazıcıoğlu S.	2017	Ankara	Master's Thesis
83.	Yel E.	2025	Erzurum	Master's Thesis
84.	Yenidünya ÖA.	2024	Erzurum	Master's Thesis
85.	Yıldırım İ.	2020	Kocaeli	Master's Thesis
86.	Yıldırım N.	2022	Aksaray	Master's Thesis
87.	Yıldırım N.	2025	Malatya	Master's Thesis
88.	Yıldızbaş H.	2017	Konya	Master's Thesis
89.	Yılmaz Baltabıyık D.	2019	İstanbul	Master's Thesis
90.	Yılmaz T.	2016	Yozgat	Master's Thesis
91.	Yılmaz AE.	2019	Bolu	Master's Thesis

2.3. Data Analyses

In this study, the descriptive analysis method was used in the analysis of the documents. Descriptive analysis is a qualitative data analysis method that involves organizing, summarizing, and interpreting the obtained data according to predetermined themes. The main purpose of this method is to present the findings to the reader in a systematic, understandable, and interpreted manner (Yıldırım and Şimşek, 2003). The theses included in the study were coded and evaluated according to the categories of 'type of thesis, year of publication, university, department, research method and keywords, study population and participants of the study'. The evaluation of the data was carried out independently by two different researchers, and the codings with disagreement were compared and arrangements were made after consensus was reached. The percentage of agreement of the data evaluated by the researchers was calculated using Miles and Huberman's (1994) formula;

(Agreement) / (Agreement + Disagreement) x 100 (1)

Equation (1). The level of consistency between the evaluations of the researchers was found to be 98%. The researcher analysed the categories of publication types, publication years, university, department, keywords, research method, study population and participants of the study separately. The data obtained are presented separately in tables and figures under the title of findings.

3. Findings

In this section, the results of the analysis of the data obtained as a result of examining the research problems by document analysis method are presented. Firstly, the distribution of the postgraduate theses obtained from the Council of Higher Education Thesis Center (YÖKTEZ) database between 2015-2025 within the scope of the concept of light is shown in Figure 2.

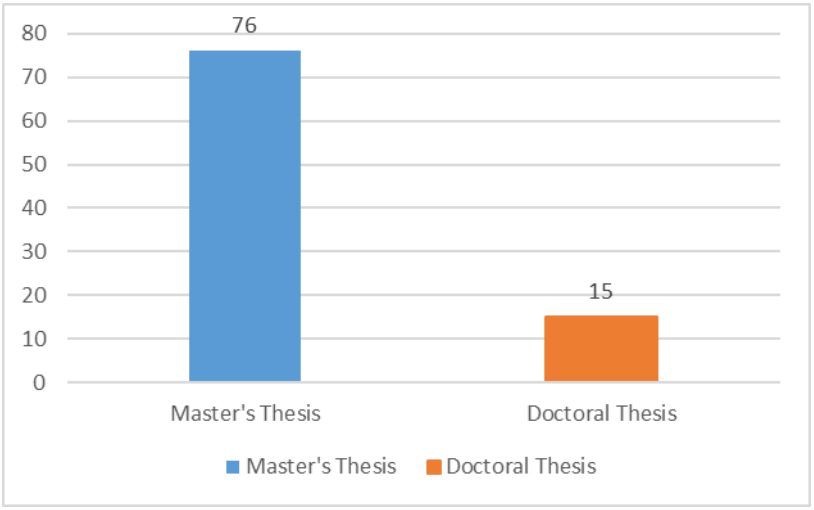


Figure 2. Distribution of postgraduate theses by type.

When Figure 2 is analysed, it is seen that a total of 91 studies conducted on the concept of light within the scope of science course in Türkiye between the years 2015-2025. When examining the distribution of these studies, it was determined that 83.52% were master's theses and 16.48% were doctoral theses. The distribution of the publications analysed in the study according to years is presented in Figure 3.

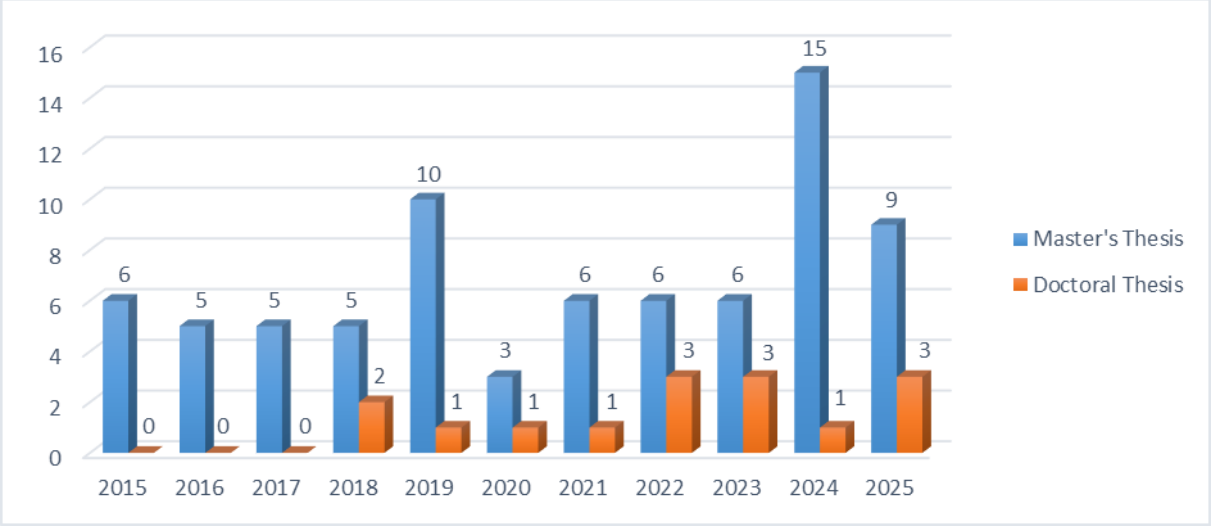


Figure 3. Distribution of graduate theses by year

When the distribution of the studies on the concept of light in Türkiye between 2015 and 2025 is analysed in Figure 3, it is seen that a fluctuating course is followed. In line with the findings obtained; It was concluded that the least study (f=4) on the concept of light was carried out in 2020 and the most studies were carried out in 2024. It is noteworthy that no doctoral thesis was produced on the concept of light in 2015, 2016 and 2017, and the number of doctoral theses produced since 2018 is very limited compared to the number of master's theses. In this context, in order to see more clearly the number of theses and the universities from which these theses were produced, the universities where the postgraduate theses were carried out are given in Table 2.

Table 2. Distribution of universities where graduate theses were completed

Name of the University	Master's Thesis (f)	Doktoral Thesis (f)	Total Graduate Theses (f)
Gazi University	7	-	7
Giresun University	6	-	6
Atatürk University	3	1	4
Kocaeli University	3	1	4
Necmettin Erbakan University	4	-	4
Akdeniz University	2	1	3
Bursa Uludağ University	2	1	3
Erciyes University	3	-	3
Kafkas University	3	-	3
Kırıkkale University	2	1	3
Ordu University	3	-	3
Marmara University	1	2	3
Recep Tayyip Erdoğan University	3	-	3
Yıldız Teknical University	3	-	3
Aksaray University	1	1	2
Bolu Abant İzzet Baysal University	2	-	2
Çanakkale Onsekiz Mart University	2	-	2
Dokuz Eylül University	-	2	2
İnönü University	1	1	2
Kastamonu University	2	-	2
Manisa Celal Bayar University	2	-	2
Mersin University	2	-	2
Ondokuz Mayıs University	1	1	2
Trabzon University	2	-	2
Adıyaman University	1	-	1
Aydın Adnan Menderes University	1	-	1
Bahçeşehir University	1	-	1
Balıkesir University	-	1	1
Bayburt University	1	-	1
Bozok University	1	-	1
Erzincan Binali Yıldırım University	1	-	1
Fırat University	1	-	1
Hacettepe University	-	1	1
İstanbul University	1	-	1
Karadeniz Teknical University	1	-	1
Kilis 7 Aralık University	1	-	1
Muğla Sıtkı Kocaman University	1	-	1
Niğde Ömer Halisdemir University	1	-	1
Pamukkale University	1	-	1
Sakarya University	-	1	1
Trakya University	1	-	1

Name of the University	Master's Thesis (f)	Doktoral Thesis (f)	Total Graduate Theses (f)
Tokat Gaziosmanpaşa University	1	-	1
Uşak University	1	-	1
Total	**76**	**15**	**91**

When Table 2 is analysed, it is seen that the postgraduate theses on the concept of light in Türkiye were conducted in 43 different universities and these theses were mostly conducted in Gazi University and Giresun University. When evaluated in terms of doctoral theses, it is seen that they were mostly conducted at Marmara University (f=2) and Dokuz Eylül University (f=2). The departments to which the postgraduate theses were affiliated are presented in Table 3.

Table 3. Departments where graduate theses were conducted

Departments	Master's Thesis (f)	Doktoral Thesis (f)	Total Thesis (f)	Percent (%)
Educational Sciences	3	-	3	3.30
Primary Education	13	5	18	19.78
Mathematics and Science Education	44	10	54	59.34
Secondary School Mathematics and Science Education	1	-	1	1.10
Mathematics and Science	4	-	4	4.39
Science Education Department	9	-	9	9.89
Physics	1	-	1	1.10
Computer and Instructional Technologies Education	1	-	1	1.10
Total	**76**	**15**	**91**	**100.00**

When the departments to which the theses included in the study belonged were examined, it was determined that 59.34% of the theses written on the concept of light were conducted in the Department of Mathematics and Science, and 19.78% were conducted in the Department of Primary Education (Table 3). It was determined that a total of 235 different keywords were used in 91 postgraduate theses on the concept of light between 2015-2025. The word cloud of these keywords is given in Figure 4.

Figure 4 shows the most frequently used keywords in postgraduate theses in larger font sizes. The 15 most frequently used keywords and their frequencies are as follows: Science Education (f=42), Academic Success (f=23), Light (f=16), Attitude (f= 13), Motivation (f=12), Light-Matter Interaction (f=10), STEM (F= 8), Light and Sound Unit (f= 5), Light Pollution (f=5), Web 2.0 Tools (f=5), Scientific Process Skills (f=5), Argumentation (f=4), Concept Cartoon (f=4), Misconception (f=4) and Algodo (f=4). The postgraduate theses were evaluated in terms of the methods used and the findings are given in Table 4.



Figure 4. Word cloud of keywords in graduate theses

Table 4. Distribution of graduate theses according to methodology

	Master's Thesis		Doktoral Thesis	
Research Methodology	**Frequency (f)**	**Percent (%)**	**Frequency (f)**	**Percent (%)**
Quantitative	40	52.63	6	40.00
Qualitative	11	14.47	-	-
Mixed	25	32.89	9	60.00
Total	**76**	**100.00**	**15**	**100.00**

According to the data in Table 4, it was determined that there are different trends in method selection in master's and doctoral theses; quantitative research methods were preferred in 52.63% of master's theses, while mixed research methods were preferred in 60% of doctoral theses. It can be concluded that in doctoral theses, mixed methods, in which quantitative and qualitative research methods are used together, are used more frequently and comprehensive studies are carried out. The findings related to the study populations in which the postgraduate theses were conducted, which is another problem of the research, are presented in Table 5.

In the light of the data in Table 5, it was concluded that the concept of light was mostly addressed at the 7th grade level in master's (67.11%) and doctoral (73.33%) theses. Furthermore, it is noteworthy that the subject matter is addressed at almost every level in master's theses, but is limited to the seventh level in doctoral theses, with no studies at the third and fourth levels.

The studies included in the research were analysed in terms of the number of participants and the findings are presented in Table 6.

Table 5. Distribution of graduate theses by study group

Working Group	Master's Thesis		Doktoral Thesis	
	(f)	(%)	(f)	(%)
11th grade students	1	1.32	-	-
10th grade students	1	132	-	-
8th grade students	2	2.63	1	6.67
7th grade students	51	67.11	11	73.33
7th grade students + parent	1	1.32	-	-
7th grade students + teacher	1	1.32	1	6.67
6-7-8th grade students	1	1.32	1	6.67
6-7th grade students	1	1.32	-	-
6th grade students	4	5.26	-	-
5 th grade students	5	6.58	1	6.67
5 th grade students + teacher	1	1.32	-	-
5-6-7-8 th grade students	1	1.32	-	-
4 th grade students	1	1.32	-	-
3 th grade students	1	1.32	-	-
3 th grade students + parent	1	1.32	-	-
Teacher candidate	2	2.63	-	-
Textbooks	1	1.32	-	-
Total	**76**	**100.00**	**15**	**100.00**

Table 6. Distribution of graduate theses by participant number

Number of Participants	Master's Thesis		Doktoral Thesis	
	(f)	(%)	(f)	(%)
0-50	40	52.63	4	26.67
51-100	28	36.84	8	53.33
101 ≥	8	10.53	3	20.00
Total	**76**	**100.00**	**15**	**100.00**

When Table 6 is analysed, it is seen that there is a significant difference in terms of the most preferred number of participants in master's and doctoral theses. While 52.63% of master's theses included between 0 and 50 participants, 53.33% of doctoral theses included between 51 and 100 participants.

4. Discussion and Conclusion

In this study, the postgraduate theses on the concept of light in the science course between 2015-2025 in Türkiye were analysed in terms of various variables. It was determined that there were only two studies in Türkiye in which systematic literature review was conducted on the concept of light in the science course. The first of these studies was conducted by Ayvacı and Altınok (2019) and the second by Acar (2023). For this reason, the results obtained from this study are compared with these two studies and interpreted below.

In this study, 76 master's theses and 15 doctoral theses were reached. This result shows that the studies on the subject of light at the doctoral level are limited and there is a need for more doctoral theses on the related concept. Acar (2023) found that only 9 of 47 theses on light between 2012 and 2022 were at the doctoral level, and Ayvacı and Altınok (2019) found that only 7 of 32 theses on the concept of light between 2005 and 2018 were doctoral theses. Both studies support the results obtained from this study. Not only in science education, but also in postgraduate surveys on physics education (Çetinkaya and Yılmaz Senem, 2024) and mathematics education (Küçükay, 2022; Özkan Hıdıroğlu, 2026), it is observed that the number of doctoral theses is in the minority. This situation may be due to the limited number of doctoral programs in universities, the small student quotas allocated to doctoral programs, and the difficulty of the admission requirements for doctoral education processes.

When the distribution of the studies according to years is examined; it is noteworthy that the least number of postgraduate theses on the relevant concept was in 2020. This result can be interpreted as that a limited number of theses were produced due to the disruption of thesis applications due to the transition of schools to distance education due to the Covid-19 Pandemic, which has a global impact. In 2024, it is seen that the highest number of thesis studies were produced in the related concept. In this context, it can be said that the concept of light has recently come to the fore with current approaches and technological developments in science, but more academic studies have been carried out at the master's level. Especially among the results obtained, the fact that no doctoral level study was carried out in 2015, 2016 and 2017 is an important finding and confirms that there is a need for studies with current approaches, methods and technological support.

When the distribution of the studies according to universities is examined; it was found that 43 postgraduate studies on the concept of light were conducted in different universities. This result shows that the related concept is widely addressed throughout Türkiye; Gazi University and Giresun University in master's level theses, and Marmara University and Dokuz Eylül University in doctoral level theses have focused on this issue. In various studies examining the general trends of postgraduate theses in science education, the analysis results regarding the university producing the most postgraduate publications similarly show that Gazi University stands out (Bakar Çörez and Ertuğ, 2023; Bilen and Çapras, 2024; Balaban Zor, 2025). This concentration is based on the academic expertise, strong background, research culture and infrastructure of these universities in science education. According to the departments, it was concluded that the studies were carried out mostly in the Department of Mathematics and Science Education (f= 54) and then mostly in the Department of Primary Education (f=18). In the light of this finding, since the number of studies on the related concept is limited in the departments of science education, physics education, computer and instructional technology education, new studies can be planned, and their number can be increased.

When the keywords used in the studies are evaluated, it can be said that academic achievement, attitude and motivation are frequently focused on the concept of light, in summary, cognitive and affective effects are examined. Similarly, the study conducted by Bakar Çörez and Ertuğ (2023) found

that the most frequently examined variables in postgraduate theses were academic achievement, student opinions, attitudes, and motivation. Since the frequencies of contemporary teaching approaches such as 21st century skills, interdisciplinary integration (STEM, STEAM, etc.), web-based teaching, problem-based teaching or project-based teaching are less frequent in the studies, it can be suggested that researchers should focus on these areas.

In terms of research methods, it was concluded that quantitative research was frequently preferred in master's theses and mixed research was frequently preferred in doctoral theses. This result shows that doctoral dissertations aim to integrate quantitative and qualitative data collection and interpretation in order to conduct them more comprehensively. The results of the studies conducted by Bakar-Çörez and Ertuğ (2023) and Genc (2020) also show that postgraduate thesis studies in science education are largely carried out using quantitative research methods, followed by mixed research methods. Özcan (2020), in her study examining doctoral theses in the field of science education, stated that mixed research methods were the most frequently preferred. The results of studies by Acar (2023) and Ayvacı and Altınok (2019) also support this research finding; they conclude that quantitative research is mostly preferred in postgraduate theses on the concept of light. Given the limited number of qualitative studies conducted on this subject, it is recommended that future researchers in this field take this into consideration.

When the grade levels in the studies were analysed, it was determined that the 7th grade level was used most frequently in both master's and doctoral theses. In addition, while there are studies at almost every grade level in master's theses, there are no studies at the 3rd and 4th grade levels in doctoral theses. It is important for researchers who will plan a study on the related concept to take this finding into consideration and fill the gap in the literature. In the study conducted by Ayvacı and Altınok (2019), it was determined that the most studied sample was 7th grade with 56.25%, which supports the result of this study. When the theses were analysed in terms of the number of participants, it was concluded that while samples between 0-50 people were used in master's theses, larger samples between 51-100 people were used in doctoral theses. It is important to use large samples in terms of generalisability of the results of the study. The findings of this research demonstrate significant consistency when compared with general trends in the science education literature. Analysis of postgraduate thesis studies in science education conducted by Bakar Çörez and Ertuğ (2023) and Genc (2020) also revealed that the most common studies involved 7th-grade students with sample groups of 1-50 and 51-100 students.

5. Recommendations

The findings obtained from this study reveal that studies on the concept of light in the field of science between 2015 and 2025 gradually increased, especially after the pandemic in 2020, and the most publications were produced in 2024. However, the current situation also points to some limitations in

terms of research diversity and stakeholder participation. In this direction, the following suggestions can be developed:

- Researchers who will plan a study on the concept of light are advised to plan by taking into consideration the low number of studies especially at the doctoral level, the lack of studies at some grade levels (3rd, 4th and 6th grades), and the lack of studies addressing current educational approaches, and to contribute to the gap in the literature.
- Diversification of research topics: Themes such as 'academic achievement', 'science education', 'science teaching', "attitudes" and 'motivation' stand out in the keyword analysis. These keywords do not reflect the current orientations of the field. It is recommended to conduct interdisciplinary studies by associating the concept of light with current issues and different disciplines such as 21st century skills, artificial intelligence and sustainability.
- International comparative research: Considering that this research is limited to studies conducted in Türkiye, it is recommended to conduct comparative studies with science education models for the concept of light in different countries. Such studies may contribute to the positioning of Turkish practices on a global scale.

Artificial Intelligence Usage Statement

In this research, the ChatGPT generative artificial intelligence tool was used for English translation. The accuracy of the information used has been checked by the author.

Ethics Committee Approval Information

Since the theses and articles in this research are examined as documents accessible to all researchers and readers, ethical committee approval is not required.

References

Absüsselam Z. The impact of augmented and virtual reality technologies on the use of light microscopy in science education. Hacettepe University Doctoral Thesis, page no: 201, Ankara, Türkiye, 2022.

Acar E. A systematic literature review of studies related to the topic of light. Balıkesir University Master's Thesis, page no: 119, Balıkesir, Türkiye, 2023.

Akça Z. A mixed method research on interdisciplinary science education. Sakarya University Doctoral Thesis, page no: 254, Sakarya, Türkiye, 2023.

Akçimen Eren Z. This study examines the impact of activities supported by the Algodoo program on students' academic achievement in the seventh-grade unit on the interaction of light and matter, and investigates students' opinions about the Algodoo program. Kilis 7 Aralık University Master's Thesis, page no: 101, Kilis, Türkiye, 2024.

Akdağ Z. Preparation, implementation, and evaluation of a Web 2.0-supported STEM activities modüle. Erciyes University Master's Thesis, page no: 190, Kayseri, Türkiye, 2024.

Akgül G. The impact of using creative drama in digital storytelling processes in science and technology lessons on achievement, attitudes, and scientific creativity. Mersin University Master's Thesis, page no: 180, Mersin, Türkiye, 2018.

Akkaya S. The effect of the Plickers app on the academic achievement and attitudes towards science class of 7th-grade students. Ordu University Master's Thesis, page no: 110, Ordu, Türkiye, 2020.

Akkuş ÇS. The impact of the 5E learning model, implemented with Web 2.0 tools and project applications, on students' academic achievement and digital literacy. Gazi University Master's Thesis, page no: 146, Ankara, Türkiye, 2025.

Akın Yanmaz E. The effect of guidance materials developed according to the context-based learning approach on the conceptual understanding of 7th-grade middle school students: the example of "mirrors and light absorption". Giresun University Master's Thesis, page no: 208, Giresun, Türkiye, 2021.

Aksoy İ., Aydın A. The effect of the flipped classroom model on teaching the unit on reflection and absorption of light in mirrors in 7th grade science. Karaelmas Journal of Educational Sciences, 2022; 10(2): 203-223.

Arduç MA. The effect of argumentation activities in teaching socioscientific issues on 7th-grade students' science literacy, attitudes towards socioscientific issues, critical thinking tendencies, and decision-making skills. İnönü University Doctoral Thesis, page no: 398, Malatya, Türkiye, 2023.

Asa A., Çalış S. The effect of home experiments with simple materials on scientific process skills and learning motivation in distance education: The Light Unit. Journal of National Education 2024; 53(241): 297-330.

Ateş S. An examination of the changes in light and sound units in the history of Turkish science education from the perspective of the anthropological theory of didactics. Niğde Ömer Halisdemir University Master's Thesis, page no: 127, Niğde, Türkiye, 2019.

Aydoslu M. Identifying middle school students' cognitive structures and misconceptions about light and reflection using alternative measurement and evaluation techniques. Kırıkkale University Doctoral Thesis, page no: 174, Kırıkkale, Türkiye, 2018.

Aytekin A. Examining the impact of materials and experimental activities developed for the "Propagation of Light and Sound" unit in the 5th grade science curriculum on students' academic achievement and motivation. Kocaeli University Doctoral Thesis, page no: 140, Kocaeli, Türkiye, 2018.

Ayvacı HŞ., Altınok O. Thematic analysis of theses conducted in Turkey: The example of the concept of light. Trakya Education Journal 2019; 9(3): 549-563.

Ayvacı HŞ., Candaş B. The level of understanding of light reflection among students at different educational levels. Journal of Computer and Education Research 2018; 6(11): 1-32.

Azaklı Şahin E. The effect of a flipped classroom model, supported by a Padlet digital whiteboard application, on academic achievement and attitude in the light unit of a 5th grade science lesson. Ordu University Master's Thesis, page no: 127, Ordu, Türkiye, 2023.

Bakar Çörez A., Ertuğ R. Investigation of theses on augmented reality applicatıons in secondary school science classes. Journal of Research in Education and Teaching 2023; 12(2): 107-120.

Balaban Zor M. A Descriptive analysis of theses on 21st-century skills in the field of science education in Turkey (2018–2025). Premium e-Journal of Social Sciences 2025, 9(56): 635–644.

Balcı Çömez C. Examining the impact of a brain-based learning approach, enriched with virtual lab applications in science classes, on middle school students' academic achievement, motivation, and 21st-century skills. Marmara University Doctoral Thesis, page no: 366, İstanbul, Türkiye, 2025.

Berberoğlu R. The impact of mobile learning-based applications on students' academic achievement, attitudes, motivation, and attitudes towards mobile learning in science classes. Uşak University Master's Thesis, page no: 139, Uşak, Türkiye, 2020.

Bilen D., Çapras G. Thematic analysis of theses on learning and teaching based on socio-scientific issues in the field of natural sciences. Western Anatolia Journal of Educational Sciences 2024; 15(3): 2525-2545.

Bozdemir Yüzbaşıoğlu H., Ezberci Çevik E., Kurnaz MA. Contextualized knowledge of reflection and diffraction among prospective science teachers. Van Yüzüncü Yıl University Faculty of Education Journal 2020; 17(1): 722-740.

Çakır R. Technology-supported science teaching: attitudes, achievement, motivation, and student opinions. Gazi University Master's Thesis, page no: 145, Ankara, Türkiye, 2023.

Çaldıran ÜG. The impact of a new generation question-based science teaching approach in online learning environments on students' academic achievement and scientific process skills. Bursa Uludağ University Master's Thesis, page no: 100, Bursa, Türkiye, 2022.

Çalıkıranoğlu G. Examining the effect of teaching supported by biomimicry activities in the unit on the interaction of light with matter in a 7th grade science lesson. Kastamonu University Master's Thesis, page no: 98, Kastamonu, Türkiye, 2025.

Çelik M. The impact of a coaching cycle focused on science literacy on teachers' technological pedagogical content knowledge and students' attitudes towards science literacy and academic achievement. Akdeniz University Doctoral Thesis, page no: 455, Antalya, Türkiye, 2024.

Çetinkaya G., Yılmaz Senem B. Analysis of postgraduate thesis studies focusing on computer-assisted instruction in physics education in Turkey. Karaelmas Journal of Educational Sciences. 2024; 12(2): 106-128.

Çırak C. Developing middle school students' views on the nature of science and scientific inquiry through a problem-based learning approach. Giresun University Master's Thesis, page no: 139, Giresun, Türkiye, 2024.

Çiftçi T. The impact of STEAM education, based on scientific inquiry, on students' academic achievement, career choices, STEAM attitudes, and scientific creativity. Adıyaman University Master's Thesis, page no: 380, Adıyaman, Türkiye,2025.

Çömez G. The effect of an argumentation-based flipped learning model on students' academic achievement and critical thinking tendencies. Yıldız Technical University, Master's Thesis, page no: 176, İstanbul, Türkiye, 2024.

Daş Ö. The effect of family education materials on the success of 3rd grade primary school students in the unit on light and sound around us. Kafkas University Master's Thesis, page no: 98, Kars, Türkiye, 2019.

Değirmençay ŞA., Şahin Yİ. Misconceptions of third grade students in terms of concepts such as force, matter, light and sound. European Journal of Education Studies 2020; 7(2): 258-273.

Demirci E. Examining the impact of Arduino-based STEM activities on light pollution on science teacher candidates' awareness of STEM education, attitudes towards technology, and the environment. Gazi University Master's Thesis, page no: 114, Ankara, Türkiye, 2023.

Demirel R. The impact of teaching the topic of light through argumentation-supported design-based science and engineering applications on 7th-grade students' 21st-century life skills and learning outcomes. Aksaray University Doctoral Thesis, page no: 332, Aksaray, Türkiye, 2021.

Demirel R., Özcan H. The effect of argumentation-supported science and engineering applications on 7th-grade students' achievement in the topic of light. Aksaray University Journal of Social Sciences Institute 2021; 5(1): 100-111.

Demirer GM. Examining the effectiveness of simulations in resolving misconceptions: the example of a light and sound unit. Kırıkkale University Master's Thesis, page no: 178, Kırıkkale, Türkiye, 2015.

Deve F. The impact of a science history-supported light unit on 7th-grade students' understanding of the nature of science. Recep Tayyip Erdoğan University Master's Thesis, page no: 154, Rize, Türkiye, 2015.

Doğan Ş. Examining the effects of AI-assisted science instruction on middle school students' academic achievement and attitudes. Yıldız Technical University Master's Thesis, page no: 137, İstanbul, Türkiye, 2025.

Doğru M. Examining the effects of the PQ4R metacognitive reading strategy on metacognitive thinking, reading comprehension, and science academic achievement in 7th-grade students. Bursa Uludağ University Master's Thesis, page no: 105, Bursa, Türkiye, 2023.

Ekici S. The effect of interactive computer-assisted game applications in the classroom on students' academic achievement and attitudes. Çanakkale Onsekiz Mart University, page no: 88, Master's Thesis, Çanakkale, Türkiye, 2025.

Er Ö. The effect of teaching based on alternative assessment approaches on students' academic achievement and attitudes in the light unit of the 7th grade science and technology lesson. Manisa Celal Bayar University Master's Thesis, page no: 313, Manisa, Türkiye, 2018.

Er SA. The effectiveness of flipped teaching in science education. Necmettin Erbakan University Master's Thesis, page no: 129, Konya, Türkiye, 2024.

Erol S. Evaluation of the e-portfolio creation process of seventh-grade students in science class. Trabzon University Master's Thesis, page no: 166, Trabzon, Türkiye, 2022.

Fidan S. In the unit on the interaction of light with matter, this study evaluates the impact of using Web 2.0 tools on the development of life skills. Trabzon University Master's Thesis, page no: 171, Trabzon, Türkiye, 2024.

Genc HN. A content analysis of theses on concept cartoons in science education: The case of Türkiye (2007-2019). International Journal of Humanities and Education (IJHE), 2020; 6(13): 267-290.

Görgülü Arı A., Arslan K. To determine student opinions regarding the materials used in the "light and absorption" unit of the science course. International Journal of Field Education 2019; 5(1): 111-124.

Gül ZO. The effect of the 5E teaching model, supported by Algodoo software, on students' academic achievement and motivation in the "light" unit of the seventh-grade science lesson. Kocaeli University Master's Thesis, page no: 88, Kocaeli, Türkiye, 2019.

Gülüm Y. The effect of design-based science teaching on increasing 7th-grade students' awareness of the technology-environment relationship: sustainable (green) building. Bolu Abant İzzet Baysal University Master's Thesis, page no: 161, Bolu, Türkiye, 2024.

Güner Ö. Examining the impact of an argumentation-based science learning approach on students' 21st-century competencies, reflective thinking skills, and perceptions of argumentation. Giresun University Master's Thesis, page no: 186, Giresun, Türkiye, 2023.

Güneş Erez L. Evaluation of teaching materials for the 7th grade unit on the interaction of light and matter, to be implemented in out-of-classroom learning environments. Recep Tayyip Erdoğan University Master's Thesis, page no: 140, Rize, Türkiye, 2024.

Güneş M. The effect of the flipped learning model on 7th-grade students' motivation towards science education and their digital literacy. Necmettin Erbakan University Master's Thesis, page no: 91, Konya, Türkiye, 2025.

Gürsel FG. The effect of metacognitive-based teaching method on students' metacognitive awareness, attitudes, and achievement in the seventh-grade light unit. İstanbul University Master's Thesis, page no: 113, İstanbul, Türkiye, 2016.

Hasanoğlu Z. The effect of using Algodoo in science education on the learning of students with specific learning disabilities. Yıldız Technical University Master's Thesis, page no: 100, İstanbul, Türkiye, 2025.

Hassan AH. The effect of physics instruction based on the simulation-supported 5E teaching model on academic achievement and attitude. Kırıkkale University Master's Thesis, page no: 133, Kırıkkale, Türkiye, 2015.

Ilıcan Ö. Examining student achievement in the topic of light and shadow using different measurement techniques, considering learning style, school type, and gender variables. Gazi University Master's Thesis, page no: 112, Ankara, Türkiye, 2019.

İşbaralı M. The impact of family education materials on middle school students' success in the light unit and family participation activities. Kafkas University Master's Thesis, page no: 99, Kars, Türkiye, 2017.

Kaçıra Türkeri S. The impact of technology integration on students' academic achievement, attitudes, and motivation in teaching the unit on the interaction of light with matter. Giresun University Master's Thesis, page no: 175, Giresun, Türkiye, 2022.

Kaçıra Türkeri S., Hacıoğlu Y. The ımpact of technology integration on students' academic achievement, attitudes, and motivation in teaching the unit on the interaction of light with matter. Journal of Science, Mathematics, Entrepreneurship and Technology Education 2025; 8(3): 287-307.

Kahveci I. The effect of blended learning approach on academic achievement in 7th grade science class. Bayburt University Master's Thesis, page no: 92, Bayburt, Türkiye, 2024.

Kaplan E. Identifying misconceptions about light and sound among 6th-grade students using concept tests, concept cartoons, and semi-structured interviews. Erciyes University Master's Thesis, page no: 170, Kayseri, Türkiye, 2017.

Kara E. The Impact of the argumentation-based science learning approach used in 7th-grade science class on students' science learning skills, motivation, and achievement. Çanakkale Onsekiz Mart University Master's Thesis, page no: 113, Çanakkale, Türkiye, 2024.

Karacalı K. The Impact of argumentation-based teaching used in science labs on students' academic achievement, inquiry-based learning skills, and creativity. Bursa Uludağ University Doctoral Thesis, page no: 273, Bursa, Türkiye, 2022.

Karagöz E. The effect of scratch-assisted instruction on students' academic achievement, motivation, and attitudes towards the subject in 7th-grade science class. Kastamonu University Master's Thesis, page no: 135, Kastamonu, Türkiye, 2024.

Karakuzu B. The Impact of STEM-based algodoo activities on the scientific creativity of seventh-grade students in the unit on the interaction of light and matter. Erciyes University Master's Thesis, page no: 138, Kayseri, Türkiye, 2021.

Karapınar A. The Impact of interdisciplinary integration in science education on middle school students' scientific process skills, reasoning skills, and conceptual understanding levels. Dokuz Eylül University Doctoral Thesis, page no: 269, İzmir, Türkiye, 2023.

Karapınar A., Balım AG. Developing a conceptual understanding test for the unit on the ınteraction of light with matter. Dokuz Eylül University Buca Faculty of Education Journal 2023; (57): 1646-1668.

Kayhan Ö. Determining the cognitive structures of 3rd grade primary school students regarding the "lights and sounds around us" unit using concept cartoons and word association test techniques. Necmettin Erbakan University Master's Thesis, page no: 112, Konya, Türkiye, 2019.

Kesler S. The impact of artificial intelligence systems on students' academic achievement in the unit on the interaction of light with matter. Erzincan Binali Yıldırım University Master's Thesis, page no: 108, Erzincan, Türkiye, 2021.

Kılınç D. The impact of teaching the unit on the interaction of light with matter using the REACT strategy on students' scientific process skills, motivation, and academic achievement. Gazi University Master's Thesis, page no: 119, Ankara, Türkiye, 2024.

Kol Ö. The impact of STEM education on learning outcomes regarding the interaction of light with matter in a science lesson. Ondokuz Mayıs University Doctoral Thesis, page no: 187, Samsun, Türkiye, 2025.

Köseoğlu E. An examination of the teaching activity implemented in response to student questions in the light unit of the seventh-grade science and technology lesson. Muğla Sıtkı Koçman University Master's Thesis, page no: 118, Muğla, Türkiye, 2015.

Küçük A. The impact of teaching the nature of science, both within and outside the subject area of light, on 5th-grade students' understanding of the nature of science. Recep Tayyip Erdoğan University Master's Thesis, page no: 132, Rize, Türkiye, 2016.

Küçükay S. An examination of postgraduate theses on number sense prepared in Turkey. Eskişehir Osmangazi University, Master's Thesis, page no: 109, Eskişehir, Türkiye, 2022.

Mazlum E. Examining indicators of conceptual knowledge about light through peer teaching practices. Karadeniz Technical University Master's Thesis, page no: 84, Trabzon, Türkiye, 2015.

Miles MB., Huberman AM. Qualitative data analysis: An expanded sourcebook. Thousand Oaks, CA: Sage; 1994.

Ministry of National EducationScience curriculum (grades 3, 4, 5, 6, 7, and 8). Ministry of National Education, General Directorate of Basic Education, 2024. https://tymm.meb.gov.tr/ogretim-programlari/ders/fen-bilimleri-dersi

Mor S. Examining the effect of computer-assisted instruction methods on student achievement in the "Light" unit of the 7th grade science and technology lesson. Kafkas University Master's Thesis, page no: 128, Kars, Türkiye, 2016.

Morgan H. Conducting a qualitative document analysis. The Qualitative Report*;* 2022; *27*(1): 64-77.

Namlı M. Using computer-assisted instruction and field trip techniques in teaching the light unit. Fırat University Master's Thesis, page no: 112, Elazığ, Türkiye, 2018.

Orhan AT. Preschool teachers' perspectives on science centers and science education in their schools. Gazi Journal of Educational Sciences 2019; 5(1): 91-101.

Özcan C. An examination of doctoral dissertations in science education in terms of selected themes. Mustafa Kemal University Faculty of Education Journal 2020; 4(6): 33-41.

Özdoğru Şenel S. The effect of activities designed according to the theory of multiple intelligences on the learning and retention of the 7th grade light unit. Gazi University Master's Thesis, page no: 103, Ankara, Türkiye, 2016.

Özer M. Evaluating the effectiveness of technology-supported inquiry-based science teaching: the "light and sound" example. Giresun University Master's Thesis, page no: 209, Giresun, Türkiye, 2019.

Özkan Hıdıroğlu Y. An examination of theses on probability and statistics in mathematics education in Türkiye. Thrace Education Journal 2026; 16(1):118-161.

Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021; 372(71). Doi: https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Sağlam A. Determining the knowledge levels of 5th grade middle school students and science teachers about light pollution. Akdeniz University Master's Thesis, page no: 77, Antalya, Türkiye, 2019.

Sak M. Comparing the level at which middle school students answer context-based and traditional questions about light. Kocaeli University Master's Thesis, page no: 195, Kocaeli, Türkiye, 2018.

Sarı K. The Leonardo effect in the integration of science and art: examining students' engineering design skills and creativity. Dokuz Eylül University Doctoral Thesis, page no: 410, İzmir, Türkiye, 2025.

Sarıçetin Z. Developing an achievement test for the 7th grade unit on the interaction of light with matter. Mersin University Master's Thesis, page no: 83, Mersin, Türkiye, 2021.

Savaş E. Examining the effect of the conceptual shift in temperature on understanding elements of the nature of science in 7th grade light unit teaching. Balıkesir University Doctoral Thesis, page no: 374, Balıkesir, Türkiye, 2020.

Sayın Ş. The effect of using concept cartoons in teaching the 'light' unit of the 7th grade science and technology course on students' academic achievement, perceptions of inquiry-based learning skills, and motivation. Manisa Celal Bayar University Master's Thesis, page no: 180, Manisa, Türkiye, 2015.

Serter Bal S. Examining the relationship between teacher and student objectives and seventh-grade learning outcomes in the science curriculum. Aydın Adnan Menderes University Master's Thesis, page no: 201, Aydın, Türkiye, 2021.

Söyleyici H. Examining the impact of problem-based learning on middle school students' scientific process skills, attitudes, and achievement: the light unit example. Trakya University Master's Thesis, page no: 152, Edirne, Türkiye, 2018.

Sözen M. The impact of integrated STEM education on the argumentation skills of 7th-grade students. Pamukkale University Master's Thesis, page no: 156, Denizli, Türkiye, 2022.

Subaşı Y. The impact of design-based science education on the academic achievement, engineering knowledge, technology perceptions, and technological problem-solving skills of 7th-grade middle school students. Marmara University Doctoral Thesis, page no: 321, İstanbul, Türkiye, 2022.

Şeker Küçükoğlu B. The effect of argumentation-supported peer teaching method on students' academic achievement and motivation towards science. Atatürk University Master's Thesis, page no: 114, Erzurum, Türkiye, 2024.

Tan E. Application of peer teaching on light-related topics in 7th grade secondary education. Atatürk University Doctoral Thesis, page no: 160, Erzurum, Türkiye, 2019.

Tanrıverdi E. The impact of problem-based STEM activities applied to environmental issues on students' awareness of light pollution. Ordu University Master's Thesis, page no: 95, Ordu, Türkiye, 2021.

Tezcan E. Examining the effects of ARCS-based science teaching on students' motivation and problem-solving skills. Bahçeşehir University Master's Thesis, page no: 135, İstanbul, Türkiye, 2022.

Tulum G. The effect of context-based materials developed for the topic of light in science class on academic achievement. Ondokuz Mayıs University Master's Thesis, page no: 129, Samsun, Türkiye, 2019.

Tulum M. The effect of light pollution education on environmental awareness among prospective science teachers. Akdeniz University Master's Thesis, page no: 98, Antalya, Türkiye, 2017.

Yalınalp Z. The effect of slow-motion animation technique on 7th-grade students' achievement in understanding the interaction of light with matter and their motivation towards learning science. Tokat Gaziosmanpaşa University Master's Thesis, page no: 130, Tokat, Türkiye, 2023.

Yaylacı R. In the unit on the interaction of light with matter, the impact of educational games supported by educational short films on students' achievement, motivation, and anxiety, and student opinions on the process were examined. Gazi University Master's Thesis, page no: 162, Ankara, Türkiye, 2024.

Yazıcıoğlu S. The effect of game-based activities on the academic achievement, motivation, and attitudes towards science learning of 6th-grade middle school students: the example of the light and sound unit. Giresun University Master's Thesis, page no: 119, Ankara, Türkiye, 2017.

Yel E. The impact of the REACT strategy on 7th-grade students' problem-solving, analytical thinking, and academic achievement. Atatürk University Master's Thesis, page no: 147, Erzurum, Türkiye, 2025.

Yenidünya ÖA. The effect of teaching the light unit with electronic experiment kits and simulations on the academic achievement, attitudes, and retention levels of middle school students. Atatürk University Master's Thesis, page no: 148, Erzurum, Türkiye, 2024.

Yıldırım A., Şimşek H. Qualitative research methods in social sciences. Ankara: Seçkin Publishing; 2003.

Yıldırım İ. This study examines the impact of using Web 2.0 tools in the 7th-grade unit on the interaction of light with matter on students' academic achievement, their level of self-learning through technology, and their attitudes towards science. Kocaeli University Master's Thesis, page no: 197, Kocaeli, Türkiye, 2020.

Yıldırım, N. Evaluation of the light pollution awareness levels of 8th grade middle school students. Aksaray University Master's Thesis, page no: 80, Aksaray, Türkiye, 2022.

Yıldırım N. An example application of the STEM SOS model in a 7th-grade science class: the interaction of light with matter. İnönü University Master's Thesis, page no: 118, Malatya, Türkiye, 2025.

Yıldızbaş H. The impact of instruction based on a collaborative knowledge construction model on students' academic achievement and critical thinking skills. Necmettin Erbakan University Master's Thesis, page no: 167, Konya, Türkiye, 2017.

Yılmaz AE. Examining the effects of STEM applications on the science attitudes and scientific process skills of 7th-grade middle school students. Bolu Abant İzzet Baysal University Master's Thesis, page no: 180, Bolu, Türkiye, 2019.

Yılmaz Baltabıyık D. The impact of STEM applications on middle school students' conceptual understanding and scientific creativity. Marmara University Master's Thesis, page no: 158, İstanbul, Türkiye, 2019.

Yılmaz T. The effect of problem-based learning method on the academic achievement and attitudes towards science of 5th grade middle school students in teaching science subjects: light and sound. Bozok University Master's Thesis, page no: 179, Yozgat, Türkiye, 2016.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1732-1749, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1732-1749, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Yeni Schiff Bazı Türevli Tiyosemikarbazonların Sentezi, Yapı Karakterizasyonu ve Teorik Çalışmaları

Hasan YAKAN[1*], Halit MUĞLU[2], M. Serdar ÇAVUŞ[3]

[1]Ondokuz Mayıs University, Faculty of Education, Department of Chemistry Education, 55139, Samsun, Türkiye
[2]Kastamonu University, Faculty of Science, Department of Chemistry, 37150, Kastamonu, Türkiye
[3]Kastamonu University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Biomedical Engineering, 37150, Kastamonu, Türkiye

[1]http://orcid.org/0000-0002-4428-4696
[2]http://orcid.org/0000-0001-8306-2378
[3]https://orcid.org/0000-0002-3721-0883
*Corresponding author: hasany@omu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.09.2025
Kabul tarihi:26.03.2026
Online Yayınlanma: 15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Schiff bazı
Tiyosemikarbazon,
Spektroskopik teknikler
DFT hesaplamaları

ÖZ

Çeşitli aldehit türevlerinin tiyosemikarbazit ile kondenzasyonu yoluyla bir dizi yeni Schiff bazı türevi tiyosemikarbazon (**1**–**4**) sentezlendi. Ana ara ürün olan tiyosemikarbazit, izotiyosiyanatın hidrazin monohidrat ile reaksiyonuyla hazırlandı. Bileşiklerin yapıları ve saflığı, ^{1}H ve ^{13}C NMR, FT-IR ve elementel analiz gibi spektroskopik tekniklerle belirlendi. Ayrıca, bileşiklerin kararlılığını ve reaktivitesini daha ayrıntılı olarak incelemek için yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) hesaplamaları yapıldı. Bu hesaplamalar, bileşiklerin yapısal ve elektronik özelliklerine kapsamlı ve karşılaştırmalı bir bakış açısı sağladı. Bileşiklerin nükleofilik ve elektrofilik özellikleri, küresel reaktivite parametrelerinin hesaplanmasıyla değerlendirildi ve bileşiklerin elektronik özelliklerini ve reaktivitesini düzenlemede ikame edicilerin rolü incelendi. Ayrıca, molekül içi etkileşimleri karakterize etmek için QTAIM ve IRI analizleri kullanıldı.

Synthesis, Structure Characterization, and Theoretical Studies of New Schiff Base Derived Thiosemicarbazones

Research Article

Article History:
Received: 11.09.2025
Accepted: 26.03.2026
Published online: 15.06.2026

Keywords:
Schiff base
Thiosemicarbazone,
Spectroscopic techniques
DFT calculations

ABSTRACT

A series of new Schiff base-derived thiosemicarbazones (**1**–**4**) were synthesized via the condensation of various aldehyde derivatives with thiosemicarbazide. The key intermediate, thiosemicarbazide, was prepared by the reaction of isothiocyanate with hydrazine monohydrate. The structures and purity of the compounds were determined through spectroscopic techniques, including ^{1}H and ^{13}C NMR, FT-IR, and elemental analysis. Furthermore, density functional theory (DFT) calculations were performed to investigate the stability and reactivity of the compounds in greater detail. These calculations provided comprehensive and comparative insights into the structural and electronic properties of the compounds. The nucleophilic and electrophilic characteristics of the compounds were assessed through the calculation of global reactivity parameters, and the role of substituents in modulating the electronic properties and reactivity of the compounds was examined. Additionally, QTAIM and IRI analyses were employed to characterize intramolecular interactions.

To Cite: Yakan H., Muğlu H., Çavuş MS. Synthesis, Structure Characterization, and Theoretical Studies of New Schiff Base Derived Thiosemicarbazones**.** Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1732-1749.

1. Introduction

Thiosemicarbazones constitute an important class of organosulfur compounds in synthetic organic chemistry, characterized by the –NH–C(=S)NH–N= moiety. Their structural diversity and pronounced reactivity render them valuable intermediates in the synthesis of various biologically active compounds. Owing to these features, thiosemicarbazones have garnered significant interest for their broad spectrum of pharmacological and biological activities, including antimicrobial (Gündüz et al., 2021; Korkmaz, 2024), antibacterial (Govender et al., 2019), antioxidant (Hernández et al., 2023; Çavuş, 2025), antitubercular (Ozcan et al., 2023), urease inhibitor (Hameed et al., 2015; Islam et al., 2019; Shehzad et al., 2020), anticancer (Shakya and Yadav, 2020; Czylkowska et al., 2024), anticonvulsant (Kshirsagar et al., 2009; Deng and Song, 2014), and antiviral (Sevinçli et al., 2020) properties. In recent years, Schiff base-derived thiosemicarbazones have attracted increasing attention due to their promising potential in a range of *in vitro* and *in vivo* biological studies. These compounds have demonstrated notable antimicrobial (Al-Amiery et al., 2012), antibacterial and antifungal (Pervez et al., 2008), antioxidant (Muğlu, 2020), anti-HIV (Bal et al., 2005), anti-inflammatory (Subhashree et al., 2017), ameliorative effect (Karakuş et al., 2024), anticancer (Arafath, 2024), and enzyme inhibitor (Tokalı et al., 2021) activities.

In the current work, new Schiff base-derived thiosemicarbazones (compounds **1**–**4**) were obtained. The synthesized compounds were thoroughly characterized by employing various spectroscopic methods, including FT-IR, ^{1}H NMR, ^{13}C NMR, and elemental analysis. To elucidate the molecular and electronic characteristics of the compounds, quantum chemical computations using density functional theory (DFT) were performed. These theoretical studies focused on evaluating the impact of various substituent groups on the electronic configuration, structural integrity, and potential reactivity of the molecules. The electronic properties and chemical reactivity of organic molecules are significantly influenced by their frontier molecular orbitals, namely the Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO) and the Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO). These orbitals govern a molecule's nucleophilic and electrophilic tendencies, respectively, and are important for understanding electron transfer processes in chemical reactions. In this study, four thiosemicarbazone-based compounds were examined, and the effects of substituents, including chlorine, methoxy, and pyridinyl nitrogen, on HOMO–LUMO distributions, electron density, and aromaticity were analyzed using computational tools such as the Quantum Theory of Atoms in Molecules (QTAIM) and the Interaction Region Indicator (IRI). By investigating how these substituents modulate nucleophilicity, electrophilicity, and π-system delocalization, a comprehensive analysis of the relationship between molecular structure and reactivity was conducted.

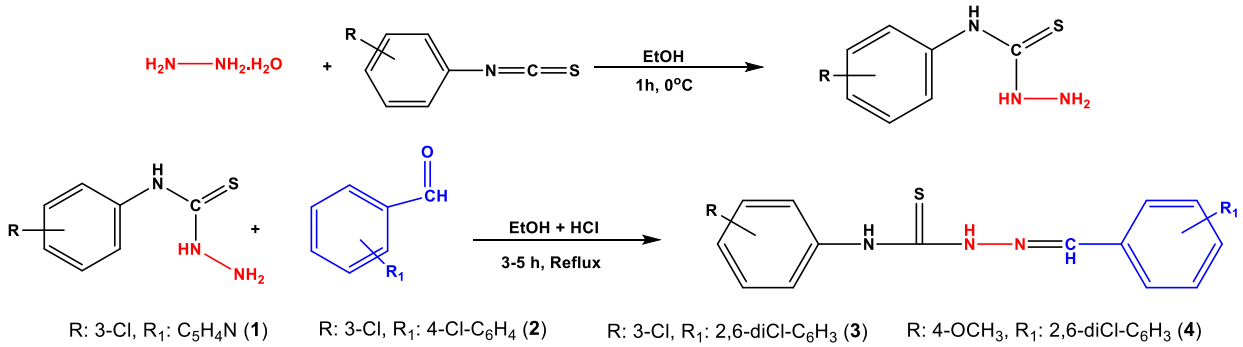
2. Materials and Methods

2.1. Reagents and Instruments

All reagents and chemicals were obtained from Merck, Sigma, or Aldrich Chemical Company and were used as received, without additional purification. Spectroscopic-grade solvents were employed throughout the experimental procedures. Elemental composition was determined using a Eurovector EA3000-Single elemental analyzer. Melting points were recorded on a Stuart SMP30 apparatus and are presented without correction. FT-IR spectra were collected using a Bruker Alpha spectrometer. ^{1}H and ^{13}C NMR spectra were acquired on a Bruker Avance III-400 MHz spectrometer using TMS as the internal standard, with DMSO-d_6 as the solvent. UV–Vis absorption measurements were carried out on a Shimadzu Pharmaspec 1700 spectrophotometer.

*2.2. General procedure for synthesis of thiosemicarbazones (**1**–**4**)*

Various isothiocyanates (8.00 mmol) were added dropwise to a solution of hydrazine monohydrate (8.00 mmol) in 20 mL of ethanol under vigorous stirring, while maintaining the temperature at 0-4 °C in an ice bath. To ensure the reaction proceeded to completion, the mixture was refrigerated overnight. The formed thiosemicarbazide intermediate was subsequently separated by filtration, then dried and recrystallized using ethanol. Afterwards, a solution containing the thiosemicarbazide (4.00 mmol) and several aldehydes (4.00 mmol) in 20 mL of aqueous ethanol was treated with a few drops of hydrochloric acid. The reaction mixture was heated under reflux at 78 °C for 3–5 hours. Upon completion, the resulting solid was collected by filtration, rinsed with cold ethanol, and air-dried. The targeted products were successfully synthesized in good yields (61–89%), as illustrated in Scheme 1. The synthesis was carried out using a modified version of previously reported procedures (Zhang et al., 2007; Yakan, 2020).



Scheme 1. Synthesis route of the compounds

2.3. Calculation process

Density Functional Theory (DFT) (Hohenberg and Kohn, 1964; Kohn and Sham, 1965) computations were carried out using the Gaussian 09 package (Frisch MJ, 2009), employing the Becke three-parameter Lee–Yang–Parr (B3LYP) functional with the 6-311++G(2d,2p) basis set. Infrared (IR) frequency analyses, conducted in the gas phase, revealed no imaginary modes, confirming that all geometries were

optimized to their ground-state configurations at the minimum points on the potential energy surface before further calculations were performed. Gas-phase calculations were preferred for geometry optimization and IR analyses in order to obtain intrinsic molecular structures free from external perturbations, which is a common and well-established approach for vibrational analysis. From the gas-phase optimizations at this same theoretical level, the frontier molecular orbital (FMO) energy eigenvalues were determined, along with global chemical reactivity descriptors, including the HOMO–LUMO gap, chemical hardness, electronegativity, electrophilicity index, nucleophilicity index, and both electron-donating and electron-accepting powers. The electronic chemical potential (μ) is defined as the derivative of the total energy with respect to the electron number under a fixed external potential $v(r)$ (Parr and Pearson, 1983; Parr, 1989):

$$\mu = \left(\frac{\partial E}{\partial N}\right)_{v(r)}$$

In practice, μ is approximated using a finite difference scheme and Koopmans' approximation as (Koopmans, 1934; Kohn and Sham, 1965):

$$\mu \approx \frac{(E_{HOMO}+E_{LUMO})}{2}$$

Subsequently, electronegativity (χ) (Parr et al., 1999) and chemical hardness (η) (Pearson, 1988; Reed, 1997) were defined as:

$$\chi = -\mu \qquad \eta = \frac{(E_{LUMO}-E_{HOMO})}{2}$$

The electrophilicity index ω is expressed as (Parr et al., 1999):

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

The relative empirical nucleophilic index, **ε**, referenced to tetracyanoethylene (TCE), is given by (Domingo et al., 2008):

$$\varepsilon = E_{HOMO(Nucleophile)} - E_{HOMO(TCE)}$$

Lastly, the electron-accepting (ω^+) and electron-donating (ω^-) powers are defined in terms of electron affinity (A) and ionization potential (I) as (Gázquez et al., 2007):

$$\omega^+ = \frac{A^2}{2(I-A)} \qquad \omega^- = \frac{I^2}{2(I-A)}$$

in which ω^+ denotes the electron-accepting power and ω^- denotes the electron-donating power.

The Quantum Theory of Atoms in Molecules (QTAIM) approach (Bader, 1985; Bader, 1991) was applied to examine variations in electron density at bond critical points (BCPs) and ring critical points (RCPs) within the compounds. Additionally, Interaction region indicator (IRI) (Lu and Chen, 2021) calculations were conducted to investigate intramolecular interactions and bond electron densities. QTAIM and IRI analyses, along with visualization of the results, were carried out using the Multiwfn program (Lu and Chen, 2012).

Spectroscopic calculations were performed in the same solvent environments as the experimental work, using the BLYP/6-311++G(2d,2p) level of theory. Since solvent interactions significantly influence magnetic shielding properties, ^{1}H NMR and ^{13}C NMR chemical shifts were computed in dimethyl sulfoxide (DMSO) solution, employing the conductor-like polarizable continuum model (CPCM) (Barone et al., 1997; Barone and Cossi, 1998) to account for solvent effects and the gauge-independent atomic orbital (GIAO) method (Wolinski et al., 1990). Solvent effects were explicitly included in NMR calculations, as nuclear magnetic shielding tensors are highly sensitive to the surrounding dielectric environment. Using the same solvent model as the experimental conditions ensures a more reliable comparison with the measured spectra. The ^{1}H NMR and ^{13}C NMR spectra of tetramethylsilane (TMS) were also computed at the same theoretical level, yielding a value of 31.8149 and 183.7737 ppm for H and C, respectively; the relative chemical shifts for the studied compounds were then obtained by subtracting the calculated absolute shielding of TMS from the corresponding values.

3. Results and Discussion

3.1. Physicochemical Properties

The experimental data, including physicochemical properties, melting points, yields, and elemental analysis results, are summarized in Tables 1 and 2.

Table 1. The physical data for the synthesized compounds

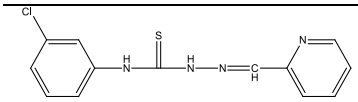
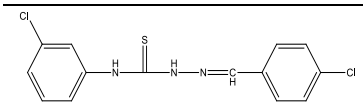
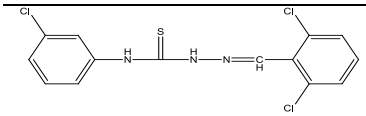
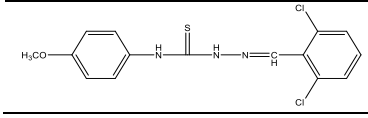
Comp.	Melting Point (°C)	Yields (%)	Colour
	177–178	61	White
	171–172	68	Pinkish white
	186–187	89	White
	188–189	75	White

Table 2. Elemental analysis results of the compounds

			Calculated			Experimental		
Comp.	**Mol. Formula**	**M.W.(g/mol)**	**C%**	**H%**	**N%**	**C%**	**H%**	**N%**
1	$C_{13}H_{11}ClN_4S$	290.5	53.70	3.81	19.27	53.63	3.80	19.30
2	$C_{14}H_{11}Cl_2N_3S$	324.0	51.86	3.42	12.96	51.83	3.43	12.98
3	$C_{14}H_{10}Cl_3N_3S$	358.5	46.88	2.81	11.72	46.84	2.81	11.73
4	$C_{15}H_{13}Cl_2N_3OS$	354.0	50.86	3.70	11.86	50.90	3.71	11.84

3.2. IR Spectral Analysis

Considering the FT-IR spectra of the compounds, the asymmetric and symmetric stretching frequencies of the amino group ($–NH_2$) as a characteristic doublet peak were not observed at 3450 – 3300 cm^{-1}. Instead, a novel imine group (CH=N) vibration was observed at 1581-1535 cm^{-1}. This evidence confirmed the successful reaction (see Figures S1-S4 in Supplementary information).

Table 3. Experimental and theoretical IR vibration frequencies of the compounds (cm^{-1})

	Comp.	**υNH**	**υC-H (Aromatic)**	**υC=N**	**υC=S**	**υC-N ArC-N N-C=S**	**Specific Vib.**
Experimental	**1**	3309	3091	1581	1315	1190 1142	C-Cl:1098
	2	3333	3146	1542	1319	1263 1202	C-Cl:1089, 1070
	3	3284	3076	1544	1326	1252 1185	C-Cl:1095, 1072
	4	3314	3128	1535	1335	1244 1201	C-Cl: 1168 C-O: 1026
Calculated	**1**	3503, 3397	3241–3168	1634	1379	1259 1175	C-Cl: 1122
	2	3530, 3525	3243–3176	1653	1424	1264 1190	C-Cl: 1099, 1032
	3	3515, 3509	3244–3186	1643	1363	1262 1186	C-Cl: 1099, 1090
	4	3520, 3515	3237–3166	1645	1359	1261 1183	C-Cl: 1092 C-O: 1060

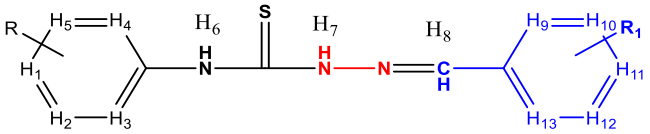
For all compounds (**1**–**4**), the amine group (–NH) vibrations of the thiosemicarbazone moiety were observed at 3333 – 3284 cm^{-1}. The aromatic proton vibrations were observed in the range 3146 – 3076 cm^{-1}, the –C=S signals of the thiosemicarbazone moiety were observed at 1335 – 1315 cm^{-1}, and the –C–N group vibrations were observed at 1263 – 1142 cm^{-1}. The –C–Cl vibration signals were observed at 1168 – 1070 cm^{-1}. For the compound **4**, the –C–O vibration signal was observed at 1026 cm^{-1}. These findings correspond well with the data reported in earlier research on analogous compounds (Tarasconi et al., 2000; Kulandaivelu et al., 2011; Al-Amiery et al., 2012; Yakan, 2020; Khalid et al., 2021; Bal

and Köse, 2023; Yakan et al., 2023a; Yakan et al., 2023b). Table 3 provides an overview of the prominent IR stretching vibrations of the synthesized compounds.

3.3. ^{1}H NMR interpretations

Tetramethylsilane served as the internal reference for the NMR spectra of compounds **1**–**4**, which were recorded in DMSO-d_6. Table 4 provides the specific chemical shifts (ppm) and coupling constants (*J*). Around 2.00, 2.45 (quintet), and 3.40 (variable, depending on the solvent and its concentration) ppm were the signals of DMSO-d_6 and water in DMSO (HOD, H_2O), respectively (Fleming and Williams, 1966). In the ^{1}H NMR spectra, for all compounds, the amino peaks of the thiosemicarbazone units (NH-C=S, H_6 and H_7) were resonated as a singlet at 12.29 – 9.70 ppm. For the compounds' azomethine protons (CH=N, H_8), a characteristic singlet was also observed in the 8.41 – 8.16 ppm region (see Figures S5–S8). Furthermore, for the compounds **1**–**3**, the aromatic ring protons of the aniline region (H_1-H_3) were resonated at 7.62 – 7.24 ppm, and the H_4 protons were resonated as a singlet at 7.87 – 7.75 ppm. The aromatic ring protons of the aldehyde unit (H_9-H_{13}) were resonated at 8.61 – 7.50 ppm. All protons were observed in the expected regions for all compounds. In compound **4**, the aromatic ring protons (H_2-H_5 and H_{10}-H_{12}) of the aniline region were resonated at 7.58 – 6.90 ppm. The methoxy (–OCH_3) proton signal appeared as a singlet at 3.76 ppm for compound **4**. These spectroscopic data are in line with the values of similar compounds that have been previously reported, as well as the literature (Kulandaivelu et al., 2011; Hussein et al., 2019; Yakan, 2020; Khalid et al., 2021).

Table 4. Experimental and theoretical ^{1}H NMR results of the synthesized compounds, ppm.



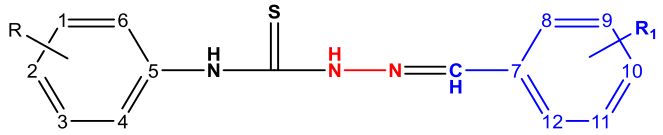
		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{12}	H_{13}
Experimental	**1**	7.29 (d)	7.42 (dd)	7.62 (d)	7.77 (s, 1H)	-	10.29 (s, 1H)	12.13 (s, 1H)	8.23 (s, 1H)	-	8.61 (d)	7.42 (dd)	7.87 (t)	8.43 (d)
	2	7.28 (d)	7.41 (t)	7.60 (d)	7.75 (s, 1H)	-	10.24 (s, 1H)	12.03 (s, 1H)	8.16 (s, 1H)	*7.50 (d)	•7.96 (d)	-	•	*
	3	7.24 (d)	7.37 (t)	7.46 (d)	7.87 (s, 1H)	-	9.98 (s, 1H)	12.29 (s, 1H)	8.41 (s, 1H)	-		7.58 (d, 3H)		-
	4	OCH_3: 3.76 (s, 3H)	6.92-6.90 (d) *	7.47-7.45 (d) •	•	*	9.70 (s, 1H)	12.11 (s, 1H)	8.40 (s, 1H)	-	7.58-7.56 (d) *	7.44-7.41 (d)	*	-
Calculated	**1**	7.526	7.757	10.088	7.442	-	10.297	15.10	7.535	-	9.198	7.812	8.357	8.026
	2	7.557	7.735	10.077	7.436	-	10.013	8.912	8.034	7.812	7.866	-	7.882	8.647
	3	7.506	7.755	10.064	7.176	-	9.895	7.847	8.888	-	7.847	7.640	7.883	-
	4	3.89-4.19	7.341	7.776	7.51	7.21	9.11	9.01	8.44	-	7.76	7.63	7.82	-

* and • are identical peak.

3.4. ^{13}C NMR interpretations

The ^{13}C NMR spectra of the compounds were recorded in DMSO-d_6 (heptet peaks, 39 – 41 ppm). The detailed chemical shifts are given in Table 5. All compounds (**1**–**4**), the -C=S peaks of the thiosemicarbazide moieties were observed at 176.74 – 176.41 ppm (see Figures S9–S12). The characteristic imine carbons (CH=N) resonated in the appropriate region of 144.00 – 138.11 ppm. For all compounds **1**–**4**, the C1 (3-Cl-C_6H_4) peaks were observed at 141.00 – 138.84 ppm. This shift is due to the presence of the substituent group on the -Cl atom. For all compounds, the aromatic ring carbon atoms (C1-C6) of the aniline region were resonated at 157.31 – 113.86 ppm. The aromatic ring carbon atoms (C7-C12) of the aldehyde region were detected at 153.46 – 124.06 ppm. In compound **1**, the imine peak (CH=N) of the pyridine ring resonated at 153.46 ppm. The methoxy (–OCH_3) carbon signal appeared at 55.71 ppm for compound **4**. The all-other aromatic carbons were observed in the appropriate regions for all compounds. The NMR data are in very good agreement with the structure of the compounds and are consistent with similar compounds in the literature (Hussein et al., 2019; Yakan, 2020; Khalid et al., 2021; Yakan, Azam, et al., 2023).

Table 5. Experimental and theoretical ^{13}C NMR results of the synthesized compounds, ppm.



		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C=S	C=N	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Experimental	**1**	140.90	124.89	130.14	125.70	132.67	121.21	176.74	144.00	149.87	-	153.46	125.88	137.03	124.06
	2	141.00	124.80	130.07	125.55	132.64	125.80	176.43	142.47	129.84	133.36*	129.19•	135.10	•	*
	3	138.84	123.50	130.35	125.35	134.63	124.41	176.41	140.63	132.76	130.23*	131.75•	129.69	•	*
	4	113.86•	157.31	•	126.82*	134.56	*	176.71	138.11	131.97	130.39*	131.62•	129.72	•	*
Calculated	**1**	148.62	129.67	136.35	120.17	148.09	125.03	183.15	139.67	159.35	-	155.29	130.41	144.68	133.39
	2	148.06	129.59	136.29	120.46	148.18	124.75	181.28	147.35	139.25	139.13	135.27	151.15	135.50	131.39
	3	147.75	129.94	136.39	120.03	147.90	124.46	181.56	144.07	132.96	152.92	135.51	136.59	137.88	148.26
	4	114.08	167.56	121.70	136.88	136.35	133.59	186.82	143.09	135.99	151.88	134.94	136.15	136.64	147.83

* and • indicate identical peaks.

3.5. DFT Analysis

The frontier molecular orbitals, namely the Highest Occupied Molecular Orbital (HOMO) and the Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO), which respectively determine a molecule's electron-donating (nucleophilic) and electron-accepting (electrophilic) tendencies, are auxiliary parameters for understanding the chemical reactivity and electronic properties of a compound. In this context, across all four compounds, the HOMO localization is predominantly observed on the thioamide (C(=S)–NH) portion of the thiosemicarbazone bridge, particularly around the sulfur (S) atom, and extends to the *meta*-chlorophenyl ring attached to this structure (Figure 1). The high-energy lone pair electrons of the sulfur atom and the contribution of the nitrogen atoms in this region to the π-system further enrich this

region with electron density. This homogeneous distribution suggests that electron transfer during interactions with an electrophile is likely to initiate primarily from this sulfur- and nitrogen-centered region. In contrast to the HOMO, the LUMO localization is observed at the opposite end of the compounds, specifically on the imine bond (–N=CH–) and the substituted phenyl ring attached to it. This region is identified as the electrophilic site with the highest electron-accepting capacity. The effect of substituents is most pronounced in the localization and energy of the LUMO. For instance, in compounds **3** and **4**, the presence of two strongly electron-withdrawing chloro groups results in a highly localized LUMO on this ring. Regarding LUMO energy, the right-hand ring (R2) of compound **3** is notably more favourable for nucleophilic attacks compared to the other compounds in the series.

In all four compounds, a higher negative potential was observed, as expected, on the sulfur atom of the thiocarbonyl (C=S) group (Figure 1). This indicates that the region around the sulfur atom is a strong nucleophilic site within the compounds. Additionally, the imine and amine nitrogen atoms were identified as significant negative potential regions. The most pronounced positive potential was observed on the hydrogen atoms of the amine (–NH–) groups on the thiosemicarbazone bridge. Due to the acidic character of these hydrogens, they can be considered potential strong hydrogen bond donors. These findings suggest that the compounds may form strong interactions with anionic species or receptors that contain hydrogen bond acceptor groups.

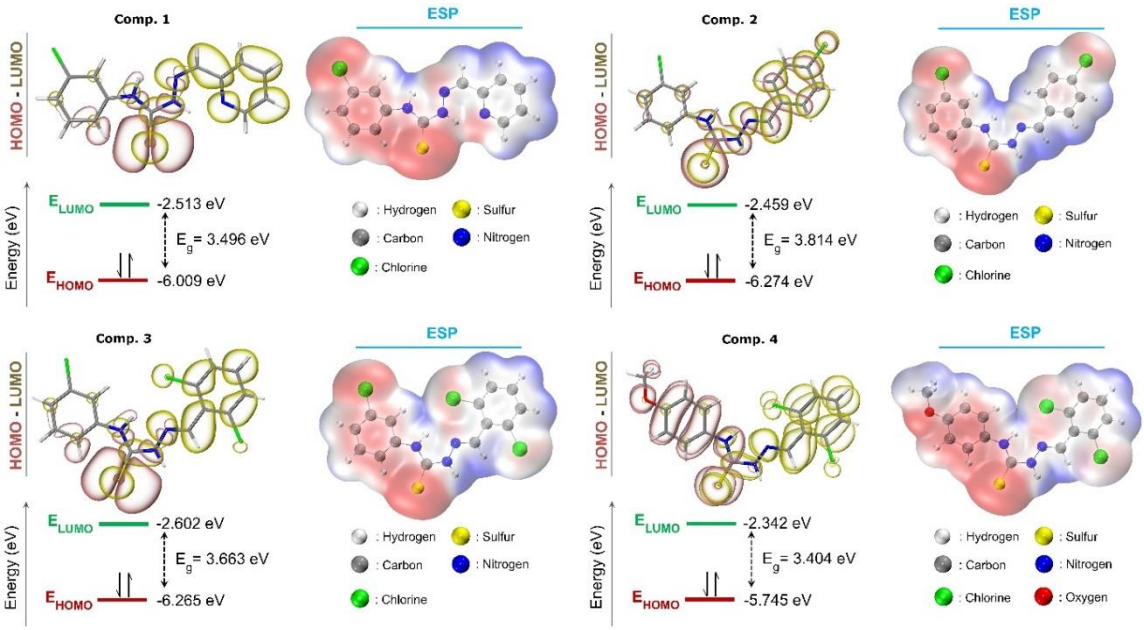


Figure 1. HOMO-LUMO and ESP surface of the compounds (on the HOMO-LUMO surfaces, yellow bubbles represent the LUMO surface and reddish bubbles represent the HOMO surface).

Analysis of calculated HOMO energies provides significant insights into the electron-donating characteristics of substituent groups (Table 6). A higher E_{HOMO} value indicates that the molecule is a better nucleophile. In this context, compound **4**, with the highest HOMO energy of -5.745 eV, exhibits the strongest electron-donating ability. The electron-donating methoxy ($–OCH_3$) group in compound **4**

increases the HOMO energy by injecting electrons into the phenyl ring via resonance. A higher HOMO energy corresponds to a lower ionization potential, indicating a greater tendency for the molecule to lose electrons. The E_{HOMO} values of the compounds are ranked as follows: compound **4** (-5.745 eV) > compound **1** (-6.009 eV) > compound **3** (-6.265 eV) > compound **2** (-6.274 eV). This ranking is consistent with the electronic effects of the substituents.

The lowest HOMO energy of compound **2**, calculated at -6.274 eV, indicates that this molecule is a weaker electron donor. This observation suggests that the substituent group on compound **2** exhibits electron-withdrawing (EWG) characteristics or, at least, does not display strong electron-donating properties. The lower HOMO energy implies that the molecule is likely to be more resistant to oxidative conditions and will play a less active role as a donor in electron transfer reactions. The HOMO energies of compound **1** and compound **3** were calculated as -6.009 eV and -6.265 eV, respectively, indicating that these compounds exhibit moderate electron-donating character compared to compound **2**. The higher HOMO energy of compound **1** suggests that it will exhibit more reactive electron-donor behaviour compared to compound **3**.

The E_{LUMO} value serves as a measure of a molecule's electron affinity and provides insights into its electron-accepting capacity (or electrophilic character). The fact that compound **3** possesses the lowest LUMO energy (-2.602 eV) indicates that it exhibits the strongest electron-acceptor properties. The combined electron-withdrawing effect of the two chloro groups depletes the electron density of the ring where the LUMO is localized, thereby rendering the compound a potent electron-acceptor. This suggests that compound **3** is likely to be more reactive toward nucleophilic attack than other compounds and would act as an effective acceptor in reduction reactions. In contrast, compound **4**, which bears an electron-donating $–OCH_3$ group, has the highest E_{LUMO} value (-2.342 eV), indicating that it is the least inclined to accept electrons or, in other words, the weakest electrophile in the series. The LUMO energies of compounds **1** and **2** were calculated as -2.513 eV and -2.459 eV, respectively. These values suggest that both molecules exhibit moderate electron-acceptor character compared to compounds **3** and **4**.

The calculated chemical hardness values decrease in the order of compound **2** > compound **3** > compound **1** > compound **4**. This indicates that compound **4**, bearing the electron-donating $–OCH_3$ group, is the softest molecule in the series, meaning it is the most easily polarizable and more prone to interacting with soft reagents. Conversely, compounds **2** and **3**, which contain electron-withdrawing substituents, exhibit harder character and greater kinetic stability. Additionally, the electronegativity ranking (compound **3** (4.434 eV) > compound **2** (4.367 eV) > compound **1** (4.261 eV) > compound **4** (4.043 eV)) directly reflects the electronic effects of the substituents. Compound **3**, with two chloro atoms, possesses the highest electronegativity, indicating its strongest ability to attract electron density in polar covalent bonds and its greatest potential to form strong hydrogen bonds with polar molecules. A molecule's reactivity profile is determined by the balance between its electrophilic (ω) and nucleophilic (ε) capacities, which is quantitatively described by the electrophilicity and nucleophilicity

indices. The calculated electrophilicity index values follow the order: compound **3** (5.367 eV) > compound **1** (5.193 eV) > compound **2** (4.999 eV) > compound **4** (4.803 eV). This ranking indicates that compound **3** is the most potent electrophile among the compounds. This high electrophilic character suggests that the molecule will exhibit significant reactivity toward nucleophiles. Conversely, the methoxy-substituted compound **4** is expected to be the least reactive toward nucleophiles. On the other hand, the nucleophilicity index (ε), which measures the electron-donating capacity of molecules, follows the order: compound **4** (2.062 eV) > compound **2** (1.938 eV) > compound **1** (1.937 eV) > compound **3** (1.866 eV). This trend is the inverse of the electrophilicity trend, maintaining the internal consistency of the molecular reactivity prediction. According to the calculations, compound **4**, with the highest ε value, is identified as the most potent nucleophile among the compounds.

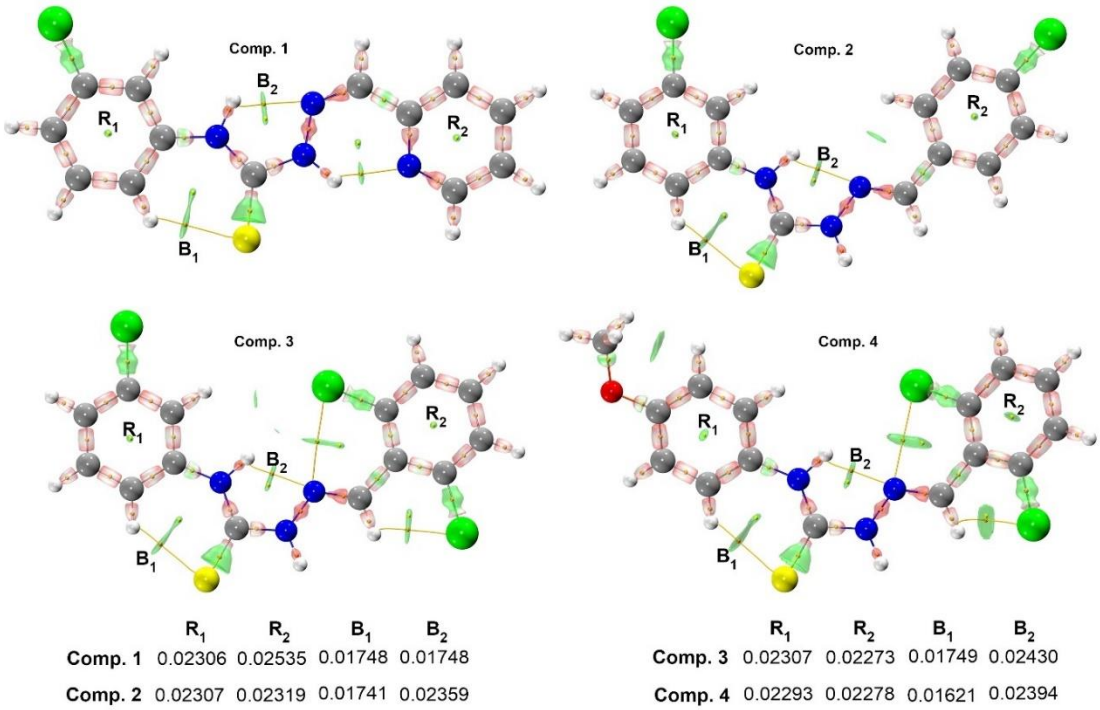
Table 6. Calculated electronic parameters of the compounds

	E_{HOMO} (eV)	E_{LUMO} (eV)	E_g (eV)	η (eV)	χ (eV)	ω (eV)	ε (eV)	D (Debye)	ω^+ (eV)	ω^- (eV)
1	-6.009	-2.513	3.496	1.748	4.261	5.193	1.937	6.625	0.903	5.164
2	-6.274	-2.459	3.814	1.907	4.367	4.999	1.938	3.067	0.793	5.159
3	-6.265	-2.602	3.663	1.831	4.434	5.367	1.866	5.051	0.924	5.358
4	-5.745	-2.342	3.404	1.702	4.043	4.803	2.062	6.430	0.805	4.849

E_g: $E_{LUMO} - E_{HOMO}$, η: Chemical Hardness, χ: Electronegativity, ω: Electrophilic index, ε: Nucleophilic index, D: Dipole moment, ω^+ : Electron-accepting power, ω^- : Electron-donating power.

The electron-donating power (ω^-) is a measure of a molecule's electron-donating capacity; a lower ω^- value indicates easier electron donation (stronger donor character). Based on the calculated values, the order is **4** (4.849 eV) < **2** (5.159 eV) < **1** (5.164 eV) < **3** (5.358 eV). This demonstrates that compound **4**, bearing the electron-donating $–OCH_3$ group, is the strongest electron donor, while compound **3**, with two electron-withdrawing –Cl groups, is the weakest electron donor (most resistant to oxidation), consistent with the nucleophilic parameters (**4** (2.062 eV) > **2** > **1** > **3** (1.866 eV)) of the compounds, where a higher value denotes stronger nucleophilic/donor character. Both parameters (low ω^- and high ε) confirm compound **4** as the most potent donor and compound **3** as the weakest donor, validating the consistency of inferences regarding the nucleophilic and oxidation behaviours of these compounds. The electron-accepting tendency, the opposite of electron donation, is evaluated by the electron-accepting power (ω^+) parameter, where a higher value indicates stronger electron acceptor character. The ranking is calculated as compound **3** (0.924 eV) > compound **1** (0.903 eV) > compound **4** (0.805 eV) > compound **2** (0.793 eV). This reveals that compound **3** is the strongest electron acceptor in the compounds. The molecule's electron-accepting tendency is related to electronegativity (χ), which reflects the overall electron-withdrawing ability. In this context, compound **3** appears to have both the highest electron-accepting power (ω^+) and the highest electronegativity (χ).

In addition to the intramolecular interaction profiles of the compounds, the effects of different substituents (chlorine, methoxy, pyridinyl nitrogen) on the aromatic rings on the strength of intramolecular hydrogen bonds and the electronic structure of the rings were analyzed using QTAIM and IRI calculations (Figure 2). In compound **1**, the ρ(RCP) value of the pyridine ring (0.02535) is significantly higher than that of the chlorophenyl ring (R_1). This indicates that the π-system in the pyridine ring, containing nitrogen as a heteroatom, exhibits more effective delocalization compared to the benzene ring. Although the absolute differences in ρ(RCP) values are numerically slight, the calculated data consistently show systematic variations among the compounds, suggesting that these values can be used to discuss comparative trends in π-electron delocalization induced by different substituents. The addition of a chlorine atom to the benzene ring in the compounds decreases the ρ(RCP) value. This reduction in the calculated ρ(RCP) values is consistent with the electron-withdrawing nature of the chlorine substituent and suggests a relative decrease in π-electron delocalization within the aromatic ring.



	R_1	R_2	B_1	B_2
Comp. 1	0.02306	0.02535	0.01748	0.01748
Comp. 2	0.02307	0.02319	0.01741	0.02359
Comp. 3	0.02307	0.02273	0.01749	0.02430
Comp. 4	0.02293	0.02278	0.01621	0.02394

Figure 2. QTAIM and IRI data of the compounds (R_1 and R_2: Ring Critical Points (RCP) at the center of aromatic rings (*e*/bohr^3). B_1 and B_2: Bond Critical Points (BCP) corresponding to intramolecular non-covalent interactions (*e*/bohr^3))

For example, the ρ(RCP) value of the R_2 ring in compound **3** is lower than that in compound **2**. This suggests that the R_2 ring in compound **3** has a less delocalized π-system compared to that in compound **2**. Similarly, the ρ(RCP) value of the R_2 (2,6-dichlorophenyl) ring in compound **4** (0.02278) is lower than that of the monochloro-substituted rings in compound **2** (~0.0231). This indicates that increased halogenation weakens the aromatic character. At this point, it was observed that the IRI isotherms

supported the QTAIM-based observations, consistent with the trends obtained from the calculated electron density values. Overall, the QTAIM and IRI results indicate that the calculated electron density parameters vary systematically with the nature of the substituents, allowing a comparative assessment of their influence on electron density distribution within the studied molecular systems.

4. Conclusion

In the current study, a series of novel Schiff base-derived thiosemicarbazone compounds (**1**–**4**) were successfully synthesized. The products were obtained in moderate to good yields, ranging from 61% to 89%. Structural elucidation of the products was carried out using IR, ^{1}H, and ^{13}C NMR spectroscopy, and elemental composition analysis. The findings revealed that substituents on the aryl ring play a critical role in determining molecular properties. Frontier molecular orbital analyses showed that, for all compounds, the HOMO is localized on the thiourea region. In contrast, the LUMO is localized on the imine bond and the substituted phenyl ring. Global reactivity descriptors quantitatively demonstrated the effects of substituents. Compound **4**, bearing an electron-donating methoxy group, was calculated to be the strongest nucleophile and the most reactive compound towards electrophilic species in the series with respect to nucleophilic reactivity, with the highest E_{HOMO}, the lowest energy gap (E_g), the highest nucleophilicity index (ε), and the lowest electron-donating power (ω^-). In contrast, compound **3**, containing two electron-withdrawing chloro groups, was identified as the most potent electrophile in the series, exhibiting the lowest E_{LUMO}, the highest electronegativity (χ), and the highest electrophilicity (ω) and electron-accepting power (ω^+). QTAIM and IRI analyses further revealed that electron-withdrawing groups, such as chlorine, reduce π-electron delocalization in aromatic rings, thereby lowering ρ(RCP) values and diminishing aromatic character.

Acknowledgment

The DFT calculations reported in this paper were partially performed at TUBITAK ULAKBIM, High Performance and Grid Computing Center (TRUBA resources). This study was not supported by any organization.

Conflict of Interest

All the authors declare no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Declaration

The authors affirm that their contributions to the essay were equal.

References

Al-Amiery AA., Al-Majedy YK., Ibrahim HH., Al-Tamimi AA. Antioxidant, antimicrobial, and theoretical studies of the thiosemicarbazone derivative Schiff base 2-(2-imino-1-methylimidazolidin-4-ylidene) hydrazinecarbothioamide (IMHC). Organic and Medicinal Chemistry Letters 2012; 2(4): 1-7.

Arafath MA. Thiosemicarbaz one Schiff base ligands and their complexes with nickel, palladium and platinum show anticancer and antibacterial activities. Journal of Sulfur Chemistry 2024; 45(1): 138-171.

Bader RF. Atoms in molecules. Accounts of Chemical Research 1985; 18(1): 9-15.

Bader RF. A quantum theory of molecular structure and its applications. Chemical Reviews 1991; 91(5): 893-928.

Bal M., Köse A. Crystal structure and DNA binding properties of a sulfide bridged dimeric schiff base compound. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(1): 818-831.

Bal TR., Anand B., Yogeeswari P., Sriram D. Synthesis and evaluation of anti-HIV activity of isatin β-thiosemicarbazone derivatives. Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters 2005; 15(20): 4451-4455.

Barone V., Cossi M. Quantum calculation of molecular energies and energy gradients in solution by a conductor solvent model. Journal of Physical Chemistry A 1998; 102(11): 1995-2001.

Barone V., Cossi M., Tomasi J. A new definition of cavities for the computation of solvation free energies by the polarizable continuum model. Journal of Chemical Physics 1997; 107(8): 3210-3221.

Czylkowska A., Pitucha M., Raducka A., Fornal E., Kordialik-Bogacka E., Ścieszka S., Smoluch M., Burdan F., Jędrzejec M., Szymański P. Thiosemicarbazone-based compounds: A promising scaffold for developing antibacterial, antioxidant, and anticancer therapeutics. Molecules 2024; 30(1): 129.

Çavuş MS. Synthesis of new 5-iodoisatin derivatives: Predicting antioxidant inhibition activity with DFT studies. Journal of Molecular Structure 2025; 1323: 140826.

Deng XQ., Song MX. Design and synthesis of pyrazolyl thiosemicarbazones as new anticonvulsants. Bulletin of the Korean Chemical Society 2014; 35(9): 2733-2737.

Domingo LR., Chamorro E., Pérez P. Understanding the reactivity of captodative ethylenes in polar cycloaddition reactions. A theoretical study. Journal of Organic Chemistry 2008; 73(12): 4615-4624.

Fleming I., Williams DH. Spectroscopic methods in organic chemistry, McGraw-Hill, New York 1966.

Frisch MJ., Schlegel HB., Scuseria GE., Robb MA., Cheeseman JR., Scalmani G., Barone V., Mennucci B., Petersson GA., Nakatsuji H., Caricato M., Li X., Hratchian HP., Izmaylov AF., Bloino J., Zheng G., Sonnenberg JL., Hada M., Ehara M., Toyota K., Fukuda R., Hasegawa J., Ishida M., Nakajima T., Honda Y., Kitao O., Nakai H., Vreven T., Montgomery JA., Peralta JE., Ogliaro F., Bearpark M., Heyd JJ., Brothers E., Kudin KN., Staroverov VN., Kobayashi R., Normand J., Raghavachari K., Rendell A., Burant JC., Iyengar SS., Tomasi J., Cossi M., Rega N., Millam JM., Klene M., Knox JE., Cross JB., Bakken V., Adamo C., Jaramillo J., Gomperts R., Stratmann RE., Yazyev O., Austin AJ., Cammi R., Pomelli C., Ochterski JW., Martin RL., Morokuma K., Zakrzewski VG., Voth GA., Salvador P., Dannenberg JJ., Dapprich S., Daniels AD., Farkas Ö., Foresman JB., Ortiz JV., Cioslowski J., Fox DJ. Gaussian 09, Revision D. 01, Gaussian. In Inc., Wallingford CT 2009.

Gázquez JL., Cedillo A., Vela A. Electrodonating and electroaccepting powers. Journal of Physical Chemistry A 2007; 111(10): 1966-1970.

Govender H., Mocktar C., Kumalo HM., Koorbanally NA. Synthesis, antibacterial activity and docking studies of substituted quinolone thiosemicarbazones. Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements 2019; 194(11): 1074-1081.

Gündüz MG., Kaya B., Özkul C., Şahin O., Rekha EM., Sriram D., Ülküseven B. S-alkylated thiosemicarbazone derivatives: Synthesis, crystal structure determination, antimicrobial activity evaluation and molecular docking studies. Journal of Molecular Structure 2021; 1242: 130674.

Hameed A., Khan KM., Zehra ST., Ahmed R., Shafiq Z., Bakht SM., Yaqub M., Hussain M., de León AV., Furtmann N. Synthesis, biological evaluation and molecular docking of N-phenyl thiosemicarbazones as urease inhibitors. Bioorganic Chemistry 2015; 61: 51-57.

Hernández W., Carrasco F., Vaisberg A., Spodine E., Icker M., Krautscheid H., Beyer L., Tamariz-Angeles C., Olivera-Gonzales P. Novel thiosemicarbazone derivatives from furan-2-carbaldehyde: synthesis, characterization, crystal structures, and antibacterial, antifungal, antioxidant, and antitumor activities. Journal of Chemistry 2023; 2023: 1-20.

Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. Physical Review 1964; 136(3B): B864-B871.

Hussein MA., Iqbal MA., Umar MI., Haque RA., Guan, TS. Synthesis, structural elucidation and cytotoxicity of new thiosemicarbazone derivatives. Arabian Journal of Chemistry 2019; 12(8): 3183-3192.

Islam M., Khan A., Shehzad MT., Hameed A., Ahmed N., Halim SA., Khiat M., Anwar MU., Hussain J., Csuk R. Synthesis and characterization of new thiosemicarbazones, as potent urease inhibitors: In vitro and in silico studies. Bioorganic Chemistry 2019; 87: 155-162.

Karakuş FG., Tunalı S., Bal-Demirci T., Ülküseven B., Yanardağ R. ameliorative effect of a vanadium-thiosemicarbazone complex on oxidative stress in stomach tissue of experimental diabetic rats. Sakarya University Journal of Science 2024; 28(1): 133-144.

Khalid M., Jawaria R., Khan MU., Braga AAC., Shafiq Z., Imran M., Zafar HMA., Irfan A. An efficient synthesis, spectroscopic characterization, and optical nonlinearity response of novel salicylaldehyde thiosemicarbazone derivatives. ACS Omega 2021; 6(24): 16058-16065.

Kohn W., Sham LJ. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. Physical Review 1965; 140(4A): A1133-A1138.

Koopmans, T. Über die zuordnung von wellenfunktionen und eigenwerten zu den einzelnen elektronen eines atoms. Physica 1934; 1(1-6): 104-113.

Korkmaz GA. Review of recent research on the antimicrobial activities of thiosemicarbazone-based compounds. Journal of New Results in Science 2024; 13(1): 61-83.

Kshirsagar A., Toraskar MP., Kulkarni VM., Dhanashire S., Kadam V. Microwave assisted synthesis of potential antiinfective and anticonvulsant thiosemicarbazones. International Journal of ChemTech Research 2009; 1(3): 696-701.

Kulandaivelu U., Padmini VG., Suneetha K., Shireesha B., Vidyasagar JV., Rao TR., Jayaveera KN., Basu A., Jayaprakash V. Synthesis, antimicrobial and anticancer activity of new thiosemicarbazone derivatives. Archiv der Pharmazie 2011; 344(2): 84-90.

Lu T., Chen F. Multiwfn: a multifunctional wavefunction analyzer. Journal of Computational Chemistry 2012; 33(5): 580-592.

Lu T., Chen Q. Interaction region indicator: A simple real space function clearly revealing both chemical bonds and weak interactions. Chemistry-Methods 2021; 1(5): 231-239.

Muğlu H. Synthesis, characterization, and antioxidant activity of some new N^4-arylsubstituted-5-methoxyisatin-β-thiosemicarbazone derivatives. Research on Chemical Intermediates 2020; 46(4): 2083-2098.

Ozcan E., Vagolu SK., Gunduz MG., Stevanovic M., Kokbudak Z., Tønjum T., Nikodinovic-Runic J., Çetinkaya Y., Dogan, SD. Novel quinoline-based thiosemicarbazide derivatives: synthesis, DFT calculations, and investigation of antitubercular, antibacterial, and antifungal activities. ACS Omega 2023; 8(43): 40140-40152.

Parr RG. Density functional theory of atoms and molecules. Horizons of Quantum Chemistry: Proceedings of the Third International Congress of Quantum Chemistry, October 29-November 3, 1979, pp. 5-15, Kyoto/Japan, Dordrecht: Springer Netherlands.

Parr RG., Pearson RG. Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity. Journal of the American chemical society 1983; 105(26): 7512-7516.

Parr RG., Szentpály Lv., Liu S. Electrophilicity index. Journal of the American Chemical Society 1999; 121(9): 1922-1924.

Pearson RG. Chemical hardness and bond dissociation energies. Journal of the American Chemical Society 1988; 110(23): 7684-7690.

Pervez H., Iqbal MS., Tahir MY., Nasim FH., Choudhary MI., Khan KM. In vitro cytotoxic, antibacterial, antifungal and urease inhibitory activities of some N^4-substituted isatin-3-thiosemicarbazones. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry 2008; 23(6): 848-854.

Reed JL. Electronegativity: chemical hardness I. The Journal of Physical Chemistry A 1997; 101(40): 7396-7400.

Sevinçli ZŞ., Duran GN., Özbil M., Karalı N. Synthesis, molecular modeling and antiviral activity of novel 5-fluoro-1H-indole-2, 3-dione 3-thiosemicarbazones. Bioorganic Chemistry 2020; 104: 104202.

Shakya B., Yadav PN. Thiosemicarbazones as potent anticancer agents and their modes of action. Mini Reviews in Medicinal Chemistry 2020; 20(8): 638-661.

Shehzad MT., Khan A., Islam M., Hameed A., Khiat M., Halim SA., Anwar MU., Shah SR., Hussain J., Csuk R. Synthesis and urease inhibitory activity of 1,4-benzodioxane-based thiosemicarbazones: Biochemical and computational approach. Journal of Molecular Structure 2020; 1209: 127922.

Subhashree G., Haribabu J., Saranya S., Yuvaraj P., Krishnan DA., Karvembu R., Gayathri D. In vitro antioxidant, antiinflammatory and in silico molecular docking studies of thiosemicarbazones. Journal of Molecular Structure 2017; 1145: 160-169.

Tarasconi P., Capacchi S., Pelosi G., Cornia M., Albertini R., Bonati A., Dall'Aglio PP., Lunghi P., Pinelli S. Synthesis, spectroscopic characterization and biological properties of new natural aldehydes thiosemicarbazones. Bioorganic Medicinal Chemistry 2000; 8(1): 157-162.

Tokalı FS., Taslimi P., Usanmaz H., Karaman M., Şendil K. Synthesis, characterization, biological activity and molecular docking studies of novel Schiff bases derived from thiosemicarbazide: Biochemical and computational approach. Journal of Molecular Structure 2021; 1231: 129666.

Wolinski K., Hinton JF., Pulay P. Efficient implementation of the gauge-independent atomic orbital method for NMR chemical shift calculations. Journal of the American Chemical Society 1990; 112(23): 8251-8260.

Yakan H. Preparation, structure elucidation, and antioxidant activity of new bis (thiosemicarbazone) derivatives. Turkish Journal of Chemistry 2020; 44(4): 1085-1099.

Yakan H., Azam M., Kansız S., Muğlu H., Ergül M., Taslimi P., Koçyiğit ÜM., Karaman M., Al-Resayes SI., Min K. Isatin/thiosemicarbohydrazone hybrids: Facile synthesis, and their evaluation as anti-proliferatıve agents and metabolıc enzyme inhibitors. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia 2023a; 37(5): 1221-1236.

Yakan H., Muğlu H., Türkeş C., Demir Y., Erdoğan M., Çavuş MS., Beydemir Ş. A novel series of thiosemicarbazone hybrid scaffolds: Design, synthesis, DFT studies, metabolic enzyme inhibition properties, and molecular docking calculations. Journal of Molecular Structure 2023b; 1280: 135077.

Zhang YM., Wang DD., Lin Q., Wei TB. Synthesis and anion recognition properties of thiosemicarbazone based molecular tweezers. Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements 2007; 183(1): 44-55.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1750-1761, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1750-1761, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Ticari Olarak Satın Alınan Farklı Sirke Türlerinin Anti-biyofilm Aktivitesi

Nurcan ERBİL[1*], Fatma AKSOY[2]

[1, 2]Ardahan Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü, 75000, Ardahan

[1]https://orcid.org/0000-0001-9553-2306
[2]https://orcid.org/0009-0005-5962-6336
*Sorumlu yazar: nurcanerbil@ardahan.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 09.09.2025
Kabul tarihi:21.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Sirke
Anti-biyofilm
pH
Asetik asit
Toplam asitlik

ÖZ

Fermente ürünlerin insan sağlığı açısından olumlu ve destekleyici etkileri, özellikle son yıllarda daha da gün yüzüne çıkmış durumdadır. Bu fermente ürünlerin en önemlilerinden birisi sirkedir. Sirke, geleneksel Türk mutfağının da önemli bileşenlerinden biridir. Salatalarda ve yemeklerde çeşni olarak kullanımının yanı sıra geleneksel turşu üretiminde de fermentasyonu hızlandırmak amacı ile kullanılmaktadır. Bu kullanımlarına ek olarak sirkenin çeşitli yüzeylerde dezenfektan olarak kullanımı da söz konusudur. Bu çalışmada ticari olarak satın alınan doğal fermente kayısı, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve ceviz sirkesi olmak üzere beş farklı sirke çeşidi kullanılmış olup, bu sirkelerin bakterilerin biyofilm oluşturma özelliklerini inhibe edici etkisi kristal viyole yöntemi ile test edilmiştir. Ayrıca, sirke örneklerinin asetik asit cinsinden toplam asitlik değerleri ve pH değerleri de belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde sirke örneklerinin toplam asitlik değerleri %21,97-34,01 arasında tespit edilirken, pH değerleri ise 2,65-2,96 arasında belirlenmiştir. Ayrıca, tüm sirke çeşitlerinin madde miktarına göre değişiklik göstermekle birlikte test bakterileri üzerinde değişen oranlarda anti-biyofilm aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anti-biofilm Activity of Different Types of Commercially Purchased Vinegar

Research Article

Article History:
Received: 09.09.2025
Accepted: 21.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Vinegar
Anti-biofilm
pH
Acetic acid
Total acidity

ABSTRACT

The positive and supportive effects of fermented products on human health have become increasingly evident in recent years. One of the most important of these fermented products is vinegar. Vinegar is a key ingredient in traditional Turkish cuisine. In addition to its use as a condiment in salads and dishes, it is also used to accelerate fermentation in traditional pickle production. In addition to these uses, vinegar is also used as a disinfectant on various surfaces. In this study, five different types of vinegar were used: commercially purchased natural fermented apricot, artichoke, rosehip, blackberry, and walnut vinegars. The inhibitory effect of these vinegars on the biofilm formation of bacteria was tested using the crystal violet method. Furthermore, the total acidity values (as acetic acid) and pH values of the vinegar samples were determined. The results showed that the total acidity values of the vinegar samples ranged from 21.97% to 34.01%, while the pH values ranged from 2.65 to 2.96. In addition, it has been determined that all vinegar types have varying levels of anti-biofilm activity on test bacteria, depending on the amount of substance.

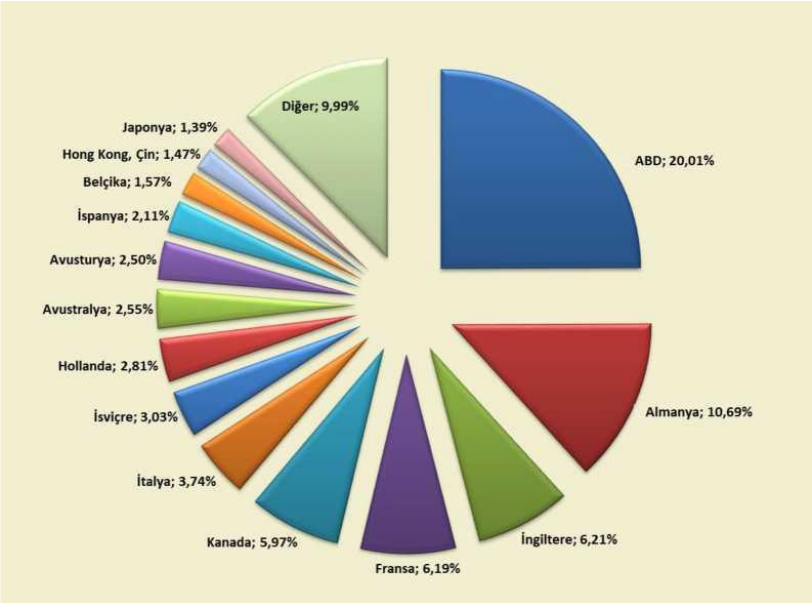
To Cite: Erbil N., Aksoy F. Ticari Olarak Satın Alınan Farklı Sirke Türlerinin Anti-biyofilm Aktivitesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1750-1761.

1. Giriş

Sirke hem ülkemizde hem de dünyada geniş bir kullanım alanına sahip olan fermente bir üründür. Sirke üretimi, iki basamaklı bir fermantasyon işlemi ile gerçekleşmektedir. Bu fermantasyon aşamalarından birincisi, *Saccharomyces cerevisiae* gibi mayalar tarafından fermente edilebilir şekerlerin etanole dönüştürüldüğü alkol fermentasyonu, ikinci aşama ise *Acetobacter, Gluconobacter* ve *Gluconacetobacter* cinsleri gibi bakterilerin etanolü okside etmesiyle asetik asitin meydana geldiği asetik asit fermantasyonudur (Adams, 1998). Sirke bileşiminin yaklaşık %80'ini su oluştururken, geriye kalan kısmını ise organik asitler, vitaminler, mineraller, alkoller, aminoasitler, aroma maddeleri ve uçucu bileşikler gibi çok çeşitli diğer bileşikler oluşturmaktadır (Casale ve ark., 2006). Sirkenin bileşimini asetik asitin yanı sıra kullanılan hammaddenin bileşimi, sirkeye ilave edilen su ve sirke bakterilerinin faaliyeti için eklenen besin maddeleri gibi faktörler de etkilemektedir (Aktan ve Kalkan Yıldırım, 2011).

Sirkenin antimikrobiyal özelliğe sahip olduğu farklı çalışmalarda bildirilmiştir. Aydın (2013) tarafından yapılan bir çalışmada dut sirkesinin çalışmada kullanılan test mikroorganizmalarına karşı değişen oranlarda antimikrobiyal etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Duru (2016) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise üzüm, elma ve nar sirkelerinin gökkuşağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) kuluçkahanelerinde enfeksiyonlara neden olan *Flavobacterium psychrophilum*'a karşı antimikrobiyal etki sergilediği tespit edilmiştir.

Sirke sadece Türkiye'de değil tüm dünyada çeşitli amaçlarla kullanım alanına sahip olan fermente bir üründür ve geniş kullanım yelpazesinden dolayı dünya genelinde ciddi bir pazara sahiptir. 2020 yılı dünya sirke ithalatı oranları incelendiğinde ABD %20,01'lik ithalat oranı ile dünya sıralamasında ilk sırada gelirken; onu sırasıyla Almanya, İngiltere ve Fransa takip etmektedir (Şekil 1). Ek olarak 2020 yılı itibariyle patlak veren Covid-19 pandemisi sürecinde dezenfektan özelliğinden dolayı sirkeye artan eğilim hem ülkemizde hem de dünya genelinde talebi daha da arttırmıştır.



Şekil 1. Dünya Sirke İthalatı (ORAN Ön Fizibilite Raporu, 2021)

2019 yılı dünya sirke ihracatı oranları ve sıralaması incelendiğinde ise ilk sırada yer alan İtalya'nın dünya sirke ihracatında %42,7'lik bir paya sahip olduğu görülmektedir. Türkiye ise %0,7'lik ihracat oranı ile bu pazarda yerini almaktadır (Tablo 1). Bu bağlamda düşünüldüğünde sirke dünya genelinde ve ülkemiz özelinde önemli pazar payı olan bir üründür.

Tablo 1. Dünya Sirke İhracatı (ORAN Ön Fizibilite Raporu, 2021)

Ülke	**2015-2019 Arası Yıllık Büyüme (%)**	**2018-2019 Arası Yıllık Büyüme (%)**	**Dünya İhracatında Payı (%)**
Dünya	6	-5	100
İtalya	2	-8	42,7
Amerika Birleşik Devletleri	13	-11	9,3
Kore Cumhuriyeti	44	116	5,1
İspanya	3	-24	5
Almanya	3	-11	5
Fransa	0	-7	4,3
Japonya	6	-1	3,2
Çin	8	5	3
Yunanistan	16	-26	2,7
Hollanda	7	-3	2,1
Birleşik Krallık	-1	12	2
Avusturya	13	10	1,8
Çek Cumhuriyeti	16	-11	1,6
Kanada	7	30	1
Taipei, Çin	0	1	1
Portekiz	11	5	0,9
Belçika	1	-12	0,9
Hong Kong, Çin	3	11	0,9
Polonya	17	13	0,8
Türkiye	**11**	**14**	**0,7**
Slovakya	13	-30	0,7
Güney Afrika	13	-17	0,5

Bir yüzeye tutunan mikroorganizmaların kendi oluşturdukları polimerik özellikte jelsi bir yapı içinde oluşturduğu topluluğa biyofilm adı verilmektedir (Leone ve ark., 2006). Bir başka ifadeyle biyofilm, bir yüzeye veya birbirine tutunmuş haldeki bakterinin organik bir polimer matriks içerisinde bulunmasıdır (Fujishige ve ark., 2006). Bir biyofilm yapısı içerinde bulunan bakteriler önemli avantajlar sağlamaktadırlar. Kapsül veya glikokaliks yapısı, enzim aracılıklı direnç, biyofilm yapısı içindeki bakterilerin metabolizmaları ve üreme miktarlarındaki heterojenlik, bakterilerin sergilediği direnç fenomeni, biyofilm yapısı içindeki bakterilerin metabolik halleri, genetik adaptasyon, çoğunluğu algılama sinyal iletim sistemleri (quorum-sensing), stres yanıtları, dış membran yapıları ve "efflux" pompası gibi biyofilm içinde oluşan mekanizmalar çoklu antibiyotik direncine neden olabilmektedir (Singh ve ark., 2017). Bundan dolayı biyofilm oluşumunun inhibe edilmesi, istenmeyen mikroorganizmalarla ve oluşturacakları çoklu antibiyotik direnciyle mücadele etmek açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada ticari olarak satın alınan beş farklı sirke çeşidinin (kayısı, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve ceviz sirkesi) test bakterileri üzerindeki anti-biyofilm aktivitesi araştırılmıştır. Bunun dışında pH ve titre edilebilir asitlik değeri gibi bazı kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Literatürde sirke ile alakalı farklı çalışmalar mevcut iken, sirkenin anti-biyofilm aktivitesi ile alakalı sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bundan dolayıdır ki bu çalışmadan elde edilen veriler literatüre katkı sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sirke Örneklerinin Temin Edilmesi

Çalışmada doğal fermente kayısı, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve ceviz sirkesi olmak üzere beş farklı sirke çeşidi ticari olarak satın alınmış ve çalışma kapsamında kullanılmıştır.

2.2. Anti-biyofilm Aktivite Tayini

Ticari olarak satın alınan beş farklı sirke çeşidinin (kayısı, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve ceviz sirkesi) anti-biyofilm aktivitesi modifiye kristal viyole yöntemi ile belirlenmiş olup; *Escherichia coli* ATCC 8739, *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, *Bacillus licheniformis* ATCC 14580, *Listeria monocytogenes* ATCC 19115, *Bacillus subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633, *Enterobacter aerogenes* ATCC 13048, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 33495 ve *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 (Amerikan Tipi Kültür Koleksiyonu, Manassas, VA, ABD) test bakterisi olarak kullanılmıştır. Besiyeri olarak LB broth (Merck, Almanya) kullanılmıştır. Analizler esnasında 96 kuyucuklu steril mikroplakalar kullanılmıştır. İçerisinde farklı konsantrasyonlarda sirke örneği ve LB besiyeri bulunduran kuyucuklara McFarland 0,5 standardına göre ayarlanmış 16 saatlik bakteri kültüründen 10 µl eklenmiştir. Mikroplakalar 37 °C'de 48 saat inkübe edildikten sonra mikroplakalar aspire edilmiş ve 2-3 kez distile su ile yıkanmıştır. Mikroplaklar oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve kuruduktan sonra kuyucuklara 130 µl %95'lik metanol (Merck, Almanya) eklenerek 15 dk inkübe edilmiştir. Bu sürenin sonunda kuyucuklardaki metanol boşaltılmış ve mikroplakalar kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra kuyucuklara 125 µl %0,1'lik kristal viyole solüsyonu eklenerek 10 dakika daha inkübe edilmiştir. Daha sonra mikroplakalar 2-3 kez distile su ile yıkanmış ve kurumaya bırakılmıştır. Kuyucuklara 200 µl Gram (+) bakteriler için %33'lük glasiyal asetik asit (Merck, Almanya) ve Gram (-) bakteriler için %95'lik etanol (Merck, Almanya) eklenerek 15 dakika beklenmiştir. Çözünmüş boyayı içeren mikroplakalar 600 nm'de ELISA Reader ile spektrofotometrik olarak okunmuştur. Analizler üç tekrarlı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kontrole (sadece bakteri ve besiyeri) karşı değerlendirilmiştir (Xu ve ark., 2014). Sirke örneklerinin anti-biyofilm aktivitesi aşağıdaki formüle göre "%" olarak hesaplanmıştır.

$$\%\ İnhibisyon = \frac{[OD600(kontrol) - OD600(örnek)]}{OD600(kontrol)} * 100$$

2.3. pH Tayini

Çalışmada kullanılan ticari sirke örneklerinin pH tayini bir pH metre (Mettler Toledo, Seven Excellence, Multiparameter) ile yapılmıştır.

2.4. Titre Edilebilir Asitlik Tayini

Çalışmada kullanılan kayısı, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve ceviz sirkelerinin titre edilebilir asitliği, asetik asit cinsinden "% (g/100 ml)" olarak belirlenmiştir. Sirke örneklerinin her biri 1/10 oranında seyreltilmiş ve üzerine 3 damla fenolftalein indikatörü ilave edildikten sonra 0,1 N sodyum hidroksit (NaOH) ile kalıcı açık pembe renk elde edilene kadar titre edilmiştir (Uylaşer ve Başoğlu, 2014). Titre edilebilir asitlik derecesi aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\%\ Asitlik = \frac{\text{A x N x meq x F}}{\text{Ö}} \text{ x } 100$$

A: Titrasyonda harcanan 0,1 N NaOH miktarı (ml)

Ö: Örnek miktarı (ml)

N: Titrasyonda kullanılan NaOH normalitesi (0,1 N)

F: Titrasyonda kullanılan NaOH faktörü (0,9980)

meq: Organik asidin meq ağırlığı (0,6)

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada kullanılan ceviz, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve kayısı sirkesi örneklerinin pH değerleri incelendiğinde, sirkelerin 2,65-2,96 aralığında pH değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Asetik asit cinsinden toplam asitlik değerleri ise %21,97-34,01 aralığında tespit edilmiş olup, en yüksek toplam asitlik değeri olan %34,01 kuşburnu sirkesinde belirlenmiştir. Kullanılan tüm sirke örnekleri içerisinde böğürtlen, enginar ve ceviz sirkelerinde %30'un altında toplam asitlik değerleri belirlenirken, kayısı ve kuşburnu sirkelerinde ise toplam asitlik değerleri %30'un üzerinde tespit edilmiştir (Tablo 2).

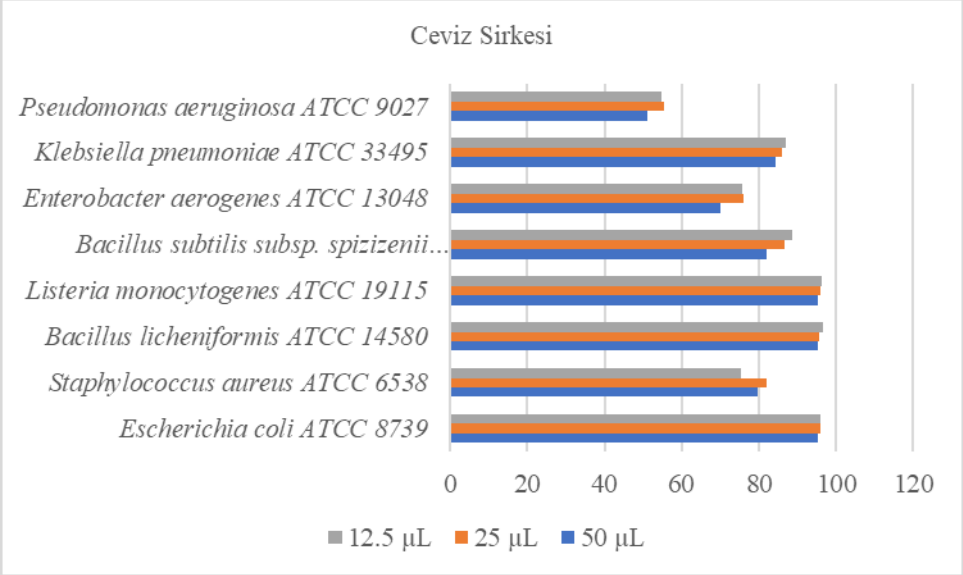
Tablo 2. Sirke örneklerinin kimyasal özellikleri

Sirke Örneği	Toplam Asitlik Değeri (%)	pH
Ceviz Sirkesi	25,62	2,96
Enginar Sirkesi	25,38	2,65
Kuşburnu Sirkesi	34,01	2,83
Böğürtlen Sirkesi	21,97	2,93
Kayısı Sirkesi	30,65	2,92

Daha önce yapılan bir çalışmada fermantasyon sonunda pirinç sirkesinin pH değerinin 3,25, toplam asitliğinin ise 59,82 g/l olduğu bildirilmiştir (Bayram ve ark., 2018). İtalyan, Fransız, İspanyol ve İsviçre pazarlarından alınan 65 sirke örneğinin analiz edildiği bir diğer çalışmada ise bu sirke örnekleri

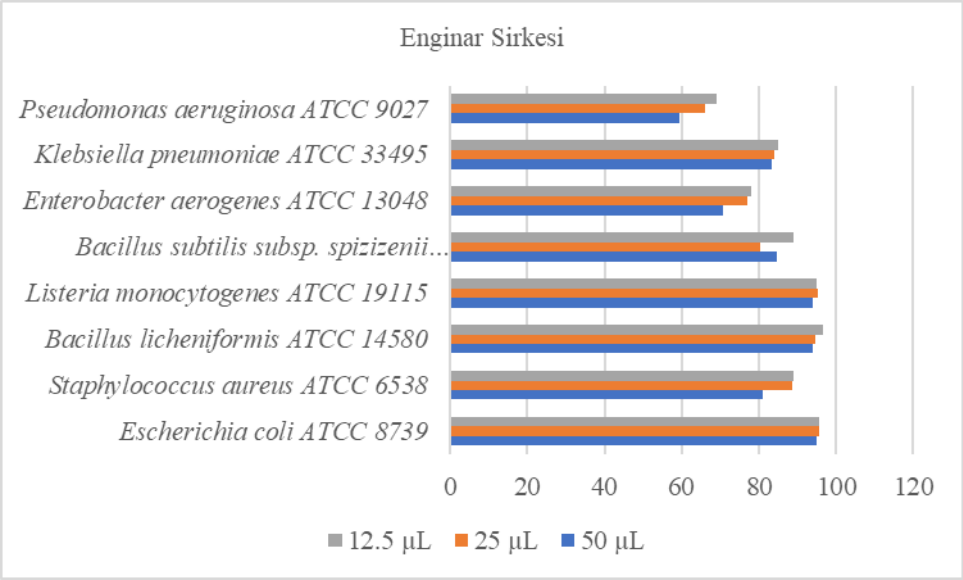
şarap sirkesi, alkol sirkesi ve meyve sirkesi olmak üzere üç şekilde kategorize edilmiştir. Bunlardan şarap sirkelerinin ortalama pH'sı 2,78 ve toplam asitliği 6,60 g/100 ml, alkol sirkelerinin ortalama pH'sı 2,36 ve toplam asitliği 7,35 g/100 ml, meyve sirkelerinin ise ortalama pH'sı 3 ve toplam asitliği 5,40 g/100 ml olarak bildirilmiştir (Gerbi ve ark., 1998). Farklı elma çeşitlerine ait elma kabuğu atıkları ve çekirdek evlerinin kullanılmasıyla elde edilen elma sirkelerinin analiz edildiği farklı bir çalışmada da sirkelerin pH değerlerinin 3,25-3,41 arasında, toplam asitlik değerlerinin ise 15,3-23,07 g/l arasında değiştiği rapor edilmiştir (Tangüler ve ark., 2021). Literatürdeki veriler ile bu çalışmadan elde edilen veriler karşılaştırıldığında değerlerin yakın olduğu gözlenmekle birlikte, bazı farklılıklar da söz konusudur. Bu durum sirkede kullanılan ham madde, fermantasyon yöntemi ve/veya süresi, fermantasyonda kullanılan mikroorganizma tür veya suşuna göre farklılık gösterebilmektedir.

Ceviz sirkesinin test bakterileri üzerindeki biyofilm inhibe edici etkisi incelendiğinde, tüm test bakterilerine karşı değişen oranlarda anti-biyofilm aktivite sergilediği görülmektedir. Test bakterileri içerisinde ceviz sirkesine karşı en duyarlı bakterilerin *L. monocytogenes* ATCC 19115, *B. licheniformis* ATCC 14580 ve *E. coli* ATCC 8739 olduğu görülmektedir (Şekil 2).



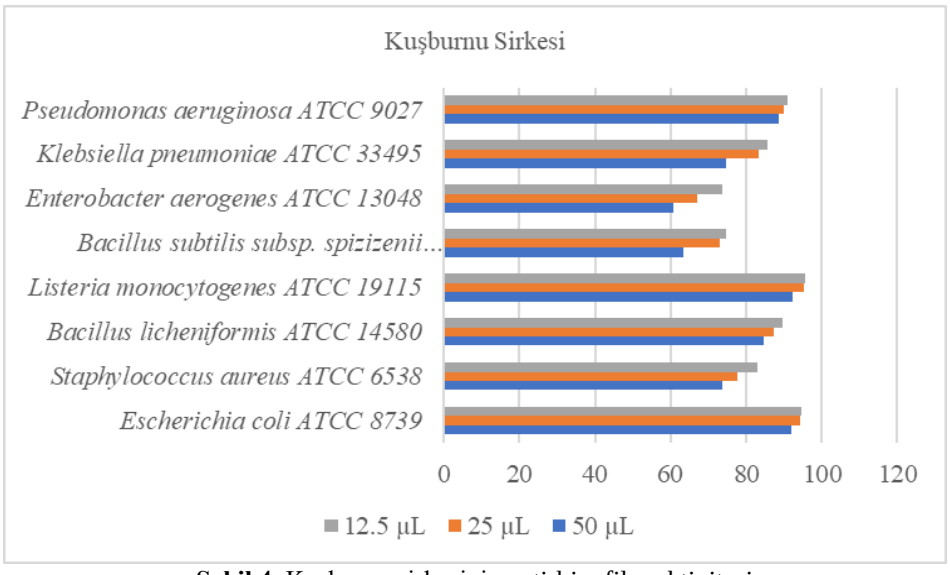
Şekil 2. Ceviz sirkesinin anti-biyofilm aktivitesi

Enginar sirkesinin de tüm test bakterilerine karşı değişen oranlarda anti-biyofilm aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük anti-biyofilm aktivite *P. aeruginosa* ATCC 9027'ya karşı sergilenirken, en yüksek aktivite ise yine *L. monocytogenes* ATCC 19115, *B. licheniformis* ATCC 14580 ve *E. coli* ATCC 8739'ye karşı tespit edilmiştir. Buna ilaveten enginar sirkesinin *S. aureus* ATCC 6538'e karşı da %80'in üzerinde anti-biyofilm aktivite sergilediği görülmektedir (Şekil 3). *S. aureus* bazı durumlarda gıda zehirlenmesine yol açabilmekte olup, bu duruma ise salgıladığı enterotoksinler neden olmaktadır. Benzer bir durum *E. coli* için de geçerlidir. *E. coli* de önemli bir enteropatojendir. Avrupa Gıda Güvenliği Kurumu'na göre, gıda kaynaklı hastaneye yatışlarda stafilokok toksini ilk 10 mikrobiyal toksin arasında yer almaktadır (Alnakip ve ark., 2023).



Şekil 3. Enginar sirkesinin anti-biyofilm aktivitesi

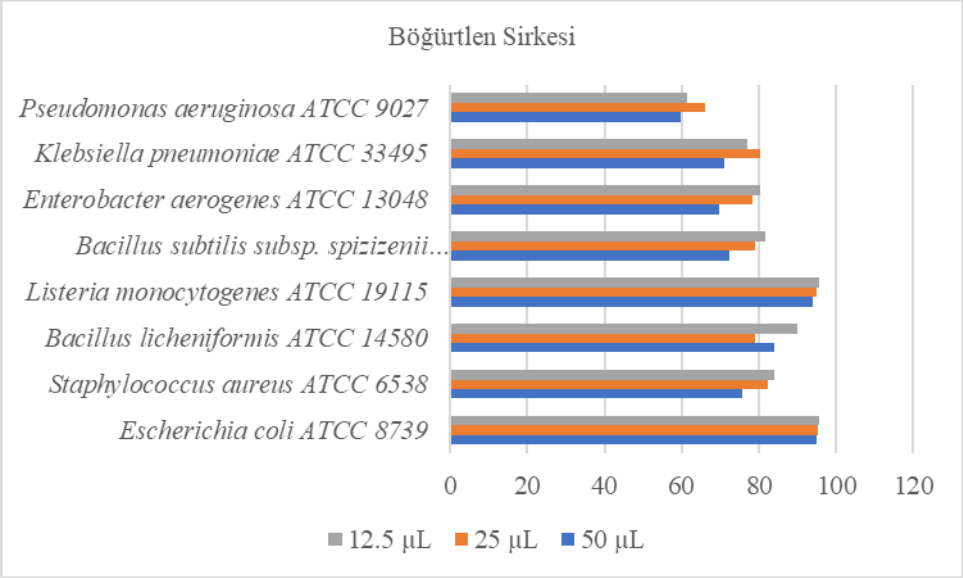
Şekil 4'te görüldüğü üzere bu çalışmada kullanılan kuşburnu sirkesi test bakterileri arasında en düşük anti-biyofilm aktiviteyi *E. aerogenes* ATCC 13048 ve *B. subtilis* subsp. *spizizenii* ATCC 6633'e karşı oluştururken, en yüksek anti-biyofilm aktivite ise *L. monocytogenes* ATCC 19115 ve *E. coli* ATCC 8739'ye karşı belirlenmiştir. *L. monocytogenes* ATCC 19115 ve *E. coli* ATCC 8739'ye karşı sergilenen anti-biyofilm aktivitenin %90'ın üzerinde olduğu görülmektedir. Daha önce yapılan bir çalışmada da kuşburnu sirkesinin *S. aureus*'a karşı biyofilm inhibisyon etkisinin %23,96 olduğu, *E. coli* O157:H7'ye karşı ise farklı dilüsyonlarda %30,25-62,99 arasında biyofilm inhibisyonuna neden olduğu bildirilmiştir (Gas ve ark., 2024).



Şekil 4. Kuşburnu sirkesinin anti-biyofilm aktivitesi

Böğürtlen sirkesinin test bakterileri üzerindeki etkisi incelendiğinde, biyofilm inhibe etme etkisinin en düşük *P. aeruginosa* ATCC 9027'a karşı sergilendiği, buna karşılık en yüksek anti-biyofilm

aktivitenin ise yine *L. monocytogenes* ATCC 19115 ve *E. coli* ATCC 8739'ye karşı oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 5).



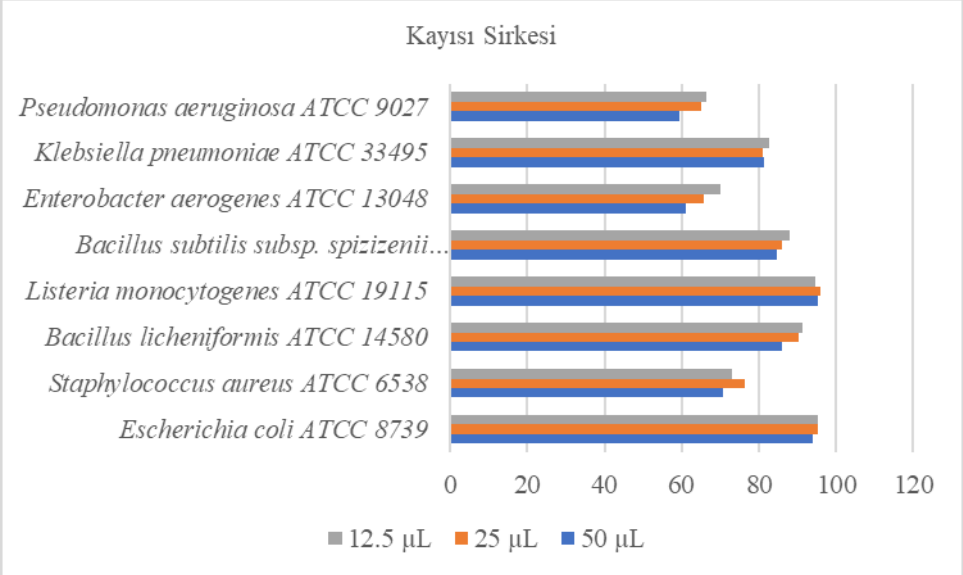
Şekil 5. Böğürtlen sirkesinin anti-biyofilm aktivitesi

Son olarak kayısı sirkesinden elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında, *L. monocytogenes* ATCC 19115, *B. licheniformis* ATCC 14580 ve *E. coli* ATCC 8739'nin kayısı sirkesine karşı en duyarlı test bakterileri olduğu belirlenmiştir. Bunun aksine en düşük anti-biyofilm aktivite ise *P. aeruginosa* ATCC 9027'a karşı sergilenmiştir (Şekil 6).

Literatürde de farklı sirke örneklerinin anti-biyofilm aktiviteye sahip oldukları bildirilmiştir. Yapılan bir çalışmada ise elma sirkesinin et ve et ürünlerinde gelişen *Bacillus cereus*'un biyofilm oluşumu üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde elma sirkesinin *B. cereus*'un biyofilm oluşumunu %50'nin üzerinde inhibe ettiği belirlenmiştir (Mahmoud ve ark., 2024). Benzer bir çalışmada da üzüm ve elma sirkelerinin *S. aureus* ve *P. aeruginosa*'ya karşı anti-biyofilm aktivitesi araştırılmış ve %6,25-%25 oranında sirke içeren solüsyonların her iki bakteride de biyofilm oluşumunu neredeyse %100 oranında önlediği rapor edilmiştir (Kahraman ve ark., 2021). Farklı bir çalışmada da asetik asit ve sirkenin, manuka balıyla sinerjik anti-biyofilm etki potansiyeline sahip olabileceği bildirilmiştir (Harrison ve ark., 2023). Bir diğer çalışmada ise sirkenin ağız içerisindeki bakteriyel canlılığı azalttığı ve 24 saatlik biyofilmi bozabildiği bildirilmiştir (Liu ve Hannig, 2020).

Sirke geleneksel olarak farklı meyvelerden elde edilen ve halk arasında gıdalarda kullanımı söz konusu olup, terapötik etkilerinden dolayı da çeşitli amaçlarla kullanılan bir fermente üründür. Bu terapötik etkiler arasında antimikrobiyal, antioksidan, antidiyabetik, antikanser vb. etkiler sayılabilir (Chen ve ark., 2016). Bu etkilerin ortaya çıkmasında temel olarak fermantasyon sonucunda sirkede oluşan organik asitler ve ham maddeden gelen polifenoller gibi bileşiklerden kaynaklanmaktadır (Chen ve ark., 2016; Perumpuli ve Dilrukshi, 2022). Antibakteriyel ajanlar yoluyla bakteri gelişiminin

engellenmesi, biyofilm oluşumunun engellenmesinde de etkili olan bir strateji olarak görülmektedir. Bir başka strateji ise antibiyofil etkisi olan bileşiklerin bakteri sinyal yollarını kesmesi ve biyofilm oluşumu inhibe etmesi şeklindedir (Roy ve ark., 2018). Dolayısıyla sirke içerisinde bulunan organik asitler ve ham maddeden kaynaklı polifenoller anti-biyofilm aktivitenin oluşmasında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 6. Kayısı sirkesinin anti-biyofilm aktivitesi

Bu çalışmada kullanılan sirke örneklerinden elde edilen anti-biyofilm aktivite sonuçları değerlendirildiğinde, ceviz, enginar, kuşburnu, böğürtlen ve kayısı sirkesi olmak üzere tüm sirke örneklerine karşı en duyarlı olan test bakterilerinin *L. monocytogenes* ATCC 19115 ve *E. coli* ATCC 8739 olduğu görülmektedir. Bu test bakterilerine karşı tüm sirke örneklerinde %90'ın üzerinde anti-biyofilm aktivite tespit edilmiştir. Bu değerler hem insan sağlığı hem de gıda sektörü açısından önem arz etmektedir. Özellikle *L. monocytogenes* gıda kaynaklı bir patojen bakteri olup, gıdalar aracılığıyla bulaştığı insanlarda Listeriosis adında bir enfeksiyon hastalığın oluşmasına neden olabilmektedir. *L. monocytogenes*, gıda işleme ortamlarında istenmeyen bir mikroorganizma olup; ekipman, mutfak eşyaları, zeminler ve giderlerdeki biyofilm yapılarında varlığını sürdüren ve sonunda çapraz kontaminasyon yoluyla gıda ürünlerine ulaşarak gıda kaynaklı Listeriosis enfeksiyonuna neden olan bir patojendir. Bu patojen, yüksek tuz konsantrasyonu veya buzdolabı sıcaklıklarında bile gelişebilmekte ve çeşitli gıda ürünlerinde uzun süre canlılığını sürdürebilmektedir. Listeriosisin tahmini görülme sıklığı diğer bağırsak hastalıklarından daha düşük olsa da *L. monocytogenes*'in neden olduğu enfeksiyonların hastaneye yatışlara ve ölümlere yol açma olasılığı daha yüksektir (Camargo ve ark., 2017).

Benzer şekilde *E. coli* suşları da gıda zehirlenmelerine veya insanlarda gastrointestinal sistem enfeksiyonlarına neden olabilmektedir. Bu bakteriye karşı tespit edilen anti-biyofilm aktivite de gıda

güvenliği ve insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. *E. coli*, gıda güvenliği ve hijyeni açısından indikatör mikroorganizma olarak kabul görmüş olup, çoğu zaman fekal kontaminasyon göstergesi olarak değerlendirilen bir bakteridir. *E. coli*'nin birçok serotipi, özellikle sosyoekonomik düzeyi düşük olan ülkelerdeki çocuklarda görülen kronik diyareden ve ölümlerden sorumlu tutulmaktadır (Gündüz ve ark., 2024).

4. Sonuç

Sonuç olarak bu çalışmada kullanılan tüm sirke örneklerinin kullanılan tüm test bakterilerine karşı değişen oranlarda anti-biyofilm aktivite sergilediği belirlenmiştir. Ancak, bunlar arasında en öne çıkan değerler *L. monocytogenes* ATCC 19115 ve *E. coli* ATCC 873'de gözlenmiştir. Bu bakterilerin farklı suşları insan sağlığı ve gıda hijyeni açısından önem arz etmektedir. *L. monocytogenes* önemli bir gıda kaynaklı enfeksiyon hastalık etkeni olup, gıdalar aracılığıyla insanlara bulaşması önemli sağlık problemlerinin oluşmasına sebebiyet verebilir. Benzer şekilde *E. coli*'de gıdalar içerisinde istenmeyen mikroorganizmalar arasında olup, çoğunlukla fekal kirlilik açısından indikatör olarak kabul edilebilmektedir. Bundan dolayıdır ki, özellikle bu bakterilere karşı tespit edilmiş olan anti-biyofilm aktivite değerleri hem gıda güvenliği açısından hem de bu gıdaları tüketen insanların sağlığı açısından öneme sahiptir. Bu açıdan farklı sirke örnekleri, gıda endüstrisinde kullanılan alet, cihaz ve yüzeylerde veya gıda içerisinde istenmeyen mikroorganizmaların oluşturduğu biyofilm yapısına karşı doğal bir ajan olarak kullanılma potansiyeli vaat etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (2209-A, 1919B012323610) ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Yazar katkısı

Nurcan ERBİL: Analizlerin yapılması (%50), Literatür taraması, Makalenin yazılması, Makalenin gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi (%50). Fatma AKSOY: Analizlerin yapılması (%50), Makalenin gözden geçirilmesi ve yeniden düzenlenmesi (%50).

Etik beyanı

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler için etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerekmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

Adams MR. Vinegar. In: Brian, J., Wood, B. (Ed.) Microbiology of fermented foods. UK: Blackie Academic & Professional 1998; 1-44.

Aktan N., Kalkan Yıldırım S. Sirke teknolojisi. 3. bs. İzmir: Sidas Medya; 2011.

Alnakip ME., Youssef MZ., Abd-Elaal SF., Bayoumi MA. Screening of food-borne *Staphylococcus aureus* and *E. coli* pathogens in artisanal white soft cheese in Delta Region Egypt. Journal of Advanced Veterinary Research 2023; 13(6): 1203–1209.

Aydın R. Uzundere ve İspir (Erzurum) ilçelerinde üretilen dut sirkesinin antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri üzerine bir araştırma. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, Türkiye, 2013.

Bayram M., Kaya C., Yücel EE., Er B., Gülmez E., Terzioğlu E. Pirinç sirkesi ve çeşitli ticari sirkelerin bazı kalite özellikleri. Akademik Gıda 2018; 16(3): 293-300.

Camargo AC., Woodward JJ., Call DR., Nero LA. *Listeria monocytogenes* in food processing facilities, food contamination, and human listeriosis: the Brazilian scenario. Foodborne Pathogens and Disease 2017; 14(11): 623-636.

Casale M., Sáiz Abajo MJ., González Sáiz JM., Pizarro C., Forina M. Study of the aging and oxidation processes of vinegar samples from different origins during storage by near-infrared spectroscopy. Analytica Chimica Acta 2006; 557: 360-366.

Chen H., Chen T., Giudici P., Chen F. Vinegar functions on health: Constituents, sources, and formation mechanisms. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 2016; 15(6): 1124–1138.

Perumpuli PABN., Dilrukshi DMN. Vinegar: a functional ingredient for human health. International Food Research Journal 2022; 29(5): 959-974.

Duru A. Elma, nar ve üzüm sirkesinin Falvobacterium psychrophilum bakteriyel balık patojenine karşı in vitro antibakteriyel aktivite ve biyofilm oluşumuna etkisinin incelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Isparta, Türkiye, 2016.

Fujishige NA., Kapadia NN., Hirsch AM. A feeling for the micro-organism: structure on a small scale. Biofilms on plant roots. Botanical Journal of the Linnean Society 2006; 150(1): 79-88.

Gas E., Berber D., Yilmaz P. Investigation of synergistic effect of rosehip vinegar and propolis extract on antibacterial and antibiyofilm efficacy against foodborne pathogens and their protective effect on sardine (*Sardina pilchardus*). Journal of Aquatic Food Product Technology 2024; 33(8): 662-682.

Gerbi V., Zeppa G., Beltramo R., Carnacini A., Antonell, A. Characterization of white vinegars of different sources with artificial neural networks. Journal of the Science of Food and Agriculture 1998; 78: 415-425.

Gündüz M., Karabıyıklı Çiçek Ş., Bekteş A. *Escherichia coli* kaynaklı gıda enfeksiyonları. Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2024; 38(2): 487-508.

Harrison F., Blower A., de Wolf C., Connelly E. Sweet and sour synergy: exploring the antibacterial and antibiyofilm activity of acetic acid and vinegar combined with medical-grade honeys. Microbiology-SGM 2023; 169(7): 001351.

Kahraman HA., Tutun H., Kaya MM., Soner Tutun S., Usluer MS., Rugji J., Yurdakul Ö. Total phenolic content, antiradical, antimicrobial and antibiofilm properties of grape and apple vinegar. Journal of Advances in VetBio Science and Techniques 2021; 6(2): 150-158. https://doi.org/10.31797/vetbio.960155

Leone S., Molinaro A., Alfieri F., Cafaro V., Lanzetta R., Di Donato A., Parrilli M. The biyofilm matrix of *Pseudomonas* sp. OX1 grown on phenol is mainly constituted by alginate oligosaccharides. Carbohydrate Research 2006; 341(14): 2456-2461.

Liu Y., Hannig M. Vinegar inhibits the formation of oral biofilm in situ. BMC Oral Health 2020; 20: 167.

Mahmoud RM., Gharib AA., Abd El-Aziz NK., Ali EM., Mokhtar A., Ibrahim GA., Ammar AM. Apple cider vinegar exhibits promising antibiofilm activity against multidrug-resistant *Bacillus cereus* isolated from meat and their products. Open Veterinary Journal 2024; 14(1): 186-199.

ORAN Ön Fizibilite Raporu. Erişim adresi: kayseri-ili-dogal-sirke-uretimi-on-fizibilite-raporu--2021.pdf (yatirimadestek.gov.tr), 2021.

Roy R., Tiwari M., Donelli G., Tiwari V. Strategies for combating bacterial biofilms: a focus on anti-biofilm agents and their mechanisms of action. Virulence 2018; 9: 522-554.

Singh S., Singh SK., Chowdhury I., Singh R. Understanding the mechanism of bacterial biofilms resistance to antimicrobial agents. The Open Microbiology Journal 2017; 11: 53.

Tangüler H., Mert H., İlman F., Yücel B., Gençtürk S. Elma atıklarından elma sirkesi üretimi üzerine bir araştırma. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 10(1): 132-139.

Uylaşer V., Başoğlu F. Temel gıda analizleri. Bursa: Dora; 2011.

Xu C., Yagiz Y., Hsu WY., Simonne A., Lu J., Marshall MR. Antioxidant, antibacterial, and antibiofilm properties of polyphenols from Muscadine grape (*Vitis rotundifolia* Michx.) pomace against selected foodborne pathogens. Journal of Agricultural and Food Chemistry 2014; 62(28): 6640–6649.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1762-1781, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1762-1781, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology



İnşaat İlerleme İzlemesi (İİİ) Kapsamında Geometrik Veri Toplama Araçları Üzerine Kıyaslamalı Bir Yaklaşım

Burak ÇELİKESİR[1], Savaş BAYRAM[2*], Feride Maide MIZRAKCI[3]

[1] Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 38039, Kayseri
[2,3] Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri

[1] https://orcid.org/0000-0001-7093-4296
[2] https://orcid.org/0000-0002-0153-6750
[3] https://orcid.org/0009-0003-3584-5636
*Sorumlu yazar: sbayram@erciyes.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.09.2025
Kabul tarihi:04.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
İnşaat ilerlemesi
Lazer tarama
LiDAR
Yapı bilgi modellemesi
360° kamera

ÖZ

Küresel inşaat sektörü, ekonominin yaklaşık %13,4'ünü oluşturmakta ve 2030 yılına kadar 15,2 trilyon dolar büyüklüğe ulaşması beklenmektedir. Sektör imalatlarında seri ve modüler üretimin kısıtlı olması sebebiyle, İnşaat 4.0 gibi yeni nesil üretim kavramları da sınırlı kullanım alanı bulmaktadır. Ancak Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) ile senkronize çalışan inşaat ilerlemesi takip sistemleri, son yıllarda literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, inşaat ilerleme izlemesi (İİİ) kapsamında, yeni nesil yazılımları yaygınlaştırmak amacıyla pratik ve maliyeti düşük sistemler ele alınmıştır. 3B YBM modelinden, 360° kamera ve HoloBuilder yazılımından, LiDAR sensör ve Canvas yazılımından elde edilen 60 ölçüm verisi, gerçek verilerle kıyaslanarak bu takip sistemlerinin performansları kıyaslanmıştır. Sistemlerin mesafe ölçümleri açısından, ortalama mutlak göreceli hata (OMGH) performans kriteri bazında; üç boyutlu YBM modeli için %2,02; Canvas Yazılımı için %2,28 ve HoloBuilder yazılımı için %9,72 hata payı elde edilmiştir.

A Comparative Approach to Geometric Data Collection Tools within the Scope of Construction Progress Monitoring (İİİ)

Research Article

Article History:
Received: 11.09.2025
Accepted: 04.12.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Construction progress
Laser scanning
LiDAR
Building information modeling
360° camera

ABSTRACT

The global construction industry accounts for approximately 13.4% of the economy and is expected to reach a size of 15.2 trillion dollars by 2030. Due to the limited use of mass and modular production in the industry, next-generation production concepts such as Construction 4.0 are of limited use. However, construction progress tracking systems that work in synchronization with Building Information Modeling (BIM) have made significant contributions to the literature in recent years. Within the scope of construction progress monitoring (CPM), practical and cost-effective systems are discussed in this study in order to disseminate next generation software. The performances of these tracking systems are compared by comparing 60 measurement data obtained from 3D DEM model, 360° camera and HoloBuilder software, LiDAR sensor and Canvas software with real data. In terms of distance measurements of the systems, on the basis of the mean absolute relative error (MAPE) performance criterion; 2.02% for the three-dimensional BIM model, 2.28% for Canvas Software and 9.72% for HoloBuilder software were obtained.

To Cite: Çelikesir B., Bayram S., Mızrakçı FM. İnşaat İlerleme İzlemesi (İİİ) Kapsamında Geometrik Veri Toplama Araçları Üzerine Kıyaslamalı Bir Yaklaşım. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1762-1781.

1. Giriş

İnşaat sektörü, gelişmiş ülkelerde altyapı yenilenmesinde, gelişmekte olan ülkelerde ise niteliksiz eleman sönümlemede ve yüksek finansal gücüyle ekonomik canlanmayı etkilemektedir. Sektör, küresel ekonomik çıktının yaklaşık %13,4'ünü oluşturmakta ve diğer endüstriyel sektörlerin de gelişimini destekleyerek küresel ekonomiye katkı sağlamaktadır (Zou ve ark., 2014). Küresel inşaat hacminin 2021-2030 yılları arasında 4,5 trilyon ABD doları büyüyerek 15,2 trilyon ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (Oxford Economics, 2021). 2020 yılında küresel inşaat sektörüne 10,7 trilyon ABD doları harcama yapıldığı göz önüne alındığında, bu hacim %42,1'lik bir büyüme anlamına gelmektedir. Bu artış, ülke ekonomilerine katkı sağlasa da katma değeri olmayan faaliyetler de artış göstermektedir (Karataş ve Budak, 2023).

İnşaat sektörünün çok sayıda paydaşla bir arada çalışma zorunluluğu, projelerin büyüyerek daha karmaşık hale gelmesi, paranın zaman değeri ve fırsat maliyeti gibi etmenler, inşaat firmalarının gelişen yeni nesil uygulamalara uyum sağlamalarını kaçınılmaz hale getirmiştir. Son yıllarda mobil cihazların vazgeçilmez birer araç olmasıyla birlikte bilgi iletişim teknolojilerine (BİT) talep artmış ve ilerleme hızlanmıştır. Sanayi sektörü için dördüncü sanayi devrimi olarak adlandırılan Endüstri 4.0 ve bu terimle gelen siber-fiziksel sistemler (Cyber Physical Systems, CPS), 5G internet teknolojisi, yapay zeka (Artificial Intelligence, AI), veri depolama ve analiz teknolojileri (Big Data, BD), bulut depolama ve veri güvenliği (BlockChain, BC), nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT), dijital ikiz (Digital Twin, DT), insan-bilgisayar etkileşimi (Human Computer Interaction, HCI) gibi teknolojiler, bu devrimi gerçekleştirmek için en çok kullanılan araçlar haline gelmiştir (Muñoz-La Rivera ve ark., 2020).

Her ne kadar inşaat sektörünün kendine has dinamikleri ve endüstri sektöründen farklı kısıtlılıkları söz konusu olsa da gelişen yazılım sistemleri, inşaat projelerinden beklenen süre, maliyet, kalite ve güvenlik hedeflerinin daha başarılı olarak gerçekleşmesinde etkili olmaktadır. Sanayi sektöründe gerçekleşmekte olan Endüstri 4.0 devriminin inşaat sektörü için yeniden tanımlanarak sektöre uygun hale getirilmesiyle ortaya çıkan İnşaat 4.0 kavramı kapsamında; akıllı inşaat tanımları ve yapı bilgi modellemesi (YBM), çevik ve yalın proje yönetimi, bulut tabanlı inşaat belge yönetim sistemleri, bilgisayarla görme ile gerçek zamanlı iş ilerlemesi takibi, otomatik konumlandırma sistemli iş makineleri, inşaat iş birliği teknolojileri vb. birçok teknolojik yenilik, günümüz inşaat/yapım yönetimi disiplininin en çok araştırılan konuları haline gelmiştir (Bayram, 2020; Yıldırım, 2022; Said ve Aktaş, 2024; Koparan, 2025).

İnşaat 4.0 ve akıllı inşaat vizyonlarını geliştirmeye yönelik olarak yapılan çalışmalarda, YBM ile inşaat projelerinin 3B modellenerek adeta sanal ortamda inşa edilmesinin önü açılmış ve yapıların dijital ikizlerinin oluşturulması sağlanmıştır (Yıkıcı, 2023). Şantiyelerde gerçekleşen iş ilerlemesini izlemek, başarılı proje yönetim uygulamaları için önem arz etmektedir (Patel ve ark., 2021). İnşaat

ilerleme izlemesi (İİİ)-(Construction Progress Monitoring, CPM) kapsamında, son yıllarda 3B yerinde (as-built) veri toplama teknolojileri, lazer tarayıcılar ve fotogrametri yöntemleri kullanılan birçok çalışma yapılmıştır. Alptekin ve ark. (2019), bir ören yerinde bulunan yapıları lazer tarayıcı kullanarak 3B olarak modellerken, Açıl ve Polat (2023), bir kütüphane yapısını 3B modelleyerek, enerji analizleri kapsamında enerji etkin yapı tasarımını hedefe almışlardır. Ancak bu tür çalışmaların yüksek maliyetli cihazlar kullanılarak sonuca ulaşmaları, özellikle Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler (KOBİ)'in bu sistemleri kullanabilmelerini engellemektedir. Zira Türk inşaat sektöründe hizmet veren işletmelerin %99,89'unu KOBİ'ler oluşturmaktadır (KOSGEB, 2016). Bu durum, diğer ülkelerde de benzerdir (Oke ve ark., 2013). Türkiye'de halen birçok inşaat projesinde, en basit proje yönetim uygulamaları olan iş programı ve takibi, belge yönetimi vb. temel araçlar kullanılmamaktadır (Bayram, 2020; Akdeniz ve Ofluoğlu, 2023). Metraj çalışmaları ya iş başında projeler üzerinden proje tasarım ekibine yaptırılmakta, ya da iş bitiminde hakediş ödemeleri yapılacağı zaman yapılmaktadır (Karagöz, 2019). İşletmelerin bu tutumları göz önüne alındığında, teknik bilgiye ve teknolojik altyapıya bakış açılarının kısıtlı olduğu düşünülebilir. Dolayısıyla inşaat sektöründe KOBİ'ler için geliştirilecek teknik ve teknolojik sistemler, bu kısıtlılıklar altında planlanarak geliştirilmelidir. İİİ tabanlı süreçler kapsamında, son yıllarda gerçekleştirilmiş olan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Akıncı ve ark., (2006), 3B modeli ve LiDAR sensörler yardımıyla saha çalışması yaparak kalite kontrol süreçlerini otomatikleştirmeye amaçlayan bir sistem önerisi geliştirmişlerdir. Bosche ve Hass (2008), LiDAR tarayıcılarla elde ettikleri verilerden 3B bilgisayar destekli tasarım (CAD) nesnelerini otomatik elde ettikleri jeo-uzlamsal yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Turkan ve ark., (2012), bir betonarme üst yapı projesinin ilerleme takibini, 4B BIM modeli ve LiDAR tarayıcılar kullanarak geliştirdikleri sistem ile incelemişlerdir. Yazarlar çalışmalarında, lazer tarayıcıların henüz tam potansiyellerine ulaşamadıkları sonucuna varmışlardır. Omar ve Nehdi (2016), İİİ için elektronik ve otomatik veri toplama teknolojilerini incelemişlerdir. Yazarlar, lazer tarama veya dijital fotogrametriden elde edilen 3B nokta bulutlarını 4B YBM ile entegre eden 'Scan-BIM' nesne tanıma teknolojilerinin yüksek hassasiyetli amaçlar için kullanılabilecek en doğru veri toplama araçları olduğunu, ancak yüksek maliyetleri ve kullanım zorlukları sebebiyle büyük, sıkışık olmayan ve erişilebilir projelerde kullanılmalarını tavsiye etmişlerdir. Eiris ve ark., (2018), geliştirdikleri PARS adlı sistem ve 360° kameralar kullanarak şantiye sahası iş güvenliğinin sağlanmasına yönelik yaptıkları çalışmada, sistemin iş kazalarını %30 oranında engellediğini belirtmişlerdir. Kopsida ve Brilakis (2020), HoloLens cihazı ve karma gerçeklik yaklaşımını kullanarak inşaat ilerlemesini yerinde otomatik izlemeye olanak sağlayan sistem geliştirmişlerdir. Yazarlar, test ettikleri farklı parametreler ile %95,2 doğruluk, %96,5 kesinlik ve %97,3 geri çağırma sağlandığını ifade etmişlerdir. Braun ve ark., (2020), İİİ'yi destekleyen makine öğrenimi (ML) tabanlı bir nesne algılama yaklaşımı sunmuşlardır. Yazarlar, geliştirdikleri yaklaşımın inşaat tipine bağlı olarak; inşa edilmiş elemanların tespitinin, hareket ile nesne oluşturma (Structure from Motion, SfM) tabanlı, tamamen geometrik planlı ve inşa edilmiş karşılaştırmaya kıyasla %50'ye kadar artabileceğini tespit etmişlerdir. Pour

Rahimian ve ark., (2020), inşaat projelerinin otomatik izlenmesi ve gerçek zamanlı simülasyonu için bir çerçeve önerisinde bulunmuşlardır. Geliştirdikleri algoritmada derin öğrenme, uzamsal çıkarım ve YBM sanal fotogrametrisi yoluyla gerçek dünya görüntülerini, YBM ve sanal dünya modelleriyle entegre etmişlerdir. Şimşek (2020), Dubai'de yapımı devam eden uluslararası bir proje üzerinde YBM sistemi ve 3B LiDAR tarama cihazını kullanmış olup bu araçların inşaat sektöründe etkin ve verimli kullanımının başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu tespit etmiştir. Patel ve ark., (2021), 1972-2021 yılları arasında yayınlanmış ve İİİ ile ilgili 1835 makaleyi, bilimsel haritalamaya dayalı bilimetrik analiz yöntemini kullanarak incelemişlerdir. İİİ ile ilgili çalışmaların, 2007'den önce temel ve geleneksel İİİ araştırma konularına odaklandığı, 2007'den sonra dijitalleşme ve otomasyona doğru ilerledikleri görülmüştür. Arif ve Khan (2021); akıllı inşaat ilerleme takibi için dronlar, fotogrametri, lazer tarama vb. gibi farklı teknolojilere alternatif olabilecek, bunların yüksek maliyet, karmaşıklık ve insan kaynakları gereksinimleri nedeniyle mevcut sınırlılıklarının önüne geçecek, düşük maliyetli bir internet protokol (IP) kamerası ile videografi tekniklerini MatLAB ve YBM entegrasyonuyla kullanan bir çerçeve sunmuşlardır. Paneru ve Jeelani (2021); inşaat sektöründe bilgisayarla görmenin potansiyel faydalarını ele aldıkları çalışmalarında, güvenlik yönetimi ve ilerleme izlemenin, bilgisayarlı görme kapsamında kullanan en popüler alanlar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca en yaygın zorluklardan birinin, görsel tabanlı uygulamaların verimli çalışması için kaliteli girdi verilerine ihtiyaç duyulması olduğunu, inşaat ortamlarının benzersiz özellikleri (düzensiz zemin, zayıf aydınlatma, dağınık ortamlar vb.) nedeniyle, görsel verileri korumanın zor olduğunu ifade etmişlerdir. Reja ve ark., (2022), İİİ çalışmalarını derleyerek, bu çalışmalarda yer alan araçları, teknolojileri ve algoritmaları kategorize eden, PRISMA adını verdikleri bütünleşik bir çerçeve çizmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında, İİİ'nin inşaat yöneticilerine gerçek zamanlı, doğru ve güvenilir bilgiler sağlama potansiyeline sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Konu ile ilgili çalışmaların, izleme süreçlerini otomatikleştirmeye yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bunun yanında, önerilen sistemler hem sahiplik maliyetleri hem de nitelikli operatör istihdamı gerektirmeleri sebepleriyle yüksek maliyetlidirler. Dolayısıyla düşük maliyetli, insan odaklı ve manuel teftiş yöntemlerine göre daha az hataya sebep olabilecek, bütünleşik bir çerçeve tespit edilememiştir. Bu nedenle, bu çalışma, inşaat sektöründe faaliyet gösteren firmaların teknolojik yeniliklere ve sistemlere İİİ özelinde uygulanabilirliğinin ele alınması fikrinden ilham almıştır. Çalışmanın amacı; özellikle KOBİ'lerin tercih edebilecekleri, YBM sistemleri ile uyumlu, kullanımı kolay ve düşük maliyetli şantiye iş ilerlemesi izleme teknolojilerini kıyaslamaktır.

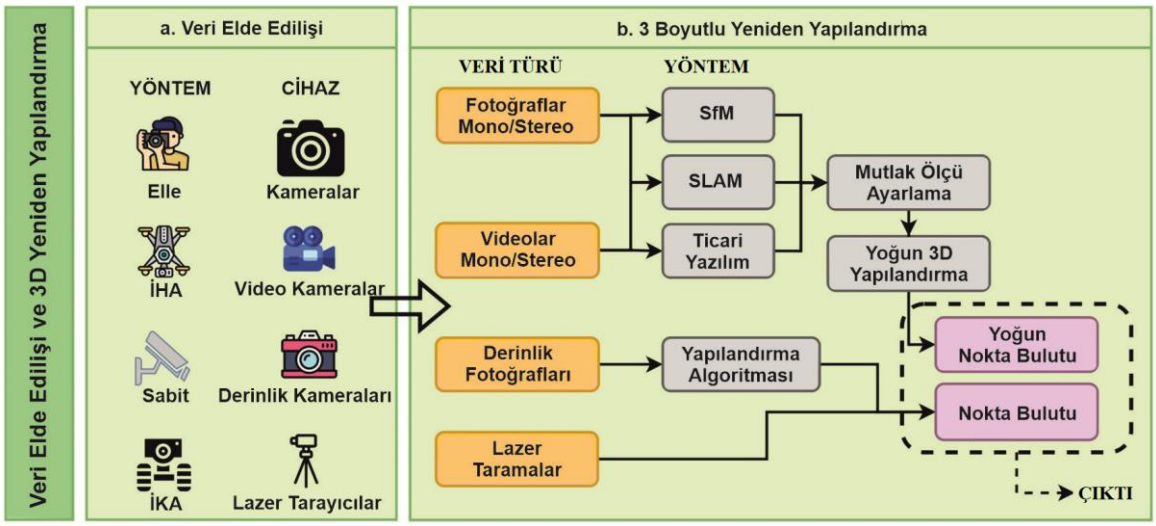
2. Materyal ve Metot

Bu bölümde, ilk olarak, çalışmanın temel metodu olan inşaat ilerleme izlemesi (İİİ) kavramı ele alınmış olup daha sonra da uygulamada kullanılan cihaz ve yazılımlar irdelenmiştir.

2.1. İnşaat İlerleme İzlemesi

İnşaat ilerleme izlemesi (İİİ), gerçek ilerlemeyi değerlendirmek ve planlanan ilerleme ile karşılaştırmak için (1) veri toplama, (2) veri analizi ve (3) proje performans raporlaması, şeklinde üç aşamadan oluşan, döngüsel ve tekrarlayan prosedür olarak tanımlanabilir (Meredith ve Mantel, 2021). İlerleme izleme, her zaman inşaat proje yönetiminin en temel bileşenlerinden birisi olmuştur (Golparvar-Fard ve ark., 2011).

Hâlihazırda, inşaat projelerinde ilerleme izleme ve belgelendirme amacıyla 2B fotoğraflar, mesajlaşma uygulamaları ile yapılan yazışmalar, e-posta gönderileri, telefon görüşmeleri vb. geleneksel çözümler, proje paydaşları arasında aktif olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler, inşaat projelerinin yönetiminde planlanan uygulamaların aksine; dağınık bilgilerin oluşmasına, tüm proje paydaşlarının aynı çatı altında toplanamamalarına ve proje süresince elde edilen verilerin kalıcı olarak korunamamasına neden olmaktadır. Procore, BIM 360 vb. gelişmiş şantiye yönetimi ve koordinasyonu programları, özellikle küçük projelerde yeterince uygulama alanı bulamamakta olup etkili bir İİİ süreci yürütülememektedir. Hâlbuki etkili İİİ, projelerin zamanında ve öngörülen bütçe içerisinde teslim edilmesinin anahtarıdır. Reja ve ark., (2022), inşaat ilerlemesi izlenmesinde kullanılan teknolojik yöntemleri kategorize ederek sınıflandırmışlardır. Bu sınıflandırmaya göre inşaat ilerlemesi izleme teknolojileri; i) verilerin elde ediliş "yöntemine" göre, ii) veriler elde edilirken kullanılan teknolojik "cihaza" göre, iii) toplanan verilerin "türlerine" göre ve iv) verilerin yeniden yapılandırılmasında kullanılan "yönteme" göre, dört gruba ayrılmıştır. Genel metodoloji, Şekil 1'de sunulmuştur.



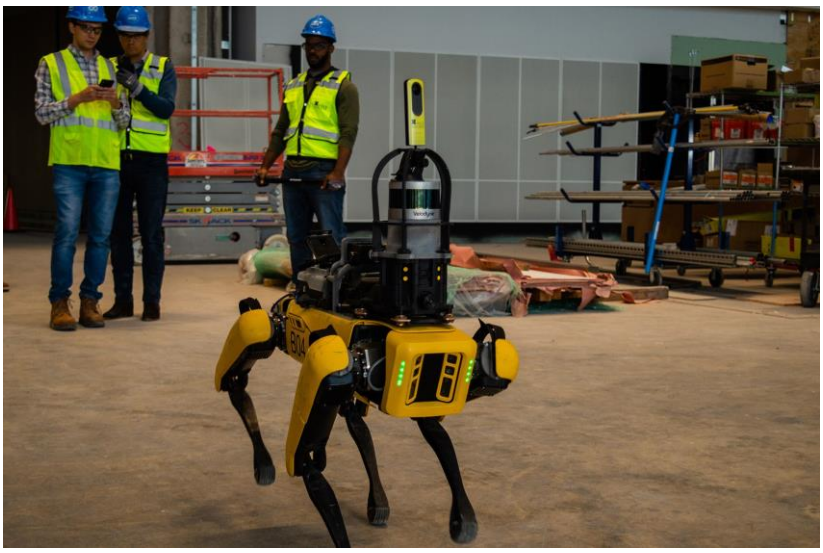
Şekil 1. İnşaat ilerlemesi izlenmesinde kullanılan yöntemler (Reja ve ark., 2022)

2.2. Cihazlar ve Yazılımlar

YBM, yapıların bilgisayar ortamında kapsamlı parametreler ile adeta sanal ortamda inşa edilmesine olanak tanıyan sistemin genel adıdır. YBM kullanımının yaygınlaşması ve inşaat proje süreçlerine entegre edilmesi, kullanan inşaat paydaşlarının sağladıkları fayda sonucu gösterilen ilgiye bağlanabilir. Farklı üreticilere ait farklı YBM yazılımları bulunmasına karşın, Autodesk tarafından geliştirilen Revit

yazılımı öne çıkmaktadır (Lu ve ark., 2021). Revit, 3B modelleme ve aile (family) özelliği ile parametrik modelleme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bunun yanında, mevcut kütüphane nesnelerinin yanında, serbest bırakılmış nesne modelleme imkânı ile kullanıcıya kendi kütüphanesini oluşturma imkânı vermektedir. Uygulama içerisinde 3B modelleme ile eş zamanlı olarak kesit, görünüş, plan çizimleri de güncellenebilmektedir (Zotkin ve ark., 2016). Autodesk Navisworks ise 4B YBM (zaman) ve 5B YBM (maliyet) boyutlarında kullanılmak için geliştirilmiştir.

HoloBuilder; mimarlık, mühendislik ve inşaat (AEC) firmaları ile müşavir firmaların inşaat ilerlemesini uzaktan yönetmelerine ve bunlara erişmelerine olanak tanıyan bir İİİ yazılımıdır (Speichee ve ark., 2015). İnşaat sektöründeki proje paydaşlarının şantiyeleri sanal olarak ziyaret etmelerini sağladığı için "şantiye için Google sokak görünümü" olarak da tanımlanmaktadır (HoloBuilder, 2025). HoloBuilder'ın SpotWalk uygulaması tarafından kontrol edilen spot robot, bir inşaat projesinin zaman içindeki ilerlemesini kaydeden 360° görüntüler yakalayarak, Şekil 2'deki gibi şantiye sahalarında bağımsız olarak hareket edebilir (Wire, 2019). 360° kameralar, 2B fotoğraflara bağlı kalınmadan 3B panoramik görüntüler ile anlık görüntüleme gereksinimlerine cevap verilmesi amacıyla geliştirilmişlerdir. Bu kameralar, üzerlerinde iki adet birbirine zıt yönde yerleştirilmiş geniş açılı kamera lensi kullanılarak imal edilmişlerdir. Mobil cihazlarla senkronize şekilde çalışarak çekim yapmaktadırlar (Ricoh, 2025).



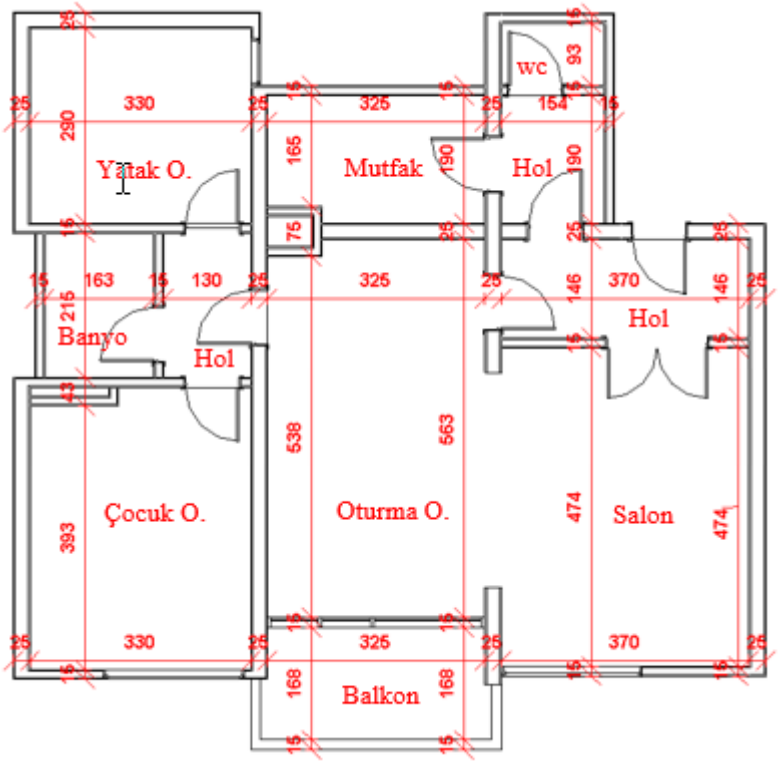
Şekil 2. SiteWalk ile otonom şantiye ilerlemesi izleme (Wire, 2019)

Canvas, yazılım sensörlerinden gelen işlenmemiş verileri, lazer nokta bulutu şeklinde işlenmiş veriye dönüştürerek alan taramasına imkân veren LiDAR görüntü işleme yazılımıdır. İlk aşamada Canvas yazılımı, 'structure sensor' adı verilen, RGB-D özellikli cihazdan toplanılan verilerin işlenmesi için kullanılmış olup Ekim 2020 tarihi itibariyle Apple firmasının iPad ve iPhone cihazlarına LiDAR sensör entegre etmesiyle birlikte 'structure sensor' üretimi durdurulmuş ve Canvas yazılımı LiDAR sensör verilerinin işlenmesine uyumlu hale getirilmiştir (Occiptal, 2020).

3. Bulgular

3.1. YBM Uygulaması

Uygulamada ele alınan yapı; Kayseri ili Melikgazi ilçesinde, zemin + 4 kat ile 20 konuttan oluşan ve 1970 yılında betonarme olarak inşa edilen bir apartman bloğunun üçüncü katında yer almaktadır. 105 m^2 brüt taban alanı mevcut olup üç oda, salon, mutfak, üç hol, balkon, banyo ve tuvaletten oluşmaktadır. Bölme duvarlar 20 cm ve 10 cm kalınlığında bims beton bloklar şeklinde uygulanmıştır. Tüm duvar ve tavan yüzeyleri çimentolu kaba ve ince sıva ile yapılmıştır. Duvar yüzeyleri bezir (keten) yağı, glitolin ve üstübeç kullanılarak hazırlanan macun ve sentetik saten boya ile boyanmıştır. Islak zeminlerde 10 x 20 cm ebatlarında seramik kaplama uygulanmıştır. Şekil 3'de projenin kat planı verilmiştir.



Şekil 3. Projenin kat planı

Revit yazılımı kullanılarak 3B YBM modeli oluşturulmadan önce, yapı alanında detaylı ölçüm, plan krokisi, fotoğraflama işlemleri ile yapının rölövesi çıkarılmıştır. Yapının 2B ve 3B çizimleri, hazırlanan rölöve ve Revit yardımıyla oluşturulmuştur. Modellemeye başlanmadan önce; Revit'in şablon, ölçü birimi, yapı kotu ayarları yapılmıştır. Mimari ve statik elemanlar proje kapsamında oluşturulacağı için bunların hepsinin bir arada oluşturulmasına olanak tanıyan yapı şablonu (construction template) kullanılmıştır. Konutun tek katlı olması ve çalışmayı kolaylaştırmak amacıyla zemin kotu +0,00 ve tavan kotu +3,00 olarak seçilmiştir. Tespit edilen duvar ve döşeme kalınlıkları, ölçüler, malzeme özellikleri gibi mevcut elemanlarının özelliklerine bağlı kalınarak malzeme ve yapı elemanı tanımlamaları yapılmıştır. Betonarme taşıyıcı sistem modellenmiş, ardından duvar çizimleri

yapılmıştır. Yapıda sıva dâhil duvar kalınlıklarının ortalama 25,0 cm ve 14,5 cm olduğu tespit edilmiştir. Parke ve seramik kaplama olmak üzere iki farklı döşeme tipi; ortalama 14 cm betonarme döşeme kalınlığı, 6 cm tesviye şapı ve 1,5 cm zemin kaplama malzemesi öngörülerek modellenmiştir. Ardından PVC pencereler ve iç oda kapıları projeye uygun olarak yerleştirilmiştir. Ölçülendirmeler ve ölçü kontrolleri yapılarak, yapının mevcut halinin 3B YBM modeli hazır hale getirilmiştir. Son olarak, YBM modeli Navisworks'e aktarılmıştır.

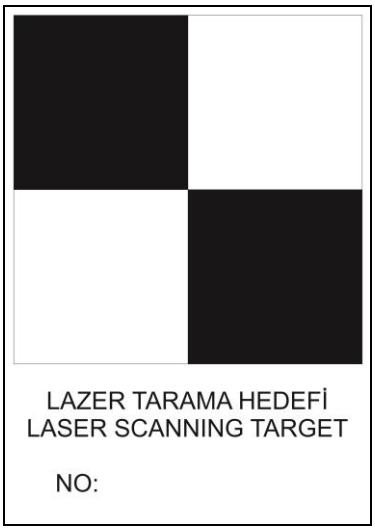


Şekil 4. Yapının 3B YBM modeli

3.2. Saha Taraması

İnşaat ilerlemesinin izlenebilmesi için, oluşturulan iş programı çerçevesinde tüm altyapı imalatlarını kapsayacak şekilde kontrol planlaması yapılmıştır. İlk olarak, konutun mevcut hali, çalışma kapsamında önerilen sistemler ile kayıt altına alınmış; ardından sırasıyla duvar, sıhhi ve ısıtma tesisatı imalatları, elektrik tesisatı, kaba sıva imalatı verileri elde edilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle gerçekleştirilen saha taramaları ifade edilmiş olup ardından toplanan verilerin işlenmesi izah edilmiştir.

Ele alınan sistemlerde, mesafe ölçümlerinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla 60 farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Kullanılan programlarda, ölçüm noktalarının konumunu doğru tespit edilebilmek için Şekil 5'de sunulan A4 kâğıt ebatlarında lazer tarama hedef kartları oluşturulmuştur.



Şekil 5. Lazer tarama hedef kartı

Oluşturulan hedef kartlarının ilki A-10 numarasından başlayıp numaralandırılarak, kartlar karşılıklı gelecek şekilde asılmıştır. Karşılıklı hedef kartları arasındaki mesafe ±1,5 mm/1 m hassasiyetli lazer metre yardımıyla ölçülmüş ve elde edilen 60 adet ölçü, kontrol ölçü veri seti olarak yazılımlardan alınacak mesafe ölçümlerini karşılaştırmak amacıyla kaydedilmiştir.

Çalışma kapsamında incelenen ilk yöntem, 360° kamera ve HoloBuilder yazılımı kullanılarak şantiye iş ilerlemesi izlemesi (İİİ) sistemidir. Uygulamada öncelikle HoloBuilder'da 'Create Project' sekmesi ile yeni bir proje oluşturulup proje bilgileri, kullanıcı bilgileri, proje kat planı, proje alanı gibi bilgiler servise yüklenmiştir.

HoloBuilder, mobil aplikasyon kullanılarak çalıştığı için uygulamanın devamında mobil tablet bilgisayar kullanımına geçilmiş ve 360° kamera ile bağlantı kurulması sağlanmıştır. Uygulamaya yüklenen daire kat planı üzerinde ilk çekim yapılacak yatay konum yaklaşık olarak belirlenip etkin konum (hotspot) ile nokta işaretlenmiştir. İşaretlenen nokta üzerinde aktif hale gelen Capture 360 komutu ile çekim gerçekleştirilmiştir. Etkin konum noktaları belirlenirken, çekim yapılan mahalin geometrik merkezinin seçilmesine özen gösterilmiştir. Tüm mahallerde aynı işlemler tekrarlanarak tüm alanın taranması sağlanmıştır. Bu sayede konutun mevcut halinin sanal bir kopyası oluşturulup taramanın ilk aşaması tamamlanmıştır. İkinci aşamada, daha önce aplikasyona tanımlanan etkin konum noktaları kullanılmıştır. Tarama için HoloBuilder aplikasyonu içerisinde bulunan 'SpeedMode' seçilmiştir. Tüm noktalara hareket edilerek ikinci çekim işlemi tamamlanmıştır. Benzer süreçler izlenerek, tüm inşaat imalatları HoloBuilder üzerine kaydedilmiştir. Yapılan beş çekimde; yıkım ve söküm imalatları, elektrik, ısıtma ve sıhhi tesisat imalatları, duvar ve sıva imalatlarının ilerleme izlemesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen ikinci yöntem, LiDAR özellikli sensörleri bulunan tablet bilgisayar ve Canvas yazılımıdır. LiDAR aracığıyla derinlik ölçümü yapılarak lazer nokta bulutları oluşturulmakta ve Canvas yazılımı aracılığıyla, elde edilen veriler işlenerek anlamlı veriye dönüştürülmektedir. Bu

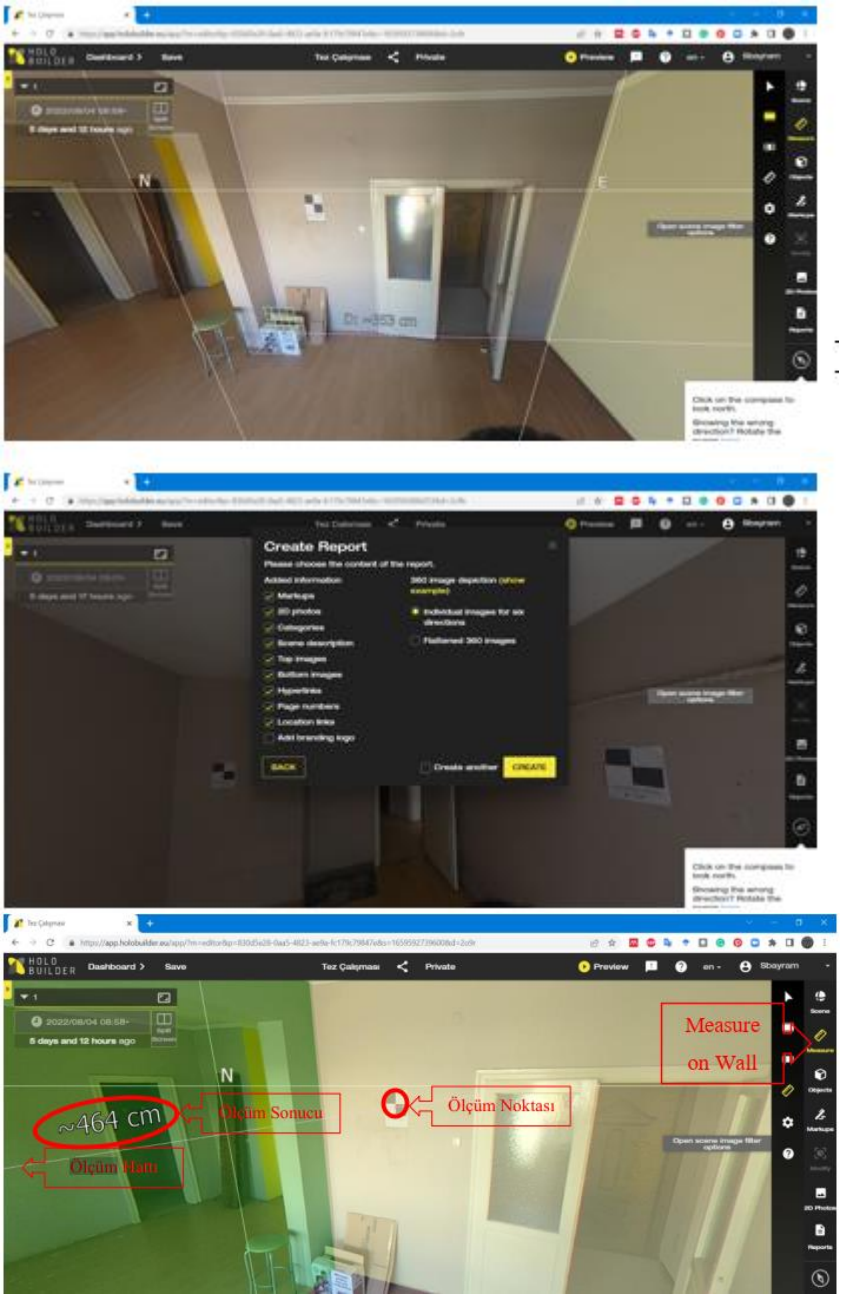
kapsamda, Canvas yazılımı kullanılarak 60 adet mesafe ölçümü yapılmıştır. Elde edilen ölçüm verileri hedef kart numaraları ile kaydedilerek ölçüm işlemi tamamlanmıştır.

Canvas'ta proje tanımlanmasının ardından LiDAR tarama gerçekleştirilmiştir. Taranan alanlar tablet ekranında saydam beyaz renkte görülmekte, cihaz hızlı hareket ettirildiğinde kırık çizgiler oluşmaktadır. Yönlendirmelere uyularak, tablet bilgisayarın yukarı-aşağı ve sağa-sola hareketleriyle tüm mekânlar taranmıştır. Her mekânda başlangıç noktasından 360° dönülerek tarama yapıldığında, diğer mekâna geçilirken bağlantının kopmaması için birbirini takip eden bir rota izlenmiş, program komutlarına uyularak süreç tamamlanmıştır. Toplam üç adet çekim yapılmış olup yapının mevcut durumu, tesisat işleri, duvar ve sıva imalatlarının ilerleme aşamaları kayıt altına alınmıştır.

3.3. Verilerin Değerlendirilmesi

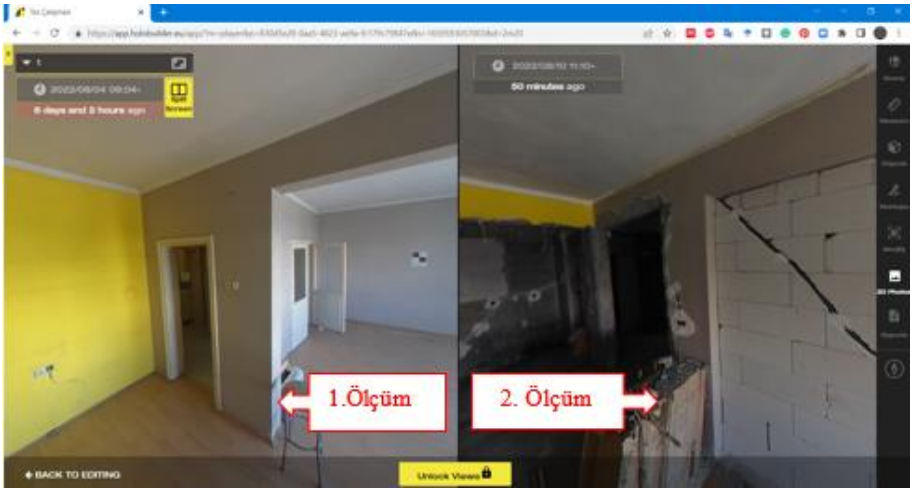
Saha taramasından elde edilen verilerden anlamlı sonuç elde edilebilmesi için birtakım düzenlemeler yapılması gerekmektedir. Öncelikle, yazılımlar üzerinden mesafe ölçümlerinin yapılabilmesi amacıyla saha verileri düzenlenerek ölçüm alınmaya hazır hale getirilmiştir. İlk olarak, konutun mevcut hali çalışma kapsamında önerilen sistemler ile kayıt altına alınmış, ardından sırasıyla duvar, sıhhi ve ısıtma tesisatı imalatları, elektrik tesisatı, kaba sıva imalatı verileri 60 farklı ölçümle elde edilmiştir. Daha sonra, yazılımlar süreç boyunca tüm yönleriyle detaylı incelenmiş, karşılaşılan problemler kayıt altına alınmıştır. Sistemler, uygulama geliştirici firmalar tarafından vaat edilen özelliklerinin test edilmesi çerçevesinde denenmiş olup, sistemlerin sağlayacağı avantajlar ve dezavantajlar değerlendirilmiştir.

İlk yöntem olan 360° kamera ve HoloBuilder yazılımı kullanılarak yapılan çekimler, uygulamanın bulut tabanlı çalışması sayesinde otomatik olarak web servisine aktarılmıştır. Yapılan çekimlerden anlamlı veriler elde edilebilmesi için düzenlemenin manuel olarak yapılması gerekmektedir. Bu düzenlemeler; i) kamera açılarının ayarlamaları, ii) duvar tanımlama işlemleri, iii) raporlama işlemleri, olarak sıralanabilir (Şekil 6).

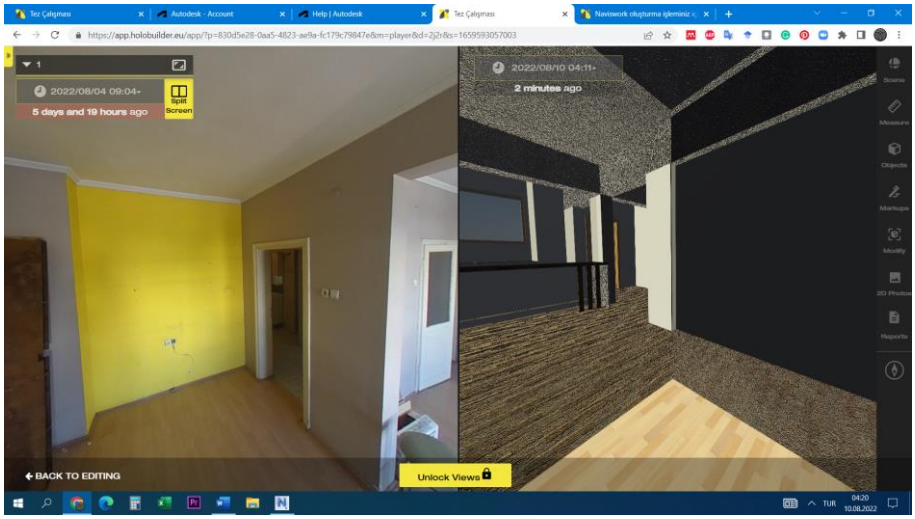


Şekil 6. HoloBuilder yazılımında kamera ayarlamaları, duvar tanımlama, raporlama ve ölçümleme işlemleri

HoloBuilder, 'SplitScreen' özelliği ile aynı etkin konum üzerinde iki farklı zamanda çekilmiş görüntüleri görüntüleme imkânı sağlamaktadır. Böylece görüntüler karşılaştırılabilmekte ve iş ilerlemesi izlenebilmektedir. Şekil 7'de, imalatların eş zamanlı görüntülenmesi sunulmuştur. Bunun yanında, HoloBuilder yazılımında, Navisworks'de oluşturulmuş YBM modeli de görüntülenebilmektedir. Böylece, 360° kamera görüntüleri ile Navisworks'den gelen 3B YBM modeli görüntüleri karşılaştırılabilir. Şekil 8'de, HoloBuilder arayüzünde Navisworks modeli görünümü sunulmuştur.



Şekil 7. HoloBuilder yazılımında imalatların eş zamanlı görüntülenmesi



Şekil 8. HoloBuilder arayüzünde Navisworks modeli görünümü

İkinci yöntem olan LiDAR sensör ve Canvas yazılımı kullanılarak elde edilen görüntüler, web servisi üzerinden düzenlenmektedir. Bu kapsamda; i) projenin web servisinde tanımlanması, ii) ölçülendirmelerin sayısallaştırılması, işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Canvas yazılımında projenin tanımlanması ve ölçümlerin sayısallaştırılması

Ölçümlenen sonuçlar, dört farklı veri seti grubu altında toplanmış olup her veri seti için 60 adet mesafe ölçüm verisi elde edilmiştir. Bu veri setleri;

- Saha çalışması sırasında lazer metre aracılılığıyla elde edilen veriler (gerçek veri seti),
- Revit'te oluşturulan 3B YBM modelinden elde edilen veriler (3B YBM veri seti),
- HoloBuilder'dan elde edilen veriler (HoloBuilder veri seti),
- Canvas'tan elde edilen veriler (Canvas veri seti),

Şeklinde adlandırılmıştır.

Yapılan mesafe ölçümlerinin performanslarının belirlenebilmesi amacıyla; hata bazında ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) ve karekök ortalama karesel hata (KOKH), korelasyon bazında ise determinasyon katsayısı (R^2) kullanılmıştır.

OMYH, bir tahmin sisteminin doğruluğunun yüzde olarak ölçülmesinde kullanılan istatistiksel bir performans ölçüm birimidir. Oransal olarak ifade edilmesinden dolayı anlaşılması kolaydır ve kullanılan en yaygın ölçüdür (de Myttenaere ve ark., 2016). OMYH performansı; ≤%10 ise 'yüksek', %10-%20 arasında ise 'iyi', %20-%50 arasında ise 'orta' ve >%50 ise 'düşük' olarak ifade edilebilir (Rai ve ark., 2022).

$$OMYH\ (\%) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_{model,i} - y_{real,i}}{\bar{y}_{model,i}}\right| \quad (1)$$

KOKH, tahminlenen değerler ile gerçek değerleri arasındaki uzaklığın bulunmasında sıklıkla kullanılan ve hatanın büyüklüğünü ölçen bir metriktir. Tahmin hatalarının (kalıntıların) standart sapması olarak ifade edilebilir (Uncuoğlu ve ark., 2022). Bu nedenle, KOKH değerinin sıfıra yakın olması durumunda iyi performans gösterdiği değerlendirmesi yapılabilir.

$$KOKH = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\left(y_{model,i} - y_{real,i}\right)^2} \quad (2)$$

R^2, bağımlı değişkendeki varyansın ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını ölçen nümerik bir metriktir. 0 (açıklanan değişkenlik yok) ile 1 (mükemmel eşleşme) arasında değişir ve bir regresyon modelinin uyum iyiliğini değerlendirir (Figueiredo ve ark., 2011).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_{model,i} - y_{real,i}\right)^2}{y^2_{real,i}} \qquad 0 \le R^2 \le 1 \quad (3)$$

Veri setlerinden elde edilen performans göstergesi değerleri, Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Ölçüm veri setlerin performansları

	3B YBM Veri Seti	HoloBuilder Veri Seti	Canvas Veri Seti
OMYH (%)	2,02	9,72	2,28
KOKH	0,079	0,475	0,109
R^2	0,9984	0,9537	0,9989

OMYH ele alındığında, bütün veri setlerinin performansı %10'dan küçük olup veri setlerinden 'yüksek' performans elde edilmiştir. KOKH açısından, elde edilen değerlerin 0,0 değerine yakın oldukları, düşük hata değerleri gözlenmiştir. R^2 değerleri için de 1,0 değerine yakın ve yüksek korelasyona işaret eden bulgular gözlenmiştir.

4. Tartışma

Rölöve ölçüm değerleriyle oluşturulan 3B YBM, 360° kamera ölçüm değerleriyle oluşturulan HoloBuilder ve LiDAR ölçüm değerleriyle oluşturulan Canvas kullanılarak elde edilen veri setlerinin, yerinde ölçümlenen veri seti baz alınarak OMYH (%), KOKH ve R^2 performansları incelendiğinde, her ne kadar ilgili yazılımların eksiklikleri ve uygulama zorlukları aşağıda da ifade edildiği üzere, mevcut uygulamayı olumsuz yönde etkilemiş olsa da, dikkate alınan performans göstergeleri dahilinde, üç veri setinin de başarılı performans gösterdikleri ifade edilebilir. Kıyaslama yapılacak olursa; 3B YBM veri seti, gerek OMYH gerekse KOKH açısından en düşük hata performansına sahiptir. R^2 içinse Canvas veri seti en yüksek korelasyon performansına sahiptir. Dolayısıyla, en

başarılı performans sıralaması; 3B YBM, Canvas ve HoloBuilder şeklinde yapılabilir. Ancak HoloBuilder'a verilerin işlenmesi sırasında operatör hatalarından kaynaklı ölçüm sonuçlarının değişkenlik gösterebileceği unutulmamalıdır. Bunun yanında, hata payı farkları; algoritmik, donanımsal ve çevresel faktörlere bağlı olarak da değişkenlik gösterebilmektedir.

Benzer çalışmalarda, genellikle performans ölçümü ve kıyaslaması yapılmadığı için mevcut bulguların benzer bulgularla kıyaslanması mümkün olmamıştır. Her ne kadar Kopsida ve Brilakis (2020), Microsoft HoloLens cihazından %95,2 doğruluk, %96,5 kesinlik ve %97,3 geri çağırma değerleri elde etmiş olsalar da bu göstergeler, mevcut çalışmada kullanılan göstergelerden farklıdır. Ancak mevcut çalışmada, iki veri setinden elde edilen %99'un üzerindeki R^2 değeri, mevcut çalışmadan elde edilen performansın daha yüksek olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bunun yanında, benzer çalışmaların, çoğunlukla LiDAR ve fotogrametrik taramaların otomatik YBM modellerine dönüştürülmesi üzerine olduğu ifade edilebilir (Akıncı ve ark., 2006; Bosche ve Hass, 2008; Turkan ve ark., 2012; Şimşek, 2020). Tarama verilerinin elde edilmesinde, genellikle satın alma maliyeti yüksek LiDAR sensörler ve SLAM sistemli kameralar kullanılmaktadır (Reja ve ark., 2022). Bu cihazlar, ayrıca özel operatör gereksinimine sahip, yavaş çekim yapan ve bulundurdukları ekipmanlar ile şantiye sahasında kullanım imkânı yalnızca özel projelerle sınırlanan kısıtlı kullanım alanı olan özelliktedir. Bu çalışma kapsamında karşılaşılan özel durumlar, aşağıda proje ve yazılım temelinde tartışılmıştır.

Proje açısından, yapının 1970 teknolojisiyle yapılmış eski bir bina olması nedeniyle ölçülü olmayan, mastarında ve terazisinde yapılmayan imalatlar, rölöve ölçülerinin alınmasını zorlaştırmıştır. Rölöve sırasında düşey doğrultuda aynı ölçümlerin yapılamaması sebebiyle yatay göz hizasından alınan ölçüler kabul edilmiştir.

Yazılım açısından, her ne kadar Revit'in aile (family) yapısı, tanımlanan malzeme özellikleri ile bir seferde birden çok katmanlı yapı elemanlarının oluşturulmasına imkân tanıyarak ve modellemeyi hızlandırarak 3B YBM'nin oluşturulmasını kolaylaştırsa da, aynı özelliklerde tanımlanmış katmanları otomatik olarak birleştiren 'join' özelliği ile özellikle farklı katman birleşimlerinde ya da hatalı çizimlerde istenmeyen işlemler yapılabilmektedir. Bu durumun manuel şekilde düzeltilmesi, işlemi zorlaştırmaktadır. Bunun yanında, 'otomatik hizalama' işlevi, oluşturulan bir alanın ölçü değişimleri yapılmak istendiğinde modellemeyi kolaylaştıran bir özellik olsa da benzer şekilde, istenmeyen hizalamalar oluşmakta ve bunların düzeltilmesi zaman almaktadır.

HoloBuilder yazılımının, BIM 360 ve Procore gibi dünya çapındaki şantiye sahası koordinasyon programları ile iletişim kurabilmesi, yazılımın kullanım alanını genişletmektedir. Özellikle 360° görüntüler eşliğinde bilgi talebi (RFI) tanımlamaları, gerek bu sürecin hatasız yürütülmesinde gerekse daha hızlı cevap ve çözüm alınmasına katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, platformun Revit ve Navisworks'e uyumlu çalışması, 5B YBM sürecine, özellikle 360° çekilmiş gerçek saha görüntüleri sayesinde katkı sağlamaktadır. Günümüzdeki internet erişimi imkânları ile gelişen bulut depolama çözümleri, nesnelerin interneti (IoT) gibi teknolojilerin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. HoloBuilder yazılımında, tanımlanacak duvarın köşe noktalarında bir engel olduğunda, köşeler doğru

noktalardan seçilememekte ve tanımlama yanlış yapılmaktadır. Mesafe ölçüm verileri duvarlar kullanılarak yapıldığından dolayı, hatalı tanımlamalar sonucu yanlış ölçümler yapılabildiği gözlemlenmiştir.

Navisworks, 3B YBM modellerini şematik renklerle görselleştirdiğinden dolayı, HoloBuilder'a da bu şekilde aktarmaktadır. Ancak aktarılan görsel kalitesinin çok düşük ve karanlık olduğu görülmüştür. Işık ayarları yapılarak aydınlatma sağlansa da görseller şematik olduğundan istenilen kalite elde edilememiştir. Gerçekçi görüntüler elde edilmesini sağlayan ve Navisworks'te de mevcut olan 'render' özelliği kullanılarak aktarım yapılma imkânı ile tatmin edici görüntüler elde edileceği değerlendirilmektedir. Yine HoloBuilder'da karanlık alanlarda çekim yapıldığında çok düşük kaliteli görseller elde edilmiştir. Bu nedenle, yüksek çözünürlüklü 360° kameralar ile uygulamanın kullanılmasının daha faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Bunun yanında, tripod ya da monopod benzeri kamera sabitleyiciler ile çekimlerin yapılması hem sarsıntıyı önleyerek daha stabil görüntüler elde edilmesini sağlayacak, hem de sürekli aynı yükseklikten çekim yapılmasına olanak sunacaktır. Özellikle dar alanlarda çekim yapılırken, etkin noktaların konumlarının doğru saptanamadığı tespit edilmiştir. Bu alanlarda manuel çekimlerin yapılması ile daha kaliteli görüntüleme elde edilmiştir.

Canvas yazılımı ile saha taraması yapılırken, kamera hareketleri tarama sonuçlarını etkilemektedir. Tablet hızlı hareket ettirildiğinde nokta bulutlarında kopmalar meydana gelmekte, yavaş hareket ettirildiğinde ise mahaller arası geçişlerde kopmalar olmaktadır. Bu sorunun sensör kaynaklı mı yoksa yazılımsal mı olduğu tespit edilememiştir. Canvas yazılımı, taramalar sonucunda elde edilen nokta bulutlarını kullanarak bulut servisi üzerinden otomatik Revit dosya uzantılı (.rfa) 3B YBM modelleri oluşturmaktadır. Ancak işlem ücreti, ülkemiz şartları için oldukça yüksek maliyetlere neden olacaktır.

5. Sonuçlar

İnşaat sektörü, doğası gereği emek yoğun iş gücü gerektirdiğinden dolayı teknolojik yeniliklere diğer sektörlere göre daha geç adapte olmaktadır. Bunun yanında; nitelikli eleman problemleri, teknolojik yeniliklerin maliyetli olmaları vb. faktörler de bu adaptasyonu geciktirmektedir. Ancak Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından yayımlanan On İkinci Kalkınma Planında; "inşaat ekosisteminde dijitalleşme artırılacaktır." politikası benimsenmiş olup planlanan yasal düzenlemeler ile birlikte, inşaat projelerinde YBM kullanımının artması beklenmektedir. YBM kullanımının yaygınlaşması da Revit ile veri alışverişi yapabilen HoloBuilder, Canvas vb. destekleyici yazılımların kullanımlarının yaygınlaşacağını ortaya koymaktadır.

Konu kapsamında yapılan çalışmaların ilk edinim ve işletim maliyeti yüksek sistemler üzerine yoğunlaştığı dikkate alındığımda, bu çalışmada önerilen LiDAR, 360° kamera vb. sistemler, 3B lazer tarayıcılar ve fotogrametrik sistemlere göre daha basit ve ekonomiktir. Operatör gerektirmeden kolay kullanılabilir olmaları ve şantiye sahasından hızlı veri elde edebilmeleri nedeniyle yakın gelecekte, yaygınlaşma potansiyellerinin yüksek olacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın temel kısıtlılığı, ölçümlemelerin saha çalışmasının 105 m^2 taban alanına sahip olan bir konut projesinde yapılmış olmasıdır. Bunun yanında; uygulama yapılan alan, mevcut bir yapının tadilat sırasındaki projesidir. Tadilat kapsamında; elektrik, sıhhi ve ısıtma sistemi tesisatları yenilenmiş, mutfak alanı mevcut oturma odasıyla birleştirilerek açık mutfak düzeni oluşturulmuş, açık olan salon ve oturma odası arasındaki duvar örülerek kapatılmış, duvar sıvaları tamir edilmiş, ıslak hacimlere seramik kaplama yapılmış, kalan zeminlere laminat parke uygulanmıştır. Dolayısıyla yeni bir inşaat sahasında önerilen sistemler uygulanmamıştır. Çalışma 60 farklı ölçüm verisi içermekte olup farklı koşullarda (örneğin projenin tamamı, farklı dış mekân, geniş hacimler vb.) farklı sonuçlar alınabilmesi mümkündür.

Bu çalışmada, az sayıda çalışmaya konu olmuş hızlı, ekonomik ve pratik olarak kullanılabilir sistem önerisinde bulunulmuştur. Özellikle Canvas yazılımının yönetim araçları ve veri alma hızı geliştirilirse, sayıları giderek artan LiDAR sensörlü cep telefonu veya tablet bilgisayar gibi yaygın kullanımı bulunan cihazlar ile bu işlemler çok basit bir hale gelebilecektir. Benzer şekilde, HoloBuilder yazılımının en büyük zorluğu olarak değerlendirilen duvar tanımlama işlemi otomatikleştirilirse, kullanımı kolaylaşarak herkes için uygun maliyetli bir çözüm temin edilmiş olunacaktır. İlerleyen çalışmalarda, benzer uygulamaların daha geniş sahalarda, farklı imalatlarda ve farklı nitelikteki inşaat projelerinde uygulanması tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (ERÜ-BAP) Koordinatörlüğü tarafından FYL-2020-10108 numaralı proje ile maddi olarak desteklenmiştir. Yazarlar, makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür ederler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Açıl Ş., Polat H. Sürdürülebilir yapı tasarımı; Yapı bilgi modelleme destekli bir alan çalışması. Online Journal of Art & Design 2023; 11(4): 354-369.

Akdeniz E., Ofluoğlu S. Otel işletmelerinde varlık ve mahal yönetimi için BIM destekli tesis yönetimi uygulaması. Karesi Journal of Architecture 2023; 3(2): 75-99.

Akıncı B., Boukamp F., Gordon C., Huber D., Lyons C., Park KA. Formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. Automation in Construction 2006; 15(2): 124–138.

Alptekin A., Fidan Ş., Karabacak A., Çelik MÖ., Yakar M. Üçayak Örenyeri'nin yersel lazer tarayıcı kullanılarak modellenmesi. Türkiye Lidar Dergisi. 2019; 1(1): 16-20.

Arif F., Khan WA. Smart progress monitoring framework for building construction elements using videography–MATLAB–BIM integration. International Journal of Civil Engineering 2021; 19(6): 717–732.

Bayram S. Yapı bilgi modellemesi (YBM) kapsamında geleneksel metraj ile yazılımın karşılaştırılması. Yapı Bilgi Modelleme 2020; 2(2): 58-65.

Bosche F., Haas CT. Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images. Automation in Construction 2008; 17(4): 499–512.

Braun A., Tuttas S., Borrmann A., Stilla U. Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision. Automation in Construction 2020; 116(4): 103210.

De Myttenaere A., Golden B., le Grand B., Rossi F. Mean absolute percentage error for regression models. Neurocomputing 2016; 192(3): 38–48.

Eiris R., Gheisari M., Esmaeili B. PARS: using augmented 360-degree panoramas of reality for construction safety training. International Journal of Environmental Research and Public Health 2018; 15(2): 1–21.

Figueiredo FDB., Britto Silva JA., Rocha E. What is R^2 all about? Leviathan – Cadernos de Pesquisa Política 2011; 60: 60-68.

Golparvar-Fard M., Bohn J., Teizer J., Savarese S., Peña-Mora F. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. Automation in Construction 2011; 20(8): 1143–1155.

HoloBuilder. 2025 https://www.holobuilder.com/

Karagöz ME. BIM ile yapı yaklaşık maliyeti hesaplama önerisi. Yapı Bilgi Modelleme 2019; 1(1): 39-45.

Karataş İ., Budak A. İnşaat sektöründe yalın inşaatın ve yapı bilgi modellemesinin birlikte kullanılmasının atıklara etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(3): 2023-2033.

Koparan B. İnşaat sektöründe dijital dönüşüm: Literatür temelli bir değerlendirme. International Journal of New Horizons in the Sciences 2025; 3(1): 53-63.

Kopsida M., Brilakis I. Real-time volume-to-plane comparison for mixed reality–based progress monitoring. Journal of Computing in Civil Engineering 2020; 34(4): 04020016.

KOSGEB. 2015 - 2018 Kobi Stratejisi ve Eylem Planı (KSEP). 2016 https://www.kosgeb.gov.tr/Content/Upload/Dosya/Mali%20Tablolar/KSEP/Kobi_Stratejisi_ve_Eylem_Plani_(2015-2018).pdf

Lu Y., Gong P., Tang Y., Sun S., Li Q. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. Automation in Construction 2021; 124: 103553.

Meredith JR., Mantel SJ. Project management: A managerial approach 11th ed. Wiley; 2021.

Muñoz-La Rivera F., Mora-Serrano J., Valero I., Oñate E. Methodological-technological framework for Construction 4.0. Archives of Computational Methods in Engineering 2020; 28(2): 689–711.

Occiptal. What is the relationship between Canvas, Structure Sensor, and Occipital? - Canvas FAQ. 2020.https://support.canvas.io/article/4-what-is-the-relationship-between-canvas-structure-sensor-and-occipital

Oke AE., Ogunsemi DR., Adeeko O. Assessment of knowledge management among construction professionals in Nigeria. Journal of Construction Project Management and Innovation 2013; 3(2): 660–679.

Omar T., Nehdi ML. Data acquisition technologies for construction progress tracking. Automation in Construction 2016; 70(10): 143–155.

Oxford Economics. Future of Construction A Global Forecast for Construction to 2030. 2021 https://www.oxfordeconomics.com/resource/future-of-construction/

Paneru S., Jeelani I. Computer vision applications in construction: Current state, opportunities & challenges. Automation in Construction 2021; 132(10): 113-121.

Patel T., Guo BHW., Zou YA. Scientometric review of construction progress monitoring studies. Engineering, Construction and Architectural Management 2021; 35(8): 315-326.

Pour Rahimian F., Seyedzadeh S., Oliver S., Rodriguez S., Dawood N. On-demand monitoring of construction projects through a game-like hybrid application of BIM and machine learning. Automation in Construction 2020; 110(6): 103-112.

Rai NK., Saravanan D., Kumar L., Shukla P., Shaw, RN. RMSE and MAPE analysis for short-term solar irradiance, solar energy, and load forecasting using a recurrent artificial neural network. Applications of AI and IOT in Renewable Energy 2022; 55(3): 181–192.

Reja VK., Varghese K., Ha QP. Computer vision-based construction progress monitoring. Automation in Construction 2022; 138(3): 104-125.

Ricoh. 360-derece camera ricoh theta 2025. https://theta360.com/tr/

Said H., Aktaş BN. Evaluating the multifaceted advantages of lean project management in SMEs: A qualitative analysis. International Review of Economics and Management 2024; 12(1): 113-141.

Speichee M., Tenhaff K., Heinen S., Handoof H. Enabling industry 4.0 with holobuilder. Gesellschaft Für Informatik; 2015.

Şimşek O. İnşaat projelerinde ileri teknoloji uygulamaları. Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayda no: 78, İstanbul, Türkiye, 2020.

Turkan Y., Bosche F., Haas CT., Haas R. Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies. Automation in Construction 2012; 22(3): 414–421.

Uncuoğlu E., Citakoglu H., Latifoglu L., Bayram S., Laman M., Ilkentapar M.. Oner AA. Comparison of neural network, Gaussian regression, support vector machine, long short-term memory, multi-gene genetic programming and M5 Trees methods for solving civil engineering problems. Applied Soft Computing 2022; 129: 109623.

Wire B. HoloBuilder announces partnership with boston dynamics | Business wire 2019. https://www.businesswire.com/news/home/20191119005414/en/HoloBuilder-Announces-Partnership-with-Boston-Dynamics

Yıkıcı A. Dijital ikiz şehir fenomeni: Dünyadan örnekler ve Türkiye'deki yönelimler. Kent Akademisi 2023; 16(1): 138-163.

Yıldırım A. Kentlerin sürdürülebilirliğinin sağlanmasında akıllı kent uygulamalarının rolü. Yakın Doğu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2022; 15(1): 98-124.

Zotkin SP., Ignatova Ev., Zotkina IA. The organization of autodesk revit software interaction with applications for structural analysis. Procedia Engineering 2016; 153(2): 915–919.

Zou PXW., Sunindijo RY., Dainty, ARJA. Mixed methods research design for bridging the gap between research and practice in construction safety. Safety Science 2014; 70(3): 316–326.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1782-1796, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1782-1796, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Düzeltme Yazısı / Corrigendum

Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Tüflerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Metehan ARDAHANLI[1*], Türkay KOTAN[2]

[1]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye
[2]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-8091-2792
[2]https://orcid.org/0000-0002-9125-8220
*Sorumlu yazar: metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr

Düzeltme: Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi sekizinci cilt birinci sayısında yayınlanan "Ardahanlı, M., & Kotan, T. (2025). Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Traverten Taşların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8(1), 299-313*." referanslı makalede, yazarlar tarafından kayaç litolojisinde sehven hata yapılmıştır. Yapılan bu hatadan dolayı yazarlar, okuyuculardan özür dilemektedirler. Makalede yer alan hatanın düzeltilmesi için makale tekrardan sunulmuştur.

Investigation of Physical and Mechanical Properties of Tuffs in the Kars-Ani Ruins Region

Corrigendum: In the article referenced in "Ardahanlı, M., & Kotan, T. (2025). Investigation of Physical and Mechanical Properties of Travertine Stones in the Kars-Ani Ruins Region. Osmaniye Korkut Ata University Journal of Science Institute, 8(1), 299-313." published in the first issue of the eighth volume of the Journal of Science Institute of Osmaniye Korkut Ata University, the authors made an inadvertent error in the rock lithology. The authors apologize to the readers for this error. The article has been resubmitted to correct the error.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1782-1796, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1782-1796, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Tüflerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Metehan ARDAHANLI[1*], Türkay KOTAN[2]

[1]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye
[2]Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-8091-2792
[2]https://orcid.org/0000-0002-9125-8220
*Sorumlu yazar: metehan.ardahanli@erzurum.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 13.06.2024
Kabul tarihi:19.09.2024
Online Yayınlanma: 15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Tüf
Fiziksel özellikler
Mekanik özellikler
Aşınma direnci

ÖZ

Doğal taşların kullanılması ile inşa edilen tarihi yapılar zamanla birçok faktöre bağlı olarak zarar görebilmektedir. Bu tarihi yapıların mevcut durumlarının korunması için restorasyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Kars-Ani harabeleri bölgesindeki kırmızı ve siyah renge sahip iki farklı tüfün; birim ağırlık, yoğunluk, porozite, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases hızı, dinamik elastisite modülü, kılcal su emme, Böhme aşınma dayanımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; siyah tüfün, kırmızı tüfe göre yüksek basınç ve çekme dayanımına, düşük porozite ile kılcal su emme miktarına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca her iki tüfün Böhme aşınma kayıp miktarları yaklaşık eş değer olarak elde edilmiştir.

Investigation of Physical and Mechanical Properties of Tuffs in the Kars-Ani Ruins Region

Research Article

Article History:
Received: 13.06.2024
Accepted: 19.09.2024
Published online: 15.06.2026

Keywords:
Tuff
Physical properties
Mechanical properties
Abrasion resistance

ABSTRACT

Historical buildings built with the use of natural stones can be damaged over time due to many factors. Restoration is needed to preserve the current condition of these historical buildings. In this study, two different red and black tuffs in the Kars-Ani ruins area; unit weight, density, porosity, compressive strength, splitting tensile strength, ultrasound velocity, dynamic elasticity module, capillary water absorption, Böhme abrasion resistance were examined. According to the results obtained; It was determined that black tuff has higher compressive and tensile strength, lower porosity and capillary water absorption than red tuff. In addition, the Bohme abrasion loss amounts of both tuffs were obtained as approximately equivalent.

To Cite: Ardahanlı M., Kotan T. Kars-Ani Harabeleri Bölgesindeki Tüflerin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1782-1796.

1. Giriş

Doğal taşlar sahip oldukları yüksek dayanım, dayanıklılık ve farklı renk çeşitlikleri sayesinde geçmişten günümüze kadar birçok tarihi yapıda tercih edilmiştir (Gürdal ve Özgünler, 2016; Süer ve Yakar, 2020; Li ve ark., 2024). Bu doğal taşlar çoğunlukla; bazalt, granit, andezit, traverten ve tüf olabilmektedir.

Bu doğal yapı malzemelerinden birisi olan tüfler kullanıldıkları yerlerde birçok avantaja sahiptir (Yang ve ark., 2025). Bu avantajlar başlıca; estetik doğal bir görselliğe sahip malzeme olmaları (Degryse ve

ark., 2002; Martínez ve ark., 2008; Fugazzotto ve ark., 2023), diğer volkanik kayaçlara göre daha yumuşak ve daha kolay işlenebilir olması (Jackson ve ark., 2011; Germinario ve ark., 2022), hafif ve diğer doğal taşlara göre daha iyi yalıtım özelliklerine sahip olmaları (Heiken, 2006) şeklinde sıralanabilmektedir.

Tüfün yapı malzemesi olarak kullanımı Roma, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerine kadar uzanmaktadır (Stück ve ark., 2008; Çelik ve ark., 2014). İtalya'da inşa edilen tüf yapıların (Jackson ve Marra, 2006) yanı sıra ülkemizde de birçok cami ve çeşme gibi tarihi yapılarda (Çelik ve Sert, 2020) tüf kullanılmıştır. Günümüzde ise tüf çoğunlukla restorasyon ve dış cephe kaplama malzemesi olarak kullanılmakta olup tüflerin özelliklerine ait literatür incelenirse;

Di Benedetto ve ark. (2015), İtalya'da bulunan tüfün boşluk yapısını incelemiş ve boşluk oranının artması ile taştaki bozulmaların ciddi oranda arttığını tespit etmişlerdir. Çobanoğlu ve ark. (2003) çalışmalarında, Afyon-Sandıklı tüflerinin boşluk oranının ve su emme oranının yüksek, basınç dayanımının ise düşük dayanımlı kaya sınıfıma girdiğini belirlemişlerdir. Çelik (2017) çalışmalarında, tüfün boşluk miktarının dayanımı ve dayanıklılığında doğrudan etkili olduğu, az boşluklu daha homojen yapıdaki tüf taşlarının daha yüksek dayanım ile ultrases hızına sahip olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca Yousif ve ark. (2021) kırılmış tüfler üzerinde basınç dayanımları gerçekleştirmiş ve tüfün basınç dayanımının artan boşluk oranı ile azaldığını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, Kars İl sınırların içerisinde yer alan Ani Harabeleri (Şekil 1) bölgesindeki kırmızı ve siyah renge sahip 2 farklı tüfün fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 1. Ani Harabeleri (Anonim, 2023; Anonim, 2024; Anonim, 2024)

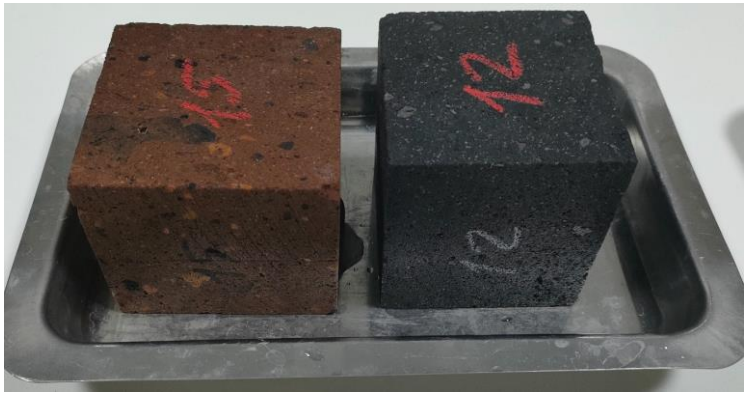
2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

2.1.1. Tüf

Çalışmada, kırmızı tüf Kars Arazoğlu köyü çevresinden, siyah tüf ise Kars Yalçınlar köyü çevresinden temin edilerek (Şekil 2) kullanılmıştır. Bu doğal taşların, taşınabilir XRF cihazı ile belirlenebilen

kimyasal bileşenlerinin oranı Tablo 1'de verilmiş, fiziksel ve mekanik özellikleri ise yöntem kısmında belirtilen deneylerle belirlenmiştir.



Şekil 2. Kırmızı ve siyah renkli tüf numuneleri

Tablo 1. Kars-Ani Harabeleri bölgesindeki siyah ve kırmızı tüflerin kimyasal analizi

Kimyasal Bileşenler	Siyah Tüf (%)	Kırmızı Tüf (%)
SiO_2	65,92	63,94
Al_2O_3	15,41	12,89
Fe_2O_3	3,72	3,68
MgO	1,94	1,78
CaO	3,01	5,37
K_2O	3,39	4,14
TiO_2	0,71	0,73
SrO	0,06	0,05
Ölçülemeyen	5,84	7,42

2.2. Metot

Bu çalışma için, Kars il sınırları içerisinde bulunan Ani Harabeleri bölgesinden alınan siyah ve kırmızı renkteki iki farklı tüf, yapı malzemesi laboratuvarında kesilerek fiziksel ve mekanik deneyler için uygun numune boyutlarına getirilmiştir. Numunelere; birim ağırlık, yoğunluk, porozite, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases hızı, dinamik elastisite modülü, kılcal su emme, Böhme aşınma dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

2.2.1. Birim Ağırlık, Yoğunluk, Porozite ve Su Emme Oranı Deneyleri

Tüf numunelerinin birim ağırlıkları TS EN 1936 (Anonim 2007)'ye göre belirlenmesi için; 110±5 °C'de 24 saat etüv kurusu ağırlıkları ile hava ve suda doymuş kuru yüzey durumundaki ağırlıkları belirlenmiş ve numunelerin birim ağırlıkları Denklem (1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Birim\ Ağırlık\ (BA)=Wd/Vg \quad (1)$$

Denklem (1)'de; *Wd*; etüv kurusu ağırlığı, *Vg*; görünür numune hacmini (en×boy×yükseklik) ifade eder. Numunelerin görünür yoğunlukları TS EN 1097-6 (Anonim 2022)'e göre hazırlanan toz örnekleri üzerinde piknometre metodu kullanılarak aşağıdaki Denklem (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Yoğunluk\ (D)=M_4/[M_4-(M_2-M_3)] \quad (2)$$

Denklem (2)'de; M_2; Doygun durumdaki deney numunesi ve piknometrenin kütlesini, M_3; Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesini, M_4; Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesini ifade eder.

Önceki adımlarda belirlenen birim ağırlık ve yoğunluk değerleri kullanılarak numunelerin porozite değerleri Denklem (3) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Porozite\ (P)=1-(BA/D) \quad (3)$$

Tüf numunelerin hacimsel ve ağırlıkça su emme oranları TS EN 699 (Anonim 2009)'a göre Denklem (4) ve Denklem (5) ile hesaplanmıştır.

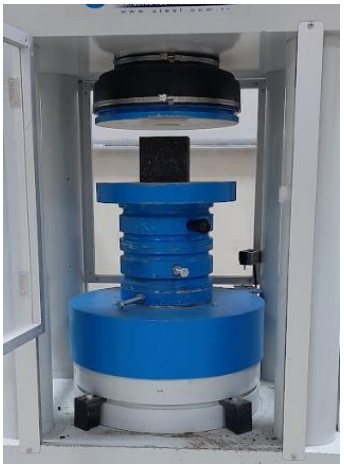
$$Hacimsel\ Su\ Emme\ Oranı\ (Sh)=(Wssd-Wd)/Vg \quad (4)$$

$$Ağırlıkça\ Su\ Emme\ Oranı\ (Sa)=(Wssd-Wd)/Wd \quad (5)$$

Denklem (4) ve Denklem (5)'de; *Wd*; numunenin etüv kurusu ağırlığını, *Wssd*; doygu-kuru yüzey durumunda numunenin havadaki ağırlığını, *Vg*; görünür numune hacmini (en×boy×yükseklik) ifade eder.

2.2.2. Basınç Dayanımı Deneyi

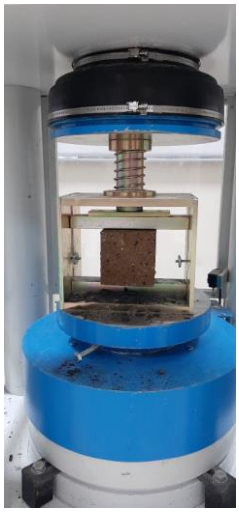
Basınç dayanımı deneyi 100×100×100 mm boyutlu numunelerde TS EN 12390-3 (Anonim, 2019) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde, standarda uygun olarak yükleme hızı 0,4 MPa/s olarak alınmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Basınç dayanımı deneyi

2.2.3. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Yarmada çekme dayanımı deneyi kesilen 100×100×100 mm boyutlu prizma numuneler üzerinde, bilgisayar kontrollü ve çok üniteli hidrolik bir cihaz kullanılarak TS EN 12390-6 (Anonim, 2024) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde, standarda uygun olarak yükleme hızı 0,4 MPa/s olarak alınmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Yarmada çekme dayanımı deneyi

2.2.4. Ultrases Hızı Deneyi

Ultrases hızı deneyi 100×100×100 mm boyutlu küp numunelerde ve her iki grup içinde üçer numune üzerinde TS EN 12504-4 (Anonim, 2021) standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 5). Ultrases hızı ölçümü yapılan bu cihaz (Şekil 5) yardımıyla tüf numunelerin dinamik elastisite modülleri de ölçülmüştür.



Şekil 5. Ultrases hızı deneyi ve dinamik elastisite modülü ölçümü

2.2.5. Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi TS EN 13057'e (Anonim, 2004) göre yapılmıştır (Şekil 6). Tüf numuneleri, 24 saat kadar 105 °C etüvde tutulduktan sonra alt yüzeyleri yaklaşık 5 mm suya batacak şekilde konulup bekletilen numunelerin 5, 10, 20 dakika, 1, 2, 4, 8, 24 saat sonunda kapilarite ile emdikleri su miktarı belirlenir.



Şekil 6. Kılcal su emme deneyi

2.2.6. Böhme Aşınma Deneyi

Böhme aşınma direnci deneyi (Şekil 7), TS 2824 EN 1338 (Anonim, 2005) standardına göre; her yüzeye 88 tur olacak şekilde ve her bir numune için toplam 352 tur uygulanmıştır. Deney sonunda ağırlık kaybı belirlenerek aşınma miktarı belirlenmiştir.

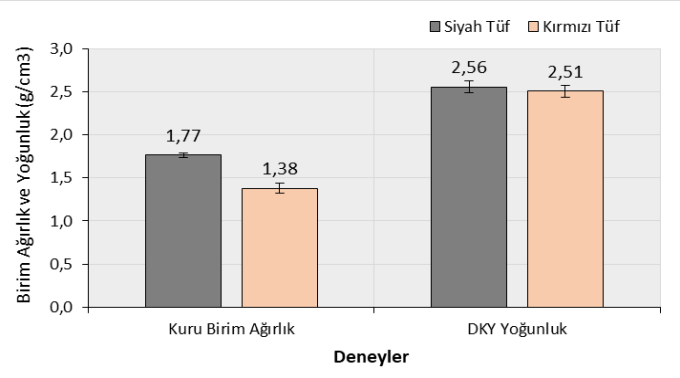


Şekil 7. Böhme aşınma deneyi

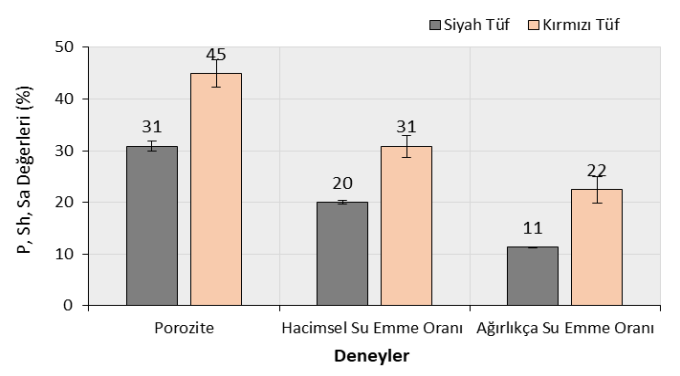
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Birim Ağırlık, Yoğunluk, Porozite ve Su Emme Oranı Sonuçları

Tüf numunelerine ait birim ağırlık ve yoğunluk sonuçları Şekil 8'de, porozite ve su emme oranı sonuçları ise Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, siyah tüfe ait birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin kırmızı tüften daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca birim ağırlık ve yoğunluğu daha fazla olan siyah tüfün iç yapısında sahip olduğu boşluk miktarının kırmızı tüften daha az olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). Tüf numunelerine ait bu porozite değerleri birim ağırlık ve yoğunluk sonuçlarını destekler niteliktedir. İç yapısındaki boşluk oranı daha fazla olan kırmızı tüfün birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin düşük çıkması beklenen bir sonuçtur.



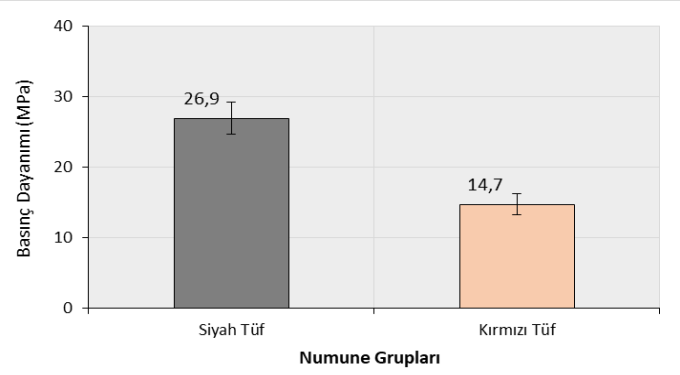
Şekil 8. Birim ağırlık ve yoğunluk sonuçları



Şekil 9. Porozite ve su emme oranı sonuçları

3.2. Basınç Dayanımı Sonuçları

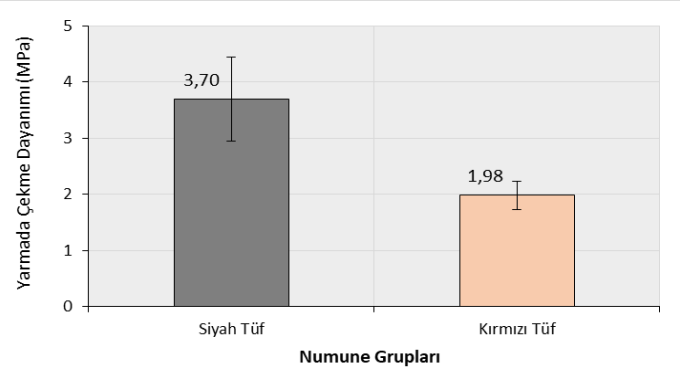
Tüf numunelerine ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde, siyah tüfün basınç dayanımının kırmızı tüfe göre daha yüksek olduğu ve her iki tüfte de elde edilen basınç dayanımı değerlerinin doğal taşların sahip olabileceği yüksek basınç dayanım değerlerine (Mohammed ve ark., 2021) göre daha düşük kaldığı belirlenmiştir. Bu durumun temel sebebi olarak, taşların iç yapılarındaki boşluk miktarının fazla (Şekil 9) olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüflerin, sahip oldukları boşluk miktarına göre çok çeşitlilik göstermekte olup boşluk miktarı fazla olan türlerinde basınç dayanımı sonuçlarının düştüğü (Yousif, 2021) literatür ile desteklenmektedir.



Şekil 10. Basınç dayanımı sonuçları

3.3. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

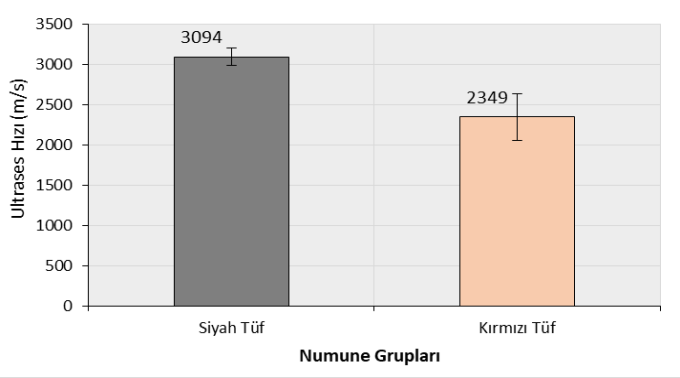
Tüf numunelere ait yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Düşük boşluk oranına (Şekil 9), yüksek birim ağırlık, yoğunluk (Şekil 8) ve basınç dayanımına (Şekil 10) sahip olan siyah tüfün yarmada çekme dayanımının, kırmızı tüften daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Siyah tüfün sahip olduğu düşük porozitenin, basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi yarmada çekme dayanımı sonuçlarına da olumlu etki yaptığı düşünülmektedir. Öyle ki, Chentout ve ark. (2015)'e göre; genel olarak porozite arttıkça basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülünün azalması, büyük ölçüde daha yüksek heterojenlik ve çok gözenekli kayaçlardaki gözenekler, boşluklar ve mikro çatlaklar sonucu oluşan zayıf bağların varlığı ile açıklanabilir.



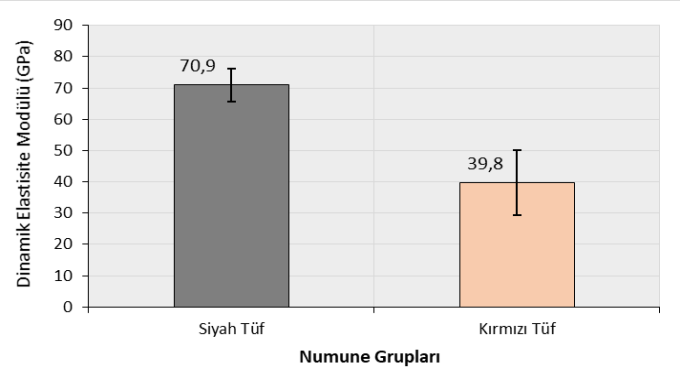
Şekil 11. Yarmada çekme dayanımı sonuçları

3.4. Ultrases Hızı Sonuçları

Tüf numunelere ait ultrases hızı sonuçları Şekil 12'de, dinamik elastisite modülü sonuçları ise Şekil 13'te verilmiştir. Siyah tüfte elde edilen ultrases hızı ile dinamik elastisite modülünün kırmızı tüfe göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Siyah tüfün kırmızı tüfe göre sahip olduğu yüksek basınç ve çekme dayanımı ile daha düşük porozite özellikleri, elde edilen daha yüksek ultrases hızı sonuçlarını desteklemektedir. Bu bulgular, Heap ve ark. (2014)'ün; tüfler için porozite arttıkça ultrases hızının azaldığını ve Brotons ve ark. (2016)'nın; çeşitli kayaçlarda porozitenin artması ile ultrases hızı ve dinamik elastisite modülünün azaldığını, ayrıca Palchik (1999)'un; gözenekli kumtaşı kayaçlarında basınç dayanımı ve elastisite modülünün doğrusal ilişkisini ortaya koyan bazı önceki çalışmalar ile doğrulanmaktadır.



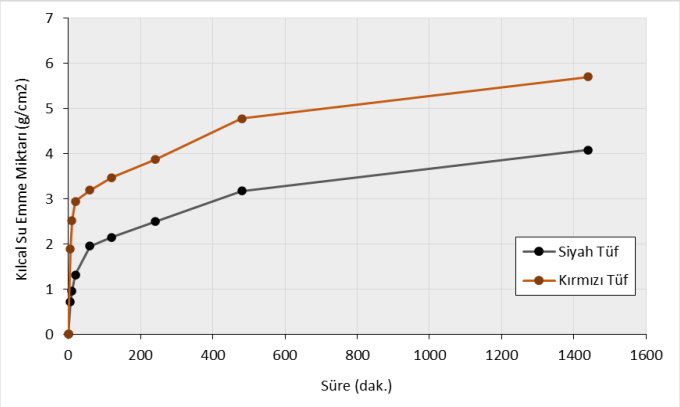
Şekil 12. Ultrases hızı sonuçları



Şekil 13. Dinamik elastisite modülü sonuçları

3.5. Kılcal Su Emme Sonuçları

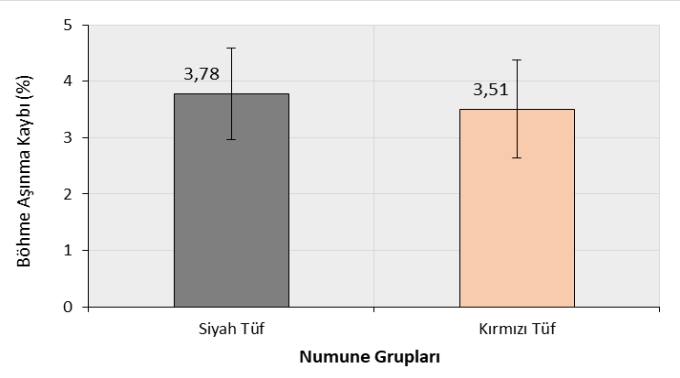
Ani Harabeleri bölgesindeki tüf numunelerine ait kılcal su emme miktarları Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 14 incelendiğinde, kırmızı tüf numunelerin kılcal su emme miktarlarının siyah tüf numunelerin kılcal su emme miktarlarından fazla olduğu görülmektedir. Kırmızı tüfün iç yapısındaki boşluk oranının siyah tüfe göre fazla olduğu (Şekil 9) ve ayrıca Şekil 14'te görüldüğü üzere kırmızı tüfdeki kapiler boşluk miktarının da siyah tüfe göre fazla olduğu belirlenmiştir. Dinçer (2019) çalışmasında, Kapadokya (Türkiye) yöresi tüflerinde porozite ile kapiler su emme özellikleri arasında belirlenen doğrusal ilişki, bu bulguyu destekler niteliktedir.



Şekil 14. Kılcal su emme miktarları

3.6. Böhme Aşınma Deneyi Sonuçları

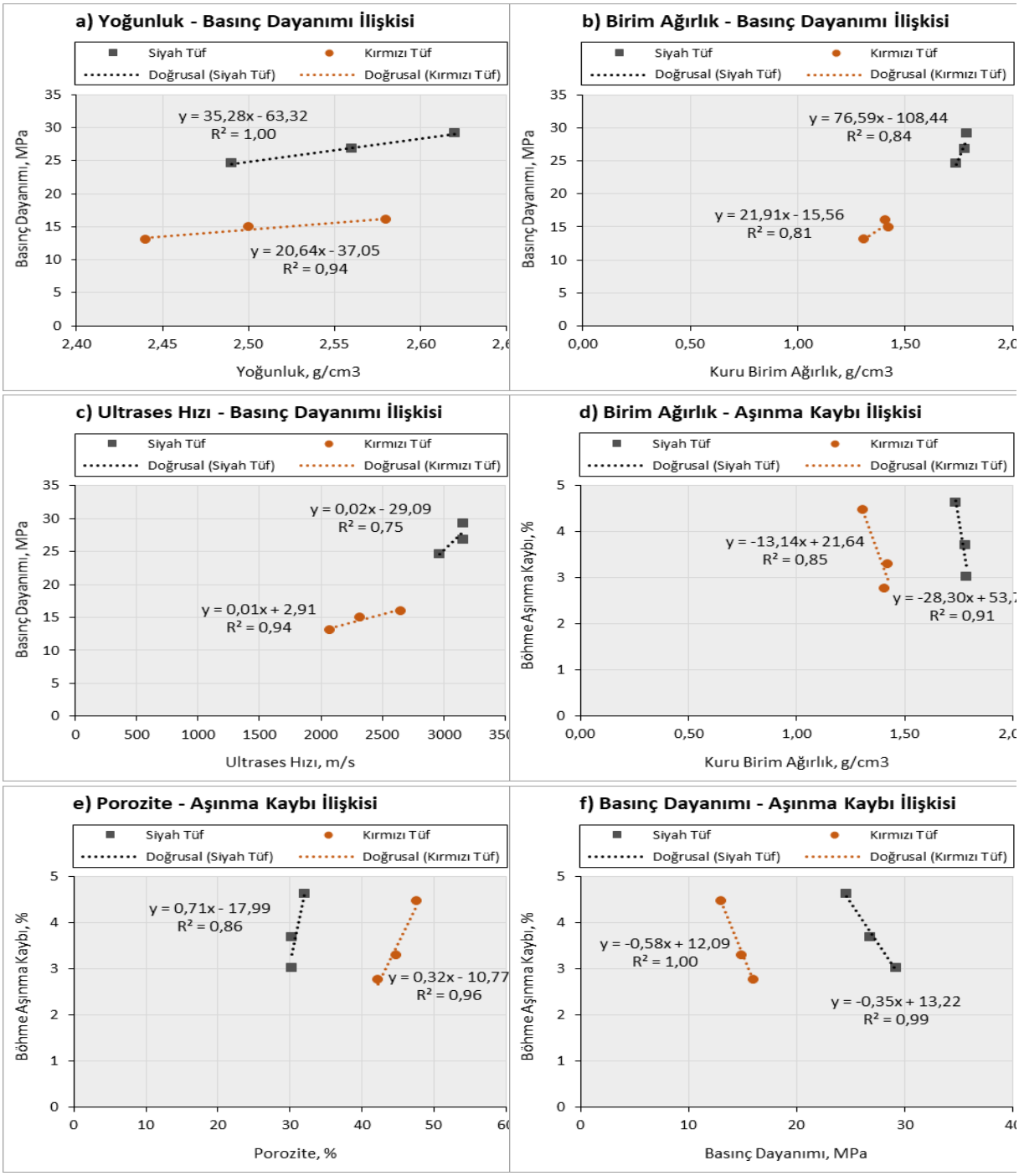
Tüf numunelerine Böhme aşınma deneyi uygulanmış ve numunelerin deney sonundaki ağırlık kayıpları yüzde olarak Şekil 15'te verilmiştir. Siyah tüf numunelerin Böhme aşınma kayıpları kırmızı tüf numunelere göre kısmen daha yüksek elde edilmiştir. Numuneler arasındaki bu aşınma kaybı farkının yüksek olmamasından dolayı her iki tüf türünün de Böhme aşınma kayıplarının yaklaşık eş değer olduğu kabul edilebilir. Adam Mohammed ve ark. (2021) önceki çalışmasında, aralarında tüf örneklerinin de bulunduğu Orta Anadolu'dan alınan kayaçların yoğunluk ve Böhme aşınma hızı arasında güçlü bir ters logaritmik ilişki belirlenmiş olup, bu çalışmadaki siyah ve kırmızı tüf taşların yoğunluk ve aşınma kaybı sonuçları yakın değerlerle bu eğilime uymaktadır.



Şekil 15. Böhme aşınma kaybı sonuçları

3.7. Fiziksel ve Mekanik Özellikler Arası İstatistiksel İlişki Sonuçları

Çalışmada ayrıca, tüf numunelerinin belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkiler incelenerek elde edilen bulgular Şekil 16'da gösterilmiştir. Siyah ve kırmızı tüflerin, Şekil 16(a)'da yoğunluk ile basınç dayanımı, Şekil 16(b)'de kuru birim ağırlık ile basınç dayanımı ve Şekil 16(c)'de ultrases hızı ile basınç dayanımı özellikleri arasında belirlenen çok güçlü pozitif doğrusal ilişkiler görülmektedir. Bu bulgular, Teymen (2018)'in önceki çalışma sonuçları ile benzer eğilimdedir. Nitekim bu gözenekli malzemelerin içyapısındaki boşluk miktarının artması, beklendiği üzere birim hacmi dolduran katı malzeme kütlesinin azalmasına, basınç altında daha küçük katı parçacık en kesitlerinde büyüyen ve daha kolay yayılan iç gerilmeler ile daha boşluklu iç yapıda ultrases dalgaların daha dolambaçlı ve uzun bir katı parçacık yolu izleyerek yayılması ilişkileri açıklayan muhtemel nedenler olabilir. Tüf numunelerinin, Şekil 16(d)'de birim ağırlık ile Böhme aşınma kaybı, Şekil 16(e)'de porozite ile Böhme aşınma kaybı ve Şekil 16(f)'de ise basınç dayanımı ile Böhme aşınma kaybı özellikleri arasındaki istatistiksel ilişkiler görülmektedir. Her iki tür tüfün, porozite ile Böhme aşınma kaybı özellikleri arasında (Şekil 16(e)) çok güçlü pozitif doğrusal ilişkiler belirlenmiş iken, Şekil 16(d) ve Şekil 16(f)'deki özellikler arasında çok güçlü negatif doğrusal ilişkiler olduğu tespit edilmiştir. Bu ilişkiler de gözenekli gevrek malzemeler için genel literatürdeki beklentiye uygun ve Adam Mohammed ve ark. (2021) önceki çalışma sonuçlarını destekler niteliktedir. Öyle ki tüflerin birim ağırlık ve porozite ile aşınma kaybı özellikleri arasındaki bu ilişkiler, içyapıdaki boşluk miktarının artması ile azalan katı parçacık en kesitlerinde ve boşluk cidarlarında abrasif etki ile oluşan iç gerilmelerin büyümesi sonucu aşınma kayıplarının artması şeklinde açıklanabilir.



Şekil 16. Özellikler arası istatistiksel ilişkiler (**a:** Yoğunluk – Basınç dayanımı ilişkisi, **b:** Birim ağırlık – Basınç dayanımı ilişkisi, **c:** Ultrases hızı – Basınç dayanımı ilişkisi, **d:** Birim ağırlık – Böhme aşınma kaybı ilişkisi, **e:** Porozite – Böhme aşınma kaybı ilişkisi, **f:** Basınç dayanımı – Böhme aşınma kaybı ilişkisi)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Ani Harabeleri bölgesindeki iki farklı renk ve dokuda olan (kırmızı ve siyah) tüflerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- Siyah tüfün birim ağırlığı ve yoğunluğu kırmızı tüfe göre daha yüksektir.
- Siyah tüfün iç yapısındaki boşluk oranı kırmızı tüfe göre daha düşüktür.

- Siyah tüfün basınç ve çekme dayanımları kırmızı tüfe göre daha yüksek elde edilmiştir.
- Kırmızı tüfün kılcal su emme miktarının siyah tüfe göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Her iki tüfün de Böhme aşınma kayıpları yaklaşık eş değerdir.
- Siyah ve kırmızı tüfün birim ağırlık, yoğunluk, porozite, ultrases hızı, basınç dayanımı ve Böhme aşınma kaybı özellikleri arasında yüksek dereceli istatistiksel ilişkiler belirlenmiştir.
- Siyah ve kırmızı tüfün TS 10449 (Anonim 1992) ve TS 11443 (Anonim 1994) standartlarında döşeme ve duvar kaplama taşı olarak kullanım için belirtilen 2,3 ve 2,6 g/cm^3 birim ağırlık ile 510, 489 kgf/cm^2 (döşeme kaplama) ve 305 kgf/cm^2 (duvar kaplama) basınç dayanımı sınırlarını sağlayamadıklarından bu amaçlarla kullanıma elverişli olmadıkları belirlenmiştir.
- Öte yandan, siyah ve kırmızı tüfün sahip oldukları hafiflik, yüksek gözeneklilik, kolay işlenebilirlik, üniform ve estetik yüzey dokusu özellikleri nedeniyle, yapılarda konsantre yük etkilerine maruz kalmayacak şekilde dekoratif amaçlı kullanılabilir.

Sonraki çalışmalarda her iki tüfün,

- Donma-çözülme altındaki davranışlarının incelenmesi,
- Kılcal su emmelerin oluşturduğu duruma bağlı olarak sülfat etkisi altındaki davranışının incelenmesi önerilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Her bir yazar makaleye %50 oranında katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Adam Mohammed AA., Fener M., Comakli R., İnce İ., Balci MC., Kayabalı K. Investigation of the relationships between basic physical and mechanical properties and abrasion wear resistance of several natural building stones used in Turkey. Journal of Building Engineering 2021; 42.

Anonim. Ani Katedrali Kültür Envanteri. https://kulturenvanteri.com/yer/?p=11952 2023. Erişim 9 Mayıs 2024.

Anonim. Ani. https://tr.wikipedia.org/wiki/Ani 2024.

Anonim. Kars. https://tr.pinterest.com/pin/56928382798031780/ 2024.

Anonim. TS 10449: Mermer-Kalsiyum Karbonat Esaslı-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü 1992; Ankara.

Anonim. TS 11443: Oniks Mermeri- Kalsiyum Karbonat Esaslı-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan Tadil 1. Türk Standartları Enstitüsü 1994; Ankara.

Anonim. TS 2824 EN 1338: Zemin döşemesi için beton kaplama blokları-Gerekli şartlar ve deney metotları. Türk Standartları Enstitüsü 2005; Ankara.

Anonim. TS EN 1097-6: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü 2022; Ankara.

Anonim. TS EN 12390-3: Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2019; Ankara.

Anonim. TS EN 12390-6: Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2024; Ankara.

Anonim. TS EN 12504-4: Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2021; Ankara.

Anonim. TS EN 13057: Beton yapılar- Koruma ve tamir için mamul ve sistemler-Deney metotları-Kılcal su emmeye direncin tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2004; Ankara.

Anonim. TS EN 1936: Doğal taşlar- Deney yöntemleri- Gerçek yoğunluk, görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik tayini. Türk Standartları Enstitüsü 2007; Ankara.

Brotons V., Tomás R., Ivorra S., Grediaga A., Martínez-Martínez J., Benavente D., Gómez-Heras M. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. Materials and Structures 2015; 49: 3021-3037.

Chentout M., Alloul B., Rezouk A., Belhai D. Experimental study to evaluate the effect of travertine structure on the physical and mechanical properties of the material. Arabian Journal of Geosciences 2015; 8: 8975-8985.

Gürdal E., Özgünler AS. Tarihi yapıların onarımında doğal taş seçimi ve kullanımı. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi 2016; 16: 27-35.

Li T., Tang X., Xia J., Gong G., Xu Y., Li M. Investigation of mechanical strength, permeability, durability and environmental effects of pervious concrete from travertine waste material. Construction and Building Materials 2024; 426.

Palchik V. Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones. Rock Mechanics and Rock Engineering 1999; 32: 303-309.

Süer M., Yakar, F. Alaşehir (Manisa) bölgesi traverten atıklarının yol alt temel ve temel tabakalarında kullanılabilirliğinin araştırılması. Academic Platform Journal of Engineering and Science 2020; 8(2): 388-395.

Yang H., Diao H., Xia S. Volcanic rocks in the 21st century: Multifaceted applications for sustainable development. Green Technologies and Sustainability 2025; 3(2); 100172.

Degryse P., Elsen J., Waelkens M. Study of ancient mortars from Sagalassos (Turkey) in view of their conservation. Cement and concrete research 2002; 32(9); 1457-1463.

Fugazzotto M., Occhipinti R., Caggiani MC., Coccato A., Finocchiaro C., Lanzafame G., Barone G. Restoration feasibility study by using alkali activated mortars based on Mt. Etna volcanic ash: The case study of Monreale Cathedral (Palermo, Italy). Materials Letters 2023; 333; 133626.

Martínez W., Alonso EM., Rubio JC., Bedolla JA., Velasco FA., Torres AA. Handmade Hydrated Lime Mechanical Motors Behavior, Added with Cactus Sap and Volcanic Ash, for their Use in Colonial Monument Restoration and Conservation. Revıstа De La Construccıon 2008; 7(2); 93-101.

Jackson MD., Ciancio Rossetto P., Kosso CK., Buonfiglio M., Marra F. Building materials of the theatre of Marcellus, Rome. Archaeometry 2011; 53(4); 728-742.

Germinario C., Pagano S., Mercurio M., Izzo F., De Bonis A., Morra V., Grifa C. Roman technological expertise in the construction of perpetual buildings: new insights into the wall paintings of a banquet scene from a tomb in Cumae (southern Italy). Archaeological and Anthropological Sciences 2022; 14(9); 181.

Çelik MY., Akbulut H., Ergül A. Water absorption process effect on strength of Ayazini tuff, such as the uniaxial compressive strength (UCS), flexural strength and freeze and thaw effect. Environ Earth Sci 2014; 71; 4247–4259.

Heiken G. Tuffs-their properties, uses, hydrology, and resources. In: Heiken G (ed) Geological Society of America 2006; 408.

Jackson MD., Marra F. Roman Stone Masonry: Volcanic Neapolitan Yellow Tuff and Campanian Ignimbrite. Archaeometry 2006.

Çelik MY., Sert M. The role of different salt solutions and their concentration ratios in salt crystallization test on the durability of the Döğer tuff (Afyonkarahisar, Turkey) used as building stones of cultural heritages. Bull Eng Geol Environ 2020; 79; 5553–5568.

Di Benedetto C., Cappelletti P., Favaro M., Graziano SF., Langella A., Calcaterra D., Colella A. Porosity as key factor in the durability of two historical building stones: Neapolitan Yellow Tuff and Vicenza Stone. Engineering Geology 2015; 193; 310-319.

Çobanoğlu I., Özpinar Y., Özbek, A. Engineering properties of tuffs in the Sandikli region (Afyon—Turkey) and their possible use as concrete aggregates. Bull Eng Geol Environ 2003; 62; 369–378.

Çelik MY. Afyonkarahisar yöresi tüflerinin fiziko-mekanik özelliklerinin ultrases dalga hızı ile ilişkisinin incelenmesi. Politeknik Dergisi 2017; 20(4); 961-970.

Stück H., Forgó L.Z., Rüdrich J. Siegesmund S., Török Á. The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. Environ Geol 2008; 56; 699–713.

Yousif OS., Karakouzian M., Rigby DB. Impacts of void existence on mechanical behavior of Tuff-like lithophysal material. Rock Mechanics and Rock Engineering 2021; 54(3); 1315-1330.

Heap MJ., Baud P., Meredith PG., Vinciguerra S., Reuschlé T. The permeability and elastic moduli of tuff from Campi Flegrei, Italy: implications for ground deformation modelling. Solid Earth 2014; 5(1); 25-44.

Dinçer İ., Bostancı M. Capillary water absorption characteristics of some Cappadocian ignimbrites and the role of capillarity on their deterioration. Environ Earth Sci 2019; 78; 7.

Teymen A. Prediction of Basic Mechanical Properties of Tuffs Using Physical and Index Tests. J Min Sci 2018; 54; 721–733.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1797-1818, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1797-1818, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology



İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezlerinin Sınıflandırılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Berrin AKKUŞ[1*], İlker CENGİZ[2]

[1]Selçuk Üniversitesi, Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 42850, Konya
[2]Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi ABD, 06690, Ankara

[1]https://orcid.org/0000-0001-8099-5973
[2]https://orcid.org/0000-0001-5329-6421
*Sorumlu yazar: berrinakkus@selcuk.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 19.09.2025
Kabul tarihi:11.03.2026
Online Yayınlanma: 15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
İmmobilizasyon
El-bilek ortezi
Ortez
Mekanik özellikler

ÖZ

İmmobilizasyon amaçlı el ve bilek ortezleri, kas-iskelet sistemi yaralanmalarında eklem stabilitesini sağlamak, iyileşmeyi desteklemek ve fonksiyonel kaybı önlemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu derlemenin amacı, immobilizasyon el ve bilek ortezlerini fonksiyonlarına, kullanılan malzemelere ve üretim tekniklerine göre sınıflandırarak mevcut literatür doğrultusunda değerlendirmektir. Bu kapsamda ilgili veri tabanlarında yapılan literatür taraması nitel olarak analiz edilmiştir. Tam ve kısmi immobilizasyon ortezleri; termoplastik, kompozit, metal destekli polimerik ve biyopolimerik malzemeler ile seri üretim, termoform ve üç boyutlu baskı teknikleri açısından ele alınmıştır. Bulgular, uygun ortez seçiminin yaralanma tipi, immobilizasyon gereksinimi ve hasta özelliklerine bağlı olarak değiştiğini; kişiye özel ve 3B baskı ile üretilen ortezlerin anatomik uyum ve hasta konforu açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

Classification of Immobilization Hand and Wrist Orthoses and Investigation of Their Mechanical Properties

Reviews

Article History:
Received: 19.09.2025
Accepted: 11.03.2026
Published online: 15.06.2026

Keywords:
Immobilization
Wrist-hand orthosis
Orthosis
Mechanical properties

ABSTRACT

Immobilization hand and wrist orthoses are widely used to provide joint stability, support the healing process, and prevent functional loss in musculoskeletal injuries. The aim of this review is to evaluate immobilization hand and wrist orthoses by classifying them according to their functions, materials used, and production techniques in line with the existing literature. Within this scope, a literature search conducted in relevant databases was qualitatively analyzed. Full and partial immobilization orthoses were examined in terms of thermoplastic, composite, metal-reinforced polymeric, and biopolymeric materials, as well as mass production, thermoforming, and three-dimensional printing techniques. The findings indicate that appropriate orthosis selection varies depending on the type of injury, immobilization requirements, and patient-specific characteristics, and that custom-made and 3D-printed orthoses offer significant advantages in terms of anatomical fit and patient comfort.

To Cite:Akkuş B., Cengiz İ. İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezlerinin Sınıflandırılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1797-1818.

1. Giriş

Ortezler, kas-iskelet sistemi hastalıkları ve yaralanmalarında fonksiyonel destek sağlamak, deformiteleri önlemek veya düzeltmek ve ağrıyı azaltmak amacıyla kullanılan harici tıbbi cihazlardır. Üst ekstremiteye yönelik ortezler, travma, nörolojik hastalıklar ve cerrahi girişimler sonrası rehabilitasyon sürecinde eklem stabilitesinin korunması ve fonksiyonel kapasitenin sürdürülmesi açısından önemli bir role sahiptir. Özellikle el ve bilek bölgesi, karmaşık anatomik yapısı ve yüksek hareket açıklığı nedeniyle yaralanmalara ve fonksiyonel bozukluklara yatkındır ve bu durum el-bilek ortezlerinin klinik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasına neden olmaktadır (Delisa ve Greenberg, 1981).

İmmobilizasyon amaçlı el ve bilek ortezleri, iyileşme sürecinde eklem hareketini kısıtlayarak hasarlı dokuların korunmasını ve stabilitenin sağlanmasını hedefler. Tam immobilizasyon sağlayan ortezler genellikle akut dönemde kırıklar, ciddi bağ yaralanmaları ve cerrahi sonrası erken evrede tercih edilirken, kısmi immobilizasyon sağlayan ortezler belirli hareketlere izin vererek fonksiyonel kullanımın devam etmesine olanak tanır. Uygun immobilizasyon düzeyinin seçimi, iyileşme sürecinin etkinliği ve uzun dönem fonksiyonel sonuçlar açısından kritik öneme sahiptir (May-Lisowski ve King, 2008).

El ve bilek ortezlerinin klinik başarısı, yalnızca immobilizasyon derecesine değil, aynı zamanda kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine ve hasta konforuna da bağlıdır. Geleneksel olarak termoplastik malzemeler, şekillendirilebilirlikleri ve klinik uygulama kolaylıkları nedeniyle yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek rijitlik, dayanıklılık ve hafiflik sunan polimer ve kompozit esaslı malzemeler, güncel ortez tasarımlarında giderek daha fazla tercih edilmektedir (Hachisuka ve ark., 2006(a)).

Üretim yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, seri üretim el ve bilek ortezleri düşük maliyet ve hızlı erişim avantajı sağlasa da anatomik uyumlarının sınırlı olması hasta konforunu olumsuz etkileyebilmektedir. Buna karşılık, kişiye özel üretilen ortezler hastanın anatomisine daha iyi uyum sağlayarak basınç noktalarını azaltmakta ve klinik etkinliği artırmaktadır. Son yıllarda üç boyutlu (3B) baskı teknolojisinin ortez üretiminde kullanılması, kişiye özel tasarım ve fonksiyonel optimizasyon açısından önemli bir gelişme olarak değerlendirilmektedir (Kim ve ark., 2018).

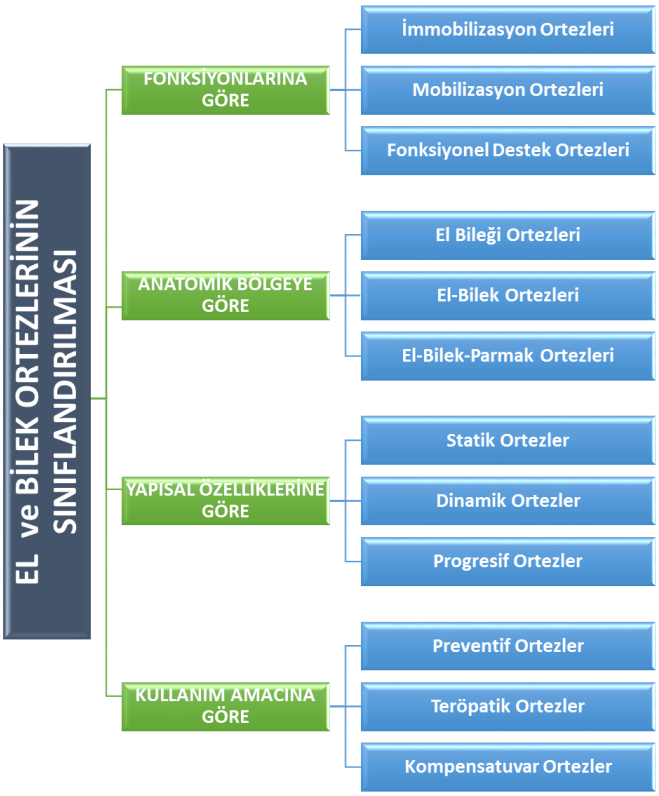
Bu derlemenin amacı, immobilizasyon amaçlı el ve bilek ortezlerini fonksiyonları, kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri açısından sınıflandırarak mevcut literatür doğrultusunda değerlendirmektir. Ayrıca geleneksel üretim yaklaşımları ile 3B baskı temelli kişiye özel ortezlerin klinik kullanım avantajları ve potansiyel katkıları karşılaştırılarak, gelecekteki uygulamalara yönelik bilimsel bir perspektif sunulması hedeflenmektedir.

2. Metot

PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar veri tabanlarında Ortopedi ve benzeri alanlardaki el-bilek ortezleri ve immobilize el ve bilek ortezleri ile ilgili tüm makaleleri çıkarmak için bir literatür araştırması yapılmıştır. Uygun anahtar kelimeler; "immobilize ortez", "immobilize el ve bilek ortezleri", "el ve bilek ortezleri", "el-bilek ortez malzemeleri", "el-bilek ortez özellikleri" "immobilize ortezlerin mekanik özellikleri", anahtar kelimeler olarak kullanılmıştır. Bu makalelerin başlıkları ve özetleri gözden geçirilmiş el ve bilek ortezleri ile ilgili olmayan makaleler hariç tutulmuştur. Ayrıca daha alakalı literatür elde etmek için makalelerin referans listelerine de bakılmıştır. Daha sonra seçilen makaleler nitel sentez için düşünülmüştür.

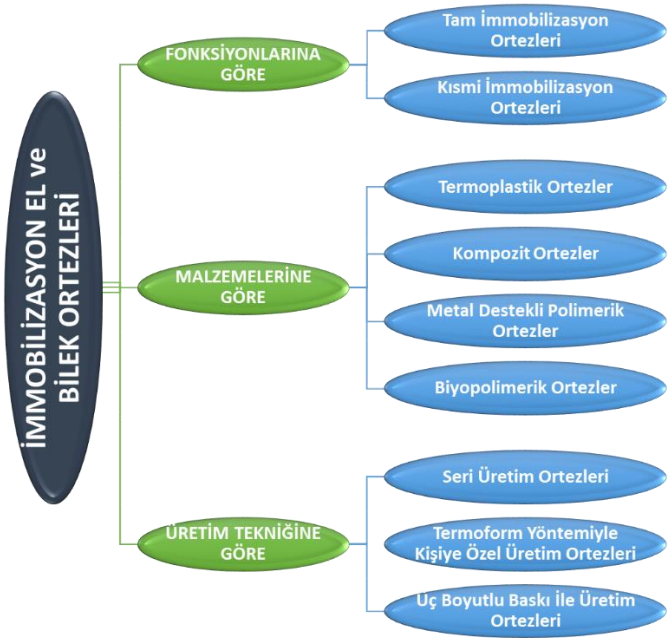
3. El ve Bilek Ortezlerinin Sınıflandırılması

El ve bilek ortezleri (ortotik cihazlar), el ve bilek bölgesindeki yapıları desteklemek, korumak, hareketsizleştirmek veya hareketi yönlendirmek amacıyla kullanılır. Bu ortezler, farklı endikasyonlara göre sınıflandırılabilir. İşlevlerine, tasarımlarına ve kullanım amaçlarına göre çeşitli kategorilere ayrılabilirler. Şekil 1'de, el ve bilek ortezlerinin sınıflandırması gösterilmiştir (Seegmiller ve ark., 2016; Aranceta-Garza ve ark., 2021).



Şekil 1. El ve Bilek Ortezlerinin Sınıflandırılması (Seegmiller ve ark., 2016; Aranceta-Garza ve ark., 2021).

İmmobilize el ve bilek ortezleri; fonksiyonlarına, kullanılan malzemelere ve üretim tekniklerine göre Şekil 2'de sınıflandırılmıştır (Sala ve ark., 2023; Amin ve ark., 2024).



Şekil 2. İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezlerinin Sınıflandırılması (Sala ve ark., 2023; Amin ve ark., 2024).

3.1. Fonksiyonlarına Göre Tam İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

3.1.1. Tam İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Tam immobilizasyon ortezleri, el veya bilek ekleminin tamamen hareketsiz hale getirilmesi gereken durumlarda kullanılır. Bu ortezler genellikle, eklem hareketinin engellenmesi ve iyileşme sürecinin hızlandırılması amacıyla tasarlanır (Cantero-Téllez ve ark., 2018; Wong ve ark., 2021). El ve bilek gibi hassas bölgelerde meydana gelen kırıklarda, bağ yaralanmalarında, cerrahi müdahale sonrası iyileşmede ve bazı nörolojik hastalıkların tedavisinde önemli bir rol oynar (Xia ve ark., 2021; Zhou ve ark., 2024). Bu kapsamda özellikle tendonların iyileşmesi için, hareketin kısıtlanması gerekebilir. Örneğin, karpal tünel sendromu gibi durumlarda, el bileği veya parmakların uygun pozisyonda tutulması gerekebilir. Bu tür hastalarda, kas tonusunun azalması veya kasılma (spastisite) nedeniyle eklem pozisyonunu korumak için ortez kullanımı yaygındır (De Angelis ve ark., 2009; Liu ve ark., 2021).

Tam immobilizasyon ortezleri genellikle, vücuda rahat bir şekilde uyum sağlayacak şekilde tasarlanır. Ortezlerin genellikle hafif, dayanıklı ve esnek malzemelerden yapılması tercih edilir. Örneğin, plastik, alüminyum, karbon fiber veya termoplastik malzemeler kullanılabilir (Hachisuka ve ark., 2006(a); Shahar ve ark., 2019). Immobilizasyon süresi kişiye ve yaralanmanın türüne bağlı olarak değişir. Genelde, 6 hafta gibi bir süre zarfında tam immobilizasyon gerekebilir. Bu süre boyunca, hasta genellikle fiziksel terapi ve rehabilitasyon alarak, kas ve eklem fonksiyonlarını geri kazanmaya çalışır (van Delft ve ark., 2023).

Ayrıca sabit ve dinamik immobilizasyon ortezleri de vardır. Sabit ortezler; el bileğini sabit tutar ve genellikle hareketin engellenmesi gereken akut durumlarda kullanılır (Aranceta-Garza ve ark., 2021; Georgiew ve ark., 2022). Dinamik ortezler ise bilek veya el hareketini sınırlayan fakat belirli bir hareket aralığına izin veren ortezlerdir. Bu tür ortezler, iyileşme sürecinde eklem fonksiyonunu korumak için tercih edilebilir (Andringa ve ark., 2013(b); Alexander ve ark., 2022). Ortezlerin kullanımı, genellikle fiziksel terapi ile desteklenir. Tam immobilizasyonun uzun süreli kullanımı, kas zayıflığına yol açabilir. Bu nedenle, terapistlerin ortez kullanım süresi ve rehabilitasyon planı hakkında önerilerde bulunması önemlidir. Tam immobilizasyon ortezlerinin, hastanın iyileşme sürecini desteklemesinin yanı sıra, günlük yaşam aktivitelerine etkisi, konforu ve uyumu da dikkate alınması gereken önemli unsurlardır. Ortezlerin doğru seçimi ve zamanlaması, tedavi sürecinin etkinliği üzerinde önemli bir rol oynar (May-Lisowski ve King, 2008; Hirata ve ark., 2024).

3.1.2. Kısmi İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Kısmi immobilizasyon ortezleri, bir eklem veya vücut parçasının hareketini tamamen engellemek yerine, sadece belirli hareketleri kısıtlar (Van Buijtenen ve ark., 2022; Schulz ve ark., 2025). Bu tür ortezlerin başlıca amacı, eklemdeki hareketin azaltılması veya engellenmesiyle iyileşme sürecini desteklerken, hastanın fonksiyonel kapasitesini mümkün olduğunca korumaktır (Jamnik ve ark., 2021). Kısmi immobilizasyon, yaralanan bölgedeki iyileşmeyi hızlandırmaya yardımcı olurken, kas ve eklem hareketliliğini de koruyarak uzun süreli sertlik ve atrofiyi önler (Millard ve ark., 2002; Van Buijtenen ve ark., 2022).

Kısmi immobilizasyon ortezleri, aşağıdaki durumlar için yaygın olarak kullanılır:

- Tendon iltihaplanmaları ve zorlanmaları: Özellikle tendinit ve tendinopati gibi durumlarda, tendonların iyileşmesi için belirli hareketlerin engellenmesi gerekebilir. Kısmi immobilizasyon, tendonlara baskıyı azaltırken, kasların ve eklemlerin uygun şekilde çalışmasını sağlar (Challoumas ve ark., 2023).
- Ligament yaralanmaları: Bilek ve el bölgesindeki bağlar (ligamentler) yaralandığında, bu yapıların iyileşmesi için genellikle kısmi immobilizasyon önerilir. Ancak tam immobilizasyonun aksine, kısmi hareket aralığına izin verir (Hutchinson ve ark., 2018).
- Cerrahi müdahaleler sonrası: Bazı cerrahi işlemlerden sonra, tam hareketi engellemek yerine, eklem veya bölgedeki hareketi kısıtlamak yeterli olabilir. Örneğin, kırık iyileşmesinde tam immobilizasyona gerek yoksa, belirli hareketleri sınırlamak yeterli olabilir (Diaz ve ark., 2016; Başar ve Polat, 2021; Barrett ve ark., 2022).
- Artrit ve eklem hastalıkları: Osteoartrit gibi dejeneratif hastalıkların tedavisinde, eklemdeki aşırı hareketlerin kısıtlanması, ağrıyı azaltabilir ve iyileşme sürecini hızlandırabilir (Lim ve ark., 2024).

- Sinir ve damar yaralanmaları: Sinir sıkışması, karpal tünel sendromu gibi durumlar da kısmi immobilizasyon ile tedavi edilebilir. Bu durumda, eklem hareketi kısıtlanarak sinirin iyileşmesine yardımcı olunur (Georgiew ve ark., 2022; Zhang ve ark., 2023).

Kısmi immobilizasyon ortezleri, farklı malzemeler ve tasarımlar kullanılarak hastanın ihtiyacına uygun şekilde özelleştirilebilir (Rybarczyk ve ark., 2023; Trindade ve ark., 2024). Örneğin, bileğin fleksiyon veya ekstansiyon hareketini sınırlamak amacıyla tasarlanmış olabilir, ancak diğer hareketler serbest bırakılabilir. El ve bilek ortezlerinde genellikle hafif, dayanıklı ve şekil alabilen malzemeler kullanılır. Termoplastik plastikler, karbon fiber ve alüminyum gibi malzemeler, hastanın rahatsızlık yaşamadan ortezi kullanmasını sağlar (De Almeida ve ark., 2022). Ortezlerin iç kısmında hava geçiren yapılar bulunabilir, böylece terleme ve cilt problemleri önlenir (Gnyawali ve ark., 2023). Ayrıca, elastik bantlar ve yumuşak iç astarlar, hasta konforunu artırır (Nordenskiöld ve ark., 1990; Hirata ve ark., 2024). Kısmi immobilizasyon ortezleri, eklemin açısını değiştirmek ve hareketi kısıtlamak için ayarlanabilir olabilir. Bu özellik, tedavi sürecine göre ortez kullanımının esnekliğini artırır (Collier ve ark., 2002).

Kısmi immobilizasyon ortezleri, genellikle ağrı yönetimi ve fonksiyonel iyileşme sağlamak için kullanılır. El veya bilek bölgesindeki tendon yaralanmalarında, kısmi immobilizasyon ortezleri, iyileşme sürecinde hasarlı tendonun gereksiz gerilmesini engeller (Woythal ve ark., 2019; Fang ve ark., 2022). Bilek burkulmalarında veya bağ yaralanmalarında, kısmi immobilizasyon hareketi sınırlayarak ağrıyı azaltır ve iyileşme sürecini destekler (Clementson ve ark., 2016; Shin ve ark., 2022). Kısmi hareket sınırlaması, hastaların iyileşme sırasında rahat etmelerini sağlar. Ayrıca, belirli hareketlerin yapılmasına izin vererek kas ve eklem gücünün korunmasına yardımcı olur (Stern ve ark., 1997; Chan ve ark., 2003). Kısmi immobilizasyon ortezleri, genellikle fiziksel terapiyle desteklenir. Çünkü uzun süreli ortez kullanımı, eklem ve kas zayıflığına yol açabilir. Terapistler, hastaların hareketlerini güvenli bir şekilde tekrar kazanmalarına yardımcı olmak için özel egzersiz programları geliştirebilir (Miles ve ark., 1994; Filipova ve ark., 2015; Yang ve ark., 2021). Ayrıca, ortopedik ortez kullanım süresi ve aktivite kısıtlamaları hakkında rehberlik sağlar. Kısacası, kısmi immobilizasyon ortezleri, el ve bilek yaralanmalarında etkili bir tedavi aracı olarak, hareket sınırlaması ve ağrı yönetimini sağlar. Bu ortezlerin doğru bir şekilde kullanılması, iyileşme sürecini hızlandırırken, uzun dönemde hastanın fonksiyonel kapasitesinin korunmasına yardımcı olur (Watson ve ark., 2018; Blomstrand ve ark., 2025).

3.2. Malzemelerine Göre İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

3.2.1. Termoplastik İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Yaygın kullanılan termoplastik malzemeler:

Aquaplast: Su ile ısıtılabilen, esnek ve hafif bir malzemedir. Çeşitli kalınlık seçenekleri mevcuttur (Cunningham ve ark., 1984).

Orfit: Çeşitli renk ve yoğunluk seçeneklerine sahip, yüksek dayanıklılıklı bir termoplastik malzemedir (Ryu ve ark., 2018; Albilali ve ark., 2023).

Pelite: Yüksek esneklik ve yumuşaklık sağlayan bir malzemedir. Düşük ısıda şekil alır ve genellikle küçük yaralanmalar için kullanılır (Lutfi ve ark., 2020).

Kydex: Sertleşmiş bir plastik malzemedir ve genellikle yüksek dayanıklılık ve gerilim gerektiren durumlar için kullanılır. Genellikle, eklem hareketliliğinin sınırlanması ve iyileşme sürecinde korunması gereken hastalar için tercih edilir (Cavanaugh ve ark., 2022).

3.2.2. Kompozit İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Kompozit immobilizasyon el ve bilek ortezleri, genellikle karbon fiber, cam elyafı ve diğer yüksek dayanıklı malzemelerden üretilen, özel olarak tasarlanmış ortopedik cihazlardır. Bu tür ortezler, yüksek dayanıklılık, hafiflik, esneklik ve rijitlik özellikleri ile öne çıkar (Hirata ve ark., 2024). Kompozit malzemeler, termoplastik malzemelere göre daha güçlü ve hafif olmaları sayesinde genellikle daha ağır yaralanmalarda ve iyileşme sürecinde aktif destek sağlayan cihazlar olarak kullanılır (Nelham ve ark., 1981; Williamson ve ark., 2023). Kompozit ortezler, vücuda uyum sağlamak ve tedavi edilen bölgeyi sabitlemek amacıyla kullanılır, aynı zamanda hastaların günlük aktivitelerine uyum sağlamalarına da yardımcı olurlar. El ve bilek gibi mobil ve hassas bölgelerde kullanıldığında, kompozit ortezler hem fonksiyonel iyileşmeyi destekler hem de tedavi sürecinde gerekli olan immobilizasyonu sağlar (McVeigh ve ark., 2021(b)).

Kompozit ortezler, birden fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan cihazlardır. Bu malzemeler, genellikle bir yük taşıyan katman (karbon fiber veya cam elyafı) ve dış yapı destekleri içerir. Bu yapılar, ortezin dayanıklılığını, sertliğini ve hafifliğini sağlar. Kompozit malzemelerin en büyük avantajı, yüksek mukavemet ve düşük ağırlığı bir arada sunmalarıdır. (Hachisuka ve ark., 2006(a)).

Kompozit malzemelerden üretilen el ve bilek ortezleri, yüksek rijitlik ve düşük ağırlık gibi mekanik avantajlar sunmalarına rağmen, bu özelliklerin klinik sonuçlara ne ölçüde yansıdığı literatürde net biçimde ortaya konulamamıştır. Mevcut çalışmaların çoğu mekanik performansa odaklanmakta, ağrı azalması, fonksiyonel iyileşme ve hasta memnuniyeti gibi klinik çıktılar sınırlı düzeyde değerlendirilmektedir. Bu nedenle kompozit ortezlerin, termoplastik ve metal destekli ortezlere kıyasla klinik sonuçları gerçekten iyileştirip iyileştirmediğinin ortaya konabilmesi için karşılaştırmalı klinik çalışmalara ihtiyaç vardır (Hachisuka ve ark., 2006(b); McVeigh ve ark., 2021(a).

Kompozit ortezlerin üretiminde kullanılan başlıca malzemeler şunlardır:

Karbon Fiber: Hafif ve Yüksek çekme dayanımına sahip bir malzemedir. Düşük esnekliği sayesinde sabitleme sağlar ve kullanımı rahattır. Ayrıca yüksek dirençli ve uzun ömürlüdür (Petersen, 2016; Sun ve ark., 2018).

Cam Elyafı: Karbon fiber kadar sert olmayabilir, daha esnek ve hafif bir yapıya sahiptir. Yüksek çekme dayanımına sahiptir ve genellikle düşük maliyetli bir seçenektir (Li ve ark., 2023; Dong ve ark., 2024).

Kevlar: Aşırı dayanıklı ve darbeye karşı dirençli bir kompozit malzeme olup yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir (Joselin ve ark., 2014).

Epoksi Reçineler: Karbon fiber ve cam elyafı gibi malzemeler genellikle epoksi reçine ile birleştirilerek sabitlenir. Epoksi, malzemenin mukavemetini artırarak ortezlerin dayanıklılığını sağlar (Uthaman ve ark., 2020).

3.2.3. Metal Destekli Polimerik İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Metal destekli polimerik immobilizasyon el ve bilek ortezleri, metal ve polimer malzemelerin kombinasyonu kullanılarak üretilen, dayanıklı, esnek ve fonksiyonel ortopedik cihazlardır. Bu ortezler, el ve bilek bölgesindeki yaralanmaların tedavisinde, eklem hareketinin sınırlanmasında, iyileşme sürecinde stabilite sağlamada ve fonksiyonel destek sunmada önemli bir rol oynar. Metal bileşenler, genellikle sertlik, güç ve dayanıklılık sağlarken, polimer malzemeler hafiflik, esneklik ve konfor sunar (Rasmussen ve ark., 2024).

Metal destekli polimerik ortezler, metaller (genellikle alüminyum, paslanmaz çelik veya titanyum gibi malzemeler) ile polimerik malzemelerin (termoplastik plastik, elastomerler, vb.) birleştirilmesiyle üretilir. Metal bileşenler, ortezin yapısal bütünlüğünü güçlendirirken, polimer malzemeler ortezin hafif, esnek ve kişiye özel olmasını sağlar (Thiele ve ark., 2009; Kim ve ark., 2018).

3.2.4. Biyopolimerik İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Biyopolimerik immobilizasyon el ve bilek ortezleri, doğada bulunan, çevre dostu, biyolojik olarak çözünebilen ve sürdürülebilir malzemelerden üretilen ortopedik cihazlardır. Bu ortezler, geleneksel polimerlerin yerine daha ekolojik malzemeler kullanılarak tasarlanır ve özellikle çevre dostu ve biyolojik uyumlu olma özellikleri ile öne çıkar (Popescu ve ark., 2023). Biyopolimerik ortezler, hem fonksiyonel iyileşmeyi desteklemek hem de çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmak amacıyla kullanılır (Ciccone ve ark., 2001; Vlăsceanu ve ark., 2024). Bazı biyopolimerler, ortezlerin dayanıklılığını sağlamak için uygun hale getirilmiş, biyoteknolojik işlemlerle şekillendirilmiş malzemelerdir. En yaygın kullanılan biyopolimer malzemeler şunlardır:

Polilaktik Asit (PLA):

Polilaktik asit, doğada biyolojik olarak çözünebilen bir polimerdir. Genellikle mısır nişastası veya şeker kamışı gibi bitkisel kaynaklardan üretilir. PLA, yüksek sertlik ve dayanıklılık özellikleri ile bilinir. Ayrıca PLA, orteze yeterli dayanıklılık sağlayarak hastanın tedavi sürecini destekler (Raj ve ark., 2022; Vlăsceanu ve ark., 2024).

Polihidroksialkanoatlar (PHA):

Polihidroksialkanoatlar, mikroorganizmalar tarafından üretilen biyoplastiklerdir. PHA biyopolimerleri, yüksek biyolojik uyumluluk ve çözünebilen özellikler ile öne çıkar. Genellikle daha esnek ve hafif olan bu biyopolimer, el ve bilek gibi hareketli bölgelerde rahatlıkla kullanılabilir (Chen ve Wang, 2013; Koller, 2018).

Kitosan:

Kitosan, kabuklu deniz ürünlerinin (örneğin karides kabuğu) kitin maddesinden elde edilen bir biyopolimerdir. Doğal antibakteriyel özelliklere sahip olan kitosan, biyolojik uyumluluğu ve ciltle uyumu sayesinde özellikle yara iyileşmesi ve postoperatif tedavi süreçlerinde tercih edilebilir (Shah ve ark., 2025).

Polivinil Alkol (PVA):

PVA, biyolojik olarak çözünebilen ve suya duyarlı bir polimerdir. Yüksek esnekliği ve dayanıklılığı, onu immobilizasyon amaçlı ortezler için ideal bir malzeme yapar. Ayrıca, vücutta minimum toksisiteye sahip olması nedeniyle biyolojik uyumluluk açısından da tercih edilir (Kobayashi ve ark., 2001; Baker ve ark., 2012).

Polipeptitler:

Polipeptitler, biyoteknolojik süreçlerle üretilir ve protein yapılarına benzer özellikler taşır. Yüksek biyolojik uyumlulukları ve doğal kökenleri sayesinde hem çevre dostu hem de sağlamdırlar. Ayrıca biyolojik süreçler sırasında kolayca çözünebilirler (Kang ve ark., 2025).

3.3. Üretim Tekniğine Göre İmmobilizasyon Ortezleri

3.3.1. Seri Üretim İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Seri üretim immobilizasyon el ve bilek ortezleri, seri üretim süreçleriyle büyük miktarlarda üretilen, el ve bilek bölgesindeki yaralanmalar ve iyileşme süreçlerinde kullanılan ortopedik cihazlardır. Bu ortezler, hızlı üretim, düşük maliyet ve yaygın erişilebilirlik gibi avantajlar sunar (Haskett ve ark., 2004; Thiele ve ark., 2009). Seri üretim, tasarımın çoğunlukla standardize edilmesi gerektiği anlamına gelir. Bu nedenle bu tür ortezler, çoğunlukla ortopedik gereksinimleri karşılayan, genel bir çözüm sunar. Ancak, kişiye özel gereksinimlere çok az yer bırakabilir.

Seri üretim genellikle aşağıdaki tekniklerle yapılır:

Enjeksiyon kalıplama: Plastik malzemenin sıcaklıkla eriyip bir kalıba enjekte edilmesiyle üretilir. Hızlı ve yüksek hacimli üretim için uygun bir yöntemdir (Vanek ve ark., 2024).

Termoformlama: Termoplastik malzemelerin ısıtılarak şekillendirilmesidir. El ve bilek ortezlerinin şekillendirilmesinde sıkça kullanılır (Tudor ve ark., 2024).

Kesme ve dikiş: Bazı seri üretim ortezlerinde, malzemeler kesilir, dikilir ve birleştirilir (Ramírez-Rios ve ark., 2021).

3.3.2. Termoform Yöntemiyle Kişiye Özel Üretim İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Termoform yöntemiyle üretilen kişiye özel immobilizasyon el ve bilek ortezleri, bireysel anatomik ihtiyaçlara göre özelleştirilir. Termoformlama, polimer malzemelerinin ısı ile şekillendirilmesi işlemi olup, ortezlerin hastanın anatomisine tam uyum sağlamasını sağlar (Kim ve ark., 2018). Bu yöntem, hem rahatlık hem de fonksiyonel destek sunarak, özellikle el ve bilek gibi hareketli bölgelerde yüksek düzeyde konfor sağlar. Termoform yöntemi, genellikle el bileği kırıkları, tendon yaralanmaları, sinir sıkışmaları (örneğin karpal tünel sendromu) ve postoperatif iyileşme süreçleri gibi durumlarda kullanılır. Yüksek biyolojik uyum ve kişiye özel destek sunmaları, bu ortezleri daha verimli ve etkili bir tedavi seçeneği hâline getirir (Çalış ve ark., 2021).

3.3.3. Üç Boyutlu Baskı İle Üretilen İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezleri

Üç boyutlu baskı ile üretilen immobilizasyon el ve bilek ortezleri, modern teknolojilerle kişiye özel olarak üretilen ortopedik cihazlardır. Bu ortezler, geleneksel üretim yöntemlerine göre büyük avantajlar sunar. Özellikle hastaların anatomik yapısına tam uyum sağlayabilmesi açısından önemli bir yenilik getirir. 3B baskı teknolojisinin kullanımı, hız, maliyet etkinliği, özelleştirilebilirlik ve daha az atık üretme gibi faydalar sağlar (von Haller ve ark., 2024).

3B baskı, dijital bir modelin katman katman basılarak fiziksel bir nesneye dönüştürülmesi işlemidir. Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla, 3B baskı daha hızlı ve daha hassas bir üretim süreci sunar. 3B baskı teknolojisi, CAD (Computer-Aided Design) yazılımları ile tasarlanmış dijital modelleri kullanarak, malzeme ekleyerek objeleri katmanlar halinde üretir. 3B baskı ile üretim için ilk adım, hastanın anatomisine özel bir model tasarlamaktır. Bu aşamada, hastanın el ve bilek ölçüleri alınır. 3B tarama teknolojisi veya manuel ölçü alma yöntemleri kullanılarak hastanın el ve bileği dijital ortamda taranır. Bu dijital tarama, bir CAD yazılımına aktarılır ve özelleştirilmiş ortez tasarımı yapılır. Tasarım aşamasında, ortezin hareketi sınırlama ve rahatlık gibi fonksiyonel özellikleri göz önünde bulundurulur (Górski ve ark., 2019).

Üç boyutlu baskı ile üretilen el ve bilek ortezleri, kişiye özel tasarım sayesinde anatomik uyum ve konfor açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde, bu ortezlerin hafiflik ve havalandırma özellikleri sayesinde kullanım konforunu artırabileceği bildirilse de, kullanıcı uyumu açısından geleneksel üretim yöntemleriyle yapılan karşılaştırmalar sınırlıdır. Tedaviye uyum, günlük kullanım süresi ve hasta memnuniyeti gibi parametrelerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, 3B baskılı ortezlerin klinik değerinin daha net ortaya konmasını sağlayacaktır (Kim ve ark., 2018).

4. İmmobilizasyon El ve Bilek Ortezlerinin Mekanik Özellikleri

4.1. Rijitlik ve Destek

İmmobilizasyon el ve bilek ortezlerinde "rijitlik ve destek", ortezin ana işlevlerinden biridir ve iyileşme sürecinde önemli bir rol oynar. Bu kavramlar, ortezin sertlik ve dayanıklılığını, hareket

kısıtlamasını ve iyileşmeye yardımcı olma kapasitesini belirler (Seegmiller ve ark., 2016; Hirata ve ark., 2024).

Rijitlik, ortezin sertlik ve esneklik eksikliği anlamına gelir. Rijit bir ortez, el veya bilek eklemindeki hareketleri tamamen kısıtlar (May-Lisowski ve King, 2008; Seegmiller ve ark., 2016). Rijitlik, genellikle kırıklar, ağır yaralanmalar veya postoperatif iyileşme durumlarında gereklidir, çünkü eklemi sabit tutarak iyileşmeyi hızlandırır. Rijit ortezler genellikle sert plastik veya metal bileşenler kullanılarak üretilir (Klopfer ve ark., 2023).

Destek, ortezin hastanın el ve bileğini sabit tutma ve koruma işlevini görmesini sağlar. Destek seviyesi, ortezin gerekli olan hareketi sınırlaması ile rahatlık arasında denge kurar. Bilek ve el desteği, genellikle yumuşak dokuları korumak, tendonları ve bağları gerilmekten veya zorlanmaktan korumak için kullanılır. Destek, özellikle kronik hastalıklar (örneğin, artrit) veya tendon sorunları (örneğin, tendonit) gibi durumlar için gereklidir (Windt ve ark., 2023).

4.2. Elastikiyet

İmmobilizasyon el ve bilek ortezlerinde elastikiyet, ortezin esnekliği veya geri dönme kapasitesini ifade eder. Elastikiyet, özellikle hafif yaralanmalar veya kronik hastalıklar (örneğin, artrit gibi) gibi durumlar için önemli bir özelliktir. Bu özellik, ortezin hem destek sağlaması hem de hareketliliği engellemeden konfor sunması açısından kritik bir rol oynar (Kjeken ve ark., 1995; Li ve ark 2025).

Elastikiyet, ortezin şekil değiştirme yeteneğini belirtir; yani ortez, deforme olduktan sonra eski şekline geri dönebilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, ortezin bilek veya el eklemi üzerinde gereksiz baskı yapmadan, doğal hareketlere uyum sağlamasını sağlar (Łukaszewski ve ark., 2020; Vlăsceanu ve ark., 2024). Elastik ortezler, dinamik destek sunarak, eklem üzerinde yumuşak bir koruma sağlar. Böylece, eklemdeki ağrıyı hafifletirken, hareket kabiliyetini de kısıtlamaz (Gallucci ve ark., 2014).

Elastik ortezler, esnek yapıları sayesinde daha rahat kullanım sunar ve günlük aktivitelerde daha az sınırlama oluşturur. Kullanıcı, ortezi uzun süre takabilir ve genellikle rahatlıkla hareket edebilir. Elastik ortezler, tamamen hareketsizleştirici olmayıp, kısıtlı hareketi mümkün kılar. Bu, iyileşme sürecinde özellikle tendon ve bağ yaralanmalarında eklem hareketliliği sağlamak için önemlidir (Wang ve ark., 2024).

4.3. Dayanıklılık ve Aşınma Direnci

İmmobilizasyon el ve bilek ortezlerinde dayanıklılık ve aşınma direnci, ortezlerin uzun süreli kullanımda verimliliğini ve performansını koruması için kritik öneme sahiptir. Bu özellikler, hasta memnuniyetini artırmak, tedavi sürecini desteklemek ve ortopedik cihazın ömrünü uzatmak adına çok önemlidir (Casey ve ark., 2003).

Dayanıklılık, ortez malzemesinin fiziksel yıpranma, gerilme ve şekil değiştirme gibi etkenlere karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Yüksek dayanıklılığa sahip bir ortez, uzun süre boyunca günlük kullanım koşullarında bozulmadan işlevini yerine getirebilir (Trindade ve ark., 2024). Dayanıklı

malzemeler, ortezin zamanla deformasyona uğramasını engeller ve uzun vadeli kullanımda bile sağlamlığını korur. Dayanıklı ortezler, sürekli bakım veya onarım gereksinimlerini azaltarak, hem hastalar hem de sağlık profesyonelleri için pratiklik sağlar (Trindade ve ark., 2024; Redaelli ve ark., 2020).

Aşınma direnci, ortezin yüzeyinin fiziksel aşınmaya ve sürtünmeye karşı gösterdiği dirençtir. Bu, özellikle el ve bilek eklemlerinin sık hareket ettiği ve sürekli fiziksel temasa maruz kaldığı durumlarda önemlidir. Aşınma, özellikle deriyle doğrudan temas eden bölgelerde meydana gelebilir (Casey ve ark., 2003; Banaszek ve ark., 2019). Yüksek aşınma direncine sahip bir ortez, dış etkenlere karşı daha uzun süre dayanır ve yüzeydeki deformasyonları engeller. Bu, deri tahrişini ve rahatlık kaybını azaltır. Aşınmaya dayanıklı malzemeler, ortezin yüzeyinin ve yapısının değişmesini engeller, böylece daha az sıklıkta değiştirilmesi gereklidir (Habiba ve ark., 2024). Naylon ve karbon fiber gibi malzemeler, yüksek aşınma direnci ve hafiflik sunar. Bu malzemeler, yüzeyin aşınmaya karşı daha dayanıklı olmasını sağlar ve zorlu koşullar altında bile daha uzun ömürlü olmasına yardımcı olur. TPU (Termoplastik Poliüretan), esnek ve dayanıklı yapısı ile hem elastikiyet sağlar hem de aşınmaya karşı direnç gösterir (Sheehan ve ark., 2016).

4.4. Hareket Kısıtlama Düzeyi

İmmobilizasyon el ve bilek ortezlerinde hareket kısıtlama düzeyi, ortezin hastanın el ve bilek eklemindeki hareketliliğini ne kadar sınırladığına dair bir kavramdır. Bu düzey, ortezin tedavi hedeflerine ve hastanın iyileşme sürecine bağlı olarak değişir. Hareket kısıtlaması, belirli bir eklem veya bölgenin istirahate alınması gerektiği durumlarda kritik öneme sahiptir (Aranceta-Garza ve ark., 2021). İmmobilizasyon ortezlerinin hareket kısıtlama düzeyi, tedavi sürecinin başarısında önemli bir rol oynar.

Tam immobilizasyon için, ortez daha katı ve sabitleyici olur. Bu tür ortezlerde, el veya bilek eklemindeki hareketin tamamen engellenmesi sağlanır. Termoplastik veya metal destekli malzemeler sıklıkla kullanılır. Kısmi immobilizasyon sağlamak için, ortezlerin daha esnek ve hafif malzemelerden üretilmesi gerekir. Bu ortezler, kullanıcının bazı hareketleri yapmasına izin verirken, belirli hareketleri sınırlayarak iyileşme sürecini destekler. TPU (termoplastik poliüretan) gibi esnek malzemeler yaygın olarak kullanılır. Dinamik hareket kısıtlamalı ortezler, eklemdeki bazı hareketlere serbestlik tanırken, daha kontrollü hareket ve stabilite sağlar. Genellikle ayarlanabilir bilek destekleri ve özel hareket sınırlandırıcılar içerir (Waldburger ve ark., 2021; Hirata ve ark., 2024).

4.5. Ağırlık

İmmobilizasyon el ve bilek ortezlerinde ağırlığın etkisi, ortezlerin konforunu, fonksiyonelliğini ve uzun süreli kullanımını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Ağırlık, ortezin tasarımında ve malzeme seçiminde önemli bir rol oynar. Çünkü hem tedavi sürecini hem de hastanın yaşam kalitesini

etkileyebilir. İmmobilizasyon ortezlerinin ağırlığı, özellikle uzun süreli kullanımda hastanın konforunu ve günlük aktivitelerini etkileyebilir (Bula-Oyola ve ark., 2022; Hirata ve ark., 2024).

Hafif ortezler, hastaların daha konforlu hissetmesini sağlar. Uzun süreli kullanımda, ağır ortezler kaslarda, eklemlerde ve ciltte ekstra baskı ve tahriş oluşturabilir. Bu da ağrı ve rahatsızlık hissine yol açabilir. Hafif ortezler, kullanıcıya daha doğal hareket etme imkânı tanır, böylece günlük yaşam aktiviteleri daha rahat bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ağır ortezler, kollar ve eller üzerinde sürekli taşıma yükü oluşturabilir (Stern ve ark., 1994). Bu, özellikle el yaralanmaları sonrası, ortezi uzun süre takmak zorunda kalan hastalarda, kas yorgunluğu ve kas zayıflığına neden olabilir. Ayrıca, ortez ne kadar ağırsa, dokulara uygulanan basınç o kadar fazla olur. Bu da zamanla cilt bozulmaları ve deri altı doku hasarlarına yol açabilir (Miles ve ark., 1994; Kitahara ve ark., 2003).

Ağır ortezler, hastaların günlük kullanım süresini kısaltmasına yol açabilir. Kullanıcı, ortezi taşımanın zorluğunu hissettiği için tedavi sürecine devam etmekte zorlanabilir. Bunun sonucunda, tedavi süresi uzayabilir ve iyileşme süreci sekteye uğrayabilir. Ağırlık, ortezin tasarımında ve kullanılan malzemelerin seçiminde belirleyici bir faktördür (Andringa ve ark., 2013(a)).

5. Sonuç ve Öneriler

5.1. Sonuç

Bu derlemede, immobilizasyon amaçlı el ve bilek ortezleri; fonksiyonlarına (tam ve kısmi immobilizasyon), kullanılan malzemelere (termoplastik, kompozit, metal destekli polimerik ve biyopolimerik) ve üretim tekniklerine (seri üretim, termoform kişiye özel üretim ve üç boyutlu baskı) göre sınıflandırılarak mekanik özellikleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, farklı ortez türlerinin tedavi sürecindeki rollerinin; yaralanmanın türüne, immobilizasyon gereksinimine, hastanın fonksiyonel durumu ve bireysel ihtiyaçlarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

Tam immobilizasyon el ve bilek ortezleri, kırıklar, ciddi bağ yaralanmaları, tendon onarımları ve cerrahi sonrası erken dönemde yüksek rijitlik ve stabilite sağlayarak iyileşme sürecinde kritik bir rol üstlenmektedir. Buna karşılık, kısmi immobilizasyon ortezleri, belirli hareketleri sınırlarken fonksiyonel hareketliliği koruyarak ağrı kontrolü ve uzun dönem fonksiyonel kazanımlar açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu yönüyle, kısmi immobilizasyon ortezleri özellikle tendon, ligament yaralanmaları ve dejeneratif eklem hastalıklarında etkin bir tedavi aracı olarak öne çıkmaktadır.

Malzeme bazlı değerlendirmelerde; termoplastik ortezler, şekillendirilebilirlik ve klinik uygulama kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmakta olup, orta düzey immobilizasyon gerektiren durumlarda yeterli destek sunmaktadır. Kompozit ortezler (karbon fiber, cam elyafı, kevlar), yüksek rijitlik, dayanıklılık ve düşük ağırlık özellikleri sayesinde ağır yaralanmalar ve yüksek stabilite gerektiren klinik durumlarda üstün mekanik performans sağlamaktadır. Metal destekli polimerik ortezler, metalin dayanıklılığı ile polimerlerin konforunu bir araya getirerek özellikle uzun süreli stabilizasyon gereken olgularda etkili bir çözüm sunmaktadır. Biyopolimerik ortezler ise

biyouyumluluk, hafiflik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlara sahip olmakla birlikte, mekanik dayanım gereksinimi düşük olan klinik durumlarda daha uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Üretim teknikleri açısından bakıldığında, seri üretim ortezler düşük maliyet ve hızlı erişim avantajı sunarken, anatomik uyumlarının sınırlı olması nedeniyle hasta konforu ve uzun süreli kullanımda dezavantajlı olabilmektedir. Termoform yöntemiyle kişiye özel üretilen ortezler, anatomik uyum ve klinik etkinlik açısından daha üstün sonuçlar sağlamakta, ancak üretim süresi ve iş gücü gereksinimi açısından dezavantajlar taşımaktadır. Üç boyutlu baskı ile üretilen immobilizasyon el ve bilek ortezleri ise kişiye özel tasarım, hafiflik, havalandırma ve estetik açıdan önemli avantajlar sunarak hasta uyumunu ve kullanım süresini artırma potansiyeli göstermektedir.

Genel olarak, immobilizasyon el ve bilek ortezlerinin mekanik performansı; rijitlik, elastikiyet, dayanıklılık, aşınma direnci, hareket kısıtlama düzeyi ve ağırlık gibi parametrelerin dengeli biçimde sağlanmasına bağlıdır. Bu parametrelerin tek başına değil, fonksiyon, malzeme ve üretim tekniği ile birlikte bütüncül olarak değerlendirilmesi, klinik başarının temel belirleyicisidir.

5.2. Öneriler

Fonksiyona uygun ortez seçimi:

Tam ve kısmi immobilizasyon ortezlerinin seçimi, yaralanmanın tipi, iyileşme evresi ve hastanın fonksiyonel gereksinimleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Gereğinden fazla immobilizasyonun fonksiyon kaybına yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Malzeme ve yapı optimizasyonu:

Termoplastik, kompozit, metal destekli polimerik ve biyopolimerik malzemelerin avantajları klinik endikasyona göre değerlendirilerek, gerekirse hibrit yapılarla mekanik ve konfor özellikleri optimize edilmelidir.

Kişiye özel ve 3B baskı uygulamaları:

Termoform ve 3B baskı teknolojileri, anatomik uyum ve hasta memnuniyetini artırma potansiyeli nedeniyle daha yaygın kullanılmalı; özellikle uzun süreli immobilizasyon gerektiren olgularda tercih edilmelidir.

Mekanik ve klinik uzun dönem çalışmalar:

Farklı ortez türlerinin uzun dönem mekanik dayanıklılığı, hasta uyumu ve fonksiyonel sonuçları çok merkezli ve karşılaştırmalı klinik çalışmalarla değerlendirilmelidir.

Hasta odaklı tasarım yaklaşımı:

Ortez tasarımında yalnızca mekanik performans değil, konfor, estetik, kullanım kolaylığı ve hastanın günlük yaşam aktivitelerine etkisi de dikkate alınmalıdır.

6. Kaynakça

Albilali AT., Baras BH., Aldosari MA. Evaluation of mechanical properties of different thermoplastic orthodontic retainer materials after thermoforming and thermocycling. Polymers 2023; 15: 1610.

Alexander J., Dawson J., Langhorne P. Dynamic hand orthoses for the recovery of hand and arm function in adults after stroke: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. Top Stroke Rehabil. 2022; 29(2): 114-124.

Amin MR., Khondoker MAH. Design and characterization of additively manufactured patient-specific wrist hand orthosis. Eng. Proc. 2024; 76: 69.

Andringa A., van de Port I., Meijer JW. Long-term use of a static hand-wrist orthosis in chronic stroke patients: a pilot study. Stroke Res Treat. 2013; 2013a: 546093.

Andringa AS., Van de Port IG., Meijer JW. Tolerance and effectiveness of a new dynamic hand-wrist orthosis in chronic stroke patients. Neuro Rehabilitation 2013b; 33(2): 225-231.

Aranceta-Garza A., Ross K., Buhler M., Rameckers E. A comparative study of efficacy and functionality of ten commercially available wrist-hand orthoses in healthy females: Wrist range of motion and grip strength analysis. Front Rehabil Sci. 2021; 15(2): 687554.

Baker MI., Walsh SP., Schwartz Z., Boyan BD. A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications. J Biomed Mater Res B Appl Biomater 2012; 100(5): 1451-1457.

Banaszek K., Klimek L., Dąbrowski JR., Jastrzębski W. Fretting wear in orthodontic and prosthetic alloys with Ti(C, N) Coatings. Processes 2019; 7: 874.

Barrett PC., Hackley DT, Samuel LT., Apel PJ. Immobilization and hand therapy after carpometacarpal arthroplasty: A systematic review. J Hand Surg Glob Online. 2022; 4(5): 255-262.

Başar B., Polat A. Safety evaluation of early active and passive motion without immobilization in metacarpal fractures. J Acad Res Med. 2021; 15; 11(3): 283-287.

Blomstrand J., Sellbrant I., Nellgård B. Removable brace is as good as plaster cast after surgically treated distal radius fracture – a randomised controlled study of pain and wrist function. J Orthop Surg Res 2025; 20: 691

Bula-Oyola E., Belda-Lois JM., Porcar-Seder R., Page A. Aspects determining adherence to wrist-hand orthoses in patients with peripheral neuropathies. Technology and Disability 2022; 34(4): 247-260.

Cantero-Téllez R., Villafañe JH., Valdes K., Berjano P., Effect of immobilization of metacarpophalangeal joint in thumb carpometacarpal osteoarthritis on pain and function. A quasi-experimental trial. Journal of Hand Therapy 2018; 31(1): 68-73.

Casey J., Dunn WJ., Wright E. In vitro wear of various orthotic device materials. J Prosthet Dent. 2003; 90(5): 498-502.

Cavanaugh PK., Watkins C., Jones C., Maltenfort MG., Beredjiklian PK., Rivlin M. Effectiveness of quickcast versus custom-fabricated thermoplastic orthosis immobilization for the treatment of mallet fingers: A randomized clinical trial. Hand (N Y) 2022; 17(6): 1090-1097.

Challoumas D., Ramasubbu R., Rooney E., Seymour-Jackson E., Putti A., Millar NL. Management of de quervain tenosynovitis: A systematic review and network meta-analysis. JAMA Netw Open 2023; 6(10): e2337001.

Chan HL., Ng GY. Effect of counterforce forearm bracing on wrist extensor muscles performance. Am J Phys Med Rehabil. 2003; 82(4): 290-295.

Chen Gq., Wang Y. Medical applications of biopolyesters polyhydroxyalkanoates. Chin J Polym Sci. 2013; 31: 719–736.

Ciccone WJ., Motz C., Bentley C., Tasto JP. Bioabsorbable implants in orthopaedics: new developments and clinical applications. J Am Acad Orthop Surg. 2001; 9(5): 280-288.

Clementson M., Thomsen N., Jørgsholm P., Besjakov J., Björkman A. Is early mobilisation better than immobilisation in the treatment of wrist sprains? J Plast Surg Hand Surg. 2016; 50(3): 156-160.

Collier SE., Thomas JJ. Range of motion at the wrist: a comparison study of four wrist extension orthoses and the free hand. Am J Occup Ther. 2002; 56(2): 180-184.

Cunningham MW., Yousif NJ., Sanger JR., Gingrass RP., Matloub HS. Aquaplast for nasal splinting. Ann Plast Surg. 1984; 13(4): 357-358.

Çalış HT., Aslaner H., Sunkak, SD., Sedefoğlu N., Sütbeyaz ST., Güler E. Comparison of therapeutic effectiveness between kinesio taping technique and static resting splint in carpal tunnel syndrome. European Journal of Therapeutics 2021; 27(1): 14–19.

De Almeida PHTQ., Santos BB., Bernardo LD., MacDermid JC. Does thermoplastics' thickness influence joint stabilization and movement coordination? An inferential study of wrist orthoses. Prosthet Orthot Int. 2022; 1;46(6): 633-640.

De Angelis MV., Pierfelice F., Di Giovanni P., Staniscia T., Uncini A. Efficacy of a soft hand brace and a wrist splint for carpal tunnel syndrome: a randomized controlled study. Acta Neurol Scand. 2009; 119(1): 68-74.

Delisa JA., Greenberg S. Orthotic management of upper extremity disorders. American Family Physician 1981; 24(3): 145–152.

Diaz R., Ebramzadeh E., Yao J. Variations in postoperative immobilization following common hand surgery procedures. Hand (N Y). 2016; 11(1): 45-49.

Dong C., Davies IJ. Mechanical properties of continuous glass fibre-reinforced composites made by material extrusion. Prog Addit Manuf 2024; 9: 2131–2141.

Fang JJ., Lin CL., Tsai JY., Lin RM. Clinical assessment of customized 3d-printed wrist orthoses. Appl. Sci. 2022; 12: 11538.

Filipova V., Lonzarić D., Jesenšek Papež B. Efficacy of combined physical and occupational therapy in patients with conservatively treated distal radius fracture: randomized controlled trial. Wien Klin Wochenschr. 2015; 127(5): 282-287.

Gallucci GL., Boretto JG., Dávalos MA., Alfie VA., Donndorff A., De Carli P. The use of dynamic orthoses in the treatment of the stiff elbow. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2014; 24(8): 1395-1400.

Georgiew FS., Florek J., Janowiec S., Florek P. The use of orthoses in the treatment of carpal tunnel syndrome. A review of the literature from the last 10 years. Reumatologia 2022; 60(6): 408-412.

Gnyawali SC., Denune JA., Hockman B., Kristjánsdóttir JV., Ragnarsdóttir MS., Timsina LR., Ghatak S., Lechler K., Sen CK., Roy S. Moisture mitigation using a vented liner and a vented socket system for individuals with transfemoral amputation. Sci Rep. 2023; 13(1): 16557.

Górski F., Zawadzki P., Wichniarek R., Kuczko W., Żukowska M., Wesołowska I., Wierzbicka N. Automated design of customized 3D-printed wrist orthoses on the basis of 3D scanning. Computational and Experimental Simulations in Engineering. ICCES 2019; 75.

Habiba R., Amaro A., Trindade D., Moura C., Silva R., Antão A., Martins RF., Malça C., Branco R. Comparative analysis of impact strength among various polymeric materials for orthotic production. Polymers 2024; 16: 1843.

Hachisuka K., Makino K., Wada F., Saeki S., Yoshimoto N., Arai M. Clinical application of carbon fibre reinforced plastic leg orthosis for polio survivors and its advantages and disadvantages. Prosthet Orthot Int. 2006a; 30(2): 129-135.

Hachisuka K., Makino K., Wada F., Saeki S., Yoshimoto K., Ogata H. Biomechanical evaluation of wrist-hand orthoses using different materials. Prosthetics and Orthotics International 2006b; 30(3): 287–295.

Haskett S., Backman C., Porter B., Goyert J., Palejko G. A crossover trial of custom-made and commercially available wrist splints in adults with inflammatory arthritis. Arthritis Rheum. 2004; 51(5): 792-799.

Hirata J., Yoshimura M., Inoue K. Effect of wrist orthoses on upper limb function, activities of daily living, and stress response. J Rehabil Assist Technol Eng. 2024; (11)5.

Hutchinson DT., Sueoka S., Wang AA., Tyser AR., Papi-Baker K., Kazmers NH. A prospective, randomized trial of mobilization protocols following ligament reconstruction and tendon interposition. J Bone Joint Surg Am. 2018; 1; 100(15): 1275-1280.

Jamnik AA., Pirkle S., Chacon J., Xiao AX., Wagner ER., Gottschalk MB. The effect of immobilization position on functional outcomes and complications associated with the conservative treatment of distal radius fractures: A systematic review. J Hand Surg Glob Online. 2021; 4(1): 25-31.

Joselin R., Wilson WJ. Investigation on impact strength properties of kevlar fabric using different shear thickening fluid composition. Defence Science Journal 2014; 64(3): 236–243.

Kang D., Zhang Y., Yu DG. Integrating synthetic polypeptides with innovative material forming techniques for advanced biomedical applications. J Nanobiotechnol 2025; 23: 101.

Kim SJ., Kim SJ., Cha YH., Lee KH., Kwon J-Y. Effect of personalized wrist orthosis for wrist pain with three-dimensional scanning and printing technique: A preliminary, randomized, controlled, open-label study. Prosthetics and Orthotics International 2018; 42(6): 636-643.

Kitahara A., Hamaoka T., Murase N., Homma T., Kurosawa Y., Ueda C., Nagasawa T., Ichimura S., Motobe M., Yashiro K., Nakano S., Katsumura T. Deterioration of muscle function after 21-day forearm immobilization. Med Sci Sports Exerc. 2003; 35(10): 1697-1702.

Kjeken I., Møller G., Kvien TK. Use of commercially produced elastic wrist orthoses in chronic arthritis: a controlled study. Arthritis Care Res. 1995; 8(2): 108-113.

Klopfer T., Hemmann P., Rupprecht V., Stuby F., Stöckle U., Meder A. Outcome analysis of distal radius fracture with orthosis versus cast immobilization after palmar plate osteosynthesis: A randomized controlled study. J Pers Med. 2023; 13(1): 130.

Kobayashi M., Toguchida J., Oka M. Development of the shields for tendon injury repair using polyvinyl alcohol--hydrogel (PVA-H). J Biomed Mater Res. 2001; 58(4): 344-351

Koller M. Biodegradable and biocompatible polyhydroxy-alkanoates (PHA): Auspicious microbial macromolecules for pharmaceutical and therapeutic applications. Molecules 2018; 23(2): 362.

Li B., Zhao Z., Ma P. Mechanical properties of flexible composites reinforced with high-performance glass fiber multi-axial warp-knitted fabrics. Journal of Industrial Textiles 2023; 53.

Li G., Yang J., Feng P., Li X., Chen W. Biomechanical analysis of rheumatoid arthritis of the hand and the design of orthotics: A finite element study. Bioengineering 2025; 12: 462.

Lim J., Choi A., Kim B. The effects of resistance training on pain, strength, and function in osteoarthritis: Systematic review and meta-analysis. J. Pers. Med. 2024; 14: 1130.

Liu CT., Liu DH., Chen CJ. Effects of wrist extension on median nerve and flexor tendon excursions in patients with carpal tunnel syndrome: a case control study. BMC Musculoskelet Disord 2021; 22: 477.

Łukaszewski K., Wichniarek R., Górski F. Determination of the elasticity modulus of additively manufactured wrist hand orthoses. Materials (Basel) 2020; 13(19): 4379.

Lutfi SNN., Abd Razak NA., Ali S., Gholizadeh H. Compression and tension behavior of the prosthetic foam materials polyurethane, EVA, Pelite™ and a combination of polyurethane and EVA: a preliminary study. Biomed Tech (Berl). 2020; 66(3): 317-322

May-Lisowski T.L., King P.M. Effectiveness of wrist orthoses in the management of upper extremity dysfunction. American Journal of Occupational Therapy 2008; 62(5): 530–538.

McVeigh JA., Pennell C., Hurley DA. Composite materials in upper limb orthoses: Mechanical performance and clinical implications. Journal of Hand Therapy 2021a; 34(2): 256–264.

McVeigh KH., Berger TG., Cudahy R., Dekker TM., Brigham TJ., Braxton JC. An evidence-based approach to casting and orthosis management of the pediatric, adolescent, and young adult

population for injuries of the upper extremity: A review article. Clin J Sport Med. 2021b; 1;31(2):151-162.

Miles MP., Clarkson PM., Bean M., Ambach K., Mulroy J., Vincent K. Muscle function at the wrist following 9 d of immobilization and suspension. Med Sci Sports Exerc. 1994; 26(5): 615-623.

Millard GM., Budoff JE., Paravic V., Noble PC. Functional bracing for distal radioulnar joint instability. J Hand Surg Am. 2002; 27(6): 972-7.

Nelham RL. Carbon fibre reinforced plastic applied to prosthetics and orthotics. J Biomed Eng. 1981; 3(4): 305-314.

Nordenskiöld U. Elastic wrist orthoses. Reduction of pain and increase in grip force for women with rheumatoid arthritis. Arthritis Care Res. 1990; 3(3): 158-162.

Petersen R. Carbon fiber biocompatibility for implants. Fibers (Basel) 2016; 4(1): 1.

Popescu, D., Baciu F., Vlăsceanu D., Marinescu R., Lăptoiu D. Investigations on the fatigue behavior of 3d-printed and thermoformed polylactic acid wrist–hand orthoses. Polymers 2023; 15: 2737.

Raj R., Dixit AR., Łukaszewski K., Wichniarek R., Rybarczyk J., Kuczko W., Górski F. Numerical and experimental mechanical analysis of additively manufactured ankle-foot orthoses. Materials (Basel) 2022; 15(17): 6130.

Ramírez-Rios LY., Camargo-Wilson C., Olguín-Tiznado JE., López-Barreras JA., Inzunza-González E., García-Alcaraz JL. Design of a modular plantar orthosis system through the application of TRIZ methodology tools. Appl. Sci. 2021; 11: 2051.

Rasmussen HC., Bang M., Lilleøre JG., Kipp JO., Lindgren L., Brüel A., Bue M., Mikkelsen MKD., Thomsen JS., Stilling M. Short arm splints for wrist stabilization: A mechanical material test and cadaveric radiography study. J Exp Orthop. 2024; 11(4): e70065.

Redaelli DF., Abbate V., Storm FA. 3D printing orthopedic scoliosis braces: a test comparing FDM with thermoforming. Int J Adv Manuf Technol 2020; 111: 1707–1720.

Rybarczyk J., Kuczko W., Wichniarek R., Górski F., Żukowska M. Study of individualized leg orthoses made by 3D Printing of composite material. Innovations in Biomedical Engineering 2023; 875: 59-67.

Ryu JH., Kwon JS., Jiang HB., Cha JY., Kim KM. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. Korean J Orthod. 2018; 48(5): 316-325.

Sala F., D'Urso G., Giardini C. Customized wrist immobilization splints produced via additive manufacturing-A comprehensive evaluation of the viable configurations. Prosthesis 2023; 5: 792-808.

Schulz M., Heilemann M., Wendler T., Heyde CE., Schleifenbaum S., Osterhoff G., Wiersbicki D. Comparison of the immobilizing effect of soft, semi-rigid and rigid neck orthoses. Eur Spine J. 2025; 34(8): 3214-3221.

Seegmiller DB., Eggett DL., Charles SK. The effect of common wrist orthoses on the stiffness of wrist rotations. J Rehabil Res Dev. 2016; 53(6):1151-1166.

Shah J., Patel D., Rananavare D., Hudson D., Tran M., Schloss R., Langrana N., Berthiaume F., Kumar S. Recent advancements in chitosan-based biomaterials for wound healing. J Funct Biomater. 2025; 16(2): 45.

Shahar FS., Sultan MTH., Lee SH., Jawaid M., Md Shah AU., Safri SNA., Sivasankaran PN. A review on the orthotics and prosthetics and the potential of kenaf composites as alternative materials for ankle-foot orthosis. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2019; 99: 169-185.

Sheehan C., Figgins E. A comparison of mechanical properties between different percentage layups of a single-style carbon fibre ankle foot orthosis. Prosthetics and Orthotics International. 2016; 41(4): 364-372.

Shin SH., Park T., Hong E., Kwak DS., Chung YG. Stabilization of the distal radioulnar joint with or without triangular fibrocartilage complex tear by an external wrist band brace: A cadaveric study. Healthcare 2022; 10: 828.

Stern EB, Sines B, Teague TR. Commercial wrist extensor orthoses. Hand function, comfort, and interference across five styles. J Hand Ther. 1994 Oct-Dec; 7(4): 237-44.

Stern EB., Ytterberg SR., Krug HE., Larson LM., Portoghese CP., Kratz WN., Mahowald ML. Commercial wrist extensor orthoses: a descriptive study of use and preference in patients with rheumatoid arthritis. Arthritis Care Res. 1997; 10(1): 27-35.

Sun W., Luo Y., Sun H. Experimental studies on the elastic properties of carbon fiber reinforced polymer composites prefabricated of unidirectional carbon fiber fabrics and a modified rule of mixtures in the parallel direction. Advanced Composites Letters. 2018; 27(1).

Thiele J., Nimmo R., Rowell W., Quinn S., Jones G. A randomized single blind crossover trial comparing leather and commercial wrist splints for treating chronic wrist pain in adults. BMC Musculoskelet Disord. 2009; 10: 129.

Trindade D., Habiba R., Fernandes C., Costa AA., Silva R., Alves N., Martins R., Malça C., Branco R., Moura C. Material performance evaluation for customized orthoses: Compression, flexural, and tensile tests combined with finite element analysis. Polymers (Basel) 2024; 16(18): 2553

Tudor George A., Diana P., Stochioiu C., Florin B. Experimental and numerical investigations on the thermoforming of 3D-printed polylactic acid parts. Rapid Prototyping Journal 17 May 2024; 30 (5): 928–946.

Uthaman A., Xian G., Thomas S., Wang Y., Zheng Q., Liu X. Durability of an epoxy resin and Its carbon fiber- reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions. Polymers 2020; 12: 614.

Van Buijtenen JM., van Delft EA., Rijsdijk M., Dobbe J., van der Veen A., Streekstra GJ., Bloemers FW. Functional bracing in distal radius fractures: A cadaveric pilot study. Orthop Rev (Pavia). 2022; 14(4): 36574.

Van Delft EAK., van Bruggen SGJ., van Stralen KJ. Four weeks versus six weeks of immobilization in a cast following closed reduction for displaced distal radial fractures in adult patients: a multicentre randomized controlled trial. Bone Joint J. 2023; 105-B(9): 993-999.

Vanek J., Ovsik M., Stanek M., Hanzlik J., Pata V. Study of injection molding process to improve geometrical quality of thick-walled polycarbonate optical lenses by reducing sink marks. Polymers 2024; 16: 2318.

Vlăsceanu D., Popescu D., Baciu F., Stochioiu C. Examining the flexural behavior of thermoformed 3D-printed wrist-hand orthoses: Role of material, infill density, and wear conditions. Polymers (Basel) 2024; 16(16): 2359.

Von Haller M., Couchman L., Honigmann P. Production time and practicability of 3D-Printed wrist orthoses versus low temperature thermoplastic wrist orthoses. Hand Therapy. 2024; 29(4):188-194.

Waldburger L., Schaller R., Furthmüller C., Schrepfer L., Schaefer DJ., Kaempfen A. 3D-printed hand splints versus thermoplastic splints: A randomized controlled pilot feasibility trial. Int J Bioprint. 2021; 8(1): 474.

Wang Z., Yuan W. Effects of elastic ankle braces on dynamic stability in patients with functional ankle instability. Am J Transl Res. 2024; 16(12): 7354-7363.

Watson N., Haines T., Tran P., Keating JL. A comparison of the effect of one, three, or six weeks of immobilization on function and pain after open reduction and internal fixation of distal radial fractures in adults: A randomized controlled trial. J Bone Joint Surg Am. 2018; 100(13): 1118-1125.

Williamson JN., Grunst MM., Lynn J., Williamson GA., Blanck RV., Wilken JM. Short-term effect of a carbon fiber custom dynamic orthosis and integrated rehabilitation on self-reported physical function, pain, speed, and agility in civilians. Prosthet Orthot Int. 2023; 47(6): 607-613.

Windt JWV., Akkerman W., Hofstra M., Meussen P. Reduced pain and improved daily activities for individuals with hand osteoarthritis using a silicone wrist hand orthosis. J Hand Ther. 2023; 36(3): 669-677.

Wong CR., Karpinski M., Hatchell AC., McRae MH., Murphy J., McRae MC. Immobilization of the wrist after dorsal wrist ganglion excision: A systematic review and survey of current practice. HAND 2021; 18(2): 254-263.

Woythal L., Hølmer P., Brorson S. Splints, with or without wrist immobilization, following surgical repair of flexor tendon lesions of the hand: A systematic review. Hand Surg Rehabil. 2019; 38(4): 217-222.

Xia W., Bai Z., Dai R., Zhang J., Lu J., Niu W. The effects of sensory re-education on hand function recovery after peripheral nerve repair: A systematic review. Neuro Rehabilitation 2021; 48(3): 293-304.

Yang YS., Tseng CH., Fang WC., Han IW., Huang SC. Effectiveness of a New 3D-printed dynamic hand–wrist splint on hand motor function and spasticity in chronic stroke patients. J. Clin. Med. 2021; 10: 4549.

Zhang F., Jiang H., Lu Z., Yang H., Zhang Q., Mi J., Rui Y., Zhao G. The significance of wrist immobilization for endoscopic carpal tunnel release. Front Neurol. 2023; 25(14): 1081440.

Zhou Z., Li X., Wu X., Wang X. Impact of early rehabilitation therapy on functional outcomes in patients post distal radius fracture surgery: a systematic review and meta-analysis. BMC Musculoskelet Disord. 2024; 25(1): 198.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1819-1842, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1819-1842, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Toprak Organik Maddesi, Biyolojik Çeşitlilik ve Tuzluluk Açısından Toprak İşlemenin Rolü

Esra Nur GÜL[1*], İrfan OĞUZ[2], Engin ÖZGÖZ[3]

[1,3]Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 60100, Tokat
[2]Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 60100, Tokat

[1]https://orcid.org/0000-0002-9865-1228
[2]https://orcid.org/0000-0002-1576-333X
[3]https://orcid.org/0000-0003-0615-9613
*Sorumlu yazar: gulesranur1@gmail.com

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.02.2025
Kabul tarihi:10.10.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Sürdürülebilir tarım
Sürdürülebilir toprak işleme
Solucan
Tuzluluk

ÖZ

Uygun olmayan toprak işleme uygulamaları, organik madde kaybı, erozyon, toprak yapısının bozulması ve su tutma kapasitesinin azalması gibi süreçleri tetikleyerek toprak degradasyonunun başlıca nedenlerinden biri haline gelmektedir. Toprak bozulma süreçleri; sıkışma ve sert tabaka oluşumu, erozyon, asitleşme, organik madde içeriğinin azalması, toprak verimliliğinin düşmesi, toprak kirliliği ve biyolojik bozulma gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik unsurları kapsamaktadır. Organik madde, toprak fonksiyonlarının korunması ve toprak bozulmasının önlenmesi açısından kilit bir rol oynamaktadır. Sürdürülebilir toprak yönetimi, çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan toprakların sürdürülebilirliğini sağlamayı hedefler. Bu yaklaşım hem mevcut nesillerin ihtiyaçlarını karşılamayı hem de gelecek kuşaklara sağlıklı ve verimli toprak kaynakları bırakmayı amaçlar. Bu çalışmada; toprak organik madde içeriği, toprak biyolojik çeşitliliği ve tuzluluğunun toprak işleme ile ilişkisi ve etkileri anlatılmaktadır.

The Role of Tillage in Soil Organic Matter, Biodiversity and Salinity

Reviews

Article History:
Received: 11.02.2025
Accepted: 10.10.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Sustainable agriculture
Sustainable soil tillage
Earthworm
Salinity

ABSTRACT

Inappropriate soil tillage practices have become one of the main causes of soil degradation by triggering processes such as loss of organic matter, erosion, deterioration of soil structure and reduction of water holding capacity. Soil degradation processes include physical, chemical and biological factors such as compaction and hard layer formation, erosion, acidification, decrease in organic matter content, decrease in soil fertility, soil pollution and biological degradation. Organic matter plays a key role in maintaining soil functions and preventing soil degradation. Sustainable soil management aims to ensure the sustainability of soils in environmental, economic and social terms. This approach aims both to meet the needs of current generations and to leave healthy and productive soil resources for future generations. In this study; the relationship and effects of soil organic matter content, soil biodiversity and salinity with tillage are explained.

To Cite: Gül EN., Oğuz İ., Özgöz E. Toprak Organik Maddesi, Biyolojik Çeşitlilik ve Tuzluluk Açısından Toprak İşlemenin Rolü. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1819-1842.

1. Giriş

Toprağın yenilenemeyen bir kaynak olduğunu biliyor muydunuz? Toprak, canlı yaşamın sürdürülebilirliği açısından hayati bir kaynak olmasına rağmen, oluşum sürecinin son derece yavaş olması nedeniyle yenilenemeyen bir doğal kaynak olarak değerlendirilmektedir. Bir santimetre

kalınlığında toprak tabakasının oluşumu, iklim ve çevresel koşullara bağlı olarak yüzlerce ila binlerce yıl alabilmektedir (Pimentel ve ark., 1995). Bu bağlamda, doğal süreçlerle oluşumu binyıllar sürebilen toprak, insan faaliyetleri sonucunda, kısa bir sürede geri dönülmez şekilde kaybedilebilmektedir. Lal (2003), toprak degradasyonunun yalnızca tarımsal verimlilik üzerindeki olumsuz etkileriyle sınırlı kalmadığını; aynı zamanda karbon döngüsü, su kalitesi ve biyolojik çeşitlilik gibi temel ekosistem hizmetlerini de tehdit ettiğini ifade etmektedir. Bu nedenlerle, toprağın korunması, yalnızca üretim odaklı değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliği hedefleyen bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

Birkaç santim kalınlığında toprak tabakasının oluşumu yüzlerce yıl alabilirken; bu sayısal gerçek, sürdürülebilirlik bakımından konunun ne denli önemli olduğunu açıkça göstermektedir. İnsanların temel ihtiyaçlarını doğal çevreden karşıladığı göz önünde bulundurulursa konunun *"korumacı"* bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir. Bu bakış açısı, insanın doğaya yönelik tutumunda günümüz kuşaklarının en büyük sorumluluğu olarak ortaya çıkmaktadır. Böylelikle kendini yenileyebilen doğal ekosistemlerin varlığı hem bugünkü hem de gelecekteki kuşakların yaşamını güvence altına alacaktır (Çeker, 2016). Bu koruma odaklı yaklaşımlar sayesinde, koruyucu toprak işleme ve doğrudan ekim gibi yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Koruyucu toprak işleme, çevresel zararları en aza indirmeye yönelik şekilde ilerlemektedir (Klik ve Rosner, 2020). Geleneksel toprak işleme ise genellikle toprak verimliliğini düşürür. Çünkü toprak organik maddesi gevşemiş toprakta hızla oksitlenir ve sonuç olarak şiddetli yağmur ve rüzgâr nedeniyle toprak erozyonunun meydana gelmesini kolaylaştırır (Gao ve ark., 2016; Peng ve ark., 2016). Bu senaryonun en iyi bilinen örneklerinden biri, 1930'larda Amerika Birleşik Devletleri'nin orta batısının geniş bir alanını harap eden trajik toz fırtınasının (Dust Bowl) yıkıcı etkileri, üreticileri ve bilim insanlarını toprağı sürdürülebilir bir şekilde nasıl yönetecekleri konusunda düşünmeye yöneltmesidir (Lal ve ark., 2007). Toprağın korunmasına yönelik olarak, toprak işlemenin minimize edildiği ve toprak yüzeyinin sürekli bitki örtüsü veya bitki kalıntılarıyla kaplanmasının hedeflendiği koruyucu toprak işleme sistemleri, başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere dünya genelinde yaygın şekilde uygulama alanı bulmuştur (Hobbs ve ark., 2008). Toprak işleme sisteminin yanlış seçilmesi ve uygulanması, toprak ve suyun muhafazasını zorlaştırmakta, organik madde miktarının düşmesine neden olmakta ve sonuç olarak toprak kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır.

Toprak kalitesinin temel indikatörlerinden biri de toprak faunasıdır. Solucanlar faydalı toprak faunasının çok önemli bir bölümünü oluşturur ve rolleri toprak verimliliği ve ekosistemin işleyişi için önemlidir (Darwin, 1840, Birkás, 2001; Kasza ve ark., 2015). Toprak işleme, solucanların varlığını, yaşam alanını ve aktivitesini iki şekilde etkiler. Doğrudan etki mekanik hasardan kaynaklanırken, dolaylı etki ise bitki artıklarının uzaklaştırılması sonucu organik madde eksikliği ve toprak erozyonu nedeniyle olmaktadır. Ayrıca, toprak örtüsünün eksikliğinden kaynaklanan daha az elverişli toprak nem koşullarının bir olumsuz etkisi de solucan yaşamı için elverişsiz ortam koşulu oluşturmasıdır (Balázs ve Szabolcs, 2023).

Ayrıca tarımsal mekanizasyon ve yoğun ve sürekli toprak işleme toprak bozulmasına, verimliliğin azalmasına ve toprak tuzluluğunun artmasına yol açmaktadır (Niu ve Wang, 2002).

Toprak işleme uygulamaları, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olup, özellikle tuzluluk sorununun ortaya çıkışında ya da kontrolünde belirleyici bir rol oynamaktadır. Uygun olmayan toprak işleme yöntemleri, toprak yapısını bozarak tuzların yüzeye taşınmasına ve bitki gelişimini olumsuz etkileyen koşulların oluşmasına neden olabilir (Qadir ve ark., 2006). Aşırı ve derin toprak işleme, özellikle yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu alanlarda kapillar hareketi artırarak tuzun üst katmanlara taşınmasına zemin hazırlar (Rengasamy, 2002). Buna karşılık, azaltılmış toprak işleme ve doğrudan ekim gibi koruyucu yöntemler, yüzeyde organik madde birikimini artırarak buharlaşmayı azaltmakta ve tuz hareketini sınırlayarak tuzlulukla mücadelede önemli bir avantaj sağlamaktadır (Sayre ve Hobbs, 2004). Bu bağlamda, toprak işleme stratejilerinin, bölgesel iklim ve toprak özellikleri dikkate alınarak tuzlulukla mücadele hedefiyle planlanması gerekmektedir.

Toprak degradasyonu, çeşitli doğal süreçlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan ve genellikle antropojenik bir bozulma ile hızlandırılan arazi üretkenliğindeki bir kayıp veya azalmayı ifade eder (Lal, 1993). En önemli nedenleri arazi kullanımı, iklim değişikliği, aşırı nüfus ve kentleşmedir. Arazi bozulması, toprak kalitesinde bir azalmaya ve canlı organizmaların gelecekteki hayatta kalma potansiyelinde azalmaya neden olur (Fitzpatrick, 2002). Toprak bozulma süreçleri; sıkışma ve sert tabaka oluşumu, erozyon, asitleşme, organik madde içeriğinin azalması, toprak verimliliğinin düşmesi, toprak kirliliği ve biyolojik bozulma gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik unsurları kapsamaktadır (Lal ve Stewart, 1990). Bu çalışmada; toprağın organik madde içeriğinin, biyolojik çeşitliliğinin ve tuzluluğunun toprak işleme üzerine olan etkileri anlatılmaktadır.

2. Toprak Organik Madde İçeriği

Organik madde, toprak fonksiyonlarının korunması ve toprak bozulmasının önlenmesi açısından kilit bir rol oynamaktadır (FAO, 2019). Toprak organik maddesinin, toprak amenajmanını büyük ölçüde etkilediği bilinmekte olup, bu nedenle toprak sağlığının ve kalitesinin temel göstergelerinden biri olarak kabul edilmektedir (Lal ve ark., 1995; Farquharson ve ark., 2003). Karmaşık bir yapıya sahip olan organik madde; ürün verimi, toprak verimliliği ve toprak sürdürülebilirliği üzerinde pozitif yönde etkilidir. Ayrıca, çevresel olumsuz etkileri en aza indirerek toprak kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunur (Lal ve ark., 1997; Reeves, 1997; Freixo ve ark., 2002; Farquharson ve ark., 2003).

Topraklar, dünya üzerindeki en büyük organik karbon havuzunu oluşturmaktadır. Karbon tutumu ile sera gazı emisyonu arasındaki değişimler aracılığıyla iklimin düzenlenmesinde ve iklim değişikliğinin neden olduğu etkilerin azaltılmasında önemli bir rol oynar (Follett, 2001; Sauerbeck, 2001; FAO, 2019). Toprak organik karbonu, küresel karbon döngüsünün çok önemli bir bileşenidir. Bu nedenle toprak organik karbonu, gelecekteki küresel iklimin kaderi üzerinde oldukça önemli bir etki yapacaktır (Govers ve ark., 2012). İklim değişikliği toprak sistemleri üzerinde farklı etkilere sahiptir, ancak toprak sistemlerinin karmaşık yapısı bu etkileri net bir şekilde yansıtamadığından, meydana gelebilecek olan

etkilerin neler olacağını doğru bir şekilde tahmin etmek çok zordur (Navarro-Pedreño ve ark., 2021). Organik madde ayrışmasının modellenmesindeki en büyük zorluk, çeşitli moleküllerin sıcaklığa ve diğer küresel değişim faktörlerine nasıl tepki verdiğinin yeterince anlaşılamamasıdır (Kothawala ve ark., 2021). Toprak sağlığını büyük ölçüde topraktaki organik madde üzerindeki etkileri aracılığıyla iyileştiren yönetim uygulamaları: (1) özellikle yüksek bitki kalıntısı bırakan ürün rotasyonları, (2) azaltılmış toprak işleme uygulamaları, (3) örtü bitkilerinin yaygın ve yoğun kullanımı ve (4) çeşitli organik katkı maddelerinin uygulanması yönetimi olarak önerilmiştir (Magdoff ve Weil, 2004).

Toprak organik karbonu, bitki ve hayvan artıklarının yanı sıra çürümenin farklı aşamalarını içeren toprak organik madde bileşenlerinden biri olarak, toprakta depolanan karbon miktarı şeklinde tanımlanabilir. Organik karbon, temel olarak bitki ve hayvan kalıntılarının, ölü ve yaşayan mikroorganizmaların ve toprak biyotasının ayrışması sonucu toprağa katılır (Oruç ve Sağlam, 1972; Anonim, 2025) (Şekil 1).

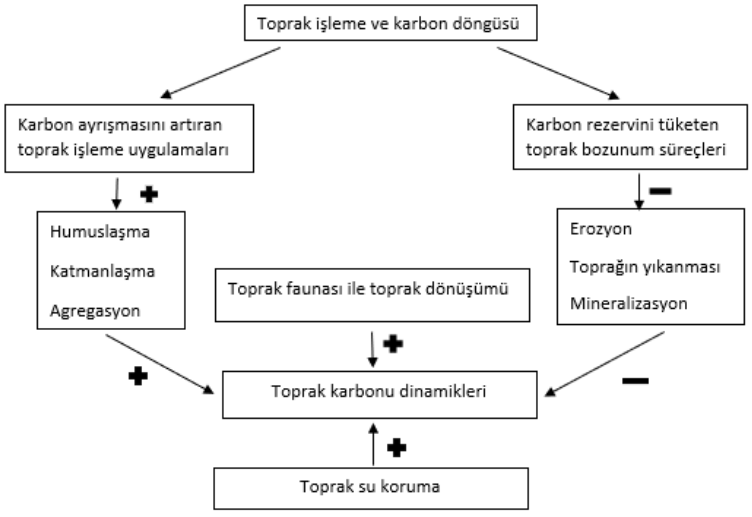


Şekil 1. Toprak organik madde kaynakları (Anonim, 2025)

Türkiye topraklarının önemli bir kısmındaki organik madde içeriği, tarımsal üretimde yüksek verim elde edilmesini engelleyecek seviyededir. Ülkemiz topraklarının %75,6'sı organik madde açısından son derece yetersiz ve eksik durumdadır (Tamer ve ark., 2016). İklim değişikliği ve toprak bozulmasının olumsuz etkilerinin en şiddetli gözlemlenebildiği kuru tarım alanları için farklı amenajman uygulamaları geliştirilmesi oldukça önemlidir. Ülkemizdeki kuru tarım alanları, genellikle sulu tarım alanlarına kıyasla daha eğimli alanlardan meydana gelmektedir. Erozyona açık olan bu alanlarda, CO_2 (karbondioksit) salınımını azaltmaya yönelik üretim tekniklerinin belirlenmesi, sürdürülebilir çevre ve gıda güvenliği arayışlarında önemli bir adım olacaktır. Bu alanlar, erozyona yatkın toprak ve topografik yapıları nedeniyle, karbon yoğunluğunun erozyon derecesine ters orantılı olarak azaldığı problemli araziler arasında yer almaktadır. Yapılan çalışmalar, erozyona uğramış toprakların, erozyona uğramamış topraklara kıyasla daha düşük karbon yoğunluğuna sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Başaran, 2004; Sezer, 2014). Topraklardaki karbon içeriğinin artması ise toprak verimliliğinin, erozyona karşı dayanıklılığını yükseltecek ve erozyon nedeniyle tarımsal verimliliğini kaybetmiş toprakların yeniden iyileşmesini sağlayacaktır.

Atmosferdeki CO_2 konsantrasyonunun yükselmesi, fotosentezin ve bitkisel üretimin artacağına işaret etmektedir. Ancak, yüksek atmosferik CO_2 seviyelerinin neden olduğu küresel ısınma, topraktaki organik maddelerin daha hızlı parçalanmasına yol açarak uzun süreçte bitkisel üretime negatif yönlü bir etki yapacaktır. Organik karbonun toprakta depolanması, toprak verimliliğini artırdığından, üretimde sürdürülebilirlik yönünde büyük bir öneme sahiptir (Bauer ve Black, 1994). Topraktaki karbon içeriğinin yükselmesinin çok yönlü faydası, yıllardır geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan faaliyetlerin yeniden değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Optimum tarımsal amenajman yöntemleri, minimum toprak işleme veya doğrudan ekim, münavebe uygulamaları ve organik atıkların (hayvansal ve bitkisel) kullanımıyla topraktaki organik karbonun yükselmesine katkı sağlayarak, atmosferdeki yüksek CO_2 seviyesinin yeniden dengelenmesini mümkün kılacaktır (Sampson ve Scholes, 2000).

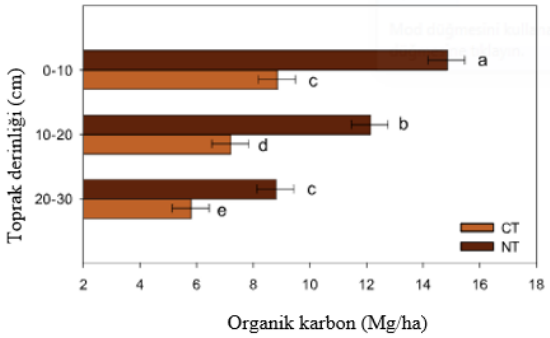
Çeşitli toprak işleme yöntemlerinin, toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri yürütülen birçok çalışmayla kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu tür uygulamaların toprak organik içeriği ve bileşimi üzerindeki etkilerine büyük önem verilmiştir (Şekil 2). Azaltılmış ve koruyucu toprak işleme uygulamaları, toprak biyotasının ana kaynağı olan yüzeysel katmandaki toprak organik maddesi içeriğini arttırır (Javurek ve ark., 2003; 2005). Geleneksel toprak işlemeye kıyasla, sıfır toprak işleme yapılan arazilerde, daha fazla canlı çeşitlililiği bulunmuştur (Kladivko, 2001). Toprak organik maddesi miktarı, çoğunlukla üst topraktaki toplam organik karbon veya azot içeriği ile belirlenir (Kuba´t ve ark., 2006). Toprak işleme de genel olarak üst toprağı etkilediği için toprak organik maddesi yanlış amenajman uygulamalarının tehlikesi altındadır.



Şekil 2. Toprak işlemenin karbon dinamiğine etkisi (Lal ve Kimble, 1997)

İşlenebilir topraklar, sürdürülebilir olmayan toprak işleme yöntemleri nedeniyle önemli tehdit altındadır. ABD topraklarının tarım yapılmadan önce içerdikleri toprak organik maddesinin %30 ila %50'sini tarım uygulamaları ile kaybettiği tahmin edilmektedir (Kucharik, 2001). Doğrudan ekim gibi karbon kaybını minimize eden uygulamalar, topraktaki organik karbonun artmasına yardımcı olur (Şekil 3). Organik

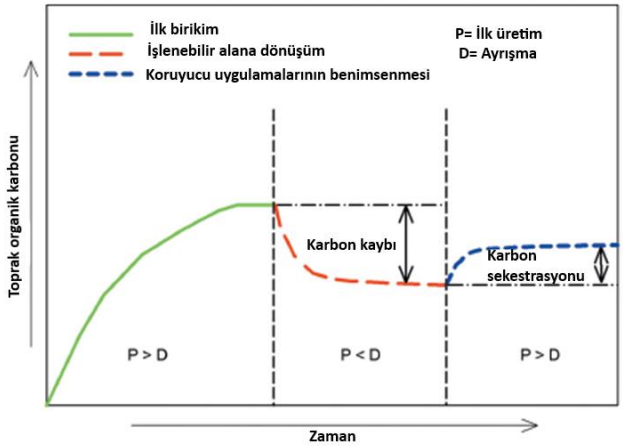
toprak düzenleyicilerin başlıca kaynaklarının çiftlik gübresi ve kompost olduğunu vurgulamış; ayrıca organik madde miktarının artırılmasının, özellikle tınlı topraklarda kabuk oluşumu ve erozyon gibi fiziksel bozulmaların önlenmesinde önemli bir rol oynayabileceğini ifade etmişlerdir (Le Villio ve ark., 2004).



Şekil 3. Geleneksel toprak işleme ve doğrudan ekim uygulamalarında organik karbon miktarının derinlik ile değişimi (Amorim ve ark., 2024)

(CT: Geleneksel toprak işleme, NT: Doğrudan ekim)

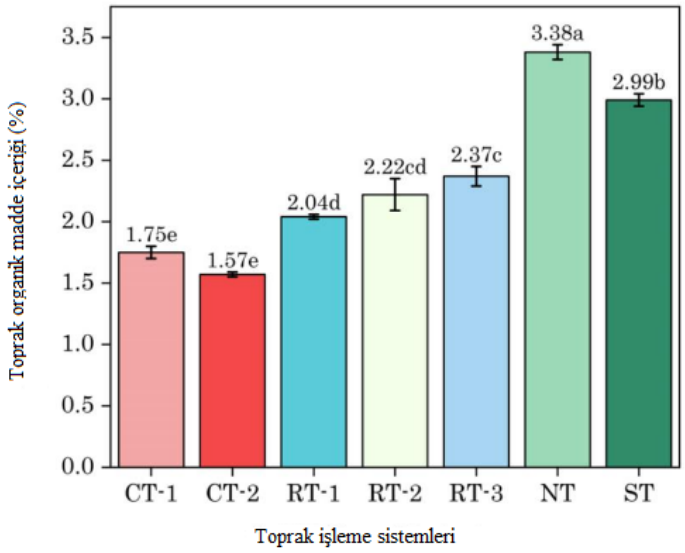
Yoğun toprak işleme sistemleri, organik karbonun birikmesine izin veren doğal veya kalıcı bitki örtüsüne kıyasla toprak organik maddesinin bozulmasını hızlandırır (Şekil 4). Bununla birlikte; modern tarımla birlikte temiz (yüzeyde anız bırakmayan) toprak işleme sistemlerinin uygulanmaya başlanmasıyla, doğal bitki örtüsü olan alanlar tarım arazisine dönüşmüş ve toprak organik maddesinde çarpıcı bir düşüş olmuştur. Bu nedenle, düşük yoğunluklu toprak işleme sistemlerinin tercih edilmesi, toprak organik maddesi üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek açısından önemli bir unsurdur. Ayrıca, bitki anızları toprağa karıştırılarak hızlı organik madde ayrışması için ideal bir ortam oluşturulur. Koruyucu toprak işleme sistemleri, geleneksel toprak işleme sistemlerine kıyasla organik madde oksidasyon oranını azaltır, mikrobiyal aktiviteyi dengeler ve kök biyokütlesinin ve toprak altı organik maddenin ayrışmasını yavaşlatır. Toprak yüzeyinde kalan anız çürümeyi yavaşlatır, böylece anız, karbon girdisini en üst düzeye çıkarır. Çeşitli çalışmalarda toprak işlemenin toprak organik maddesini yılda 1 ton/da kadar arttırabileceği gösterilmiştir (Al-Kaisi ve Yin, 2005).



Şekil 4. Toprak işleme-toprak organik karbon ilişkisi (Al-Kaisi ve Licht, 2005)

Lopez-Fanda ve Pardo (2009), İspanya'da yarı kurak bölgede çizelle minimum toprak işleme (MT), pulluk ile geleneksel toprak işleme (CT), direkt ekim (no-till) ve parabolik pullukla (paraplow) 0-30 cm derinlikte toprak işleme (ZT) sistemlerinin azot miktarı, besin maddesi birikimi ve toprak organik karbonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Beş yıllık sürecin sonunda, 0-30 cm derinlikte topraktaki organik karbon miktarı ve toplam azot miktarının direkt ekim ve ZT sistemlerinde MT ve CT sistemlerine kıyasla sırasıyla 6,2 ton/ha ve 7,0 ton/ha arttığı tespit edilmiştir.

Gencer ve ark. (2024), uzun vadeli toprak işleme tekniklerinin toprak organik madde içeriği üzerindeki etkilerinin 14 yıl sonra istatistiksel olarak anlamlı ($P \leq 0{,}001$) olduğunu belirtmişlerdir. Toprakların organik madde içeriğinin %1,57 ile %3,38 arasında değiştiğini, en yüksek değerin doğrudan ekim yapılan sıfır toprak işleme uygulamasından elde edildiğini, en düşük değerin ise anızı yakılmış geleneksel toprak işleme uygulamasında elde edildiğini bildirmişlerdir (Şekil 5).



Şekil 5. Uzun süreli farklı toprak işleme uygulamalarının toprak organik madde içeriğine (%) etkisi (Gencer ve ark., 2024)

(CT-1: Anızlı geleneksel toprak işleme, CT-2: Anızı yakılmış geleneksel işleme, RT-1: Ağır diskli tırmıklı azaltılmış toprak işleme, RT-2: Rototillerli azaltılmış toprak işleme, RT-3: Ağır diskli tırmıklı azaltılmış ve sıfır toprak işleme kombinasyonu, NT: Doğrudan ekimli sıfır toprak işleme, ST: Stratejik sıfır toprak işleme)

Toprak işlemesiz tarımın toprak organik maddesine katkısı, yüzey kalıntısı ve daha az toprak bozulması ile sınırlı değildir. Aynı zamanda kök biyokütlesi, mikrobiyal çeşitlilik ve solucan popülasyonunda da artış sağlar. Koruyucu toprak işleme yöntemleri, ekim ve toprak işleme sisteminin tipine ve stabilite derecesine bağlı olarak toprak organik madde durumu üzerindeki etki düzeylerinde farklılık gösterir (Al-Kaisi ve Licht, 2005).

Šimon ve ark. (2009) toprak işleme sistemlerinin toprak organik maddesi ve toprak hidrofobikliğine etkisi üzerine çalışmışlar ve toprak işleme uygulamaları arasında önemli farklılıklar bulmuşlardır. Toprak işlemesiz tarım ve malç ile kombine edilmiş toprak işlemesiz tarımda organik karbon içeriği

önemli ölçüde artmıştır. Organik karbon içeriği, tüm konularda örnekleme derinliği ile azalmış, ancak geleneksel yöntemle işleme konusundaki azalma (%3,5), koruyucu toprak işleme uygulanan konudaki azalmadan yaklaşık %8-10 oranında daha düşük olmuştur. Toprak organik maddesi, bitki anızlarının yüzeyde kaldığı koruyucu toprak işleme sisteminin üst toprak horizonlarında, anızın profile dağıtıldığı geleneksel toprak işleme yöntemine göre daha fazla birikmiştir (Šimon ve ark., 2009).

Geleneksel yoğun toprak işleme yöntemleri, toprakta bulunan organik maddenin hızlı bir şekilde parçalanmasına ve bunun sonucunda topraktan uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu da toprak strüktürünün bozulmasına yol açmaktadır. Buna karşılık, koruyucu toprak işleme sistemleri toprağın minimum düzeyde işlenmesini ve yüzeyin kapalı tutulmasını esas alarak organik maddenin toprakta birikmesini teşvik eder. Karbonun toprakta tutulmasına, erozyonun azaltılmasına ve biyolojik aktivitenin korunmasına katkıda bulunur. Dolayısıyla, koruyucu toprak işleme uygulamaları, organik madde içeriğini korumanın ve arttırmanın yanı sıra sürdürülebilir toprak yönetiminin önemli bir parçası olarak değerlendirilmelidir.

3. Toprak Biyolojik Çeşitliliği

Dünya genelinde, toprakların fiziksel, kimyasal ve biyolojik kalite ölçütlerini iyileştirmek ve bitkisel üretimde sürdürülebilirliği esas alan üretim anlayışını yaygınlaştırmak amacıyla birçok araştırma yürütülmektedir. Özellikle, toprakların biyolojik kalite ölçütleri üzerinde doğrudan etkili olan mikrobiyal aktivitenin toprak işleme sistemleriyle nasıl değiştiğini belirlemeye yönelik çalışmalar, birim alandan optimum verim elde etmeyi hedefleyen tarımsal sürdürülebilirlik yönünden büyük önem taşımaktadır (Kirchner ve ark., 1993). Günümüzde, pulluk kullanmaya dayalı geleneksel toprak işlemenin toprağın mikrobiyal aktivitesini negatif yönde etkilediğini gösteren birçok çalışma (Reicosky ve Lindstrom, 1993; Beare ve ark., 1994; Roscoe ve Burman, 2003) mevcuttur. Bu çalışmaların büyük bir kısmında, bitkisel üretimde toprakların mikrobiyal aktivitesini doğrudan etkileyen belirli mikroorganizma gruplarının, kısa ve uzun vadede toprak işleme sistemlerinden nasıl etkilendiği de ele alınmıştır.

Toprak organizmaları, topraktaki hayvansal ve bitkisel kökenli artıkların ayrışmasını, biyokimyasal döngülerin devamlılığını ve toprak yapısının oluşumunu kontrol ederek toprak kalitesinin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır (Şekil 6). Toprak organizmaları, makro ve mikro olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Mikroorganizmalar; toprak agregasyonu, azot döngüsü, bitki hastalıkları ve bitki büyümesinde kritik bir öneme sahiptir (Buckley ve Schmidt, 2001). Toprak mikroorganizmaları, toprak organik maddesinin sadece %1-8'ini oluşturmasına rağmen, biotransformasyon sürecindeki rolleri nedeniyle toprak verimliliğinde önemli bir etkisi vardır (Newsham ve ark., 1995). Doğrudan ekim sisteminin uygulandığı alanlarda, toprağa anızın karıştırılmaması sebebiyle özellikle alt toprak derinliklerinde N ve C miktarında azalmalar gözlenmektedir (Carter, 1991; Castro ve ark., 1991). Ancak, doğrudan ekim sisteminin uzun süre uygulandığı alanlarda, geleneksel toprak işleme sistemine kıyasla üst toprakta daha fazla N ve C birikimi olduğu tespit edilmiştir (Bauer ve Black, 1981; Dick, 1983).



Şekil 6. Solucan kanalları yardımı ile bitki köklerinin daha derine penetre olması (FIBL, 2004)

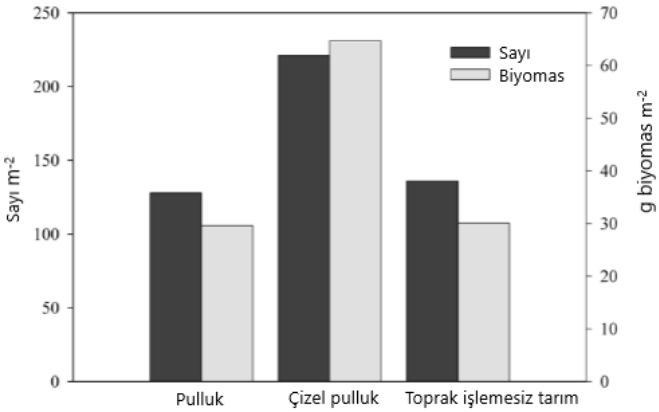
Toprağın alt üst edilmemesi ile toprak üstünde kalan bitki artıkları zamanla yüzeyde bir malç tabakası oluşturur. Bu tabaka, toprağı yağmur ve rüzgâr gibi fiziksel etkenlerden korurken, yüzeydeki sıcaklığın ve nemin sürekliliğini sağlar. Aynı zamanda, toprak organizmaları ve mikroorganizmalar için uygun bir yaşam alanı sunar. Mikroorganizmalar, malçla etkileşime geçerek onu toprakla karıştırır, çürümesini hızlandırır ve humusa dönüşmesini sağlar (Sungur ve ark., 1994). Bunun yanı sıra topraktaki organik madde, su ve besin maddeleri için tampon işlevi görür. Daha büyük toprak faunası üyeleri ise toprağın doğal yapısını korurken, derinlere doğru açtıkları tünellerle yoğun yağışlarda suyun toprak tarafından emilimini artırır. Toprakta yaşayan bu organizmaların toprağa yaptığı bu etkiler "biyolojik işleme" olarak adlandırılır (İşler ve Kılınç, 2016).

Solucanlar, toprak strüktür stabilitesini ve toprak gözenekliliğini iyileştirir ve yüzey akışı azaltır. Ayrıca, solucanlar topraktaki besin döngüsünü ve organik maddeyi değiştirir. Agregatlar içindeki fiziksel yapıyı değiştirerek ve mikrobiyal aktiviteyi arttırarak organik maddenin mineralleşmesini kısa vadede arttırırlar. Doğrudan ekim, solucan varlığını ve tür çeşitliliğini arttırır, ancak azaltılmış toprak işlemenin faydalı etkisi mevcut türlere ve toprak işleme yoğunluğuna bağlıdır. Organik katkılar, solucan varlığını arttırır (Bertrand ve ark., 2015) (Şekil 7).



Şekil 7. Topraktaki solucan varlığı

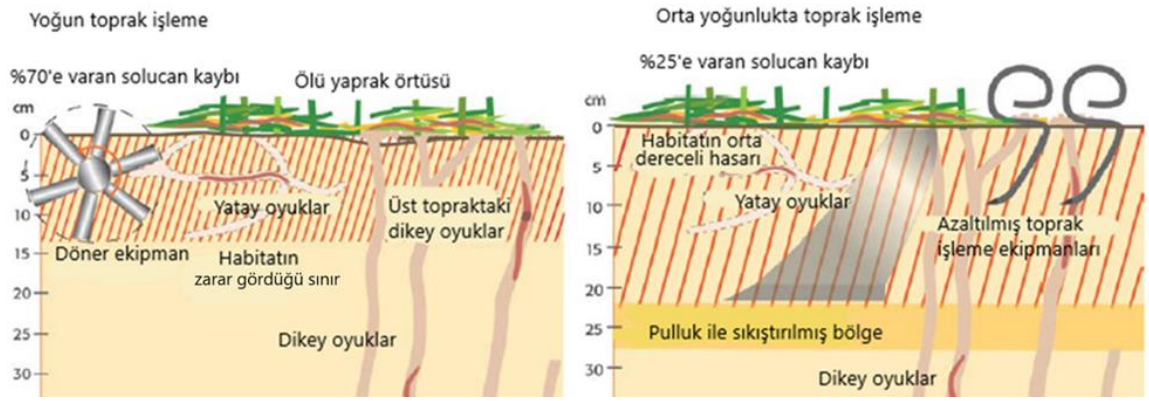
Kültürel uygulamaların solucanları etkilediği yaygın olarak bilinmektedir (Lee, 1985; Edwards ve Bohlen, 1996; Chan, 2001; Roger-Estrade ve ark., 2010). Birçok çalışma, solucan varlığının ve çeşitliliğinin tarım arazilerinde işlenmemiş topraklara kıyasla azaldığını göstermiştir (Edwards ve Bohlen 1996; Peigne ve ark. 2009). Ayrıca, solucanlar kalıcı meralarda işlenmiş agro-ekosistemlerde olduğundan daha fazladır (Low, 1972). Toprak işlemenin solucan nüfus dinamiklerini etkilediği iyi bilinmektedir. Çalışma derinliği, parçalama yöntemi ve çalışma sıklığı kombinasyonu olarak tanımlanabilen toprak işleme yoğunluğu, solucan popülasyonunun çeşitliliği ve büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisi vardır. Solucanlar çeşitli mekanizmalar yoluyla toprak işlemeden etkilenir (Chan, 2001; Curry, 2004; Roger-Estrade ve ark., 2010). Ulrich ve ark. (2006), yaptıkları çalışmada en yüksek yetişkin birey sayısını çizel pulluk ile yapılan toprak işleme yönteminde gözlemlemişlerdir (Şekil 8).



Şekil 8. Solucanların sayısı ve biyokütlesi (Ulrich ve ark., 2006)

Solucan varlığı üzerine, toprak işleme aletleri veya toprak işleme sırasında taşınan toprak parçaları ile temas nedeniyle solucanlarda fiziksel olarak yaralanmalar veya ölüme neden olan mekanik hasarlar oluşur (Gerard ve Hay, 1979). Boström (1995), toprak frezesi tarafından işlenen toprak tabakasında bulunan solucan biyokütlesinin %61 ile 68'inin makinanın mekanik etkisi ile öldürüldüğünü tahmin

etmiştir. Pullukla toprağın alt üst edilmesi, solucanları toprak yüzeyine çıkarır ve yırtıcılara yem olmalarına neden olur (Cuendet, 1983; Tomlin ve Miller, 1988). Geleneksel toprak işleme (pullukla sürüm ve ikincil toprak işleme operasyonları), solucan yuvalarını yok eder, anızın toprağa karıştırılması nedeniyle organik madde kullanılabilirliğini azaltır (Lee, 1985; Nuutinen, 1992; Briones ve Bol, 2003), sıcaklık, nem ve toprak yapısı gibi toprak fiziksel koşullarını değiştirir (Birkas ve ark., 2004; Rosas-Medina ve ark., 2010) (Şekil 9).



Şekil 9. Farklı toprak işleme yoğunluklarının solucan üzerine etkisi (FIBL, 2014)

Toprak organizmaları üzerindeki toprak işlemenin olumsuz etkileri; doğrudan bir organizmanın bütünlüğünün bozulması yoluyla ya da dolaylı olarak organizmaları zararlı koşullara maruz bırakarak, organik maddenin topraktaki dağılımını değiştirerek ya da toprak nemini, sıcaklığını, havalanmayı ya da sıkışmayı değiştirerek olabilir (Faber ve ark., 2017).

Nemli topraklar işlendiğinde oluşabilecek toprak sıkışmasının, solucan toplulukları üzerinde zararlı bir etkisi vardır. Sıkışmış bölgelerden solucanlar uzaklaşır ve makine tarafından ezilme ihtimali artar (Cluzeau ve ark., 1992; Larink ve Schrader, 2000; Capowiez ve ark., 2009). Toprak ne kadar az bozulursa, toprak işleme solucanlar için o kadar az zararlı olur. Yani, yüzeysel toprak işleme solucanlara, diğer uygulamalardan daha az zarar vermektedir. Toprak işleme genellikle solucanlara zarar verse bile, tarımsal sistemlerde derecesi farklılık gösterir. Örneğin, 5 yıl süren pullukla işlemeden sonra, solucan biyokütlesinde yaklaşık %70 ve solucan sayısında %80 azalma olmuştur (Chan, 2001). Bu nedenle, solucan çeşitliliğini ve varlığını korumak veya geliştirmek isteyen çiftçiler toprak işleme sistemini dikkatlice seçmelidir. Doğrudan ekim, solucanlar için dost toprak işleme uygulamasıdır (Peigné ve ark., 2007).

Geleneksel yoğun toprak işleme yöntemleri, canlıların yaşam alanlarını bozarak popülasyonlarda azalmaya ve biyolojik dengenin bozulmasına neden olur. Oysa toprağın yapısını daha az bozan ve yüzey örtüsünü koruyan koruyucu toprak işleme sistemleri sayesinde toprak nemi korunur, sıcaklık dalgalanmaları azalır ve organik madde içeriği yüksek düzeyde kalır, bu durum ise toprak organizmalarının daha istikrarlı şekilde gelişmesine imkan sağlar. Sonuç olarak, koruyucu toprak işleme

sistemleri, yalnızca fiziksel ve kimyasal toprak kalitesine değil, aynı zamanda biyolojik çeşitliliğin sürdürülmesine de doğrudan katkı sağlar.

4. Tuzluluk

Ağca (1999) tuzluluğu; "Kurak ve yarı kurak bölgelerde, özellikle sıcak ve kurak olan dönemlerde, tuzlu taban sularının kılcal yükselme ile toprak yüzeyine kadar ulaşarak, burada yüksek evaporasyon nedeni ile toprak yüzeyinden kaybolması ve tuzların toprak yüzeyinde veya yüzeye yakın kesimlerde birikmesiyle oluşmaktadır.*"* olarak tanımlamıştır. Toprak çözeltisinde yer alan temel katyonlar (Na, Ca, Mg ve K) ile anyonlar (Cl, SO_4, HCO_3, CO_3 ve NO_3), tuzluluğun oluşumunda başlıca iyon gruplarını oluşturmaktadır (Deliboran ve Savran, 2015). U.S. Salinity Laboratory Staff (1954) tarafından tuzlu ve alkali topraklar aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Tuzlu ve alkali toprakların sınıflandırılması (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954)

	ECe	ESP	pH
Tuzlu topraklar	>4 mSc/m	<15 %	<8,5
Tuzlu alkali topraklar	>4 mSc/m	>15 %	<8,5
Tuzsuz alkali topraklar	<4 mSc/m	>15 %	>8,5

Tarım topraklarında tuzluluk problemi; sulama, drenaj, yanlış amenajman uygulamaları, toprak özellikleri ve iklim gibi etmenlerden kaynaklanmaktadır. FAO'ya göre, sulanabilir alanların takriben yarısı, *"sessiz düşman"* olarak adlandırılan alkalilik, yüzeyde göllenme ve tuzluluk gibi sorunlarla karşı karşıyadır (Kanber ve ark., 2005). Tuzluluk nedeniyle tarımsal üretimin azalması veya verim kaybının temel nedeni, bitkilerin sürekli artan tuz seviyelerine uyum sağlayamamasıdır (Kanber ve ark., 1992). Dünyada topraklarının takriben %46'sı yarı kurak ve kurak iklim bölgelerinde bulunmaktadır. Bu bölgelerde sulanabilir tarım arazilerinin yaklaşık %50'sinde çeşitli derecelerde tuzluluk sorunu gözlemlenmektedir. Dünya Toprak Haritası'na göre dünya çapında 954 milyon hektar alan tuzdan etkilenerek tarımsal verimliliği sınırlanmış durumdadır (FAO, 1988; Szabolcs, 1991). Her yıl, dünya genelinde 10 milyon hektar alan tuzluluk sorunu yüzünden kullanılamaz hale gelmektedir (Akgül, 2003). Ülkemizin bulunduğu kurak ve sıcak iklim koşulları, çoraklığın ve tuzluluğun oluşumu için uygun bir ortam hazırlamaktadır. Düşük yağış nedeniyle eriyen tuzlar, akışsız nem koşullarında denizlere kadar drene olamamakta, ancak yüksek sıcaklığın etkisiyle bitkilerin aktif olarak kullandığı toprak derinliklerinde çökelmekte ya da toprağın yüzeyinde birikerek gözle izlenebilecek beyaz benekler veya tuz tabakalarını oluşturmaktadır. Toprakta tuz birikimi sonucunda ortaya çıkan yüksek sodyum (Na^+) düzeyi, toprak yapısını olumsuz etkileyerek hidrolik özelliklerin bozulmasına, pH değerinin yükselmesine ve suyun sızma ile havalanma kapasitesinin azalmasına yol açmakta; bu durum ise toprağın sıkışmasına, erozyonun artmasına ve yüzey akışının şiddetlenmesine neden olmaktadır (Ondrasek ve ark., 2010).

Türkiye'de çorak toprakların işlenen alan miktarına göre dağılımı, Tablo 2'de detaylı olarak sunulmuştur (Sönmez, 2004). Çorak araziler, Türkiye'nin yüzölçümünün %2'sini, toplam işlenen tarım alanlarının %5,48'ini ve ekonomik olarak sulanabilir 8,5 milyon hektarlık alanın %17'sini kapsamaktadır (Tablo 2). Tablo 2'de görüldüğü üzere, toplam çorak arazilerin %0,5'i alkali, %25,5'i tuzlu-alkali ve %74,2'si tuzlu topraklardan meydana gelmektedir.

Tablo 2. Türkiye'de sorunlu toprakların dağılımı (Sönmez, 2004)

Sorunun niteliği	Alan (ha)	Sorunlu alanlara göre %
Hafif tuzlu	614617	41,0
Tuzlu	505603	33,0
Alkali	8641	0,5
Hafif tuzlu-alkali	125863	8,0
Tuzlu-alkali	264958	17,5
Toplam	1518722	100,0

Çözünebilen tuzlar, bitkilerce kolaylıkla alınabilmektedir. Ancak bitki bünyesine alınan tuz bileşiklerinin türü ve miktarı belirli bir seviyeyi aştığında, bu durum bitkiye zarar vermektedir. Tuz bileşikleri, bitkilerin beslenme ve metabolizma süreçlerini bozarak toksik etkiler oluşturur. Bunun yanı sıra, topraktaki tuz konsantrasyonunun artışı, bitkinin topraktan suyu alımını zorlaştırırken toprağın strüktürünü bozarak hem bitki büyümesini yavaşlatır hem de tamamen durdurabilir (Kanber ve ark., 1992; Güngör ve Erözel, 1994) (Şekil 10). Ayrıca tuzluluğun bitki büyümesini ve gelişimini olumsuz yönde etkilediğini, tohum çimlenmesini, filiz büyümesini, enzim aktivitesini (Seckin ve ark., 2009), DNA, RNA, protein sentezini ve mitozu olumsuz etkilediğini göstermektedir (Tabur ve Demir, 2010; Javid ve ark., 2011).

Sulama suyunun bitki gelişimi üzerine birinci etkileri, bitki öz suyunda yüksek ozmotik koşulların oluşması veya suda fitotoksik (bitkiler için zararlı) bileşiklerin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bitkiler genellikle çimlenme ve fide dönemlerinde, olgunlaşma evresine kıyasla erimiş bileşikler, yani tuzlardan daha fazla zarar görmektedir. Bu etkiler; bitkide meyve gelişiminin azalması, pazar kalite değerinin bozulması, vejetatif büyümenin durması ya da bunların kombinasyonu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Sulama suyunun bitki gelişimine olan ikinci etkisi ise dolaylı olup, sulama suyunun toprağa etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Örneğin, sulama suyunun içerdiği sodyum, toprak kolloidleri tarafından adsorbe edilir ve kil fraksiyonunun dispersiyonuna yol açar. Kil fraksiyonunun dispersiyonu ise toprağın permeabilitesinin düşmesine ve toprak yüzeyinde kabuk tabakası oluşumuna yol açmaktadır (Kurunç, 2020).



Şekil 10. Tipik bir tuzlu toprak strüktürü (Birkas, 2014)

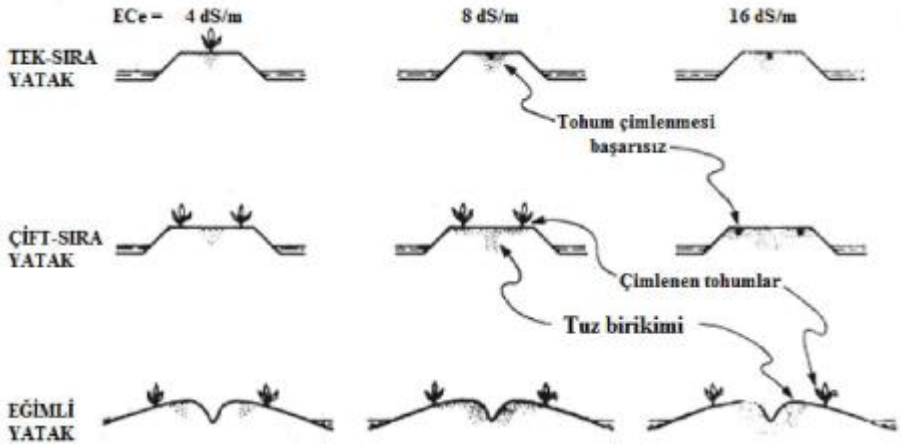
Sulama sularındaki toplam tuz miktarı, ölçüm kolaylığı açısından genellikle elektriksel iletkenlik cinsinden ifade edilir. Bir çözeltinin elektrik iletkenliği ile çözeltideki toplam tuz konsantrasyonu arasında ilişki lineerdir (Esechie, 1994). Suyun evapotranspirasyon yoluyla buharlaşması sonucunda, toprağın elektriksel iletkenlik değeri, kullanılan sulama suyunun elektriksel iletkenlik değerinden 2 ila 10 kat daha yüksektir. Bu nedenle, drenaj sistemi mevcut olsa bile, toplam tuz konsantrasyonu yüksek veya orta olan sulama sularının kullanımı topraklarda tuzluluğa yol açabilir (Ayyıldız, 1990; Munsuz ve Ünver, 1995) (Tablo 3).

Tablo 3. Bazı bitkilerde verim azalmasına neden olan kritik EC değerleri (Maas ve Hoffman, 1977'den uyarlanmıştır.)

Bitki	Verim Azalışındaki Tuzluluk Eşik Değeri mmho/cm	Eşik Değerin Ötesindeki Tuzlulukta Birim Artış Başına Verim Azalması %/(mmho/cm)	Kaynak
Yonca	2.0	7.3	Brown ve Hayward, 1956; Bower ve ark.,1969
Arpa (tane)	8.0	5.0	Ayers ve ark., 1952;
Mısır (tane)	1.7	12	Kaddah ve Ghowail, 1964
Pamuk	7.7	5.2	Bernstein ve Ford, 1959; Bernstein, 1955
Buğday	6	7.1	Ayers ve ark., 1952; Asana ve Kale, 1965
Soya	5.0	20	Abel ve MacKenzie, 1964; Bernstein ve Ogata, 1966

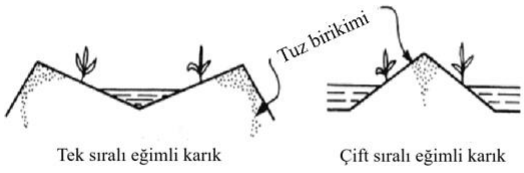
Toprak tuzluluğu ve sulama suyundan kaynaklanan çimlenme sorunlarını azaltmak için tohum yatağı şekilleri, ekim yöntemleri ve sulama uygulamalarında dikkatli olunması gerekmektedir (Şekil 11). Su akışı, karık içlerinden karık sırtlarına doğru gerçekleşir. Bu durumda, topraktaki tuzlar da suyla birlikte karık sırtlarına taşınarak orada birikir ve tohumun ekildiği alan, tuzun en fazla yoğunlaştığı bölge haline gelir (Ayers ve Westcot, 1989).

Toprak işleme, tuzlu topraklarda toprak geçirgenliğini arttırmak için kullanılabilir, ancak düzgün bir şekilde uygulanmazsa, taban taşı oluşup tuzlar birikebilir ve bu potansiyel olarak tuzları toprak yüzeyine daha da yakınlaştıracaktır (Abrol ve ark., 1988). Tuzlu topraklarda tohum yatağı hazırlığı için toprak yüzeysel işlenmelidir. Azaltılmış veya minimum toprak işleme sistemleri önerilir. Tuzluluk sorunu yaşayan arazilerde derin toprak işleme uygulamaları yüzey tuzu konsantrasyonlarını arttırır (Frizen, 2015).



Şekil 11. Farklı toprak tuzluluklarının ve yatak şekil düzenlemesinin çimlenmeye etkisi (Bernstein ve ark., 1955)

Tek sıralı eğimlendirilmiş yatakların genel olarak kullanılan diğer uyarlaması, karıktaki su hattının hemen üzerine tohumların ekiminin yapılmasıdır. Bu yöntem, hem sıcaklık hem de tuzluluk kontrolü açısından etkili bir uygulamadır. Erken ilkbahar ya da kış döneminde ekimi yapılan bitkiler için toprak sıcaklığının birkaç derece daha yüksek olması önemlidir. Eğimlendirilmiş yataklar kuzey yarım kürede güneye, daha soğuk toprak sıcaklığının tercih edildiği durumlarda ise kuzeye doğru yönlendirilerek oluşturulmalıdır (Şekil 12) (Ayers ve Westcot, 1989).



Şekil 12. Eğimli karıklarda tuzluluğun kontrolü (Bernstein ve Fireman, 1957)

Son araştırmalar, saman malçının evaporasyonu düşürerek toprak tuzluluğu ile mücadele etmede çiftçiler için umut vadeden bir uygulama olduğunu ve toprak suyu ile tuz hareketini düzenlediğini ortaya koymuştur (Tian ve Lei, 1994; Pang ve Xu, 1998; Pang, 1999; Li ve ark., 2000). Huang ve ark. (2001) ise buğday samanı malçının tuz birikimini önlediğini ve 0-10 cm derinlikte tuz seviyesinin sabit

kalmasını sağladığını bildirmişlerdir. Geleneksel yöntemin aksine koruyucu toprak işleme sistemleri, toprağın işlenme yoğunluğunu azaltarak suyun toprak içinde daha homojen bir şekilde dağılımını sağlar ve bu sayede tuz birikimini engeller. Ayrıca, bu sistemlerde toprak yüzeyinin bitki kalıntılarıyla veya doğal bitki örtüsüyle kapalı tutulması, buharlaşmayı azaltarak tuzların toprak yüzeyine çıkmasını engeller.

5. Sonuç

Sürdürülebilir toprak amenajmanı, toprak kullanımının planlanması, uygulanması ve yönetimi sırasında sürdürülebilirlik prensiplerinin göz önünde bulundurulduğu bir yaklaşımı tanımlamaktadır. Bu yaklaşım, toprakların verimliliğini, sağlığını ve biyoçeşitliliğini korumayı, erozyonu önlemeyi, su kaynaklarını korumayı ve toprakların uzun vadeli kullanımını sağlamayı amaçlar. Sürdürülebilir toprak yönetimi, çeşitli stratejiler, politikalar, uygulamalar ve teknolojilerin bir araya getirilmesini gerektirir. Bu kapsamda erozyon kontrolü, toprak iyileştirme teknikleri, sürdürülebilir tarım uygulamaları gibi bir dizi yöntem ve yaklaşım önemli rol oynar. Topraklar, gıda üretimi, su döngüsünün devamlılığı, biyolojik çeşitliliğin korunması ve iklimin düzenlenmesi gibi ekosistem hizmetlerinin sağlanmasında hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle, sürdürülebilir toprak amenajmanı, çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan toprakların sürdürülebilirliğini sağlamayı hedefler. Bu yaklaşım hem mevcut nesillerin ihtiyaçlarını karşılamayı, hem de gelecek kuşaklara sağlıklı ve verimli toprak kaynakları bırakmayı amaçlar.

Sürdürülebilir tarım ve bu kapsamda uygulanan yöntemlerin temel amacı; toprak ve su gibi doğal kaynakların korunmasını sağlamak, çevre kalitesini yükseltmek, güvenli gıda üretimini sağlamak, tarımsal ekonominin sürdürülebilirliğini desteklemek ve tarımla uğraşan kesimin yaşam standartlarını iyileştirmektir. Geleneksel toprak işleme yöntemlerinde, enerjiyi, toprağı ve suyu korumaya yönelik olarak dikkate değer bir katkı yapılmamaktadır. Ayrıca toprak işleme zaman almakta, yüksek oranda yakıt, makine ve işçilik gibi girdileri beraberinde gerektirmektedir. Geleneksel toprak işlemede tek hedef en fazla geliri sağlamak üzere maksimum girdi uygulanmasıdır. Geleneksel toprak işleme sistemlerinin aksine koruyucu toprak işleme sistemlerinde hedef toprak ve su kaynaklarını koruyarak optimum girdi kullanımıdır. Daha az girdi uygulayarak daha fazla elde edilecek bir miktar gelirden, sürdürülebilirlik adına feragat edilebilir.

Koruyucu toprak işleme yönteminde, kullanılan ekipman ve makinelerin toplam güç ihtiyacı, yakıt sarfiyatı, çalışma süreleri ve yatırım masrafları büyük ölçüde düşmektedir. Tarımsal üretimin sürdürülebilir ve ekonomik hale gelmesi ve gelecek nesillerin açlık ve kıtlık gibi tehditler ile yüzleşmek zorunda kalmaması için en uygun toprak işleme sisteminin uygulanması bir zorunluluk olarak görülmektedir.

Sonuç olarak, koruyucu toprak işleme sistemleri ile geleneksel toprak işleme yöntemleri karşılaştırıldığında, her iki yaklaşımın da belirli avantajları ve dezavantajlar olduğu görülmektedir. Geleneksel toprak işleme, toprağın fiziksel olarak hazırlanmasını kolaylaştırarak kısa vadede yabancı ot kontrolü ve tohum yatağı hazırlığı gibi konularda etkili olurken toprak yapısının bozulmasına, organik

madde kaybına, erozyonun artmasına ve uzun vadede verimliliğin azalmasına neden olmaktadır. Öte yandan, koruyucu toprak işleme sistemleri -minimum toprak işleme, doğrudan ekim ve yüzey örtüsünün korunması gibi uygulamalar- toprağın fiziksel bütünlüğünü koruyarak erozyonu azaltmakta, suyun tutulmasını desteklemekte ve toprak organizmalarının sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin başarılı olabilmesi için uygun ekipman, bilgi birikimi ve zaman gerektiren bir adaptasyon süreci gerekmektedir. Dolayısıyla, koruyucu toprak işleme sistemleri, sürdürülebilir tarım açısından önemli avantajlar sunsa da geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, her bölgenin ekolojik ve sosyoekonomik koşullarına göre değerlendirilmesi gereken çok boyutlu bir yaklaşımdır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Abrol IP., Yadav JSP., Massoud FI. Salt-affected soils and their management (No. 39). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1988.

Ağca N. Topraklarda çoraklaşma ve sürdürülebilir tarım. 26-28 Mayıs GAP I. Tarım Kongresi, 2, 915-922, Haz. Harran Ü. Ziraat Fakültesi, Şanlıurfa. 1999.

Akgül H. Tuzluluk. Ziraat Mühendisliği Dergisi 2003; 340. Ankara.

Al-Kaisi MM., Yin X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations. Journal of Environmental Quality. 2005

Al-Kaisi MM., Yin X., Licht MA. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. Agriculture Ecosystems and Environment, In Press. 2005

Al-Kaisi MM., Licht MA. Tillage management and soil organic matter, Iowa State University Extension and Outreach, 2005, PM 1901i.

Amorim HCS., Ashworth AJ., Partson M., Savin MC., Anapalli SS., Reddy KN. No-till impacts on soil organic carbon and soil quality in the Lower Mississippi River basin: Implications for sustainable management. Soil Science Society of America Journal 2024; 88: 1736-1747.

Anonim. WA Soil Analysis Results Fact Sheet ChemCentre Open Day https://www.chemcentre.wa.gov.au/soil-interpretation-guide-open-day-2019 2025 (Erişim Tarihi: 18.01.2025)

Asana RD., Kale VR. A study of salt tolerance of "Four varieties of wheat. Indian Journal of Plant Physiology 1965; 8(1): 5-22.

Ashraf M. Breeding for salinity tolerance in plants. Critical Reviews in Plant Sciences 1994; 13: 17-42.

Ayers AD., Brown JW., Wadleigh CH. Salt tolerance of barley and wheat in soil plots receiving several salinization regimes. Agronomy Journal 1952; 44(6): 307-310.

Ayers RS., Westcot DW. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No.29. Rome, 1989. ISBN 92-5-102263-1.

Ayyıldız M. Sulama suyu kalitesi ve tuzluluk problemleri. Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 1990.

Balázs M., Szabolcs B. Effect of conservation tillage on earthworms in a long-term farm experiment (Hungary). Journal of Central European Green Innovation 2023; 11(2): 86-92.

Başaran M. Türkiye'nin organik karbon stoku. Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2004; 8 (3/4): 31-36.

Bauer A., Black AL. Soil carbon, nitrogen, and bulk density comparisons in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. Soil Science Society of America Journal 1981; 45: 1166.

Bauer A., Black AL. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. Soil Science Society of America Journal 1994; 58: 185-193.

Beare MH., Cabrera ML., Hendrıx PF., Coleman DC. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. Soil Science Society of America Journal 1994; 58: 787-795.

Bernstein L. Salt tolerance of field crops-Cotton, United States Salinity Laboratory Report to Collaborators 1955; 37-41.

Bernstein L., MacKenzie AJ., Krantz BA. Soil Science Society of America, Proceedings 1955; 19: 240.

Bernstein L., Fireman M. 1957. Laboratory studies on salt distribution infurrow irrigated soil with special reference to pre-emergence period. Soil Science 1957; 83: 249-263.

Bernstein L., Ford R. Salt tolerance of field crops. United States Salinity Laboratory Report to Collaborators 1959; 34-35.

Bernstein L., Ogata G. Effects of salinity on nodulation ,nitrogen fixation, and growth of soybeans and alfalfa. Agronomy Journal 1966; 58: 201-203.

Bertrand M., Barot S., Blouin M., Whalen J., Oliveira T., Roger-Estrade J. Earthworm services for cropping systems. A review. Agronomy for Sustainable Development 2015; 35: 553-567.

Birkás M (Ed.). Talajművelés a fenntartható gazdálkodásban. Gödöllő, SZIE, Mezőgazdasági és Környezettudományi Kar. 2001; 292 p.

Birkas M., Jolankai M., Gyuricza C., Percze A. Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary. Soil and Tillage Research 2004; 78: 185-196.

Boström U. Earthworm populations (Lumbricidae) in ploughed and undisturbed leys. Soil and Tillage Research 1995; 35: 125-133.

Bower CA., Ogata G., Tucker JM. Rootzone salt profiles and alfalfa growth as ınfluenced by ırrigation water salinity and leaching fraction, Agronomy Journal 1969; 61: 783-785.

Briones MJI., Bol R. Natural abundance of C-13 and N-15 in earthworms from different cropping treatments. Pedobiologia 2003; 47: 560-567.

Brown JW., Hayward HE. Salt tolerance of alfalfa varieties. Agronomy Journal 1956; 48: 18-20.

Buckley DH., Schmidt TM. The structure of microbial communities in soil and the lasting impact of cultivation. Microbial Ecology 2001; 42: 11-21.

Capowiez Y., Cadoux S., Bouchant P., Ruy S., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. Soil and Tillage Research 2009; 105: 209-216.

Carter MR. Ninhydrin-reactive N released by the fumigation-extraction method as a measure of microbial biomass under field conditions. Soil Biology and Biochemistry 1991; 23: 139.

Castro CF., Filho JC., Henklain MJ., Vieira R., Casão Jr. Tillage methods and soil and water conservation in southern. Brazil. Soil and Tillage Research 1991; 20: 271.

Chan KY. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity - implications for functioning in soils. Soil and Tillage Research 2001; 57: 179-191.

Cluzeau D., Binet F., Vertes F., Simon J.C., Riviere J.M., Trehen P. Effects of intensive cattle trampling on soil plant earthworms system in 2 grassland types. Soil Biology and Biochemistry 1992; 24: 1661-1665.

Cuendet G. Predation on earthworms by the black-headed gull (*Larusridibundus* L.). Chapman & Hall, London. In: Satchell JE (ed) Earthwormecology – from Darwin to Vermiculture, 1983.

Curry JP. Factors affecting the abundance of earthworms in soils. In: Edwards CA (ed) Earthworm ecology. CRC, Boca Raton, 2004

Çeker A. Sürdürülebilir tarım ve Türkiye açısından bir değerlendirme. International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic 2016; 11/2 Winter: 809-836.

Darwin C. On the formation of mould. Tranc. Geol. Soc 1840, 5. 505–509 London.

Deliboran A., Savran Ş. Toprak tuzluluğu ve tuzluluğa bitkilerin dayanım mekanizmaları. Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi 2015; 8 (1): 57-61.

Dick W. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentration and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. Soil Science Society of America Journal 1983; 47: 102.

Edwards CA., Bohlen PJ. Biology and ecology of earthworms. London, Chapman & Hall, 1996.

Edwards JH., Wood CW., Thurlow DL., Ruf ME. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludalf soil. Soil Science Society of America Journal 1999; 56: 1577-1582.

Esechie HA. Interaction of salinity and temperature on the germination of sorghum. Journal of Agronomy and Crop Science 1994; 172: 194-199.

Faber F., Wachter E., Zaller JG. Earthworms are little affected by reduced soil tillage methods in vineyards. Plant, Soil and Environment 2017; 63(6): 257-263.

FAO. Soil map of the world. Revised legend, by FAO–UNESCO–ISRIC. World Soil Resources Report No. 60. Rome. 1988

FAO. Sürdürülebilir toprak yönetimi gönüllü kılavuz ilkeleri http://www.fao.org/3/i6874tr/I6874TR.pdf. 2019

Farquharson RJ., Schwenke GD., Mullen JD. Should we manage soil organic carbon in Vertosols in the northern grains region of Australia? Australian Journal of Experimental Agriculture 2003; 43: 261-270.

FIBL. Earthworms-Architects of fertile soils. Research Institute of Organic Agriculture FIBL, Switzerland, and TILMAN-ORG Consortium. https://www.fibl.org/. 2014

Fitzpatrick RW. Land degradation processes. ACIR Monogr, 2002; 84:119-129.

Follett R. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. Soil and Tillage Research 2001; 61(1): 77-92

Freixo AA., Machado Plod, dos Santos HP., Silva CA., Fadigas FD. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. Soil and Tillage Research 2002; 64: 221-230.

Frizen D. Managing saline soils in North Dakota. NDSU Extension Service, Fargo, ND 58105 Available online: http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/soilfert/sf1087.pdf (accessed on 13 January 2015).

Gao Y., Dang X., Yu Y., Li Y., Liu Y., Wang J. Effects of tillage methods on soil carbon and wind Erosion. Land Degradation & Development 2016; 27: 583-591.

Gencer M., Gök M., Çelik İ. Sustaining soil biological activity: the role of extended reduced and no-tillage techniques. KSU Journal Of Agriculture and Nature 2024; 27(6): 1442-1457.

Gerard BM., Hay RKM. The effect on earthworms of ploughing, tined cultivation, direct drilling and nitrogen in a barley monoculture system. Journal of Agricultural Sciences 1979; 93: 147-155.

Govers G., Merckx R., van Oost K., van Wesemael B. Soil organic carbon management for global benefits: A discussion paper. In Proceedings of the Workshop organised by the Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environmental Facility 'Soil Organic Carbon Benefits: A Scoping Study', 2012, 10–12, Nairobi, Kenia.

Güngör Y., Erözel Z. Drenaj ve arazi ıslahı. Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları; 1994.

Hobbs PR., Sayre K., Gupta R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. Philosophical Transactions of the Royal Society B 2008; 363: 543-555.

Huang Q., Yin Z., Tian C. Effect of two different straw mulching methods on soil solute salt concentration. Arid Land Geography 2001; 24: 52-56.

İşler N., Kılınç M. Tarla tarımı. Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Kitabı. http://www.mku.edu.tr/files/898-45fba308-31e9-41e3-a927-8e622ac97149.pdf 2016.

Javid MG., Sorooshzadeh A., Moradi F., Sanavy Seyed AMM., Allahdadi I. The role of phytohormones in alleviating salt stress in crop plants. Australian Journal of Crop Science 2011; 5(6): 726-734.

Javůrek M., Vach M., Mikanová O. Response of soil microbial activity on different ways of organic matter use for field crop stand establishment. Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska 2003; 58: 223-232.

Javůrek M., Vach M., Mikanová O. Impact of different methods of field crop stand establishment on development of soil biota in topsoil and subsoil. Lucrari Stiintifice 2005; 48, seria Agronomie, Universitatea de Stiinte Agricole si Medicina Veterinara Iasi, Romania, 462-469.

Kaddah MT., Ghowail SI. Salinity effects on the growth of corn at different stages of development. Agronomy Journal 1964; 56: 214-217.

Kanber R., Kırda C., Tekinel O. Sulama suyu niteliği ve sulamada tuzluluk sorunları. Adana: Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Genel Yayın Ders Kitapları; 1992.

Kasza G., Bódı B., Sárközı E., Mázsa, Á., Kardos, L. Vermicomposting of sewage sludge – Experiences of a laboratory studyInternational Journal of Biosciences, Biochemistry and Bioinformatics 2015; 5: 1-10.

Kothawala DN., Kellerman AM., Catalan N., Tranvik LJ. Organic matter degradation across ecosystem boundaries: The need for a unified conceptualization. Trends in Ecology & Evolution 2021; 36, 113-122.

Kellerman AM., Kothawala DN., Dittmar T., Tranvik LJ. Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecularcharacteristics. Nature Geoscience 2015; 8: 454-457.

Kirchner MJ., Wollum II AG., King LD. Soil microbial populations and activities in reduced chemical input agroecosystems. Soil Science Society of America Journal 1993; 57: 1289.

Kladivko JE. Tillage systems and soil ecology. Soil and Tillage Research 2001; 61: 61-76.

Klik A., Rosner J. Long-term data from field erosion plot studies in eastern Austria. Data in Brief 2020; 31: 105810.

Kubát J., Cerhanová D., Nováková J., Lipavský J. Total organic carbon and its composition in long term field experiments in the Czech Republic. Archives of Agronomy and Soil Science 2006; 52: 495-505.

Kucharik CJ, Brye KR, Norman JM, Foley JA, Gower ST, Bundy LG. Measurements and modeling of carbon and nitrogen cycling in agroecosystems of southern Wisconsin: potential for SOC sequestration during the next 50 years. Ecosystems 2001; 4(3):237-58.

Kurunç A. Sulama suyu kalitesi ve tuzluluk, Tuzluluğun bitkilere etkisi. http://aves.akdeniz.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=3&USER=1679 2020

Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. Soil Tillage Research 1993; 27: 1-8.

Lal R., Kimble J., Levine E., Whitman C. World soils and greenhouse effect: An overview. In: Lal R.et al. (eds.): Soils and Global Change. Boca Raton: Lewis Public; 1995.

Lal R., Kimble JM. Conservation tillage for carbon sequestration. Nutrient Cycling in Agroecosystems 1997; 49: 243-253.

Lal R., Kimble J., Follett R. Soil quality management for carbon sequestration. In: Lal R. et al. (eds.): Soil Properties and their Management for Carbon Sequestration. Lincoln: US Department Agriculture Natural Resources Conservation National Soil Survey Center; 1997.

Lal R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. Food Security in a Global Economy 2003; 17(1): 1-22.

Lal R., Reicosky DC., Hanson JD. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. Soil and Tillage Research 2007; 93(1): 1-12.

Larink O., Schrader S. Rehabilitation of degraded compacted soil by earthworms, in Subsoil Compaction. Adv GeoEcol 2000; 32: 284-294.

Lee KE. Earthworms – Their ecology and relationships with soils and land use. Australia: Academic press; 1985.

Le Villio M., Arrouays D., Deslais W., Clergeot D., Droussin J., Le Bissonnais Y. Interest of the compost as a source of organic matter to restore and maintain physical properties of French soils. 2004; Symposium No: 57, Paper No. 1529.

Li X., Zhang Z., Liu X., Li Y. Effect of straw mulching on soil water and salt moving. Journal Shandong Agricultural University 2000; 31(1): 38-40.

Lopez-Fanda C., Pardo MT. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi arid environment. Soil and Tillage Research 2009; 104: 278-284.

Low AJ. The effect of cultivation on the structure and other physical characteristics of grassland and arable soils (1945–1970). Journal Soil Science 1972; 23: 363-380.

Maas EV., Hoffman GJ. Crop salt tolerance-Current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division 1977; 103(IR2): 115-134.

Magdoff F., Weil RR. Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press; 2004.

Munsuz N., Ünver I. Su kalitesi. Ankara: Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları; 1995.

Navarro-Pedreño J., Almendro-Candel MB., Zorpas AA. The increase of soil organic matter reduces global warming, myth or reality?. Sci 2021; 3: 18.

Newsham KK., Fitter AH., Watkinson AR. Arbuscular mycorrhiza protect an annual grass from root pathogenic fungi in the field. Journal of Ecology 1995; 83: 991.

Niu DL., Wang QJ. Research progress on saline-alkali field control. Canadian Journal of Sport Sciences 2002; 33(6): 449-455 (in Chinese).

Nuutinen V. 1992. Earthwormcommunity response to tillage and residue management on different soil types in southern Finland. Soil Tillage Research 1992; 23: 221-239.

Ondrasek G., Rengel Z., Romic D., Savic R. Environmental salinisation processes in agro-ecosystem of Neretva River estuary. Növénytermelés 2010; 59(Supplement): 223-226.

Oruç N., Sağlam T. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak İlmi Bölümü Ders Notu: Erzurum; 1972.

Pang H., Xu F. Study on the tillage methods under straw mulching in Weibei Arid Area. Research. Agric Mod 1998; 19: 249-251.

Pang H. The effect of straw mulching on the soil environment and wheat yield traits. Chin. Journal Soil Science 1999; 30: 174-175.

Peng X., Zhu Q., Xie Z., Darboux F., Holden NM. The impact of manure, straw and biochar amendments on aggregation and erosion in a hillslope Ultisol. Catena 2016; 138: 30-37.

Peigné J., Ball BC., Roger-Estrade J., David C. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. Soil Use and Management 2007; 23: 129-144.

Pimentel D., Harvey C., Resosudarmo P., Sinclair K., Kurz D., McNair M., Blair R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science 1995; 267(5201): 1117-1123.

Qadir M., Ghafoor A., Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: a review. Land Degradation & Development 2006; 17(6): 661-676.

Reeves DW. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. Soil Tillage Research 1997; 43: 131-167.

Reicosky DC., Lindstrom MJ. Fall tillage method: Effect on short term carbon- dioxide flux from soil. Agronomy Journal 1993; 85: 1237-1243.

Rengasamy P. Transient salinity and subsoil constraints to dryland farming in Australian sodic soils: an overview. Australian Journal of Experimental Agriculture 2002; 42(3): 351-361.

Roger-Estrade J., Anger C., Bertrand M., Richard G. Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. Soil Tillage Research 2010; 111: 33-40.

Rosas-Medina MA, de Leon-Gonzalez F, Flores-Macias A, Payan-Zelaya F, Borderas-Tordesillas F, Gutierrez-Rodriguez F, Fragoso-Gonzalez C. Effect of tillage, sampling date and soil depth on earthworm population on maize monoculture with continuous stover restitutions. Soil Tillage Research 2010; 108: 37-42.

Roscoe R., Burman P. Tillage effects on soil organic matter in the density fractions of a Cerrado Oxisol. Soil and Tillage Research 2003; 70: 107-119.

Sampson RN., Scholes RJ. Additional human-induced activities. In: Land use, land-use change, and forestry: A special report of the Intergovermental Panal on Climate Change. 2000 Edited R.T. Watson et al. IPCC.

Sauerbeck D. CO_2 emissions and C sequestration by agriculture per-spectives and limitations. Nutrient Cycling in Agroecosystems 2001; 60(1–3): 253-66.

Sayre KD., Hobbs PR . The raised-bed system of cultivation for irrigated production conditions. In Lal, R. (Ed.), Encyclopedia of Soil Science 2004. CRC Press.

Szabolcs I. Desertification and salinisation. I. A. V. Hassan II-ISESCO. Plant Salinity Research 1991; 3-18.

Seckin B., Sekmen AH., Turkan I. An enhancing effect of exogenous mannitol on the antioxidant enzyme activities in roots of wheat under salt stress. Journal of Plant Growth Regulation 2009; 28: 12-20.

Sezer B. Karbon salınımı ve toprak yönetimi. www.tarim.gov.tr/ABOGM/Belgeler. Ulaşım. 23.10.2014. 2014.

Šimon T., Javůrek M., Mikanová O., Vach, M. The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity. Soil and Tillage Research 2009; 105: 44-48.

Sönmez B. Türkiye'de çorak ıslahı araştırmaları ve tuzlu toprakların yönetimi. Sulanan alanlarda Tuzluluk Yönetimi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 20-21 Mayıs, 2004, s.157-162, Ankara.

Sungur N., Ulusoy E., Yalçın H. Ege bölgesi koşullarında ikinci ürün elde etmede mekanizasyon olanakları. Ege Üniversitesi Araştırma Fonu No:89-ZRF-006 Nolu Proje Sonuç Raporu, İzmir. 1994.

Tabur S., Demir K. Role of some growth regulators on cytogenetic activity of barley under salt stress. Plant Growth Regulation 2010; 60: 99-104.

Tamer N., Başalma D., Türkmen C., Namlı A. Organik toprak düzenleyicilerin toprak parametreleri ve ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) bitkisinin verim ve verim öğeleri üzerine etkileri. Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi 2016; 4(1): 11-21.

Tian K., Lei Y. Integrated effect of water, fertilize and salinity on the wheat yield in desalinized fluvo aquic soil in Heilonggang Region. Res. Agric. Mod 1994; 15: 364-368.

Tomlin AD., Miller JJ. Impact of ring-billed gull (Larus delawarensis ord.) foraging on earthworm populations of southwestern Ontario agricultural soils. Agriculture, Ecosystems & Environment 1988; 20: 165-173.

Ulrich S., Hofmann B., Tischer S., Christen O. Influence of tillage on soil quality in a long–term trial in Germany. Advances in GeoEcology., Rainer Horn, Heiner Fleige, Stephan Peth and Xinhua Peng (Editors), 110-116. 2006

U.S. Salinity Laboratory Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United States Department of Agriculture, (ed. Richards, L. A.), Handbook No. 60, Washington, D. C. 1954.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1843-1880, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1843-1880, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Natural Dyestuff Sources in Textiles: Cultivated in Türkiye and Their Chemical Structures

Emine BAKAN[1*]

[1]Uşak University, Ulubey Vocational School, Uşak

[1]https://orcid.org/0000-0002-3463-4314
*Corresponding author:emine.tomruk@usak.edu.tr

Review Article

Article History:
Received: 28.06.2025
Accepted: 16.11.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Sustainability
Natural dyestuffs
Root dyes
Mordanting
Vegetable dyes

ABSTRACT

For centuries, textiles have been colored using plant-derived dyes, which are considered a more environmentally sustainable alternative to synthetic dyes. The diverse climatic conditions in Türkiye have enabled the widespread cultivation of various natural dye plants, contributing to its long-standing tradition of eco-friendly textile applications. Despite their environmental benefits, natural dyes gradually declined in use due to the affordability, wider color range, and superior fastness properties of synthetic dyes. However, the high-water consumption and environmental pollution associated with synthetic dye production have renewed interest in eco-friendly alternatives. Natural dyestuffs, derived from plants, insects, and minerals, offer sustainable solutions for the textile industry. This review highlights the natural dye sources cultivated in Türkiye, examining their chemical properties and dyeing applications. The study classifies these natural dyestuffs by chemistry, details their environmental advantages, and discusses the role of mordants in improving dyeing efficiency. The resurgence of natural dyes, in line with global sustainability goals, underscores their potential as environmentally safe alternatives to synthetic dyes. This paper emphasizes the importance of promoting sustainable practices in textile dyeing to reduce ecological impacts and enhance the industry's contribution to a greener future.

Tekstildeki Doğal Boyarmadde Kaynakları: Türkiye'de Yetiştirilenler ve Kimyasal Yapıları

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 28.06.2025
Kabul tarihi:16.11.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Sürdürülebilirlik
Doğal boyarmaddeler
Kök boyalar
Mordanlama
Bitkisel boyalar

ÖZ

Yüzyıllar boyunca tekstil ürünleri, bitki kökenli boyalarla renklendirilmiş ve bu boyalar, sentetik boyalara kıyasla çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif olarak kabul edilmiştir. Türkiye'nin çeşitli iklim koşulları, birçok doğal boya bitkisinin yaygın olarak yetiştirilmesine olanak sağlamış ve bu durum, ülkenin çevre dostu tekstil uygulamaları konusundaki köklü geleneğine katkıda bulunmuştur. Ancak çevresel avantajlarına rağmen, doğal boyaların kullanımı zamanla azalmış; bunun başlıca nedenleri, sentetik boyaların daha ekonomik oluşu, daha geniş bir renk yelpazesi sunması ve üstün haslık özelliklerine sahip olmasıdır. Öte yandan, sentetik boya üretiminin yüksek su tüketimi ve çevre kirliliği gibi olumsuz etkileri, çevre dostu alternatiflere olan ilgiyi yeniden artırmıştır. Bitkilerden, böceklerden ve minerallerden elde edilen doğal boyar maddeler, tekstil endüstrisi için sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Bu derleme çalışması, Türkiye'de yetiştirilen doğal boya kaynaklarını ele almakta; bunların kimyasal özellikleri ile boyamacılık uygulamalarını incelemektedir. Çalışmada doğal boyar maddeler kimyasal yapılarına göre sınıflandırılmış, çevresel avantajları detaylandırılmış ve mordanların boyama verimliliğini artırmadaki rolü tartışılmıştır. Doğal boyaların küresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda yeniden önem kazanması, sentetik boyalara çevre dostu bir

alternatif olarak potansiyellerini ortaya koymaktadır. Bu makale, tekstil boyamacılığında sürdürülebilir uygulamaların teşvik edilmesinin, ekolojik etkilerin azaltılması ve sektörün daha yeşil bir geleceğe katkı sağlaması açısından önemine dikkat çekmektedir.

To Cite: Bakan E. Natural Dyestuff Sources in Textiles: Cultivated in Türkiye and Their Chemical Structures. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1843-1880.

1. Introduction

The rising awareness of environmental and health-related issues has driven a shift towards eco-friendly and non-toxic biological resources (Ayvaz and Teker, 2023). Among these, natural dyes—sourced from plants, insects, and minerals—stand out as sustainable alternatives with minimal ecological impact (Bechtold and Mussak, 2009; Singh and Bharati, 2014). In textile dyeing, plant-derived colorants hold a significant position due to their wide availability, extensive color range, and ease of application. As the demand for greener production methods grows, natural dyes are once again gaining prominence as a viable solution for reducing synthetic dye pollution (Clark, 2011; Leitner et al., 2012; Padma Shree, 2017; Dhara and Padma Shree, 2019).

Anatolia has a very rich geography in terms of these plant dyestuffs (Eyüboğlu et al., 1983; Öztürk, 1997; Karadağ, 1997). Looking at the Web of Science and Scopus data, it is noticed that the number of publications on natural dyes and root dyes is increasing especially after 2020 and the published articles are mostly from countries such as Iran, India, China and Türkiye (Web_1; Web_2). The abundant cultivation of plants used as natural dyeing sources especially in the Middle East countries makes these plants more recognizable in these countries. In these geographies, plants that make it possible to obtain colors in almost many tones grow. For this reason, the popularity of natural dyeing in Türkiye has spread abroad and naturally dyed products have become more preferred. In fact, there are four textile enterprises in Türkiye that use natural dyes in the production of garments and accessories. These enterprises use completely natural products. These are Sat-Su-Ma, Armaggan, Bahar Bozacı and Darwin's (Ayvaz and Teker, 2023). In addition to all these, Cultural Heritage and Natural Dyeing Laboratory was established in 2010 due to the large variety of natural dyeing plants grown in Türkiye and this laboratory constitutes the world's largest collection of 612 natural dyeing plants and insects (Web_3).

Over the past decade, the application of natural dyes in textile coloration has gained increasing attention, leading to a shift in perspectives and the development of innovative approaches. Historically, natural dyes have been widely utilized in coloring various materials, including textiles, food products, and leather. In addition to their use in textile dyeing, these dyes have demonstrated significant potential in functional finishing processes, such as UV protection and antimicrobial treatments, offering eco-friendly alternatives to synthetic additives (Gupta et al., 2005; Shahid and Mohammad, 2013). Beyond textiles, natural dyes have found applications in food coloring and cosmetics, primarily due to their non-toxic and biodegradable nature (Dweck, 2002; Kapoor, 2005). Furthermore, emerging research highlights their role in advanced technologies, including photosensitive dyes for solar cells and pH-sensitive indicators, underscoring their versatility across multiple scientific and industrial fields (Garcia et al., 2003; Zhang et al., 2008). As the demand for sustainable and environmentally responsible solutions

grows, natural dyes continue to be explored for their potential to replace synthetic counterparts in diverse applications.

The Persian Empire (545-383 BC), the Hellenistic Age (333-30 BC), the Roman Period (30 BC - 395 AD) and finally the Byzantine Period (330-1453 AD) are important periods of civilization in Anatolian history. All these people dyed their textiles. However, the techniques they used to color textile products have not been fully solved even today. In fact, the use of plant products in dyeing dates back to ancient times (Sunerli and Aydın, 2019). Presumably, in the beginning, weavings were contaminated with colored fruit juices. It was observed that these colors could not be removed by washing and these discoveries were evaluated and developed over time. On the other hand, since there were only a few substantive dyestuffs in nature, the color palette and yield were limited and these colors faded in sunlight (Tezcan and Suyunu, 1991). Over time, the leaves of the indigo plant naturally develop a blue hue when placed in water, while the sea snail 'Murex' produces a purplish dye when crushed and exposed to sunlight. These natural phenomena played a crucial role in the historical development of indigo and other dyestuffs for fabric dyeing (Pereira et al., 2014). In the early stages, indigo extraction and dyeing techniques were based on the use of the plant's leaves, which served as the primary source of color. The use of indigo is evidenced by the discovery of a garment dyed with indigo in Thebes around 3000 BC. The words blue and purple are also found in the Bible and these colors refer to indigo and mureks purple. Mureks purple is also known as "Tyrian" or "Royal purplex purple". According to the story, this product became extremely important and the city of Tire in Türkiye became famous for its production (Tezcan and Suyunu, 1991).

In Anatolia, which has been home to many civilizations over the centuries, different natural resources have been learned to color textile materials. Türkiye has given its name to some colors such as turquoise with the advantage of having many plant and animal species in different geographical conditions and climatic conditions.

Türkiye, being rich in plant biodiversity, offers a wide range of natural dye sources. Many studies have documented local dye plants, traditional knowledge, and modern applications, forming a valuable cultural and scientific base (Bechtold and Mussak, 2009; Kamel et al., 2011).

Recent studies from Türkiye also point to the growing scientific innovation in this field. For example, Kalaycı et al. investigated black mulberry fruit extract as a dye source for various synthetic and natural fibers, offering insights into the effectiveness of both conventional and microwave dyeing techniques (Kalaycı et al., 2024).

Sarı et al. evaluated marble-printed silk fabrics dyed with natural colorants using various mordants and after-treatments, reporting on improved color fastness properties and aesthetic outcomes (Sarı et al., 2024).

In addition, researchers such as Benli et al. demonstrated how different natural dye sources can improve the surface characteristics and color depth of pre-dyed wool fabrics during topping processes, indicating enhanced dye–fiber interaction and color uniformity (Benli et al., 2023).

Another significant contribution comes from Benli and Selvi (2024), who examined the pharmaceutical potential of Dodder (Cuscuta campestris Yuncker) as a dual-purpose natural dye and bioactive compound, highlighting its dyeing efficacy and antimicrobial properties (Benli and Selvi, 2024).
These and similar studies strengthen the relevance of natural dyes not only for sustainability but also for functional textile innovations, such as antimicrobial, UV-protective, or smart dyeing systems.
This study provides a comprehensive classification and chemical evaluation of natural dyestuff sources cultivated specifically in Türkiye, a region with exceptional botanical diversity. Unlike previous works, this paper integrates detailed information on dye-yielding plants with their chemical structures, historical applications, and modern extraction methods. Additionally, the study presents an updated analysis of mordanting techniques including the use of bio-mordants and their impact on dye performance and sustainability. By combining ethnobotanical knowledge with recent advancements in green chemistry and textile technology, this review offers a novel perspective on reviving and optimizing natural dyeing practices for sustainable textile production.

2. Plant-Based Natural Dyestuff Sources in Textiles and Studies with Them

Due to Türkiye's geographical advantage, many plants are grown in its rich soil. While there are 11,000 plant species in all European countries, there are 9,000 species growing naturally in Türkiye alone (Teker, 2011). Except for the roots of the root dye, which also gives its name to the dyestuff types, the stems, branches, fruits and leaves of the plants are used in textile coloring. Natural dyeing resources that grow almost everywhere in Anatolia were used to establish dyehouses in many parts of the country during the Ottoman period (Baykara, 1998; İmer, 1999; Kabaalioğlu, 2022). Especially Alaşehir, the district of Manisa province known as Philadelphia at that time, Aydın, Bursa and Edirne became the dyeing centers of those periods. These natural dyeing sources can dye many types of fabrics that are cellulosic or protein based. The color spectrum is remarkably diverse, allowing for dyeing in various shades of yellow, green, brown, blue, red, and black (Taş, 2019). In a recent study by Eyüpoğlu et al. mohair fibers were successfully dyed with natural colorants extracted from Candelariella reflexa, a species of lichen. The research revealed that this natural source provided yellowish-green and brown hues depending on the mordanting process applied. Moreover, the dyed fabrics demonstrated acceptable fastness values, highlighting Candelariella reflexa as a sustainable and underutilized dye source in Turkish flora (Eyüpoğlu et al., 2022). Building upon this long-standing dyeing tradition, recent studies have documented the continued use and scientific evaluation of plant-based colour sources cultivated in Türkiye.

Aceraceae; The Aceraceae family includes several species of the genus Acer, such as Acer pseudoplatanus L. (sycamore maple) and Acer platanoides L. (Norway maple), both of which have been historically used as natural dye sources in Anatolia. This group is widely grown around Çanakkale region in Türkiye. The trunk, branches, bark and dried fruits of acer platanoides L. are used for dyeing

and colors in yellow and brown tones are obtained. The seeds, leaves, trunk, branches and bark of acer pseudoplatanus L. are used for dyeing and khaki and brown tones are generally obtained (Adrosko, 1971; Wigginton, 1973; Grierson, 1989; Anonymous, 1991).

Saliaceae; This group, whose scientific name of the species is Saliaceae, salix alba L., grows widely around Çanakkale region in Türkiye. The dyeing source of the plant is its leaves. Yellow, brown and black tones are obtained in dyeing (Grierson, 1989; Anonymous, 1991; Gönüz et al., 2006).

Vitis vinifera L.; The scientific name of the species is Vitis vinifera L. It is possible to obtain colors in different shades from this plant, which is widely grown in Anatolia, especially in the Aegean Region (Bayatlı, 1957; Gönüz et al., 2006; Şanlı, 2011). Dyeing is usually done with the leaves of the grapevine. Şanlı and Arlı, dyed silk carpet yarns with grape leaves using 5 different mordant substances during the dyeing process, and they obtained colors such as mustard, dark cream, light khaki, and light yellow. As a result of dyeing silk shirt fabric with grape leaves, colors such as cream, oak nut, and aqua green tones were obtained (Şanlı and Arlı, 2007).

Fabaceae; This group is grown abundantly on the Aegean and Mediterranean coasts in Türkiye. The bark of the cercis siliquastrum L. plant is used in dyeing and a light brown color is obtained (Eyüboğlu et al., 1983). Yellow dyes can be obtained from Lotus corniculatus L., Melilotus officinalis L., and Trifolium pratense L. in the dyeing process (Baylav, 1963; Grierson, 1989).

Lamiaceae.; This group is cultivated in Europe, Asia and Northern Europe. Mentha pulegium L. and salvia officinalis L. belong to this group. In dyeing, the whole mentha pulegium plant is used, while the stem and leaves are used in dyeing with salvia officinalis (Şanlı, 2001). In general, colors in yellow, green gray and black green tones are obtained (Harmancıoğlu, 1955; Korur, 1937; Uslu, 1982). Şanlı and Arlı, mordanted silk yarn and fabric with 5 different mordants during dyeing and obtained yellow, smoked, mustard and khaki tones in dyeing with mentha pulegium plant (Şanlı and Arlı, 2007).

Hypericaceae; This plant is widely distributed across various regions of Türkiye and includes species such as Hypericum calycinum L., Hypericum empetrifolium Willd., Hypericum perforatum L., and Hypericum triquetrifolium Turra (Anonymous, 1991). Flowering above-ground parts of plants are utilized in dyeing. Yellow, green, red and black tones are obtained according to the mordanting agents (Baykara, 1964; Uslu, 1982; Rodales, 1987; Öztürk and Aksoy, 2000).

Walnut; The scientific name of the species of walnut family is Juglans regia L. It grows in every region of Türkiye (Karadağ, 2007). The dyeing source of the plant is the leaves and outer stem shells (Gönüz et al., 2006; Etikan and Ölmez, 2014). Shades of brown were obtained from the fruit outer shell of walnut in dyeing with different mordants (Öztürk, 1982; Şanlı et al., 2014; Doty et al., 2016).

Pinaceae; Belonging to the Pinaceae family, Pinus brutia Ten. is commonly used in dyeing and is widely distributed from western Anatolia to the Mediterranean and Black Sea regions of Türkiye. Reddish yellow (Uslu, 1982) and pale red (Duran, 1992) tones are obtained in dyeing with cones and bark, respectively. Avinç et al., powdered and extracted the waste bark of pinus brutia ten. plant and dyed

cotton, linen, silk, wool, tencel, polyamide and acrylic fibers simultaneously with alum and oak ash mordants (Avinç et al., 2013). Depending on the mordant and fiber type, beige, brown and brownish-yellow tones were obtained. The dyeability of hemp fabrics with natural extracts from Anatolian black pine (Pinus nigra) and Scots pine (Pinus sylvestris) was evaluated by Pars (2024). This study highlighted the versatility of native Turkish plant sources in dyeing alternative textile substrates like hemp.

Isatis tinctoria; Indigo is a plant from the cruciferous family, whose common name is isatis tinctoria. It grows frequently in eastern and southern Anatolia. A dye called indigo blue is obtained from its roots (Karadağ, 2007; Şanlı et al., 2014; Mocquard et al., 2022). Yılmaz (2020a), dyed woolen fabrics using indigo grass and found that it could be applied directly for coloration without requiring an extraction or fermentation process.

Polygonaceae; This group includes Polygonum belardii L., Rumex acetosella L., and Rumex crispus L., which are commonly used in dyeing (Karadağ, 2007). In Türkiye, it is distributed in Western, Central, Eastern, Southern and Southeastern Anatolia. It grows mostly in Yozgat, Sivas, Amasya, Tokat, Kayseri and Gümüşhane regions. The above-ground parts of the polygonum belardii are used in dyeing and generally a pistachio greenish yellow color is obtained (Korur, 1937; Şanlı, 2001). The roots of rumex acetosella are used in dyeing and olive yellow color is obtained (Anonymous, 1947; Grierson, 1989). In dyeing with rumex crispus, the roots and seeds of the plant are used and dark brown and red tones are obtained (Grierson, 1989).

Morus Alba L.; The dyeing source of this plant is its leaves. It grows around Malatya. Yellow tones are obtained (Gönüz et al., 2006).

Polypodiaceae; The plants used in dyeing in this group are polypodium vulgare L. and pteridium aquilinum (L.) Kuhn. It generally grows around central Anatolia in Türkiye. The above-ground parts of the polypodium vulgare L. are used in dyeing processes and yellow color is obtained. On the other hand, crop heads, roots and fresh branches and leaves of the pteridium aquilinum (L.) Kuhn are used for dyeing and yellow and nephti green tones are obtained (Grierson, 1989).

Ericaceae; This plant thrives in temperate regions of Türkiye. Arbutus andrachne L. yields a light-yellow dye from its leaves and thin branches, while Erica arborea L. produces yellow, green, and muted orange shades. Additionally, in Vaccinium myrtillus L., young shoots provide yellow tones, whereas its fruits result in purplish-brown hues during the dyeing process (Uğur, 1988; Grierson, 1989; Anonymous, 1991).

Papaveraceae; This plant species is widely found in both Türkiye and India. The petals of the papaver rhoeas L. plant are used in dyeing and gray tones are obtained (Uslu, 1982).

Rosaceae; The scientific name of the species is rosaceae. In Türkiye, it is found naturally in high mountainous regions around Samsun, Giresun, Trabzon, Rize, Ordu and Artvin. This group includes Crataegus monogyna Jacq., Malus sylvestris L. Mill., Prunus amygdalus L., Prunus avium L., Prunus spinosa L., Pyrus cydonia L., and Sorbus aucuparia L., which are commonly used in dyeing. The stem bark, flowers and fruits of red hawthorn are used in dyeing, and yellow-rose tones are obtained

(Grierson, 1989). In dyeing with malus sylvestris plant, the bark of the tree is used and yellow, olive-green tones are obtained (Eyüboğlu et al., 1983). Prunus amygdalus leaves are used in dyeing and yellow color is obtained (Etikan and Ölmez, 2014). Khaki and brown tones are obtained in dyeing with the leaves of the prunus avium plant, and violet tones are obtained in dyeing with its fruits (Korur, 1937). Flowers, twigs and bark of prunus spinoza are used for dyeing, and yellow, orange and brown tones are obtained (Grierson, 1989; Anonymous, 1971/72/73; Öztürk, 1988; Gündüz, 1993). The leaves and branches of pyrus cydonia are used for dyeing and brown tones are obtained (Etikan and Ölmez, 2014). Fresh and ripe fruits of wild sorbus aucuparia are used in dyeing and light brown tones are obtained.

Berberidaceae; It grows in many regions of Anatolia. The roots, wood, shoots, bark and fruits of the berberis vulgaris L. plant are used for dyeing and yellow color is obtained (Şanlı, 2011; Yaldızbaş, 2020).

Alcanna tinctoria; This grass is a perennial plant (Karamanoğlu, 1977). The roots of the alcanna tinctoria contain the color substance alkanin and dark brown, red - purple, brown colors are obtained (Güngörmez, 2015). It grows in the Mediterranean Region and especially in Eskişehir, Ankara, Ürgüp, Kayseri and Divriği in Central Anatolia. In the literature, it is possible to find many studies on dyeing using alcanna tinctoria. For example; in 1999, Kayabaşı et al. used alcanna tinctoria in the dyeing of carpet yarns and reported that the colors obtained can be used in carpet yarns (Kayabaşı et al., 1999). Yılmaz and Bahtiyari (2017), dyed woolen fabrics with alcanna tinctoria plant and obtained purple shades in dyeing without mordant, while purple, brown, lilac and black colors were obtained in dyeing with mordant. In addition, Rekaby et al. showed in their study that the printing process is feasible by using alcanna tinctoria plant (Rekaby et al., 2009). Akan and Balos (2021), dyed wool yarn with alcanna tinctoria in their study. In the dyeing processes performed with mordantless, pre-mordanting and post-mordanting techniques, while smoked color was obtained in mordantless dyeing, light brown, dark brown, light green and earth tones were obtained according to the aluminum alum, copper sulfate, iron sulfate, oxalic acid mordants used in pre-mordanting and post-mordanting.

Betulaceae; This group grows in all lands of Türkiye. Alnus glutinosa mill. belongs to this group (Karadağ, 2007). The bark of the plant is used in dyeing. Yellow, brown and black colors are obtained (Harmancıoğlu, 1955; Adrosko, 1971; Grierson, 1989).

Urticaceae; It grows in many forested areas, especially in the western Black Sea and Marmara region. Urtica dioica L. belongs to this group (Karadağ, 2007). The aerial parts of the plant are used in dyeing, producing yellow and olive tones.

Leguminosae; This group is native to Europe but is also widely distributed across various regions of Türkiye. Genista tinctoria L. and Spartium junceum L. plants belong to this group (Karadağ, 2007). Flowers, stems and young shoots of plants are used for dyeing. Yellow color is obtained (Anonymous, 1947).

Fagaceae; This group thrives in temperate forests across Europe and Asia and includes Quercus cerris L., Quercus infectoria Oliv., Quercus petraea Lieb., and Quercus robur L. (Şanlı et al., 2014). The leaves,

bark, and fruits of these plants are commonly used in dyeing, producing shades of brown and black (Eyüboğlu et al., 1983; Şanlı et al., 2014).

Rubiaceae; This species is endemic to Türkiye and has only been identified in the Antalya region. This group includes Galium aparine L., Galium verum L., Rubia tinctorum L., and Sherardia arvensis L. (Karadağ, 2007; Genç, 2017; Genç, 2022). Roots of plants are used in dyeing. Eşberk (1947), Thompson (1986), Aytaç (1999) and Torgan (2008) obtained yellow and red tones with dyeing rubiaceae groups. This plant group offers a diverse range of colors and is widely used in vegetable dyeing (Şanlı et al., 2014; Tuğrul, 1995). Rubiaceae dye plant is also called dyer's root, dyeing herb, red root, dye root, dye ivy and egg dye in Anatolia (Torgan, 2008; Kayabaşı and Dellal, 2006). Looking at the archives of the Ottoman Empire, it is known that it gained commercial value as an important export product during the Empire period (Kabaalioğlu, 2022). In 1875, the export value of Rubiaceae dye from the port of Izmir reached 5,000 gold coins (Genç, 2014). There are many studies on dyeing using rubiaceae dye in the literature. For example, Erkan et al. in their study presented in 2010 showed that rubia tinctorium dye can be used as an alternative method for dyeing denim products (Erkan et al., 2010). Özer et al. reported in their study in 2016 that silk fabrics can also be dyed with rubiaceae dyes (Özer et al, 2016). In their study conducted in 2015, Özgüney et al. examined the applicability of rubiaceae dye on various natural fibers with printing technique (Özgüney et al., 2015). Deveoğlu et al. also dyed silk fibers using rubiaceae dye and Quercus ithaburensis ssp.macrolepis in 2012 and investigated their fastness properties (Deveoğlu et al., 2012a). Şanlı and Arlı (2007) made mordanting during the dyeing of silk yarns and fabrics with rubiaceae dye and used 5 different mordants. The obtained colors were salmon, rose dry, tan, eggplant purple, carrot and brown tones. Yılmaz and Bahtiyari (2017), observed that a wide color palette can be obtained when wool fabrics are dyed with rubiaceae dye. While red color tones were obtained in dyeing without mordant, red and its tones as well as burgundy and brown were obtained in dyeing with mordant. Rubia tinctorum L., known as madder, gives color to textile materials thanks to the alizarin (1,2 dihydroxy anthraquinone) it contains (Kahveci, 2001; Jiang et al., 2021). Özgüney et al. applied madder dye to cotton, wool and silk fabrics by printing technique (Özgüney et al., 2015). In the K/S values they measured the color efficiency, it was revealed that K/S increased as the amount of dyestuff in the printing paste increased. The color nuance and color efficiency also changed according to the mordanting technique and mordant type. It is possible to obtain different color shades and fastness values with different mordants. Moreover, the use of natural dyestuffs helps address the ecological and toxicological issues associated with synthetic colorants. Among them, madder (Rubia tinctorum L.) is one of the most extensively studied and widely used natural dyes in the literature (Canikli, 1989; Yoshizumi and Crews, 2003). Kayabaşı et al. also dyed wool carpet yarns with madder and compared the colors in dyeing without mordant and dyeing with 16 different mordants (Kayabaşı et al., 1998). Depending on the type of mordant used, peach, burgundy, cherry rot, cinnamon, tile, coffee, rosewood, mustard and tan colors were obtained. Kayabaşı and Dellal (2006), dyed the wool of sheep breeds from different regions with madder and made subjective and objective color evaluation. 100% dye extraction

was used and dyeing process was carried out after mordanting the wool fibers of different breeds. Depending on the variety of wool breeds used and the differences in dye mordants, red, burgundy, cherry, brown, pink, cinnamon colors were obtained. In the objective evaluation, the lowest dE (color difference) value was obtained with iron sulphate mordant in Sönmez wool with 31.01 and the highest dE value was obtained with potassium bichromate mordant in Norduz wool with 69.25.

Malvaceae; It grows mostly around the Black Sea, Aegean, Marmara and Antalya regions and likes temperate climates. his group includes Malva sylvestris L., Eucalyptus camaldulensis Dehn., and Myrtus communis L. (Yılmaz, 2020b). Leaves and bark of plants are used in dyeing. Green and brown tones are obtained (Korur, 1937; Eyüboğlu et al., 1983; Öztürk, 1997). In a novel study, Ömeroğulları Başyiğit et al. investigated the dyeing properties of air plasma-treated wool fabrics using natural dye obtained from Hibiscus sabdariffa, a subclass of the Malvaceae family. Their work not only demonstrated enhanced dye uptake and color strength but also implemented a feed-forward neural network model to predict dyeing results with high accuracy. This innovative approach combines sustainability with artificial intelligence, representing an emerging frontier in natural dyeing Technologies (Ömeroğulları Başyiğit et al., 2023).

Verbenaceae; It is found in the regions of Antalya, Bursa, Çanakkale, Trabzon, Giresun, Muğla, Zonguldak, Mersin, Adana, and Hatay. Vitex agnus-castus L. belongs to this group (Karadağ, 2007). The dyeing source of the plant is its roots, leaves and young branches (Şanlı, 2011). Yellow color is obtained in dyeing (Eşberk, 1939; Uslu, 1982; Enez, 1984).

Adoxaceae; It can be found along the coasts of the Black Sea and the northern regions of the Aegean. The toxic plant sambucus ebulus is the most commonly used species in this group (Canbolat et al., 2013). By using 5 different mordant substances during the dyeing of silk carpet yarns and silk shirt fabric with sambucus ebulus, shades ranging from light to dark green and nuances in beige-cream-bone colors were obtained (Şanlı and Arlı, 2007).

Punicaceae; It is commonly grown in the Mediterranean, Aegean, and Southeast Anatolia regions of Türkiye. The fruit and bark of punica granatum L. are used for dyeing (Yılmaz, 2020b). Red-yellow and black color tones are obtained (Korur, 1937; Harmancıoğlu, 1955; Baykara, 1964; Uslu, 1982; Enez, 1984; Anonymous, 1991). Although punica granatum L originates from the Middle East, it is grown in Mediterranean region, China, India, and Northwestern United States, and it generally thrives in temperate climates(Karadağ, 2007; Lansky and Newman, 2007). Punica granatum L. is rich in tannins (Saad et al., 2010; Şanlı, 2011) and tannins and flavonols are the main coloring compounds in punica granatum L. (Tiwari et al., 2010). Studies on dyeing using punica granatum can be found in the literature. For example, Tiwari et al. reported the usability of punica granatum in cotton dyeing for its antimicrobial activity, without using mordant substances (Tiwari et al., 2010). Benli and Bahtiyari (2016), reported that previously extracted punica granatum be used to color bleached cotton fabrics without using mordants in their study conducted in 2016. Shams-Nateri et al. reported the use of punica granatum L. and reseda luteal L. in dyeing polyamide fabrics in their study in 2014 (Shams-Nateri et al., 2014).

When wool fibers and fabrics are dyed with punica granatum L. in the presence of different mordant substances, mustard-yellow and light brown colors are obtained in mordant-free dyeing, while yellow, khaki, light brown, and brown tones are obtained depending on the type of mordant in mordanted dyeing (Özgür et al., 2012; Tutak et al., 2014a).

Asteraceae; It is the largest family of flowering plants. There are many subspecies in Türkiye. The dye source of the plant is the flower heads (Gönüz et al., 2006). Species such as Anthemis chia L., Artemisia vulgaris L., Chrysanthemum segetum L., Cirsium arvense L. Scop., Helichrysum stoechas L. subs., Solidago virgaurea, Sonchus arvensis L., Inula viscosa L. Aiton., Tussilago farfara L., and Carthamus tinctorius are commonly used to produce various shades of yellow (Enez, 1984; Oğuz and Yayıntaş, 1987; Uysal, 1991). Artemisia vulgaris L., senecio vulgaris L., sonchus asper L., on the other hand, yield green, dark brown, and blackish colors (Macintyre, 1999; Ala and Bakıcı, 2020). Karadağ and Yıldız (2022), examined the dyeing behavior of organic cotton fabrics using yarrow species (Achillea biebersteinii and Achillea millefolium). The study offered insight into the tonal variation and fastness properties achieved through these Asteraceae family plants.

Araliaceae; It naturally grows in Europe and East Asia. Colors are obtained from the fruits, flowers, and leaves of hedera helix L. plant. Pale pink color is obtained from the fruits, yellow from the flowers, and grayish green from the leaves (Grierson, 1989).

Taxaceae; It is Türkiye's oldest tree and the world's fifth oldest tree. Taxus baccata L. is endangered in Türkiye and it is quite difficult to grow it from seeds. Pale orange color is obtained from the leaves and inner wood, while light rose and reddish-brown tones are obtained from the slender branches and bark (Eyüboğlu et al., 1983; Grierson, 1989).

Plumbago Europaea; It is cultivated in coastal regions where the Mediterranean climate is present. Plumbago europaea holds an important place among natural dyes. In dyeing, the entire plant (roots, stems, leaves, flowers) is generally used, resulting in yellow tones (Şanlı, 2011). In a dyeing experiment where Şanlı and Arlı (2007), dyed silk thread and fabric with five different mordant substances, beige, earth, mustard, and brown tones were obtained using Plumbago europaea.

Cupressaceae; It is commonly grown in the eastern part of Türkiye. Juniperus communis L. plant belongs to this group. When the plant's fruits are used for dyeing, yellow color is obtained, while the red and brown tones are obtained from the bark and slender branches (Rodale's, 1987; Grierson, 1989).

Scrophuladaceae; It has been observed in the high mountains of the Aegean region in Türkiye. The above-ground parts of Digitalis purpurea L., Verbascum orientale Bieb., and Verbascum xanthophoeniceum L. are used in dyeing. Yellowish-green colors are obtained (Karadağ, 2007; Uysal, 1991). In a dyeing experiment where Şanlı and Arlı (2007), dyed silk thread and fabric with five different mordant substances, yellow, earth, cream, mustard, and khaki tones were obtained using verbascum orientale Bieb. plant.

Euphorbiaceae; It is primarily grown in regions with continental climate conditions (Park, 2023). Euphorbia rigida Bieb. and mercurialis perennis L. plants belong to this group (Genç, 2022). The entire

euphorbia rigida Bieb. plant is used for dyeing, resulting in yellow color (Yazıcıoğlu and Şanlı, 1999; Yazıcıoğlu et al., 1999; Şanlı and Yazıcıoğlu, 2003). For dyeing with mercurialis perennis L., the above-ground parts of the plant are used, resulting in yellow tones (Etikan and Ölmez, 2014).

Anacardiaceae; It grows in more than 40 regions in Türkiye. The Pistacia palaestina boiss plant is typically used for dyeing its leaves, resulting in yellow, gray, and purple tones (Eyüboğlu et al., 1983; Karadağ, 2007). Rhus coriaria L. is used for dyeing its fruits and leaves, resulting in black tones (Anonymous, 1991; Şanlı, 2011). In a recent study, Benli (2024) investigated the potential of pistachio tree branches, a biowaste source, for sustainable dyeing of wool fabrics. The findings demonstrated that Pistacia vera L. can provide effective and eco-friendly coloration, contributing to circular economy practices in the textile sector.

Liliaceae; It is a group with 44 genera in Türkiye. Allium cepa L. belongs to this group. The outer dry skins of the onion are used as a dye source. Generally, yellow tones are obtained (Enez, 1984; Gönüz et al., 2006; Şanlı, 2011). In the literature, it is possible to come across different materials instead of fabrics such as wool, silk and cotton, which are frequently used in natural dyeing (Karadağ, 2007). Önem et al. (2012), dyed leather with onion tuber outer skin. With 3 different mordants and without mordant, colors shifting from ashy yellow to brown were obtained. Özen and Erdem İşmal (2023), dyed lyocell fabric, a man-made fiber based on regenerated cellulose. Lyocell fabric was dyed using onion peel and pre-mordanted with alum, iron(II) sulfate, and copper(II) sulfate. This process resulted in a diverse color palette, including yellow-orange tones, beige and its variations, light pink, dusty rose, olive green, brown, earthy shades, and cumin tones.

Oleaceae; Olea europaea L. and olive oil production is widespread in Türkiye. This group includes Ligustrum vulgare L., Fraxinus excelsior L., Phillyrea latifolia L. and Olea europaea L., The flowers, leaves, and bark of Fraxinus excelsior are used in dyeing, producing yellow-green hues (Grierson, 1989). The fruits of ligustrum vulgare are used for dyeing, resulting in blue and turquoise tones (Adrosko, 1971; Anonymous, 1971/72/73).

The characteristics of all these textile dye source plants cultivated in Turkey are summarized in Table 1.

Table 1. Natural dye plants in Türkiye

Plant Family	*Plant*	*Dye Source*	*Geographical Source*	*Colors Obtained*	*References*
Aceraceae	Acer platanoides L.	Trunk, branches, bark and dried fruits	Çanakkale	Yellow and brown tones	Adrosko, 1971; Wigginton, 1973; Grierson, 1989; Anonymous, 1991
Saliaceae	Salix alba L.	Leaves	Çanakkale	Yellow, brown and black tones	Grierson, 1989; Anonymous, 1991; Gönüz et al., 2006
Vitis vinifera L.	Vitis vinifera L.	Leaves	Aegean Region	Mustard, dark cream, light khaki, and light yellow	Bayatlı, 1957; Gönüz et al., 2006; Şanlı and Arlı, 2007; Şanlı, 2011
Fabaceae	Cercis siliquastrum L.	Bark	Aegean and Mediterranean coasts	Light brown	Baylav, 1963; Grierson, 1989
Lamiaceae	Mentha pulegium L. and salvia officinalis L.	Whole plant	Europe, Asia and Northern Europe	Yellow, green gray and black green tones	Harmancıoğlu, 1955; Korur, 1937; Uslu, 1982; Şanlı, 2001; Şanlı and Arlı, 2007
Hypericaceae	Hypericum calycinum L.	Flowering above-ground parts	Various regions of Türkiye	Yellow, green, red and black tones	Baykara, 1964; Uslu, 1982; Rodales, 1987; Anonymous, 1991; Öztürk and Aksoy, 2000
Walnut	Juglans regia L.	Leaves and outer stem shells	Every region of Türkiye	Brown shades	Öztürk, 1982; Gönüz et al., 2006; Karadağ, 2007; Etikan and Ölmez, 2014; Şanlı et al., 2014; Doty et al., 2016
Pinaceae	Pinus brutia Ten.	Cones and bark	Western Anatolia of Türkiye	Reddish yellow and pale red	Uslu, 1982; Duran, 1992; Avinç et al., 2013; Pars, 2024
Isatis tinctoria	Indigo	Roots	Eastern and southern Anatolia	Indigo blue	Karadağ, 2007; Şanlı et al., 2014; Yılmaz, 2020a; Mocquard et al., 2022
Polygonaceae	Polygonum belardii L., Rumex acetosella L., and Rumex crispus L.	The above-ground parts	Yozgat, Sivas, Amasya, Tokat, Kayseri and Gümüşhane	Pistachio greenish yellow	Korur, 1937; Anonymous, 1947; Grierson, 1989; Karadağ, 2007; Şanlı, 2001
Morus Alba L.	Morus Alba L.	Leaves	Malatya	Yellow	Gönüz et al., 2006
Polypodiaceae	Polypodium vulgare L. and pteridium aquilinum (L.) Kuhn	The above-ground parts	Central Anatolia in Türkiye	Yellow and nephti green tones	Grierson, 1989
Ericaceae	Arbutus andrachne L.	Leaves and thin branches	Temperate regions of Türkiye	Yellow, green, and muted orange shades	Uğur, 1988; Grierson, 1989; Anonymous, 1991
Papaveraceae	Papaver rhoeas L.	The petals	Many regions of Anatolia	Gray tones	Uslu, 1982
Rosaceae	Crataegus monogyna Jacq., Malus sylvestris L. Mill., Prunus amygdalus L., Prunus avium L., Prunus spinosa L., Pyrus cydonia L., and Sorbus aucuparia L.	The stem bark, flowers and fruits	High mountainous regions around Samsun, Giresun, Trabzon, Rize, Ordu and Artv	Yellow-rose tones, Khaki and brown tones,	Korur, 1937; Anonymous, 1971/72/73; Eyüboğlu et al., 1983; Öztürk, 1988; Grierson, 1989; Gündüz, 1993; Etikan and Ölmez, 2014;
Berberidaceae	Berberis vulgaris L.	The roots, wood, shoots, bark and fruits	Many regions of Anatolia	Yellow tones	Şanlı, 2011, Yaldızbaş, 2020
Alcanna tinctoria	Alcanna tinctoria	The roots	Eskişehir, Ankara, Ürgüp, Kayseri and Divriği	dark brown, red - purple, brown colors	Karamanoğlu, 1977; Kayabaşı et al., 1999; Rekaby et al., 2009; Güngörmez, 2015; Yılmaz and Bahtiyari, 2017; Akan and Balos, 2021;
Betulaceae	Alnus glutinosa mill.	The bark	All lands of Türkiye	Yellow, brown and black color	Harmancıoğlu, 1955; Adrosko, 1971; Grierson, 1989
Urticaceae	Urtica dioica L.	The aerial parts of the plant	Western Black Sea and Marmara region	Yellow and olive tones	Karadağ, 2007

Leguminosae	Genista tinctoria L. and Spartium junceum L.	Flowers, stems and young shoots	Various regions of Türkiye	Yellow	Anonymous, 1947; Karadağ, 2007
Fagaceae	Quercus cerris L., Quercus infectoria Oliv., Quercus petraea Lieb., and Quercus robur L.	The leaves, bark, and fruits	Temperate forests across Europe and Asia	The shades of brown and black	Eyüboğlu et al., 1983; Şanlı et al., 2014; Şanlı et al., 2014
Rubiaceae	Galium aparine L., Galium verum L., Rubia tinctorum L., and Sherardia arvensis L.	The roots	Antalya region	Diverse range of colors	Eşberk, 1947; Thompson,1986; Aytaç, 1999; Kayabaşı and Dellal, 2006; Torgan, 2008; Erkan et al., 2010; Deveoğlu et al., 2012a; Genç, 2014; Özgüney et al., 2015; Özer et al., 2016; Yılmaz and Bahtiyari, 2017; Genç, 2017; Genç, 2022; Kabaalioğlu, 2022.
Malvacea	Malva sylvestris L., Eucalyptus camaldulensis Dehn., and Myrtus communis L.	Leaves and bark of plants	Black Sea, Aegean, Marmara and Antalya regions	Green and brown tones	Korur, 1937; Eyüboğlu et al., 1983; Öztürk, 1997; Yılmaz, 2020b; Ömeroğulları Başyiğit et al.,2023
Verbenaceae	Vitex agnus-castus L.	Roots, leaves and young branches	Antalya, Bursa, Çanakkale, Trabzon, Giresun, Muğla, Zonguldak, Mersin, Adana, and Hatay	Yellow colors	Eşberk, 1939; Uslu, 1982; Enez, 1984; Karadağ, 2007; Şanlı, 2011
Adoxaceae	Sambucus ebulus	The roots	Coasts of the Black Sea and the northern regions of the Aegean	Shades ranging from light to dark green, nuances in beige-cream-bone	Şanlı and Arlı, 2007; Canbolat et al., 2013
Punicaceae	punica granatum L.	The fruit and bark	Mediterranean, Aegean, and Southeast Anatolia regions of Türkiye	Red-yellow and black color tones	Korur, 1937; Harmancıoğlu, 1955; Baykara, 1964; Uslu, 1982; Enez, 1984; Anonymous, 1991; Lansky and Newman, 2007; Saad et al., 2010; Tiwari et al., 2010; Şanlı, 2011;Özgür et al., 2012; Tutak et al., 2014a Shams-Nateri et al. , 2014; Yılmaz, 2020b
Asteraceae	Anthemis chia L., Artemisia vulgaris L., Chrysanthemum segetum L.	The flower heads	Many subspecies in Türkiye	Green, dark brown, and blackish colors	Enez, 1984; Oğuz and Yayıntaş, 1987; Uysal, 1991; Macintyre, 1999; Gönüz et al., 2006; Ala and Bakıcı, 2020
Araliaceae	Hedera helix L.	Fruits, flowers, and leaves	Europe and East Asia	Pale pink colors	Grierson, 1989
Taxaceae	Taxus baccata L.	Leaves and inner woods	Various regions of Türkiye	Pale orange color	Eyüboğlu et al., 1983; Grierson, 1989
Plumbago Europaea	Plumbago Europaea	Entire plant (roots, stems, leaves, flowers)	Coastal regions where the Mediterranean climate	Yellow tones, beige, earth, mustard, and brown tones	Şanlı and Arlı, 2007; Şanlı, 2011
Cupressaceae	Juniperus communis L.	Fruits, bark and slender branches	Eastern part of Türkiye	Yellow, red and brown tones	Rodale's, 1987; Grierson, 1989
Scrophuladaceae	Digitalis purpurea L., Verbascum orientale Bieb.	The above-ground parts	Aegean region in Türkiye	Yellowish-green colors	Uysal, 1991 Şanlı and Arlı, 2007
Euphorbiaceae	Euphorbia rigida Bieb. and mercurialis perennis L.	The above-ground parts	Continental climate conditions	Yellow color	Yazıcıoğlu et al., 1999; Yazıcıoğlu and Şanlı, 1999; Şanlı and Yazıcıoğlu, 2003; Etikan and Ölmez, 2014; Genç, 2022; Park, 2023
Anacardiaceae	Pistacia palaestina boiss, Rhus coriaria L.	Leaves, Fruits	Grows in more than 40 regions in Türkiye	Yellow, gray, and purple tones	Eyüboğlu et al., 1983; Anonymous, 1991; Karadağ, 2007; Şanlı, 2011; Benli, 2024

Liliaceae	Allium cepa L.	The outer dry skins of the onion	Grows in 44 regions in Türkiye	Yellow tones	Enez, 1984; Gönüz et al., 2006; Şanlı, 2011; Önem et al., 2012; Özen and Erdem İşmal, 2023
Oleaceae	Olea europaea L., Ligustrum vulgare L., Fraxinus excelsior L.	The flowers, leaves, and bark	Widespread in Türkiye	Yellow-green hues	Adrosko, 1971; Anonymous, 1971/72/73; Grierson, 1989;

3. Plant And Animal-Based Colorants and Their Natural Sources

While Section 2 focuses on plant-derived dyestuffs cultivated in Türkiye and their practical dyeing studies, this section highlights additional colorants obtained from both plant and animal origins, emphasizing their natural sources and chromophoric characteristics.

a) Blue Colorants

Indigo is the primary coloring agent in this group, which is plant-based and has the chemical formula $C_{16}H_{10}N_2O_2$. The most commonly used substance in this group is Isatis tinctoria (Çırak, 1991; Şanlı et al., 2014; Mocquard et al., 2022). It grows all over Anatolia. Other blue colorants are derived from Isatis crymbosa and Isatis tomentella, which belong to the same family. These plants grow in eastern Anatolia and the southern coasts (Teker, 2016; Begiç and Oğuz, 2022). Indigo has been used to dye not only cellulose and protein-based textile materials but also wood materials, yielding good results (Okca, 2017).

b) Red Colorants

There are dyestuffs of animal and vegetable origin. The purple color produced from animal origin murex trunculus (Pelagia) or murex brandaris (purpura) has historically been a symbol of nobility as it was used only by wealthy nobles. The source of the dyestuff is the shells of the Mediterranean and Marmara coasts. A bright red color is also obtained from the animal named Cochineal (Dactylopius coccus costa). It was the primary source of red dye used in the Ottoman Empire. It can be said to originate from the Canary Islands. Lakshadia red is also obtained from an animal called Tachardia Laccifer. This dyestuff, a derivative of lactic acid, is sourced from the Far East, mostly from India. Kermes red is obtained from the animal called Kermes ilicis, Kermes Vermilio, Plank. These insect-like animals live on the Mediterranean coast. This source of dyestuff is famous under the name "Vermeio". It is the typical red color used in the trousers of British and Hungarian soldiers.

Rubia tinctorium and rubia peregrina are the leading plant-based red dyestuffs. Rubia Tinctorium was found to contain pseudopurpurin, alizarin, purpurin, munjistin and rubiadin (Gündüz, 1993; Pereira et al., 2014). The Turkish name of Rubia tinctorium is red root or sticky herb. It is used to obtain bright red color (Şanlı et al., 2014). It is obtained from central and western Anatolia. Carthamus Tinctorius is used to obtain red and yellow color (Karadağ, 2007; Şanlı, 2011). The obtaining process is quite complicated and difficult. These colors were mostly used in the clothes of sultans. In Anatolia, especially the yarn coloring of carpets produced from wool yarns is made with natural vegetable dyestuffs. In many regions of Anatolia, especially in Uşak province, carpet making is a field that has made itself known to

the world and all yarns are dyed with natural resources. The most commonly used vegetable dyeing sources are alizarin, purpurin, sulfuretin, indigotin, datisetin, rubiadin (Balakina et al., 2006; Ahn et al., 2014; Soysaldı et al., 2023). Eyüpoğlu et al. employed artificial neural networks (ANN) to predict the dyeing outcomes of air plasma-treated wool fabrics dyed with Rubia tinctorum L. The integration of AI-based models into traditional dyeing studies offers new perspectives on process optimization (Eyüpoğlu et al., 2024a).

c) Yellow Colorants

There are plenty of plants in Anatolia for the production of yellow dyestuffs. Although yellow colors contain quercetin and myricetin, the source is mostly the rhus coriaria plant. Cotinus caggrygria, also known as yellow paint tree in Turkish, gives colors from orange to yellow to brown (Şanlı et al., 2014). It contains fisetin as the coloring group. It is a Mediterranean plant and can be easily found in Anatolia. During the First World War, the tents and uniforms of the Turkish armies were dyed with this color. Reseda Luteola is used to obtain the bright yellow color. The coloring compounds are luteolin and apigenin. This plant is found in all regions of Anatolia except the highlands of western Anatolia. Salvia triloba, also known as sage in Turkish, grows in western and southern Anatolia, which has a relatively warm climate. Salvia is used to obtain a bright yellow color, although not as much as Reseda Luteola. Quercetin is obtained in many places in central Anatolia. Quercetin is the name of the coloring component. It is very difficult to identify the plant source because 20 plant species can give the same response. Euphorbia biglandula is also used for yellow coloring processes (Karadağ, 2007). Alimum cepa, or onion, is also used to obtain yellow, beige, red and brown tones and is widely grown in Anatolia (Onal et al., 2018). The coloring group of Hypreicum empetrifolium plant is quercetin. This small plant is common along the coasts of western and southern Anatolia. Pistacia palaestina, also known as mastic tree is also used to obtain yellow color. Its coloring compounds are rhamnetin, emodin, quercetin, rhamnazin and kaempferol. Pistacia palastina is found as a tree and shrub in Central Anatolia (Şanlı et al., 2014). However, Pistacia teresindus grows only in Northwest Anatolia. Other plants used to obtain yellow color are Rumex, Erica ardbrea, Bupleurum family, Rhus coriaria. Rhus coriaria is used to produce yellow, brown, and black dyes, with its coloring compounds primarily consisting of quercetin, myricetin, and tannins. These plants are usually grown in the central and eastern regions of Anatolia. Inula viscosa contains the coloring compounds quercetin and possibly rhamnettin and emotin. Rhamus Petiolaris is used in colors ranging from dark yellow to orange, brown, yellow to green (Genç, 2014; Begiç and Oğuz, 2022). Its coloring compounds are rhamnetin, emodin, quercetin, rhamnezin and kaempferol. This plant is generally found in Anatolia at altitudes of 1000-3000 meters. Anthemis tinctoria contains the coloring compounds isorhamnetin, myricetin, quercetin and is cultivated in all regions of Anatolia where daisies grow. Anthemis chia is also a white chamomile plant, cultivated in western Anatolia and different from normal chamomile. The coloring compounds are apigenin, possibly a little luteolin and quercetin. Apigenin is used either directly or mixed with rubia tinctorium (to obtain red color) (Şanlı, 2011). Matrcaria Chamonilla is also used to obtain yellow color. The coloring groups

of this plant include apigenin, luteolin and quercetin. The dyeing group of Frangula Alnus, contains emodin, and the yellow color turns into orange with alum. When mixed with indigo, it turns green, and when mixed with cochineal, it turns red orangey. The coloring compounds of Crocus Sativus are crocin (crocetin). It is a plant known for 3500 years in many places in Anatolia. It is also known as "golden plant". Berberis Crataegina (Berberis Vulgaris) is cultivated in different ceremonies of Anatolia (Karadağ, 2007). It contains berberine compounds and is used to obtain yellow brown tones (Ke et al., 2006; Ahn et al., 2014). The dyeing compounds of Datisca Cannabina are datiscetin, quercetin and rhamnazin. It is used to obtain a bright yellow color. Datisca cannabina is known from the Black Sea coast, western parts of Anatolia and many other regions. Punica granatus, pomegranate tree and curcuma longa / curcuma rotunda, turmeric plant are other herbal sources used to obtain yellow color (Al Sarhan and Salem, 2018).

d) Violet Colorants

In the red/blue mixture, it is known that red is used from alizarin and blue from pseudopurpurin. Investigations have shown that violet is mainly obtained with vegetable dye and ferrous mordant (Harbelioğ, 2011). Different shades were obtained by mixing alum ($KAl(SO_4)_2$), cream tartar ($KC_4H_5O_6$), iron sulphat ($FeSO_4.\ 7H_2O$) with cochineal or vegetable dyestuffs in different ratios.

e) Orange Colorants

Orange tones, were obtained by mixing with quercetin or apigenin. Lawsonia enermis, henna in Turkish, is used to obtain orange tones (Rahman Bhuiyan et al., 2018). The coloring components of henna are lawson and luteolin (Zhang et al., 2008).

f) Green Colorants

Examination of most greens revealed that they were obtained by mixing indigo or coppery mordant with vegetable yellow dyestuff (Harbelioğ, 2011). Analysis of handmade products from Eastern Anatolia showed that copper mordant was used to obtain green shades. The technique probably used for green dyeing was the application of indigo with a mixture of quercetin, luteolin and rhamnus petioralis. Indigo sulfonic acid-emodin combinations have also been applied.

g) Brown Colorants

The best-known source of brown dyes is walnut shells. Juglas Regia, i.e. walnut, contains juglone as a dyeing group and is grown in many places in Türkiye. In dyeing polyester fabric, the highest color values are achieved with the mordanting technique applied during dyeing. Light brown tones are achieved through pre-mordanting, whereas dark brown shades can be obtained using simultaneous mordanting during the dyeing process (Eser et al., 2016).

h) Black Colorants

Dyestuffs are obtained by the reaction of quernus cerris L., quernus infectoria oliv., quernus robur L., Rhus coriaria L. or Punica granatum L. with iron sulfate mordant (Güngörmez, 2015; Yılmaz, 2020a). The dyeing groups in Quercus rubra are tannic acid and ellagic acid (Karadağ, 2007; Etikan and Ölmez, 2014). The fruits of the tree are used for black dyeing in Anatolia (Genç, 2022).

4. Chemical Structures of Colorants

In this review, each natural dyestuff described in Section 2 is directly associated with its main chromophoric compounds. For instance, *Rubia tinctorum L.* contains alizarin ($C_{14}H_8O_4$) and purpurin ($C_{14}H_8O_5$), *Isatis tinctoria L.* provides indigotin ($C_{16}H_{10}N_2O_2$), *Juglans regia L.* yields juglone ($C_{10}H_6O_3$), and *Curcuma longa L.* includes curcumin ($C_{21}H_{20}O_6$). These chemical structures are explained in detail in Section 4, together with their color-imparting mechanisms.

4.1 Flavonoids: This group is responsible for imparting a yellow hue to plants. It includes several subgroups such as flavonols, flavones, flavanones, and isoflavonoids. Among these, flavones and flavonols are particularly significant as they represent one of the most important classes of phenolic compounds (Meryemoğlu, 2018). The most notable yellow dye within this category is luteolin, recognized as the oldest European dye. Historically, dye plants containing flavonoids have been widely used for producing yellow hues in ancient and historical textiles. Today, flavonoids are being reintroduced as sustainable, non-toxic, and eco-friendly textile dyes. Beyond their application in textiles, flavonoids serve various medicinal purposes, including anti-inflammatory, antiallergic, tumor-preventive, antiviral, antidiabetic, vascular-protective, antioxidant, antimicrobial, and enzyme-inhibiting functions (Deveoğlu, 2018).

Flavonoids have existed in nature since ancient times, with their name derived from the Greek word "flava," meaning yellow. These compounds are applied to textile materials using mordants, producing a spectrum of colors ranging from yellow to greenish-yellow and brown. First appearing in green algae approximately 500 million years ago, flavonoids are among the most important natural sources of dyes and pigments. It is estimated that over 4,000 flavonoids exist in nature. The chemical structures of luteolin and flavonoids are illustrated in Figure 1 (Deveoğlu and Karadağ, 2019).

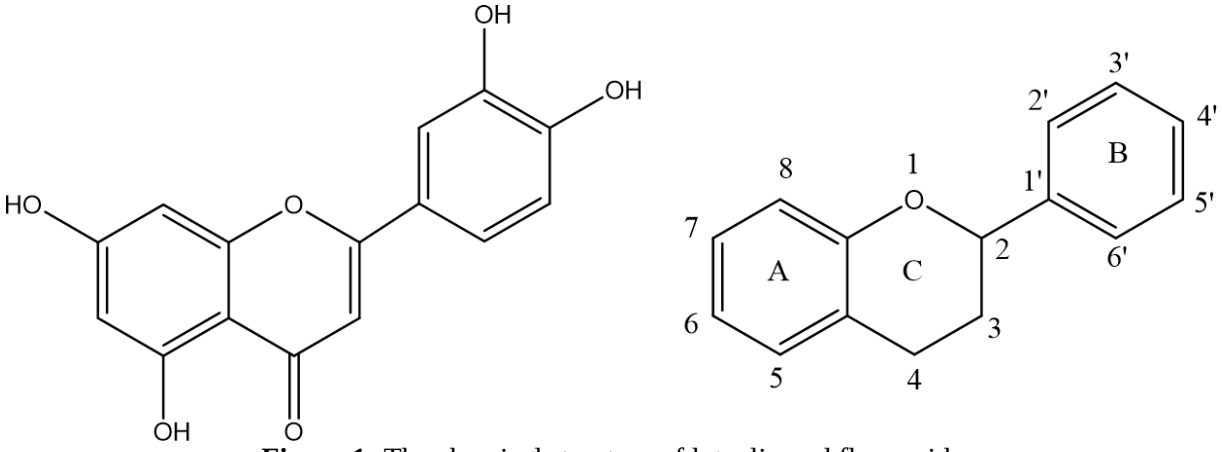


Figure 1- The chemical structure of luteolin and flavonoids

Flavonoids are not exclusive to plants; they are also found in non-plant sources. For instance, these compounds are present in the wings and bodies of butterflies from the Satyridae, Lycaenidae, and Papilionidae families (Deveoğlu and Karadağ, 2011). Additionally, the only known mammalian source of flavonoids comes from the scent glands of the Canadian beaver, which produces 4'-methoxyflavanone.

In plants, most flavonoids exist in the form of glycosides. During the natural dyeing process, these compounds typically break down into an aglycone and a sugar. The fundamental structure of flavonoids is flavone, a naturally colorless compound (Acar, 2013).

Flavones and flavonols (3-hydroxyflavones) serve as the primary chromophores responsible for the yellow color of flavonoids. It is estimated that flavonoids account for at least 50% of all natural dyes used in textile coloring (Deveoğlu and Karadağ, 2019). These compounds are highly soluble in water, making them versatile for dyeing applications.

Some of the most commonly used flavonoid-containing plants in textile dyeing include Reseda luteola L., Allium cepa L., Cotinus coggygria Scop., Rhamnus petiolaris, and Genista tinctoria L. (Arık et al., 2012).

Subclasses of flavonoids;

a)Flavones; Flavones lack a 3-hydroxyl group on the carbon ring, a feature that distinguishes them from flavonols. Among naturally occurring flavonoids, flavones are the most widely distributed in plants. These compounds are colorless, insoluble in water, and have a melting point of 100°C. Flavanones are derived from flavones through structural modifications. Flavones play a key role in producing ivory and yellow hues in plants and flowers. Luteolin, the most significant flavone, is predominantly found in vegetables such as artichokes, basil, celery, and parsley. The chemical structure of flavones is illustrated in Figure 2. In addition to its role as a natural yellow dye, luteolin is also known for its anti-inflammatory properties (Acar, 2013).

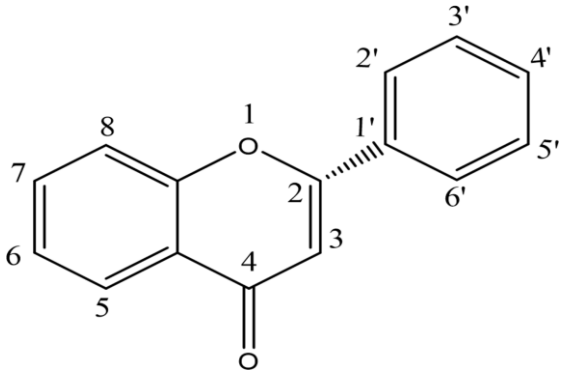


Figure 2- The chemical structure of flavones

b)Flavonols; Flavonols are a subclass of flavonoids known for their antioxidant properties and include compounds such as quercetin, kaempferol, rhamnetin, morin, myricetin, and fisetin. Quercetin, a well-known flavonol dye, was first isolated from Quercus rubra, while the yellow pigment found in the wings of the Melanargea gelatea butterfly also belongs to this class.

Among flavonols, kaempferol, quercetin, myricetin, and fisetin have been the most extensively studied. The earliest known flavonol-based dye is believed to have been derived from Tamarix sp. species. Flavonols are widely present in various foods, including onions, cabbage, broccoli, apples, cherries, mulberries, tea, and red wine (Deveoğlu and Karadağ, 2011; Deveoğlu and Karadağ, 2019). The chemical structure of flavonols is illustrated in Figure 3.

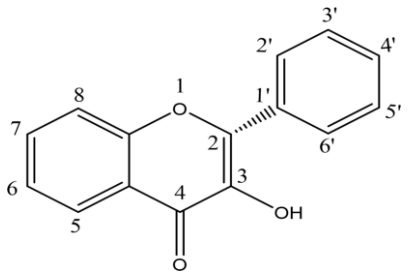


Figure 3- The chemical structure of flavonols

c)Flavanones; Flavanones are characterized by the absence of a double bond between positions 2 and 3 and possess a chiral center at position 2 (Deveoğlu and Karadağ, 2011; Deveoğlu and Karadağ, 2019). These compounds, including hesperidin and eriocitrine, are commonly found in linden tea and lemon. Flavanones are highly reactive and readily undergo hydroxylation, glycosylation, and methylation reactions. They are particularly abundant in citrus peels, where they occur in high concentrations. The chemical structure of flavanones is illustrated in Figure 4.

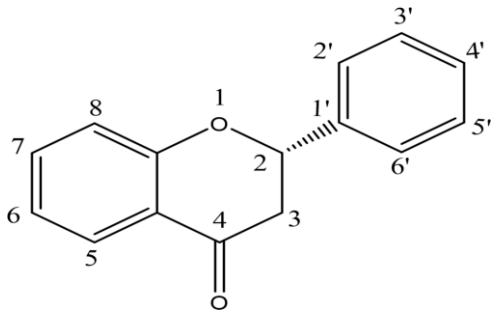


Figure 4- The chemical structure of flavanones

d)Isoflavonoids; Isoflavonoids are structurally distinct from other flavonoid classes due to their binding to the carbon atom at the 3rd position of the B-ring. These compounds are known for their potential antibacterial activity, and some have also been identified in microbial sources. More than 300 plant species contain isoflavones, which are primarily localized in roots and seeds. However, isoflavone synthesis is exclusive to legumes, particularly soybeans. From a pharmacological perspective, legumes are considered rich sources of isoflavonoids (Acar, 2013). Compared to flavones and flavonols, isoflavonoids are present in lower concentrations in nature. The chemical structure of isoflavonoids is illustrated in Figure 5.

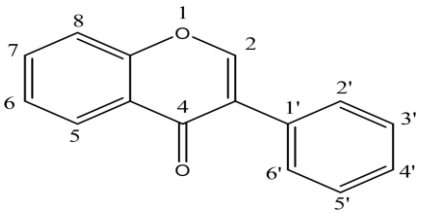


Figure 5- The chemical structure of isoflavonoids

e)Anthocyanidins; Anthocyanidins, a subclass of flavonoids, are responsible for the red, purple, and blue hues observed in various plant-based dyes. In Greek, "antho" means flower and "kyanos" means blue. Anthocyanins are used to obtain red, purple and blue colors (Benli et al., 2012). Anthocyanidins

are the basic structures of anthocyanins. These compounds (or aglycones) consist of an aromatic ring (A) attached to an oxygen-containing heterocyclic ring (C) connected to an aromatic (B) ring via a C-C bond. If they are found in glycoside forms (attached to a sugar moiety), they are known as anthocyanins (Deveoğlu, 2018). Teas, honey, fruits, vegetables, nuts, olive oil, cocoa and grains contain anthocyanidins. Anthocyanins extracted from black carrot (Daucus carota L.) have also been explored as sustainable dye sources. Pars and Karadağ (2024) successfully applied these pigments on cellulosic-based fabrics, showing promising results in terms of color yield and eco-friendliness (Pars and Karadağ, 2024). More than 500 different anthocyanidins are known and described in the literature. The chemical structure of anthocyanidins is given in Figure 6.

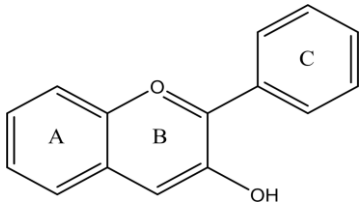


Figure 6- The chemical structure of anthocyanidins

f)Proanthocyanidins: Proanthocyanidins are oligomers or polymers composed of multiple anthocyanidin-like structures (Figure 7). Proanthocyanidins are also called "condensed tannins". The degree of polymerization can range from 2 to 48 units. Apple, cocoa, grape (Vitis vinifera L.), beans, apricot (Armeniaca vulgaris Lam.), cherry (Prunus avium), peach, red wine, green tea (Camellia sinersis), black tea, blackberry (Rubus caesius) and its Many products such as contain proanthocyanidins (Acar, 2013).

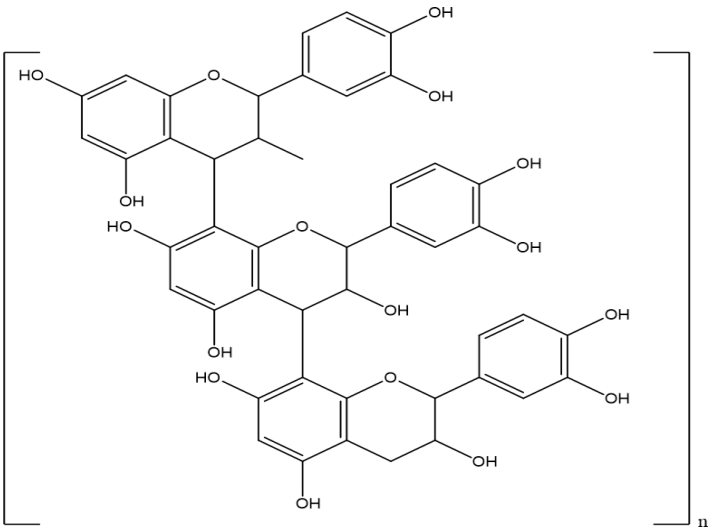


Figure 7- The chemical structure of proanthocyanidins

g) Flavanols: There are plenty of flavanols in grapes and wine. Flavanols are found in grapes in both the seed and skin. Since flavanols form proanthocyanins, they have become an important center of

attraction in recent years (Deveoğlu and Karadağ, 2011). Structurally, flavanols are the most complex subclass of flavonoids. Their chemical structure is illustrated in Figure 8.

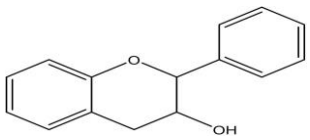


Figure 8- The chemical structure of flavanols

4.2 Quinones: Quinones represent the largest group of naturally occurring compounds with coloring properties. Their basic structure consists of an unsaturated cyclic ketone, derived from either a monocyclic or polycyclic aromatic compound (Deveoğlu and Karadağ, 2011). Structurally, quinones exhibit significant diversity and are classified into three main subgroups: benzoquinones, naphthoquinones, and anthraquinones (Figure 9). The fruits of Rhamnus petiolaris Boiss contain emodin, a naturally occurring anthraquinone. Anthraquinones form the largest subgroup of quinones, comprising over 170 identified natural compounds. Emodin has been detected in three major plant families: Fabaceae (*Cassia* species), Polygonaceae (*Rheum, Rumex,* and *Polygonum* species), and Rhamnaceae (*Rhamnus* and *Ventilago* species). Some quinones have been widely used as food colorants in industrial applications. Among the most significant industrial quinones are carminic acid, obtained from the Mexican cochineal insect (*Dactylopius coccus Costa*), and carmesic acid anthraquinones, derived from the lac bug (*Laccifer lacca Kerr*). Another important source of anthraquinones is the madder plant (*Rubia tinctorum L.*), which has historically been one of the most valuable natural dye sources (Torgan, 2008). To date, approximately 36 anthraquinones have been identified in *R. tinctorum* through various studies. Some of the most notable anthraquinone-based dyes include alizarin, pseudopurpurin, purpurin, munjistin, rubiadin, xanthopurpurin, purpuroxanthin, lucidin, chinizarin, christofin, and antragallol (Canikli, 1989). Recent research has increasingly focused on the use of traditional dyestuffs such as madder and gall oak not only for their historical value but also for their performance on modern textile materials. For example, Karadağ and Pars (2024) explored the physicochemical properties of warp knitted fabrics dyed with madder and gall oak, emphasizing their applicability in sportswear fabrics due to high color fastness and durable color depth. Their work reinforces the significance of integrating heritage dye sources into contemporary textile applications, which aligns with the current study's objective of highlighting dye plants cultivated in Türkiye and their technical dyeing potential.

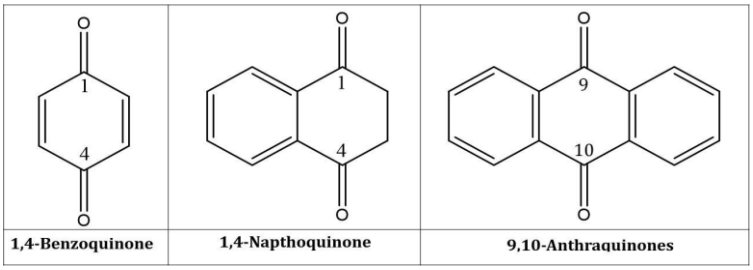


Figure 9- Structures of the quinnones

4.3 Indigoids: Indigo is a blue dye derived from the Indigofera tinctoria L. Plant, a tropical species native to India (Figure 10). Its molecular structure consists of an aromatic compound formed by the combination of two indoxyl molecules. The cultivation of indigo in India dates back approximately 4,000 years. Indigo was first exported to Europe as a pigment in the 12th century and was later introduced as a dyestuff by Marco Polo. By the late 12th century, it had gained popularity among Venetian dyers. In the 16th century, large quantities of indigo were imported to Europe at affordable prices, leading to its widespread use. When Isaac Newton analyzed the spectrum of sunlight in the late 17th century, he designated one of the seven colors as indigo. Several plant species are known to produce indigo dye. Among them, Isatis tinctoria L., commonly referred to as woad, has been utilized for centuries (Mocquard et al., 2022). This plant is native to both Europe and Anatolia, where it grows wild in Central and Western Anatolia. It was also cultivated in Anatolia in the past. Similar plants, Isatis crymbosa and Isatis tomentella, are found in southern and eastern Anatolia, Polygonum tinctoria in Japan and Korea, Eupatorium indigofera or Marsdenia tinctoria in Brazil and Malaysia. Indigo has been used not only in textile dyeing but also as a cosmetic, hemostatic, anti-inflammatory, anti-cancer and antiulcer since ancient times (Acar, 2013). There is a glycoside called "indican" formed by indoxyl with glucose in the leaves of the Indian indigo (Indigofera tinctoria) plant (Teker, 2016). Indoxyl formed from indican hydrolyzed by fermentation of leaves, is oxidized to indigo by air oxygen (Figure 10).

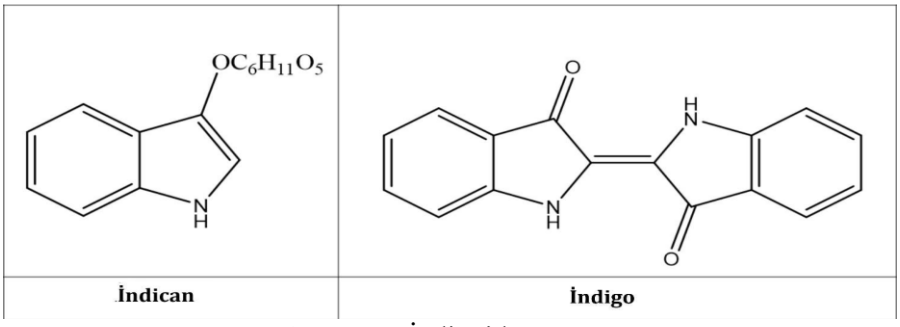


Figure 10- İndigoid structures

5. Mordanting in Natural Dyes

Substances used in the mordanting process are known as mordants. Mordants can be either naturally derived or synthetically produced compounds that serve to fix dyes to fibers, enhance their resistance to external factors, and expand the achievable range of color shades. Mordanting strengthens the affinity between the dye and the textile surface, resulting in more vibrant colors, improved fastness, and an expanded color spectrum. Mordants expand the color spectrum by forming coordination complexes between metal ions and dye molecules, which alter the electronic transitions within the chromophore structure. These variations in complex formation result in observable shifts in hue and color intensity on textile fibers. In addition to traditional metal mordants, recent studies have emphasized the use of bio-mordants, which are derived from natural, biodegradable sources such as plant tannins, organic acids,

and enzymes. These eco-friendly alternatives offer significant environmental and toxicological advantages over conventional metallic mordants (Adeel et al., 2009; Batool et al., 2021a).

Furthermore, the extraction and application of natural dyes have advanced considerably with the introduction of modern isolation techniques. Methods such as ultrasound-assisted extraction (UAE), microwave-assisted extraction (MAE), and supercritical fluid extraction (SFE) have proven to be more efficient, sustainable, and capable of preserving the bioactivity of dye compounds (Mia et al., 2019; Zuber et al., 2020). These innovations not only reduce solvent usage and time but also improve dye yield and quality.

The integration of bio-mordants with advanced colorant extraction and isolation techniques offers new opportunities for sustainable textile dyeing, improving dye–fiber affinity and reducing the need for synthetic metal salts.

The introduction of mordanting, likely in India around 2000 BC, significantly advanced dyeing techniques. This innovation allowed many coloring agents-previously ineffective-to be successfully applied to textiles (Tezcan and Suyunu, 1991). Beyond improving dye adherence, mordants also influence color variations. Depending on the type of mordant used, the same dye can darken, lighten, or undergo a complete shift in hue. The colorimetric properties of dyed fabrics are influenced by the chemical structure of both the mordant and the fiber, as well as by their ability—where applicable—to form coordination or hydrogen-bonding interactions with dye molecules. Mordanting enhances dyeing performance by improving color fastness properties such as washing, rubbing, and light fastness, as well as by increasing dye uptake and color uniformity across fibers.

Recent studies have shown that mordants play a significant role in forming coordination complexes with natural dyes and fibers, thus enhancing dye fixation and color fastness. The functional groups present in mordants, especially metal ions, form chelate bonds with the hydroxyl, carbonyl, or amino groups in dye molecules, which results in stronger fiber–dye bonding and improved durability of coloration. This interaction also influences the final hue and depth of the dye. As demonstrated by Batool et al. and Amin et al., the formation of metal–dye complexes not only improves wash and light fastness but also affects the antimicrobial and UV protective properties of the dyed textile (Batool et al., 2021b; Amin et al., 2023).

Among natural mordants, clay water and yeast are widely used to increase dye efficiency (Yaldızbaş, 2020). Other types of mordants, categorized by their composition and effects, are listed in Table 2.

Table 2. Natural and chemical mordants used in natural dyeing

Mordant type	***Chemical formula***	***References***
Alginate	$C_6H_7NaO_6$	Akyol and Yener, 2020
Alum	$KAl(SO_4)_2$	Canikli, 1989; Etikan and Arlı, 2001; Şanlı and Arlı, 2007; Erkan et al., 2010; Kamel et al., 2011; Deveoğlu et al., 2012b; Önem et al., 2012; Etikan and Ölmez, 2014; Şen et al., 2014; Indi et al., 2019; Jabar et al., 2020; Yılmaz, 2020c; Begiç and Oğuz, 2022; Gökbulut ve Kıcık, 2023; Kemer Gürsoy ve Şanlı, 2023; Tağı and Şengül Bekiroğlu, 2023.
Ammonia	NH_3	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998
Acetic Acid (Apple Vinegar)	CH_3COOH	Canikli, 1989; Coşkun ve Tağı, 2020.
Ascorbic Acid	$C_6H_8O_6$	Akyol and Yener, 2020; Eyüboğlu, 2020.
Copper acetate	$Cu(CH_3COO)_2$	Salimian et al., 2016.
Copper sulfate	$CuSO_4.5H_2O$	Kayabaşı et al., 1998**,** Etikan and Arlı, 2001; Kayabaşı and Dellal, 2006; Erkan et al., 2010; Önem et al., 2012; Salimian et al., 2016; Repon et al., 2017; Indi et al., 2019; Eyüboğlu, 2020; Yılmaz, 2020c; Oğuz, 2021.
Zinc chloride	$ZnCl_2$	Kamel et al., 2011; Yılmaz, 2020c.
Iron chloride	$FeCl_3$	Bechtold et al., 2007; Repon et al., 2017.
Iron sulphate	$FeSO_4.7H_2O$	Canikli, 1989; Grierson, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Kayabaşı and Dellal, 2006; Erkan et al., 2010; Kamel et al., 2011; Deveoğlu et al., 2012b; Önem et al., 2012; Canbolat et al., 2013; Tutak et al., 2014a; Tutak et al., 2014b; Salimian et al., 2016; Indi et al., 2019; Eyüboğlu, 2020; Yılmaz, 2020c; Begiç and Oğuz, 2022; Gökbulut ve Kıcık, 2023; Kemer Gürsoy ve Şanlı, 2023; Tağı and Şengül Bekiroğlu, 2023.
Calcium carbonate	$CaCO_3$	Akyol and Yener, 2020.
Calcium nitrate	$Ca(NO_3)_24H_2O$	Özer et al., 2016.
Calcium oxide	CaO	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998.
Tin chloride	$SnCl_2$	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Kamel et al., 2011; Deveoğlu et al., 2012b; Kumar et al., 2015; Salimian et al., 2016; Repon et al., 2017; Eyüboğlu, 2020; Yılmaz, 2020c; Oğuz, 2021.
Cream tartare	$KC_4H_5O_6$	Şanlı et al., 2014; Oğuz, 2021; Begiç and Oğuz, 2022; Tağı and Şengül Bekiroğlu, 2023.
Chrome screed	$KCr(SO_4)_2$	Kamel et al., 2011; Şanlı et al., 2014.
Lead Acetate	$Pb(CH_3COO)_2 .3H_2O$	Erkan et al., 2010.
Magnesium Chloride	$MgCl_2$	Akyol and Yener, 2020.
Nickel Sulfate	$NiSO_4 .6H_2O$	Erkan et al., 2010.
Oxalic acid	HOOCCOOH	Akan and Balos, 2021.
Potassium bichromate	$K_2 Cr_2 O_7$	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Kayabaşı and Dellal, 2006; Şanlı and Arlı, 2007; Erkan et al., 2010; Kamel et al., 2011; Deveoğlu et al., 2012b; Eyüboğlu, 2020; Yılmaz, 2020c; Oğuz, 2021; Tağı and Şengül Bekiroğlu, 2023; Kemer Gürsoy and Şanlı, 2023.
Potassium tartrate	$C_4H_4K_2O_6$	Tutak and Korkmaz, 2012.
Citric acid	$C_6H_8O_7$	Kayabaşı et al., 1998; Tutak and Korkmaz, 2012; Akyol and Yener, 2020.
Soda (sodium carbonate)	Na_2CO_3	Akyol and Yener, 2020; Genç, 2020.
Sodium chloride	Na Cl	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Şanlı and Arlı, 2007; Kamel et al., 2011.
Sodium nitrate	$NaNO_3$	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998
Sodium sulfate	Na_2SO_4	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Kamel et al., 2011;

		Genç, 2020.
Sodium sulfite	Na_2SO_3	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998
Sulfuric acid	H_2SO_4	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998
Wine stone	$KC_4H_5O_6$	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Hong, 2018.
Tannin	$C_{76}H_{52}O_{46}$	Canikli, 1989; Kayabaşı et al., 1998; Oğuz, 2021; Hong, 2018.
Tannic acid	$C_{76}H_{52}O_{46}$	Tutak et al., 2014a; Indi et al., 2019; Amin et al., 2023; Kemer Gürsoy ve Şanlı, 2023.
Tartaric acid	$C_4H_6O_6$	Kemer Gürsoy ve Şanlı, 2023.
Urea	CH_4N_2O	Akyol and Yener, 2020.

As it is seen as a result of different experiments, it is possible to obtain dyeing in different shades with different mordanting methods. These are as follows respectively;

Dyeing Without Mordant: The textile material is dyed using a natural dyestuff source under appropriate conditions, without the application of a mordant.

Pre-Mordanting: The textile material is first treated with a mordant before undergoing the dyeing process.

Co-Mordanting (Together): Textile material, dyestuff and mordant are all processed at the same time and dyeing is done.

Post-Dyeing (Final) Mordanting: After the textile material is dyed with natural dyestuff, the textile material is processed with mordant.

In natural dyeing, mordanting techniques enhance the dye's affinity for the textile material and improve color strength. Recent studies suggest that reusing the dye bath up to three times is a more sustainable and environmentally friendly practice, which is increasingly gaining popularity. The dye bath is not spilled, allowing for new dyeing processes and K/S values are halved after the 3rd time dye bath reuse (Deniz, 2019).

6. Fastness in Dyeing with Natural Dyestuffs

In dyeing with natural dyestuffs, it is generally known that fastnesses are lower when no mordant is used, therefore, as mentioned in the previous section, the fastness of textile materials can be increased with different mordants. In the fastness properties of raw materials such as cotton, wool, silk, tencel-lyocell, mohair, hemp dyed with natural dyes, light, washing, rubbing and perspiration fastnesses are generally evaluated.

Etikan and Arlı (2001), dyed wool yarns with serg plant using 3 different mordanting techniques (without mordant, pre-mordanting and simultaneous mordanting) and 10 different mordant types. When the fastness after dyeing was examined, the highest light fastness was obtained in the simultaneous mordanting technique with copper sulphate and it was measured around 5-6. Simultaneous mordanting refers to a one-bath process in which the mordant and the dye are applied together, allowing the fixation of the dye and mordant to occur at the same time. In other dyeing and mordanting techniques, light

fastness values were around 2-3. Rubbing fastness values were generally at acceptable levels in all 10 types of mordants and in all mordantless, pre-mordanting and simultaneous mordanting techniques.

When the fastnesses with and without mordant were compared, as a result of dyeing wool with root dye, it was observed that there was not much difference in light fastness and rubbing fastness. Dyes extracted from the roots of Rubia tinctorum L. (madder) were used to achieve reddish hues, with the dye-to-fiber ratio adjusted according to experimental parameters. When 3% copper sulphate - 50% root dye, 3% copper sulphate - 200% root dye and 3% iron sulphate - 100%, 200% root dye ratios were used, it was determined that the light fastness degrees of the colors obtained were very high (7-8). Rubbing fastness was generally low **(**Kayabaşı et al., 1998).

It is possible to reach leather dyeing with natural dyestuffs in the literature. In the leather dyeing process with onion tuber outer shell, the rubbing fastnesses were found to be 4-5 in the dyes with or without mordant. In general, dry rubbing fastnesses were higher than wet rubbing fastnesses. Sweat fastnesses were also around 4-5, while light fastnesses were low (2-3) (Önem et al., 2012).

Wool fiber can be dyed naturally using mint (mentha spicata L.) and thyme (thymus vulgaris L.) plants. While the light fastness values in dyeing without mordant were around 3-4, these values increased to 6 in dyeing with mordant. Rubbing fastness values were 4-5 (Tutak et al., 2014b). In another study in which silk fabric was dyed with thyme pulp, the color tones obtained were inversely proportional to the fastness values. Fabrics mordanted with tin chloride, which gave the best results in fastness values, gave pale and dull colors, while alum gave the brightest colors (Deniz, 2019).

It was observed that the test values of rubbing, light and water drop fastness as a result of mordant dyeing of wool fiber with alkanna tinctoria were generally 3-4 values, while these values were 1 degree lower in dyeing without mordant (Akan and Balos, 2021).

When the washing, rubbing and light fastness of the colors obtained by dyeing Alaca and Şile fabric with different mordants of dyestuffs obtained from the roots, bark and leaves of rubiaceae, Rhamnus petiolaris Boiss, isatis tinctoria, and hazelnut bark were evaluated, all values were around 4 (Begiç and Oğuz, 2022).

Wool fibers were dyed with extracts of vitis vinifera leaves, juglans regia, rubia tinctorium, asteraceae and verbascum orientale bieb. in the presence of different mordants and light, rubbing and water drop fastnesses were examined. The light fastness value of the dyes made with the use of ferrous sulfate mordant in asteraceae plant was the highest (7). While wet rubbing fastness was ¾, dry rubbing fastness was generally 5. While wet water drop fastness values vary between 3-4, dry water drop fastness values are around 5 (Kemer Gürsoy and Şanlı, 2023).

Beige, shades of green and shades of brown were obtained as a result of dyeing wool with pine cones (Pinaceae). The highest dye uptake was achieved with the use of iron and copper sulphate mordants in the pre-mordanting technique and the color values and fastness properties were also high (Kemer Gürsoy and Şanlı, 2023).

When the fastness values of cotton and wool yarns dyed with berberis vulgaris L., juglans regia and rubia tinctorium with clay, yeast, alum and iron sulphate mordants according to pre-mordanting and co-mordanting techniques were examined, it was seen that alum and iron sulphate were the mordants that gave higher washing and rubbing fastness (Yaldızbaş, 2020).

Elibüyük et al. (2019), dyed 100% cotton fabrics separately with natural and synthetic dyestuffs and compared the color and fastness values. There was no difference between the colorimetric values of cationized and non-cationized cotton fabrics dyed with natural dyestuffs. There was no difference in the washing and rubbing fastness values of natural and reactive dyed fabrics and they were found to be at commercially acceptable values.

Erkan et al. dyed cotton denim fabrics with rubia tinctorium and evaluated the color and fastness values. Light fastness values of natural dyed fabric were higher than those of white denim fabric. Washing fastness did not show any change depending on mordant concentration and dye concentration. Rubbing fastnesses were also at acceptable levels (Erkan et al., 2010).

Kayabaşı and Dellal (2004), dyed wool belonging to different sheep breeds raised in Türkiye with and without mordant with root dye (rubia tinctorium) and evaluated their light fastness. Light fastness values were between 3 and 6 and it was found that the sheep breed from which the wool was obtained was not important in light fastness values, but the mordant used in dyeing was important.

Aesculus hippocastanum (horse chestnut) was proposed as a novel natural dye source for wool fabrics by Eyüpoğlu et al.(Eyüpoğlu et al., 2024b). Their work confirmed the plant's rich tannin content and potential for producing brown shades with acceptable fastness.

7. Conclusions

The increasing awareness of environmental sustainability has renewed interest in natural dyestuffs as eco-friendly alternatives to synthetic dyes. This study explored the rich diversity of plant-based natural dye sources cultivated in Türkiye, classifying them by their chemical structures, dyeing applications, and environmental advantages. Türkiye, with its unique geographical and climatic conditions, hosts a wide variety of natural dyestuff plants, many of which have been used for centuries in traditional textile dyeing practices.

The findings indicate that flavonoids, anthraquinones, indigoids, and quinones play a fundamental role in natural dyeing processes, offering a broad spectrum of color possibilities, ranging from yellow, red, and blue to black and brown tones. Additionally, the use of mordants significantly enhances color fastness, vibrancy, and durability, making natural dyes more suitable for modern textile applications. Among the mordants studied, alum, iron sulfate, and copper sulfate demonstrated superior dye fixation and fastness properties.

One of the critical challenges in the widespread adoption of natural dyes remains their limited fastness and reproducibility compared to synthetic alternatives. However, advancements in mordanting techniques, dye bath reutilization, and natural dye extraction methods offer promising solutions for

enhancing their commercial viability. Moreover, the ability to reuse the dye bath up to three times has been identified as an effective sustainability strategy that minimizes wastewater pollution and resource consumption.

In conclusion, this study underscores the scientific and industrial potential of natural dyes in sustainable textile production. While technical challenges remain, further research and innovation in mordanting techniques, bio-based dye enhancers, and eco-friendly extraction methods could bridge the gap between traditional practices and modern textile industry needs. Promoting natural dyeing education and fostering collaborations between academia and industry will be essential for ensuring the long-term sustainability of natural dyes in textile applications.

In future studies, more advanced analytical techniques such as HPLC-MS, FTIR, and UV–Vis spectroscopy can be used to investigate the molecular structures and binding mechanisms of natural dyes in greater detail. Moreover, exploring innovative mordanting strategies, especially involving bio-mordants and nanomaterials, may provide more eco-friendly and efficient dyeing alternatives. The development of standardized extraction and application protocols would also enhance reproducibility and facilitate industrial-scale use of natural dyes.

Authorship Contribution Statement: The corresponding author was solely responsible for conducting the literature review, creating tables, drafting the manuscript, and performing revisions.

Declaration of Competing Interests: The author declares that there is no conflict of interest.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Data Availability Statement: The data used to support the findings of this study are included within the manuscript.

References

Acar G. Doğa ve insan sağlığı ile uyumlu doğal boyalı kumaş geliştirme. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:126, Kayseri, Türkiye, 2013.

Adeel S., Ali A., Bhatti IA., Zsila F., Zuber M., Abbas M. Dyeing of cotton fabric using pomegranate (Punica granatum) peel: Optimization of extraction and dyeing conditions using Taguchi method. Journal of Cleaner Production 2009; 17(1): 61–66.

Adrosko RJ., Natural dyes and home dyeing (formerly titled: natural dyes in the United States) (Vol. 281). Courier Corporation; 1971.

Ahn C., Zeng X., Li L., Obendorf SK. Thermal degradation of natural dyes and their analysis using HPLC-DAD-MS. Fashion and Textiles 2014; 1: 1–13.

Akan H., Balos MM. Natural dye extraction from Alkanna strigosa Boiss. & Hohen. (Boraginaceae). International Journal of Life Sciences and Biotechnology 2021; 4(2): 224–234.

Akyol G., Yener E. Coloring of enzymatically pre-treated cotton fabrics with madder dye. Journal of Advanced Engineering Studies and Technologies 2021; 2(1): 21-29.

Al Sarhan TM., Salem AA. Turmeric dyeing and chitosan/titanium dioxide nanoparticle colloid finishing of cotton fabric. Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR) 2018; 43(4): 464-473.

Ala DM., Bakıcı GG. Investigation of the usability of canary grass (Senecio vernalis) in natural dyeing. Textile and Engineer 2020; 27(120): 236–242.

Amin N., Khan TA., Shabbir M., Asim M., Riaz R., Adeel S. Sustainable dyeing of textile materials using natural dyes and bio-mordants: A review of interactions and mechanisms. Sustainable Chemistry & Pharmacy 2023; 35: 101030.

Anonim. Yünleri nebatlarla boyama reçeteleri. Karınca Kooperatif Dergisi 1947; 13(122): 16-17.

Anonim. A Golden Hands Pattern Book Handcrafts., United States; 1971/72/73.

Anonim. Bitkilerden Elde Edilen Boyalarla Yün Liflerinin Boyanması. T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı Küçük Sanatlar ve Sanayi Bölgeleri ve Siteleri Genel Müdürlüğü. Ankara; 1991.

Arık B., Sahan G., Demir A., Seventekin N. Effect of chitosan on natural dyeability and antibacterial activity of wool fabrics. 1. Uluslararası Moda ve Tekstil Tasarımı Sempozyumu, 8-10 Ekim 2012, sayfa no:99-103, Antalya.

Avinç O., Celik A., Gedik G. Yavaş A. Natural dye extraction from waste barks of Turkish red pine (Pinus brutia Ten.) timber and eco-friendly natural dyeing of various textile fibers. Fibers Polym 2013; 14: 866–873.

Aytaç A. 1999. Değişik miktardaki *Galium verum L.* bitkisi ile farklı mordan maddeleri oranlarının yün halı ipliğinin boyanmasında renk oluşumuna ve haslık derecelerine etkisi. 2000'li Yıllarda Türkiye'de Geleneksel Türk El Sanatlarının Sanatsal, Tasarımsal ve Ekonomik Boyutu Sempozyumu, Mayıs 1999, sayfa no: 66-74, İzmir.

Ayvaz KM., Teker MS. Türkiye'de doğal boya kullanan tekstil işletmeleri ve bitki atıkları ile sürdürülebilir bir yaklaşım önerisi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2023; 59: 348-362.

Balakina GG., Vasiliev VG., Karpova EV., Mamatyuk VI. HPLC and molecular spectroscopic investigations of the red dye obtained from an ancient Pazyryk textile. Dyes and Pigments 2006; 71(1): 54–60.

Batool F., Naveed S., Iqbal MS., Munir M., Imran M., Adeel S. Eco-friendly dyeing of wool using natural dyes and bio-mordants: Characterization and performance. Environmental Science and Pollution Research 2021a; 28(3): 3367–3376.

Batool F., Adeel S., Rehman F., Habib N., Özomay M. Waste black tea leaves (Camellia sinensis) as a sustainable source of tannin natural colorant for bio-treated silk dyeing. Environmental Science and Pollution Research 2021b; 28(15): 18936–18947.

Bayatlı O. Weaving in Bergama. Turkish Ethnography Journal 1957; 2: 53–55.

Baykara T. Kökboya. Arış Dergisi 1998; 1(4): 64-71.

Baykara T. Madder (Rubia tinctorum). İstanbul University Geography Institute Journal 1964; 7(14): 221–226.

Baylav N. Dye plants of Türkiye and foreign dye plants and dyes used in Türkiye. Turkish Art and History Research and Studies 1963; 1: 732–744.

Bechtold T., Mahmud-Ali A., Mussak R. Natural dyes for textile dyeing: A comparison of methods to assess the quality of Canadian goldenrod plant material. Dyes and Pigments 2007; 75(2): 287-293.

Bechtold T., Mussak R. Handbook of natural colorants. Wiley Publication: John Wiley&Sons; 2009.

Begiç HN., Oğuz M. Dyeing of alaca and Şile cloth with dye substances obtained from madder, weld, indigo, and hazelnut shell and determination of their fastness levels. Folklore Academy Journal 2022; 5(2): 417–434.

Benli H., Bahtiyari İ., Yılmaz M. Usability of natural dyes in traditional Turkish Ebru art. Akdeniz Sanat 2012; 5(10): 21-33.

Benli H., Bahtiyari Mİ. Bleaching of cotton fabrics with ozone-hydrogen peroxide combination and coloring with natural dyes. Textile and Engineer 2016; 23(103): 189–196

Benli H., Aydınlıoğlu Ö., Yılmaz F., Bahtiyari Mİ. Topping of naturally dyed wool fabrics with different natural dye sources. Coloration Technology 2023; 139(2): 171–181.

Benli H., Selvi EK. Study of Dodder (Cuscuta campestris Yuncker) as a pharmaceutically effective natural dyestuff source. Fibers and Polymers 2024; 25(12): 4743–4754.

Benli H. Sustainable dyeing of wool fabrics with a bio-waste Pistachio tree (Pistacia vera L.) branch. In 7th International Scientific Conference Contemporary Trends and Innovations in Textile Industry; sayfa no: 154–160.

Canbolat Ş., Acar K., Merdan N. Dyeing silk materials with a natural dye extracted from Sambucus ebulus L. (Elderberry). Istanbul Commerce University Journal of the Institute of Science 2013; 12(23): 103–114.

Canikli N. Kökboya (Rubia Tinctorum L)'den elde edilen renkler ve bu renklerin yün halı iplikleri üzerindeki ışık ve sürtünme haslıkları. Ankara Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:74, Ankara, Türkiye, 1989.

Clark M. Handbook of textile and industrial dyeing. Woodhead Publishing Limited: Elsevier; 2011.

Coşkun G., Tağı SÖ. Investigation of the effects of microwave use in dyeing of cotton fabrics with natural dyes. Folklore Academy Journal 2020; 3(4): 421-445.

Çırak Y. Doğal boyamacılık ve Isatis tinctoria bitkisinin doğal boyar maddeleri. Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:46, Eskişehir, Türkiye, 1991.

Deniz H. Isparta Sütçüler'de yetişen kekiklerin doğal boyama yöntemi ile haslık değerlerinin tespiti. Süleyman Demirel Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:92, Isparta, Türkiye, 2019.

Deveoğlu O., Karadağ R. An overview: Natural dyes. Marmara University Journal of Science 2011; 23(1): 21-32.

Deveoğlu O., Şahinbaşkan BY., Torgan E., Karadağ R. Investigation on color, fastness properties, and HPLC-DAD analysis of silk fibers dyed with Rubia tinctorum L. and Quercus ithaburensis Decasine. Coloration Technology 2012a; 128: 364–370.

Deveoğlu O., Cakmakcı E., Taskopru T., Torgan E., Karadag R. Identification by RP-HPLC-DAD, FTIR, TGA and FESEM-EDAX of natural pigments prepared from Datisca cannabina L. Dyes and Pigments 2012b; 94(3): 437-442.

Deveoğlu O. Doğal boyamacılıkta kullanılan bazı flavonoidlerin aluminyum komplekslerinin yapısının aydınlatılması. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no:213, İstanbul, Türkiye, 2018.

Deveoğlu O., Karadağ, R. A review on flavonoids – A dye source. International Journal of Advanced Engineering and Pure Science 2019; 3: 188-200.

Dhara S., Padma Shree V. New trends in natural dyes for textiles. Elsevier Science and Technology: Woodhead Publishing; 2019.

Doty K., Haar S., Kim J. Black walnut, Osage orange and eastern redcedar sawmill waste as natural dyes: Effect of aluminum mordant on color parameters. Fashion and Textiles 2016; 3: 1-16.

Duran K. A study on the natural dyeing of wool with the bark of Turkish red pine (Pinus brutia). Textile and Apparel 1992; 2(16): 428–434.

Dweck AC. Natural ingredients for coloring and styling. Int. J. Cosmet. Sci. 2002; 24: 287-302.

Elibüyük SA., Yıldırım FF., Tasan PK., Yumru Ş., Çörekcioğlu M., Bulut MO. Comparison of 100% cotton fabrics dyed with natural and synthetic dyes in a textile company. Yekarum 2019; 4(2): 28-39.

Enez N. Doğal boyalarla yün boyamacılığı ve kullanılan boyaların kromatografik yöntemle saptanması. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:92, İstanbul, Türkiye, 1984.

Erkan G., Şengül, K., Kaya, S. A study on dyeing denim fabrics with Rubia tinctorum L. (madder). Textile and Engineer 2010; 17(80): 1–10.

Eser F., Aktas E., Onal A. Dyeing quality of walnut shells on polyester and polyester/viscose blended fabrics. Indian Journal of Fiber & Textile Research (IJFTR) 2016; 41(2): 188-194.

Eşberk T. The nature and importance of rural handicrafts in Turkey. Ankara; 1939.

Eşberk T. Methods of utilizing dye plants grown in our country in rural arts: Madder dye. Turkish Textile Journal 1947; 4: 11–13.

Etikan S., Arlı M. Colors obtained from Plumbago europaea and their light and rubbing fastness properties on wool carpet yarns. Journal of Agricultural Sciences 2001; 7(4): 96-101.

Etikan S., Ölmez FN. The tradition of plant-based dyeing in Fethiye and its current status. Kalemişi 2014; 2(4): 54–71.

Eyüboğlu Ü., Okaygün I., Yaraş F. Doğal boyalarla yün boyama: uygulamalı ve geleneksel yöntemler. Uygulamalı Eğitim Vakfı;1983.

Eyüboğlu Ş. Investigation of dyeing properties of linen fabric with natural dye obtained from wild cornflower. Düzce University Journal of Science and Technology 2020; 8: 317-325.

Eyüpoğlu C., Eyüpoğlu S., Merdan N. Investigation of dyeing properties of mohair fiber dyed with natural dyes obtained from Candelariella reflexa. Journal of Natural Fibers 2022; 19(16): 12829–12848.

Eyüpoğlu C., Eyüpoğlu S., Merdan N., Ömeroğulları Başyiğit Z. Natural dyeing of air plasma-treated wool fabric with Rubia tinctorum L. and prediction of dyeing properties using an artificial neural network. Coloration Technology 2024a; 140(1): 91–102.

Eyüpoğlu S., Eyüpoğlu C., Merdan N., Karakuş O. Investigation of dyeing characteristics of merino wool fiber dyed with sustainable natural dye extracted from Aesculus hippocastanum. Sustainability 2024b; 16(22): 10129.

Garcia CG., Polo AS., Iha NYM. Photoeletrochemical solar cell using extract of Eugenia jambolana Lam as a natural sensitizer. Acad. Bras. Cienc. 2003; 75: 163-165.

Genç M. Some records related to madder and weld (Reseda luteola) in the Ottoman archive documents of the Prime Ministry. Süleyman Demirel University Journal of Fine Arts Faculty 2014; 7(13): 174–212.

Genç M. Natural dye sources and dyehouses around Sakarya. Süleyman Demirel University Journal of Social Sciences Institute 2017; 26: 100–119.

Genç M. Use of madder dye in felt making. Folklore Academy Journal 2020; 3(4): 33-52.

Genç M. Identified plant-based natural dye sources in Gaziantep. Hars Academy International Peer-Reviewed Journal of Culture, Art, and Architecture 2022; 5(Special Issue 3): 154–169.

Gökbulut Ç., Kıcık H. Investigation of dyeability of cotton fabrics with plant-based food dyes. Journal of Sustainable Engineering Applications and Technological Developments 2023; 6(1): 118-128.

Gönüz A., Aksoy A., Karabacak E. Some potential dye plants naturally distributed in and around Çanakkale. Anatolian Aegean Agricultural Research Institute Journal 2006; 16(1): 54–71.

Grierson S. The Color Cauldron, Scotland; 1989.

Gupta D., Jain A., Panwar S. Anti-UV and antimicrobial properties of some natural dyes on cotton. Indian Journal of Fiber & Textile Research 2005; 30: 190–195.

Gündüz İ. Karapınar handwoven textiles and madder dyeing. Konya; 1993.

Güngörmez H. Natural dyes and salt. Iğdır University Journal of the Institute of Science 2015; 5(1): 57–63.

Harbelioğ Y. Taşpınar halı ipliklerinin boyanmasında uygulanan doğal boyama yöntemlerinin reçetelendirilmesi. Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:104, Ankara, Türkiye, 2011.

Harmancıoğlu M. Fastness degrees of colors obtained from important plant dyes found in Türkiye on wool against various factors. Ankara; 1955.

Hong KH. Effects of tannin mordanting on coloring and functionalities of wool fabrics dyed with spent coffee grounds. Fashion and Textiles 2018; 5: 1-11.

Indi YM., Patil PD., Jujare T. Padding technique for natural dyeing. Indian Journal of Fiber and Textile Research (IJFTR) 2019; 44(1): 118-121.

İmer Z. Türklerin dokuma sanatında boyacılık. Erdem, 1999; 10(29): 331-354.

Jabar JM., Ogunmokun AI., Taleat TAA. Color and fastness properties of mordanted Bridelia ferruginea B dyed cellulosic fabric. Fashion and Textiles 2020; 7: 1-13.

Jiang HY., Hu XD., Zhu JJ., Wan J., Yao JB. Studies on the photofading of alizarin, the main component of madder. Dyes and Pigments 2021; 185: 108940.

Kabaalioğlu N. Osmanlı döneminde Anadolu'da kök boyamacılığı ve 18. yüzyıla ait bir boya reçetesinin uygulaması. Nişantaşı Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:82, İstanbul, Türkiye, 2022.

Kalaycı E., Yavaş A., Avinç O. Natural dyeing of PA 6, PTT, PBT, PLA, silk, and soybean textile fibers with black mulberry fruit extract by conventional and microwave dyeing techniques. In: Muthu, S.S. (eds) Natural Dyes and Sustainability. Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry. Springer, Cham.2024; 329–352.

Kapoor VP. Herbal cosmetics for skin and hair care. Nat. Prod. Rad. 2005; 4: 306-314.

Kahveci İ. Doğal boyama materyallerinin üre+amonyak+kalsiyum okzalat mordan sistemi ve diğer mordanlar kullanılarak kökboya (rubia tinctorum L.) ile boyanması üzerinde araştırmalar. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no:126, Tokat, Türkiye, 2001.

Kamel MM., Abdelghaffar F., El-Zawahry MM. Eco-friendly dyeing of wool with a mixture of natural dyes. Journal of Natural Fibers 2011; 8(4): 289-307.

Karadağ R. Natural Dyestuffs Used in Turkish Carpets. Rugs, and Fabrics. Ariş, 1997; 1(2): 38–51.

Karadağ R. Natural dyeing. Republic of Türkiye Ministry of Culture and Tourism, Ankara; 2007.

Karadağ R., Yıldız Y. Examination of dyeing properties of the dyed organic cotton knitting fabrics using yarrow (Achillea biebersteinii AFAN and Achillea millefolium L.). Journal of Natural Fibers 2022; 19(14): 7374–7381.

Karadağ R., Pars A. Physicochemical properties of warp knitted fabrics colored with madder and gall oak for sportswear. Journal of Natural Fibers 2024; 21(1): 2378854.

Karamanoğlu K. Pharmaceutical botany. Ankara University Faculty of Pharmacy Publications, No: 44, Ankara; 1977.

Kayabaşı N., Arlı M., Erdoğan Z. Colors obtained from Rubia tinctorum L. and their light and rub fastness on wool carpet yarns. Journal of Agricultural Sciences 1998; 4(3):84–90.

Kayabaşı N., Şanlı HS., Etikan S. Colors obtained from Alkanna tinctoria (L.) Tausch and Rumex conglomeratus Murr. and a study on their light and rub fastness. Yüzüncü Yıl University, Faculty of Agriculture, Journal of Agricultural Sciences 1999; 10(1): 7–10.

Kayabaşı N., Dellal G. A study on the light fastness values of colors obtained from madder (Rubia tinctorum L.) on wool from different sheep breeds in Turkey. Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences 2004; 14(2): 79-83.

Kayabaşı N., Dellal G. A study on the subjective and objective evaluation of colors obtained by dyeing wool from different sheep breeds in Turkey with madder. Süleyman Demirel University Journal of the Institute of Science 2006; 10(3): 334–340.

Ke G., Yu W., Xu W. Color evaluation of wool fabric dyed with Rhizoma coptidis extract. Journal of Applied Polymer Science 2006; 101(5): 3376-3380.

Kemer Gürsoy G., Şanlı HS. Dyeing of wool fiber with grape leaves, walnut shell, madder, chamomile, and mullein and evaluation of fastness properties. Folklore Academy Journal 2023; 6(1): 162-172.

Korur NR. Vegetable dyes in Türkiye. Ankara; 1937.

Kumar A., Raja ASM., Shakyawar DB., Pareek PK., Krofa D. Efficacy of natural dye from Gerardiana diversifolia on Pashmina (Cashmere) shawls. Indian Journal of Fiber and Textile Research 2015; 40(2): 180-183.

Lansky PE., Newman AR. Punica granatum (pomegranate) and its potential for prevention and treatment of inflammation and cancer. Journal of Ethnopharmacology 2007; 109(2): 177–206.

Leitner P., Fitz-Binder C., Mahmud-Ali A., Bechtold T. Production of a concentrated natural dye from Canadian Goldenrod (Solidago canadensis) extracts. Dyes and Pigments 2012; 93(1–3):1416–1421.

Macintyre D. The role of Scottish native plants in natural dyeing and textiles. Master's thesis, University of Edinburgh, Institute of Ecology and Resource Management; 1999.

Meryemoğlu B. Natural dyes from lignocellulosic biomass hydrolysates. Indian Journal of Fiber & Textile Research 2018; 43: 92-97

Mia MR., Bashar MM., Mollah MYA., Mostafa MG. Extraction, characterization and application of natural dyes from Alpinia nigra leaves on cotton and silk fabrics. Surface Innovations 2019; 7(1): 41–50.

Mocquard J., Le Lamer AC., Fabre PL., Mathieu C., Chastrette C., Vitrai A., Vandenbossche V. Indigo dyeing from Isatis tinctoria L.: From medieval to modern use. Dyes and Pigments 2022; 110675.

Okca AK. Dyeing wooden toys with madder, weld, and indigo. Motif Academy Journal of Folklore 2017; 10(19): 73–88.

Oğuz G., Yayıntaş A. Ornamental plants in our parks and gardens. İzmir; 1987.

Oğuz M. Bitkisel boyalarla (kökboya, cehri, çivit otu, fındıkkabuğu) boyanan alaca ve şile bezinin giysi tasarımında kullanılması. Çankırı Karatekin Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstirüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:83, Çankırı, Türkiye, 2021.

Onal A., Yılmaz M., Eser F. Use of fermented dough extract in the dyeing of wool fabrics. Indian Journal of Fiber and Textile Research 2018; 43:132-135.

Ömeroğulları Başyiğit Z., Eyüpoğlu C., Eyüpoğlu S., Merdan N. Investigation and feed-forward neural network-based estimation of dyeing properties of air plasma treated wool fabric dyed with natural dye obtained from Hibiscus sabdariffa. Coloration Technology 2023; 139(4): 441–453.

Önem E., Mutlu MM., Günay S., Azeri H. Extraction of natural dye from onion (Allium cepa) outer skin and its use in leather dyeing. Textile and Engineer 2012; 19(88): 1–8.

Özen Ö., Erdem İşmal Ö. Lyocell fibers and natural dyes as a potential for eco-friendly designs inspired by nature. Journal of Art & Design 2023; 13(1): 201–213.

Özer LM., Karadağ R., Torgan E. HPLC-DAD analysis of silk fabrics dyed with Rubia tinctorum L. and Quercus infectoria and the effect of Turkish red oil on color and fastness properties. Textile and Engineer 2016; 23(103): 197–204.

Özgür MÜ., Açıkgöz ZÖ., Şahinbaşkan BY., Gümrükçü G. Woolen fabric dyeing with Punica granatum L. rind by using different mordants. Asian Journal of Chemistry 2012; 25(4): 1956–1964.

Özgüney AT., Seçim P., Demir A., Gülümser T., Özdoğan E. Ecological printing of madder on various natural fibers. Textile and Apparel 2015; 25(2): 166–171.

Öztürk İ. A few notes on plant dyes and dyeing samples from Yenikent village. Turkish Ethnography Journal 1982; 17: 49–58.

Öztürk İ. A regional example of hand carpet weaving and plant-based dyeing. Folklore and Ethnography Studies 1988; 267–274.

Öztürk İ. Doğal bitkisel boyalarla yün boyama. Dokuz Eylül Yayınları; 1997.

Öztürk İ., Aksoy A. Colors obtained from St. John’s Wort (Hypericum triquetrifolium Turra) and the light and wash fastness of these colors on wool carpet yarns. Ankara University Faculty of Agriculture, Journal of Agricultural Sciences 2000; 6(1): 110–115.

Padma Shree V. Natural dyes for textiles: Sources, chemistry, and applications. Elsevier Science and Technology, The Textile Institute Book Series: Woodhead Publishing; 2017.

Park Y. Characteristics of cotton fabric dyed with Euphorbia extract at different concentrations of cellulosic nanoparticles (CNP). Fashion and Textiles 2023; 10(1): 3.

Pars A., Karadağ R. Sustainable bio-dyeing of cellulosic-based fabrics with anthocyanins from black carrot (Daucus carota L.). Structure 2024; 32(3): 50-56.

Pars A. Evaluation of the dyeability of hemp fabric with Anatolian black pine (Pinus nigra subsp. Pallassiana) and Scots pine (Pinus sylvestris L.). Textile Research Journal 2024; 94(7–8): 777–787.

Pereira DM., Valentão P., Andrade PB. Marine natural pigments: Chemistry, distribution, and analysis. Dyes and Pigments 2014; 111: 124–134.

Rahman Bhuiyan MA., Ali A., Islam A., Hannan MA., Fijul Kabir SM., Islam MN. Coloration of polyester fiber with natural dye henna (Lawsonia inermis L.) without using mordant: a new approach towards a cleaner production. Fashion and Textiles 2018; 5: 1-11.

Rekaby M., Salem AA., Nassar SH. Eco-friendly printing of natural fabrics using natural dyes from alkanet and rhubarb. The Journal of The Textile Institute 2009; 100(6): 486–495.

Repon MR., Islam MT., Mamun MAA. Ecological risk assessment and health safety speculation during color fastness properties enhancement of natural dyed cotton through metallic mordants. Fashion and Textiles 2017; 4: 1-17.

Rodale's Illustrated Encyclopedia of Herbs. Pennsylvania;1987.

Saad H., Charrier-El Bouhtoury F., Pizzi A., Rode K., Charrier B., Ayed N. Characterization of pomegranate peel tannin extractives. Industrial Crops and Products 2010; 40: 239–246.

Salimian S., Moghaddam MK., Safi S., Mortazavi SM. Properties of wool dyed with pinecone powder as a by-product colorant. Indian Journal of Fiber & Textile Research 2016; 41: 173-179.

Sarı HK., Yıldırım FF., Avinç O., Yavaş A. Evaluation of colorimetric and color fastness properties of marble-printed silk fabrics with the use of various mordants and after-treatments. In: Muthu, S.S. (eds) Natural Dyes and Sustainability. Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry. Springer, Cham.2024; 287–327.

Shahid M., Mohammad F. Recent advancements in natural dye applications: A review. Journal of Cleaner Production 2013; 53: 310–331.

Shams-Nateri A., Hajipour A., Dehnavi E., Ekrami E. Colorimetric study on polyamides dyeing with weld and pomegranate peel natural dyes. Clothing and Textiles Research Journal 2014; 32(2): 124–135.

Singh HB., Bharati KA. Handbook of natural dyes and pigments. Woodhead Publishing; 2014.

Soysaldı A., Karadağ R., Güzel ET. Characteristics and dye analysis of Uşak carpets found in Ayaş Mosques. Arış, June 2023; (22): 46–65.

Sunerli E., Aydın MÇ. The effect of natural dyeing on surfaces formed with different textile fibers. The Journal of International Lingual Social and Educational Sciences 2019; 5(1): 196–203.

Şanlı HSA. Dyeing silk textile products with some dye plants and determination of fastness values Doctoral dissertation, Ankara University, Institute of Science; 2001.

Şanlı HS., Yazıcıoğlu Y. Breaking strength of wool carpet yarns dyed with grapevine, mullein, and pennyroyal plants. Journal of Agricultural Sciences 2003; 9(1).

Şanlı HS., Arlı M. Dyeing silk textile products with some dye plants and determining the obtained colors. Gazi University Journal of Industrial Arts Education Faculty 2007; 21: 55–78.

Şanlı HS. Colors used in carpet and kilim yarn dyeing and the plants that produce these colors. E-Journal of New World Sciences Academy (NEWWSA) Social Sciences 2011; 6(4): 439–445.

Şanlı HS., Bıyıklı E., Kaya Ü. Kilim weaving and plant-based dyeing in Beypazarı. Kalemişi 2014; 2(4): 14–22.

Şen H., Aksoy A., Çobanoğlu G., Selvi S. Natural dyeing works on some lichens species distributed in Ayvacık (Çanakkale) and İvrindi (Balıkesir/Turkey). Biological Diversity and Conservation 2014; 7(3):184-189.

Tağı SA., Şengül Bekiroğlu E. Natural dyeing of mohair and hemp yarns and woven textile surface studies. Arış 2023; 22: 28-45.

Taş E. The historical development of textile raw material dyeing and dyestuffs. Turkish Studies-Social Sciences 2019; 14(3): 1095–1120.

Teker MS. The necessity of establishing a natural dye laboratory for educational purposes in the Traditional Turkish Handicrafts Department of Carpet-Kilim and Old Fabric Patterns. Arış Journal 2011; 5: 110–119.

Teker MS. Rezerve boyama teknikleri ile indigo, kökboya, kekik posasının giysi koleksiyonunda kullanılması. Akdeniz Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü sanatta Yeterlilik Tezi, sayfa no:157, Antalya, Türkiye, 2016.

Tezcan İ., Suyunu A. Natural dyestuffs in silk carpets. Textile and Engineer 1991; 5(26): 88–97.

Thompson J. DOBAG (A return to tradition). Hali, The International Magazine of Antiques, Carpets, and Textiles 1986; 30: 14–21.

Tiwari CH., Singh P., Mishra KP., Srivastava P. Evaluation of various techniques for extraction of natural colorants from pomegranate rind—ultrasound and enzyme-assisted extraction. Indian Journal of Fiber and Textile Research 2010; 35(3): 272–276.

Torgan E. Kökboya (Rubia tinctorum L.) bitkisinden pigment eldesi, analizi ve uygulaması. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:99, İstanbul, Türkiye, 2008.

Tuğrul S. Kökboya bitkisinin üretim teknikleri üzerine bir araştırma. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:66, Antalya, Türkiye, 1995.

Tutak M., Korkmaz, NE. Environmentally friendly natural dyeing of organic cotton. Journal of Natural Fibers 2012; 9(1): 51-59.

Tutak M., Acar G., Akman O. Natural dyeing properties of wool fabrics by pomegranate (Punica granatum) peel. Textile and Apparel 2014a; 24(1): 81–85.

Tutak M., Acar G., Akman O. Natural dyeing of wool fiber using mint (Mentha spicata L.) and thyme (Thymus vulgaris L.). Textile and Engineer 2014b; 21(93): 18-23.

Uğur G. Natural colors and dyes in Turkish carpets. Ankara; 1988.

Uslu M. Weaving and dyeing in Bodrum. Proceedings of the 2nd National Handicrafts Symposium, 1982, 356–377, İzmir.

Uysal İ. Morphology, chronology, and use of some dye plants in Çanakkale Province. T. Ü. Çanakkale Education College Research Journal 1991; 2(1): 65–103.

WEB_1 Web of Science. (n.d.). Retrieved from https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/5e59617b-3bfb-4af4-8f48-58da0030f30b-b8e38db6. Erişim Tarihi:17 Ocak 2025

WEB_2 Scopus. (n.d.). Retrieved from https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=91670a6f4b8e05abfd6c519a66c7415c&sot=a&sdt=a&sl=26&s=TITLE-ABS-KEY%28madder+dyes%29&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results Erişim Tarihi: Mart 2025.

WEB_3 Turkish Cultural Foundation. (n.d.). Retrieved from http://www.tcfdatu.org/tr/servisler/avantajlar/zengin-koleksiyon-34.htm Erişim Tarihi: Mart 2025.

Wigginton E. Moments: The Foxfire Experience. Foxfire 2, New York, ERIC; 1973.

Yaldızbaş KN. Kadıntuzluğu, ceviz, kökboya bitkileri ile boyanan ipliklerin bazı haslık düzeyleri ve tekstil tasarımında kullanılması. Gazi Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:160, Ankara, Türkiye, 2020.

Yazıcıoğlu Y., Şanlı S. Colors obtained from spurge (Euphorbia) plant with different mordants and mordanting methods and their fastness values. Proceedings of the Symposium on the Artistic, Design, and Economic Dimensions of Traditional Turkish Handicrafts in the 2000s, 1999; 299–307.

Yazıcıoğlu Y., Şanlı S., Tezel Z. A comparative study on the breaking strength of tufted wool carpet yarns dyed with natural dyes. Proceedings of the Symposium on the Artistic, Design, and Economic Dimensions of Traditional Turkish Handicrafts in the 2000s, 1999; 290–298. İzmir.

Yılmaz F., Bahtiyari İ. Coloring of wool fabrics with various plant-based sources. Textile and Engineer 2017; 24(106): 62–71.

Yılmaz F. The use of woad (Isatis tinctoria) as a natural dye source for woolen fabrics. Atatürk University Journal of Fine Arts Institute 2020a; 26(45): 485–490.

Yılmaz F. Dyeing wool fabrics with golden flower (Helichrysum arenarium) in the scope of natural dyeing. Journal of Art 2020b; (35): 102–108.

Yılmaz F. The use of mallow (Malva sylvestris L.) as a natural dye. Textile and Engineer 2020c; 27(118): 84-90.

Yoshizumi K., Crews PC. Characteristics of fading of wool cloth dyed with selected natural dyestuffs on the basis of solar radiant energy. Dyes and Pigments 2003; 58(3): 197–204.

Zhang D., Lanier SM., Downing JA., Avent JL., Lum J., McHale JL. Betalain pigments for dye-sensitized solar cells. J. Photochem. Photobiol. A 2008; 195: 72-80.

Zuber M., Adeel S., Ali A., Rauf A., Aslam M. Application of almond shell waste as a bio-mordant in natural dyeing of cotton fabric. Journal of Natural Fibers 2020; 19(7): 2784–2794.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1881-1906, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1881-1906, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

α-Amilaz İmmobilizasyon Yöntemleri

Ceren Bersu YILMAZ[1], Demet BAYBAŞ[2]

[1,2]Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyokimya Bölümü, 58140, Sivas

[1]https://orcid.org/0009-0008-6184-3323
[2]https://orcid.org/0000-0002-7712-754X
*Sorumlu yazar: bersuyilmaz48@gmail.com

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 14.07.2025
Kabul tarihi:20.11.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
Enzim
İmmobilizasyon
α-amilaz

ÖZ

Enzimler, insandan bitkiye, hatta mikroorganizmalara kadar, tüm canlılarda bulunan ve biyolojik tepkimeleri hızlandıran katalizörlerdir. Bitki ve mikroorganizmalar gibi çeşitli kaynaklardan izole edilen enzimler, pek çok endüstriyel alanda kendilerine yer bulmuştur. Bunları bir destek malzemesine bağlamak (hareketsiz hale getirmek), enzimin tekrar kullanılabilirliğini sağlar. Bu önemli işlem, birçok sektörde maliyetleri düşürür. Bu çalışmada, birçok açıdan önemli bir enzim olan α-amilazın immobilizasyonu üzerine son beş yılda yayınlanmış bazı makaleler derlenmiş ve immobilizasyonda kullanılan destek materyalleri ve yöntemler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Optimum pH, sıcaklık ve kinetik parametrelere (K_m, V_{maks}), α-amilaz kaynağının, immobilizasyon yöntemlerinin ve destek malzemelerin etkisi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Geleneksel literatür taraması ile seçilmiş yirmi sekiz araştırma makalesinden elde edilen sonuçlar, bu değerler açısından analiz edilmiştir. Çalışma ayrıca, ulusal ve uluslararası güncel çalışma derlemeleri kullanılarak α-amilaz enzimi ve immobilizasyon yöntemleri hakkında detaylı bilgi sunmaktadır. Bu çalışmanın, akademik kariyerlerinin başında olan araştırıcılara, bu alandaki Türkçe kaynak eksikliğini gidererek katkı sağlaması umulmaktadır.

Alpha-Amylase Immobilization Methods

Reviews

Article History:
Received: 14.07.2025
Accepted: 20.11.2025
Published online:15.06.2026

Keywords:
Enzyme
Immobilization
α-amylase

ABSTRACT

Enzymes are catalysts found in all living organisms — from humans and plants to microorganisms — that accelerate biological reactions. Enzymes isolated from various sources, such as plants and microorganisms, are used in many industrial processes. Attaching them to a support material — immobilising them — ensures the enzyme's reusability. This important process reduces costs in many industries. This study compiles some of the articles published over the last five years on the immobilization of α-amylase, an important enzyme in many respects. The effects of α-amylase source, immobilization methods, and support materials on optimal pH, temperature, and kinetic parameters (K_m, V_{max}) are presented comparatively. In terms of these values, the results obtained from twenty-eight research articles selected through a traditional literature review were analyzed. The research also provides detailed information on α-amylase enzyme and immobilization methods, using national and international compilations of current studies. It is hoped that this study will contribute to colleagues at the beginning of their academic careers by addressing the paucity of Turkish resources in this field.

To Cite: Yılmaz CB., Baybaş D. α-Amilaz İmmobilizasyon Yöntemleri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1881-1906.

1.Giriş

Enzimler, biyolojik ve kimyasal süreçlerde yüksek katalitik aktivite ve seçiciliğe sahip olan, ayrıca aktivasyon enerjisini düşürerek biyokimyasal tepkimeleri hızlandıran, makromoleküler biyolojik katalizörlerdir (Dağbağlı ve ark., 2024). Bu özellikleri sayesinde enzimler, biyokatkı olarak kimya, ilaç, tekstil ve gıda endüstrilerinin yanı sıra biyosensör tasarımı ve kimyasal üretim alanlarında geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Bahri ve ark., 2022).

İmmobilizasyon, enzimlerin kararlılığını (stabilitesini), aktivitesini ve seçiciliğini artırırken, aynı zamanda enzim–substrat tepkimesi sonrasında enzimlerin ortamdan ayrılmasını ve geri kazanılmasını kolaylaştırır (Al-Harbi ve Almulaiky, 2024). Enzim immobilizasyonu, enzimin bir taşıyıcıya bağlanması olarak tanımlanabilir. Bu süreç, enzimin hareketliliğini azaltmasına veya kaybetmesine rağmen katalitik aktivitesini korumasını sağlar. İmmobilizasyon sistemleri; stabilite, izolasyon, yüksek aktivite ve bozunmaya (denatürasyona) karşı artan direnç gibi avantajlar sunarak biyoteknoloji alanlarındaki çeşitli uygulamalarda kullanımı kolaylaştırmaktadır (Abdel-Hameed ve ark., 2022). Enzim immobilizasyonu, enzimlerin yeniden kullanılmasını kolaylaştırarak endüstriyel uygulamaların maliyetini düşürür. Genel olarak, enzim immobilizasyonunun temel amacı, farklı endüstrilerde kullanılacak enzimatik katalizden en yüksek düzeyde fayda sağlamaktır. Modern biyoteknolojide immobilizasyon tekniği, enzim teknolojisinin geliştirilmesi ve enzimlerin etkin biçimde kullanılması için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir (Bahri ve ark., 2022). Enzimin bir destek malzemeye tutturulmasında, ilerleyen bölümlerde ayrıntıları sunulacak olan, çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Enzim immobilizasyon tekniklerinden biri olan adsorpsiyon yönteminde, destek malzemelerle etkileşim sonucu oluşan bağlar sayesinde enzimler dayanıklılık ve kararlılık kazanmakta, bu da denatürasyonun önüne geçmektedir. İyonik bağlanma yöntemi, proteinlerin sahip olduğu yükler aracılığıyla destek malzemeye bağlanmasını esas alır ve basitliği ile düşük maliyeti nedeniyle tercih edilen bir immobilizasyon tekniğidir. Metal bağlanma tekniği ise yüklü ve polar amino asit gruplarının metal iyonları ile etkileşimi temel alır. Ancak yüksek maliyetli olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaz. Kovalent bağlanma yönteminde, atomlar arasında elektron çiftlerinin paylaşılması yoluyla, enzimdeki fonksiyonel gruplar ile destek materyalinde bulunan gruplar arasında kararlı yapılar oluşur. Tuzaklama yöntemi, enzimin fiziksel olarak sabitlenerek sistem içinde tutulduğu, uygulaması hızlı ve maliyeti düşük bir immobilizasyon tekniğidir. Çapraz bağlanma yöntemi, taşıyıcı kullanılmaksızın, enzim molekülleri arasında köprü görevi gören bağlayıcı maddeler aracılığıyla kararlı yapılar oluşmasını sağlar. Bazı durumlarda enzimin destek malzemeye tuzaklanması ya da hapsedilmesi amacıyla da çapraz bağlayıcılar kullanılabilir. Kapsülleme tekniğinde ise enzimler çözelti içinde serbest halde bulunmakla birlikte, belirli ve kontrollü bir alan içerisinde tutulurlar. Son olarak, hapsetme yöntemi, enzimlerin polimerik ağ yapılarıyla fiziksel olarak tutulduğu bir immobilizasyon yöntemidir.

Amilazlar, enzim pazarında yüksek kâr getiren, endüstriyel açıdan önemli enzimlerdir (Bindu ve Mohanan, 2020). α-Amilaz (1,4-α-D-glukan glukanohidrolaz), nişasta moleküllerini önce maltoz ve dekstrine, ardından glukoz birimlerine hidrolize eden, glukozid hidrolaz ailesine ait endüstriyel açıdan önemli bir enzimdir (Defaei ve ark., 2020). Bu amilaz türü, en yaygın ve önemli endüstriyel amilazlardan biri olup, ilaç, gıda, deterjan, kâğıt ve tekstil endüstrileri de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde çok sayıda uygulamaya sahiptir (Bahri ve ark., 2022). α-Amilaz enzimi, nişasta hidrolizi gibi enzimatik tepkimelerin üretim verimini artırmadaki yüksek performansı ile bilinir. Bu özellik, üretim maliyetlerinde önemli bir azalmaya katkı sağlar (Yandri ve ark., 2023). Diğer bir ifade ile, enzimlerin immobilizasyonu, biyokatalizörlerin kullanımını ve dayanıklılığını artırarak üretim maliyetlerini düşürür (El-Shishtawya ve ark., 2020). Günümüzde, amilazlar uluslararası enzim pazarında önemli bir paya sahip olup toplam pazarın yaklaşık %30'unu oluşturmakta ve bu oranın sürekli artış gösterdiği gözlemlenmektedir (Razzaghi ve ark., 2023). 2022 yılında, dünya çapında α-amilaz pazarı 321 milyon USD olarak rapor edilmiştir ve 2032 yılına kadar yıllık %3,8'lik bir bileşik büyüme oranı (CAGR) ile 465,5 milyon USD'ye ulaşması beklenmektedir (Yandri ve ark., 2023). Buna paralel olarak, araştırmacıların amilaz immobilizasyonu konusuna olan ilgisi de artacaktır. Amilaz immobilizasyonu konusu ile ilgili uluslararası literatüre bakıldığında farklı yıllarda yapılmış derleme çalışmalarla karşılaşılacaktır. Ancak ulusal literatürde böyle bir çalışmaya rastlanmamıştır.

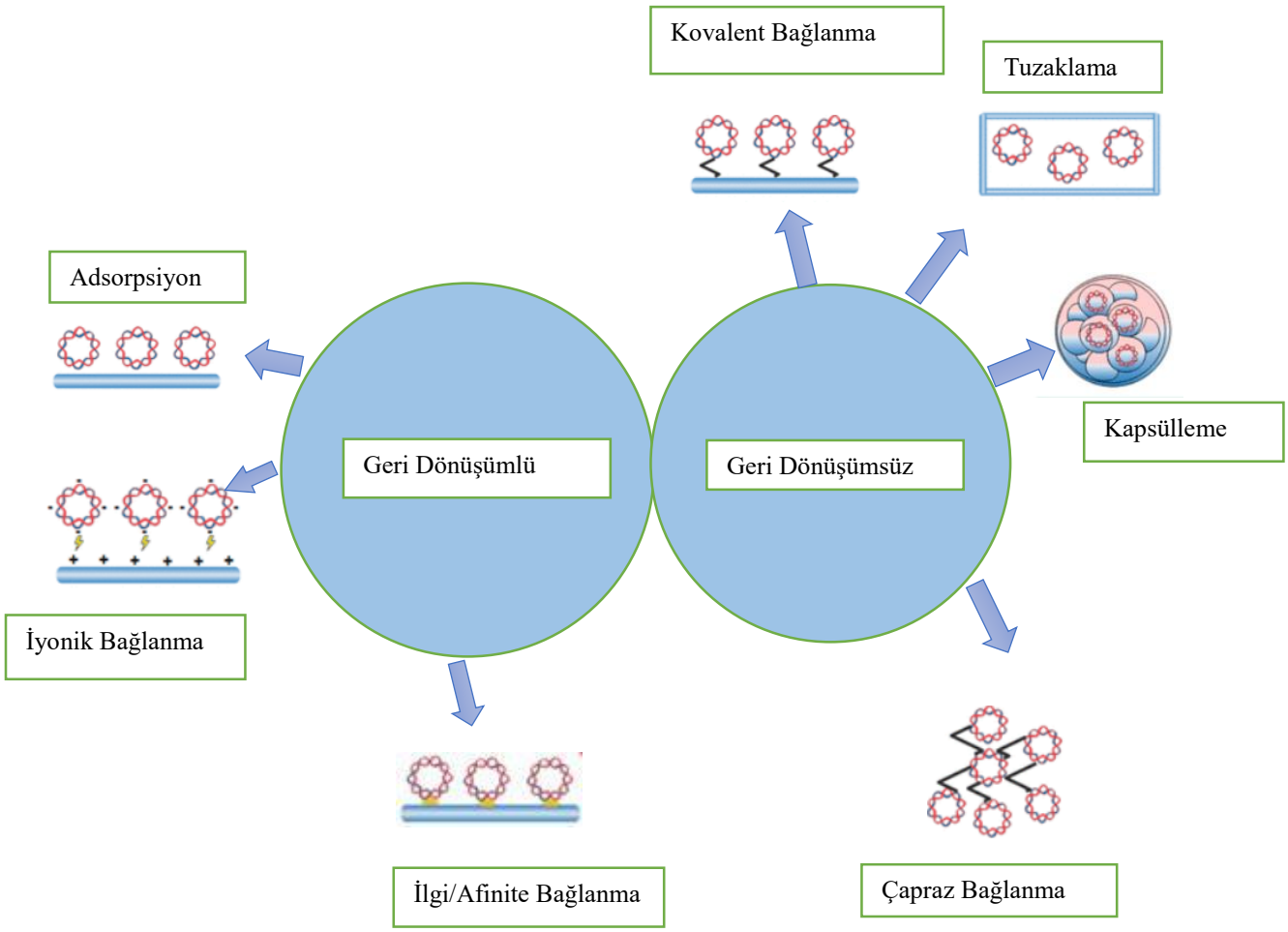
Bu çalışmanın temel önemi, genelde enzimler ve özelde alfa-amilaz enzimi hakkında mevcut Türkçe kaynak eksikliğini en aza indirmektir. Bu doğrultuda, çeşitli kaynaklardan derlenen bilgiler doğrultusunda kapsamlı bir derleme makalesi oluşturulmuştur. Enzimler, kendilerine özgü bir mekanizmaya, işlevlere, denge durumlarına ve bu özelliklere bağlı olarak gelişen özgün yapılara sahiptir. Yukarıda da belirtildiği gibi, enzimlerin çeşitli kimyasal ve fiziksel tekniklerden geçirilerek yeniden kullanılabilir hâle getirilmesi; doğrudan ya da dolaylı olarak maliyet, kararlılık ve depolanabilirlik gibi açılardan önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu derleme çalışma kapsamında öncelikle enzim immobilizasyonu ve bu işlemde kullanılan temel teknikler hakkında genel bilgiler verilmiş, ardından amilaz ve onun endüstriyel açıdan önemli bir alt türü olan α-amilaz enzimi ayrıntılı olarak ele alınmıştır. 2020-2025 yılları arasında, *ScienceDirect* sitesinde yayımlanan α-amilaz immobilizasyonu konulu akademik yayınlar incelenmiş, geleneksel literatür derlemesi ile seçilen 28 makalede, immobilizasyon sürecinde etkili olan başlıca parametreler derlenerek karşılaştırmalı bir tablo hâlinde sunulmuştur. Bu yönüyle çalışma, α-amilaz enzimi immobilizasyonuna odaklanarak alandaki mevcut bilgi birikimine katkı sunmayı hedeflemekte; aynı zamanda güncel Türkçe kaynak yetersizliğini gidermeye yönelik özgün bir referans niteliği taşımaktadır. Çalışma ayrıca, α-amilaz immobilizasyonu konusunda inceleme yapmak isteyen farklı alanlardaki araştırmacılara, güncel olarak kullanılan bazı destek malzemelerini, immobilizasyon parametreleri açısından karşılaştırma imkânı sunacaktır.

2.Enzim İmmobilizasyonu:

İmmobilizasyon tekniği, enzimin tepkime ortamından ayrılmasıyla oluşan çoklu tekrar kullanılabilirlik, işlem maliyetinin ve enzim inaktivasyonunun azaltılması, tepkimelerin daha kontrollü gerçekleştirilmesi, çalışma sürekliliği, daha yüksek katalitik performans, aktivitenin iyileştirilmesi, istenmeyen ürünlerin azaltılması ve daha yüksek sıcaklık ile pH koşullarında kararlılığın artırılması gibi konularda önemli avantajlar sağlamaktadır (Abedi ve ark., 2024). Bu nedenle, immobilizasyonun temel amacı, enzimi çözünmeyen bir matrise tutturarak, ortamdan kolayca ayrılabilmesini ve sabit koşullar altında yeniden kullanılabilmesini mümkün kılmaktır (Hassan ve ark., 2019). Enzim immobilizasyon tekniklerinin geliştirilmesi, Nelson ve Griffith tarafından 1916 yılında gerçekleştirilen ilk çalışmadan bu yana yoğun bir şekilde devam etmektedir (Wahab ve ark., 2020). Genel olarak, enzimlerle ilgili endüstriyel zorluklar genellikle düşük stabilite, substrat veya ürün inhibitörleri, geri kazanım zorluğu ve yüksek maliyetle ilişkilidir. Bu sorunları çözmek amacıyla enzim immobilizasyonu, stabiliteyi artırmak, ayırmayı kolaylaştırmak ve birden fazla kullanım döngüsünde tekrar kullanım sağlamak için çok yönlü bir araç olarak geliştirilmiştir (Maurya ve ark., 2020). Enzim immobilizasyonu, enzimin bir taşıyıcıya bağlanması olarak tanımlanabilir. Bu süreç, enzimin hareketliliğinin azalmasına veya kaybolmasına rağmen katalitik aktivitesinin korumasını sağlar. İmmobilizasyon sistemleri, stabilite, özgüllük, daha iyi aktivite ve denatürasyona karşı daha yüksek direnç sunarak, enzimlerin biyoteknoloji alanlarındaki kullanımını çeşitlendirir ve kolaylaştırır (Abdel-Hameed ve ark., 2022). İmmobilize enzimler, daha yüksek dayanıklılığa sahip olup değişen çevresel koşullara karşı daha dirençlidir (Yandri ve ark., 2021). Enzimler, yüksek katalitik aktiviteye, substrat özgüllüğüne ve kirleticileri parçalama yeteneğine sahiptir. Katalitik aktivitelerini kaybetmeden enzimleri destek malzemeleri üzerinde immobilize etmek, konformasyonel yapılarının korunmasını gerektirir. Mikroküreler, boncuklar ve hidrojeller, dayanıklılıkları, biyouyumlulukları, kararlılıkları, immobilizasyon yetenekleri ve yeniden kullanılabilirlikleri nedeniyle destek malzemeleri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Yamaguchi ve Miyazaki, 2024). Enzimler ile taşıyıcı arasındaki güçlü bağ, enzimlerin taşıyıcıdan sızmasını önemli ölçüde engeller (Mehrabi ve ark., 2024**).**

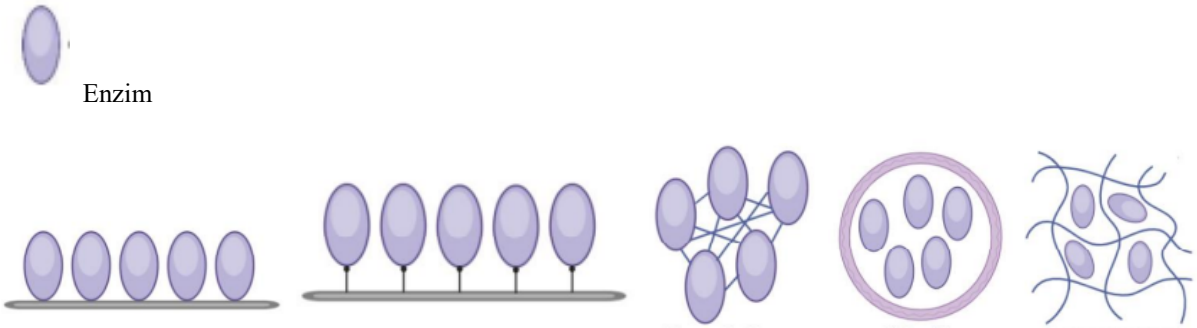
İmmobilizasyon teknikleri, enzimin ve taşıyıcının özellikleri ile birebir ilgilidir. Enzimin şekil ve boyut gibi fiziksel özelliklerine, substrat özgüllüğüne, aktivitesine, optimum pH ve sıcaklık aralığı gibi biyolojik aktivitelerine bağlıdır. Bu nedenle, bu parametreler göz önünde bulundurularak, yüksek ürün verimi ve yeniden kullanılabilirlik sağlayan kapsamlı bir enzim immobilizasyon sistemi geliştirilmek temel amaç olmalı, immobilizasyon tekniği ve taşıyıcı, endüstriyel gereksinimlere göre seçilmelidir. Bu amaçla kullanılacak immobilizasyon yöntemleri, geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Mohammadi ve ark., 2023). Enzimlerin geri dönüşümlü immobilizasyonu, adsorpsiyon, metal bağlama ve iyonik bağlamayı; geri dönüşümsüz immobilizasyonu ise tuzaklama ve kovalent bağlanmayı kapsamaktadır (Maghraby ve ark., 2023). Aşağıda, söz konusu tekniklerle ilgili daha ayrıntılı bilgiler sunulmaktadır. Tüm bu immobilizasyon yöntemleri, Maghraby ve arkadaşlarının çalışmalarından (2023) derlenerek düzenlenen Şekil 1'de özetlenmiştir. Şekilde de

görülen, geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz şeklindeki bu sınıflandırma, enzimlerin taşıyıcı matriks ile olan etkileşimlerinin kalıcılığına dayanmaktadır.



Şekil 1. Geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz immobilizasyon teknikleri (Maghraby ve ark. 2023 kaynağından alınarak düzenlenmiştir)

Benzer şekilde, ilgili sınıflandırma Türköz ve arkadaşlarının çalışmalarında (2024) da ilgi çekici bir şema ile sunulmuştur; bu şema, söz konusu kaynaktan alınarak düzenlenmiş hâliyle Şekil 2'de yer almaktadır. Şekil 2, immobilizasyon tekniklerini enzim-matriks etkileşimi bağlamında sade ve anlaşılır bir şekilde sunmaktadır. Her bir yöntem, enzimin yüzeyle olan ilişkisine göre farklı yapısal formlarda gösterilmiştir. Adsorpsiyon, enzimlerin yüzeye tutunması ile gösterilirken, kovalent bağlanma, enzimlerin taşıyıcıya kimyasal bağlarla sabitlenmesini betimlemektedir. Çapraz bağlanmada enzimler, ağ benzeri bir yapı içerisinde bağlanmaktadır. Kapsülleme, enzimlerin yarı geçirgen bir kapsül içerisinde bulunduğu yapıyı temsil eder. Tuzaklama ise enzimlerin düzensiz bir matris içinde fiziksel olarak hapsolmasını simgeler. Bu şematik sunumlar, teorik bilgilerin görsel hafıza ile desteklenmesini kolaylaştırarak, immobilizasyon tekniklerinin kavranmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 2. İmmobilizasyon yöntemleri (Türköz ve ark., 2024 kaynağından alınarak düzenlenmiştir).

Her bir teknik aşağıda alt başlıklarla ayrıntılı şekilde açıklanmış, Tablo 1'de ise avantaj ve dezavantajları açısından karşılaştırılmıştır.

2.1.Geri Dönüşümlü İmmobilizasyon

Destek malzeme ve enzim arasındaki bağlanma türüne bağlı olarak, geri dönüşümlü immobilizasyon yöntemleri ile sabitlenen enzimler, hafif çevresel koşullarda dahi destekten kolayca ayrılabilmektedir. Bu durum bir dezavantaj gibi görünse de eğer düşük maliyetli destekler kullanılır ve destek yeni enzimle yeniden yüklenirse, özellikle kararsız ve yüksek maliyetli enzimlerin kullanıldığı biyoanalitik sistemlerde, geri dönüşümlü immobilizasyon avantaj sağlayabilir (Taheri-Kafrani ve ark., 2021). Bu tür bağlanma adsorpsiyon yoluyla ve iyonik ya da metalik etkileşimlerle gerçekleşebilir.

2.1.1.Adsorpsiyon

Bu yöntemde enzimler, bir taşıyıcı üzerinde hidrofobik etkileşimler, van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları veya iyonik bağlar aracılığıyla immobilize edilmektedir (Türköz ve ark., 2024). Taşıyıcılar/adsorbanlar yapılarına göre iki ana kategoriye ayrılabilir: inorganik (silika, hidroksiapatit ve titanya gibi) ve organik (kitosan, selüloz, kitin ve aljinat gibi). α-amilazı immobilize etmek için en yaygın kullanılan inorganik taşıyıcılardan biri silika veya silika bazlı nanopartiküllerdir. Bu tür immobilizasyon, denatürasyon ve bozunmayı önleyerek enzimin dayanıklılığını ve kararlılığını artırır. Ayrıca, enzimin yeniden kullanılabilir hâle gelmesini sağlar ve bu durum yeni enzim preparatları geliştirme maliyetlerini düşürür (Ali ve ark., 2025).

2.1.2.İyonik Bağlanma

İyonik bağlanma, enzimler ve destek malzemeleri arasında anyonik (örneğin karboksil grupları) ya da katyonik (örneğin amin grupları) etkileşimi içeren basit, ucuz ve geri dönüşümlü bir immobilizasyon tekniğidir. Bu immobilizasyon tekniğinde kullanılan destek malzemeleri bu yüzeylere adsorbe olabilmesi için yani proteinlerin birbirine/desteğe bağlanabilmesi için elektrostatik yüklere sahip olması gerekir (Maghraby ve ark., 2023). Enzimlerin geri dönüşümlü immobilizasyonu için yaygın olarak

kullanılan bu teknikte, enzimler ile taşıyıcı yüzeyler arasında iyonik etkileşimler bulunur. Örneğin, iyon değiştiricilerin kullanımı (protein-ligand etkileşimleri), enzimlerin geri dönüşümlü immobilizasyonunda kromatografinin en eski kullanımlarındandır. Kolay ve geri dönüşümlü bir teknik olmasına rağmen, yüksek enzim aktivitesinin ve güçlü bağların sürdürülmesi için gereken koşulları belirlemek genellikle zordur. Yüksek yüklü destek kullanıldığında, ürünler veya substratlar da yüklü ise, optimum pH ve pH kararlılığında kaymalar meydana gelebilir (Taheri-Kafrani ve ark., 2021).

2.1.3.Metal Bağlanma

Metal bağlama (şelasyon), yüksek maliyet ve güvenlik endişeleri nedeniyle endüstride daha az tercih edilen ve geri dönüşümlü bir enzim immobilizasyon yöntemidir. Bu teknik, yüklü ve polar amino asitler ile metal iyonları arasında koordine kovalent bağı oluşturma yeteneğine dayanmaktadır (Mohammadi ve ark., 2023).

2.2. Geri Dönüşümsüz İmmobilizasyon

Geri döndürülemez immobilizasyon mekanizmasında, bir enzimin destekten ayrılması ancak biyolojik aktivitesinin yok edilmesiyle mümkündür (Taheri-Kafrani ve ark., 2021). Bu mekanizmaya ilişkin aşağıdaki türler mevcuttur.

2.2.1.Kovalent Bağlanma

Bu immobilizasyon yönteminin oluşumu atomlar arasında elektron çiftlerinin ortak kullanımına dayanmaktadır. Enzimlerin taşıyıcı malzemenin yüzeyine bağlanması “doğrudan” bağlanma olarak adlandırılmaktadır (Türköz ve ark., 2024). Yöntem, enzimde bulunan fonksiyonel gruplar ile destek materyalinin yüzeyinde yer alan amino grubu, karboksil grubu, hidroksil grubu ve sülfidril grubu gibi fonksiyonel gruplar arasında kararlı bir kovalent bağ oluşumuna dayanmaktadır (Hassan ve ark., 2019).

2.2.2.Tuzaklama

Tuzaklama yaklaşımının mekanizması, enzimin polimerik bir ağ içinde kapsüllenmesine dayanır; bu kapsülleme, enzimi tutarken ürünlerin ve substratın geçişine izin verir (Taheri-Kafrani ve ark., 2021). Tuzaklamada genellikle enzimler aljinat gibi suda çözünür bir polimer içerisinde dağıtılıp, ardından çapraz bağlanarak matrise hapsedilir. Matrisin gözenek boyutu, işlemde önemli bir rol oynar ve deney koşullarının (örneğin polimerin derişimi) değiştirilmesiyle kontrol edilir. Tuzaklama yönteminin doğal avantajları arasında hafif koşullar gerektirmesi, hızlı ve düşük maliyetli olması yer alır. Ayrıca, yöntem küçük ölçekli uygulamalar için uygundur (Sharma ve ark., 2022b).

2.2.3.Çapraz Bağlanma

Çapraz bağlama immobilizasyonu, enzimlerin taşıyıcı olmaksızın kovalent bağlarla birbirine bağlandığı bir stratejidir. Moleküller arası çapraz bağlanma, iki bitişik enzim molekülü arasında köprü görevi gören bağlayıcı ajanların varlığıyla gerçekleştirilir. Çapraz bağlama ile gerçekleşen immobilizasyon, enzimler arasında sağlam bir bağlantı sağlayarak üstün kararlılıklara yol açar (Maghraby ve ark., 2023). Genellikle enzimler için iki çapraz bağlama yöntemi uygulanır: Çapraz bağlı enzim kristalleri (CLEC) ve çapraz bağlı enzim agregatları (CLEA). Her iki yöntem de glutaraldehit gibi çapraz bağlayıcı ajanlar kullanılarak çeşitli düzenlemeler yapılmaktadır (Mohammadi ve ark., 2023).

2.2.4.Hapsetme ve Kapsülleme

Kapsülleme immobilizasyon tekniği, birden fazla biyomolekülün farklı polimerik matrislere hapsedilmesini içerir. Kapsülleme hem enzimlerin hem de hücrelerin çözeltilerde serbest olmalarına rağmen kontrollü bir alanda bulunmaları bakımından tuzaklamaya benzer (Maghraby ve ark., 2023). Hapsetme, enzimlerin düşük maliyetli polimerik ağlarda tutulduğu bir immobilizasyon yöntemi olarak tanımlanmaktadır ve enzimlerin aynı bölgede birikmesini önlemek için pratik bir strateji olarak değerlendirilmektedir (Türköz ve ark., 2024).

Tablo 1. İmmobilizasyon yöntemlerinin değerlendirilmesi

YÖNTEMLER	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR	REFERANSLAR
Adsorpsiyon	Kolay, hızlı ve ekonomik bir tekniktir. Tepkime oluşmaz. Por ve difüzyon sınırlamaları bulunmaz. Minimum düzeyde enzim aktivasyonu gerektirir. Kimyasal yöntemlere kıyasla enzimler üzerinde daha az engelleyicidir. Basit bir yöntem olup, ikincil bir etken madde kullanımını gerektirmez. Enzimin yapısı üzerindeki etkisi sınırlı olduğu için, katalitik aktivitede azalma göreli olarak düşüktür. Hazırlama işlemleri basit ve hızlıdır. Ayrıca, düşük maliyetlidir.	Kinetik davranışın bölünme ve difüzyon mekanizmaları nedeniyle bozulması, düşük verimle sonuçlanır. Bu bozulmalar, enzimin pH'ya karşı kararlılığında azalmaya veya optimum pH değerinin kaymasına neden olabilir. Aynı zamanda, enzim moleküllerinin taşıyıcıdan ayrılması (desorpsiyon) da gözlemlenebilir. Düşük stabilite ve desteklerde zayıf bağlanma mevcuttur.	Sharifi ve ark., 2020, Türköz ve ark., 2024, Yamaguchi ve ark., 2024
Kovalent Bağlanma	Bu yöntem, geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta olup nispeten basitliği, farklı taşıyıcı seçenekleri, enzimlerle güçlü bağlanma kapasitesi ve çok işlevli gruplar içermesiyle öne çıkar. Ayrıca, sızıntı ve desorpsiyon gibi istenmeyen kayıplar gözlenmemektedir. Güçlü bağlanma, enzim sızmasının önlenmesi, yüksek termal kararlılık, artırılmış operasyonel kararlılık, belirli proseslere uyarlanabilirlik ve yüksek stabilite mevcuttur.	Bu yöntem, rekabetçi inhibisyon risklerinin yanı sıra, enzimlerin kimyasal modifikasyonuna bağlı olarak fonksiyonel konformasyon kaybına neden olabilmektedir. Enzim hareketliliğinin kısıtlanması, enzim aktivitesinin azalması, konformasyonel kısıtlama ve yüksek maliyet mevcuttur.	Sharifi ve ark., 2020, Türköz ve ark., 2024, Yamaguchi ve ark., 2024
Hapsetme	Hızlı immobilizasyon yöntemidir, Algılama (sensör) uygulamaları için kullanılabilir. Düşük maliyetli matrislerin varlığı, sınırlı konformasyonel değişiklik ve küçük ölçekli uygulamalardaki pratikliği nedeniyle bu yöntem avantajlıdır.	Mikrobiyal bulaşma (kontaminasyon) olasılığı vardır. Enzim sızıntısı ve gözenek difüzyon sınırlamaları mevcuttur. Düşük endüstriyel uygulama seviyeleri ve küçük ölçekli operasyonlarla sınırlıdır.	Türköz ve ark., 2024
Kapsülleme	Uygun maliyetli bu yöntem, uzun vadeli enzim stabilitesi sağlar. Özütleme (ekstraksiyon) gerektirmez ve çoklu enzimlerin tek kapta immobilizasyonuna olanak tanır. Ayrıca, enzimlerin doğal yapısı korunarak hücre organellerinin (örneğin mitokondrilerin) immobilizasyonu mümkündür.	Düşük enzim derişimi ve sınırlı gözenek boyutu mevcuttur. Son ürünlerin diğer enzimlerce dönüşümü nedeniyle istenmeyen yan ürünler oluşabilir.	Türköz ve ark., 2024

Tablo 1. Devamı.

YÖNTEMLER	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR	REFERANSLAR
Çapraz Bağlanma	Matris içermeyen, nispeten basit, hızlı ve ucuz olan bu yöntem, endüstriyel uygulamalarda yaygın olup, aynı anda yüksek miktarda enzimin çapraz bağlanmasına olanak sağlar. Güçlü biyokatalizör bağlama, sızıntı önleme, desorpsiyonda azalma mevcuttur. Yeniden kullanımı kolaydır. Kolay hazırlama imkânı sunar. Taşıyıcı gerektirmez. Yüksek immobilizasyon stabilitesi sunar.	Çapraz bağlayıcılar tarafından denatürasyon veya yapısal modifikasyon gerçekleşebilir. Çok işlevli reaktifler (glutaraldehit vb.) gereklidir. Enzim aktivitesinin kaybı, difüzyon hızının azalması, zayıf mekanik özellikler, kütle transfer sınırlamalarına sahiptir. Çapraz bağlanma verimi protein yüzeyindeki Lizin (Lys) sayısına bağlıdır.	Sharifi ve ark., 2020, Türköz ve ark., 2024, Yamaguchi ve ark., 2024
Tuzaklama	Enzim aktivitesinin korunması, sürekli çalışma, basit alt akış süreci gibi avantajlar sunar. Kolay hazırlama, düşük maliyet ve yüksek enzim aktivitesi mevcuttur.	Kütle transferinin sınırlandırılması, düşük enzim yüklemesi, katalizlemenin ara faz enzim/substratında gerçekleştirilmesi, enzim sızıntısı gibi dezavantajlar mevcuttur.	Sharifi M. ve ark., 2020, Türköz ve ark., 2024
İyonik Bağlanma	Basit hazırlama imkânı sunar. Enzimin yapısı üzerindeki etkisi daha azdır. Maliyet düşüktür.	Enzim desorpsiyonu gerçekleşir.	Yamaguchi ve ark., 2024

Tablo 1'de ise enzim immobilizasyon yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Buna göre; Fiziksel adsorpsiyon yöntemi, basit ve düşük maliyetli olması nedeniyle tercih edilmekle birlikte, zayıf bağlanma kuvvetleri nedeniyle enzim taşıyıcıdan kolaylıkla ayrılabilir. Bu durum sistemin uzun dönem stabilitesini sınırlar. Kovalent bağlanma ise, enzimin taşıyıcıya güçlü ve kalıcı şekilde tutunmasını sağlar. Bu sayede yüksek termal ve kimyasal stabilite elde edilir. Ancak, aktif bölgeye yakın bağlanmalar katalitik aktivitede azalmaya yol açabilir ve yöntemin karmaşıklığı maliyeti artırabilir. Jel tutuklama teknikleri, enzim moleküllerini üç boyutlu polimer ağları içerisinde hapseder ve böylece enzim konformasyonunun korunmasına yardımcı olur. Bu yöntem, özellikle substrat afinitesini koruyarak yüksek katalitik aktivite sağlar ve enzim kaybını minimize eder. Dezavantaj olarak ise, difüzyon kısıtlamaları nedeniyle tepkime kinetiğini yavaşlatabilir.

Destek materyalinin kimyasal yapısı, gözenekliliği ve yüzey özellikleri, immobilize enzimin aktivitesi ve stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynar. Örneğin, biyopolimer bazlı taşıyıcılar (aljinat, kitosan) enzim konformasyonunu koruyarak yüksek aktivite sağlarken, bazı inorganik destekler (silika, manyetik nanopartiküller) mekanik dayanıklılığı artırmakta, ancak uygun fonksiyonelleştirme yapılmadığında enzim aktivitesinde azalmaya neden olabilmektedir.

Sonuç olarak, immobilizasyon yöntemi ve taşıyıcı seçimi, uygulama koşullarına (pH, sıcaklık, substrat tipi) göre optimize edilmelidir. Bu optimizasyon, enzimin katalitik verimliliğini maksimize ederken, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamada kritik öneme sahiptir.

3. Amilaz Enzimi

"Amilaz" terimi, nişasta anlamına gelen Yunanca "*amylon*" kelimesinden türemiştir (Sharma ve ark., 2022a). İlk amilaz, 1833 yılında Anselme Payen tarafından izole edilmiştir (Farooq ve ark., 2021). Bakteri kaynaklı amilazların daha yüksek kararlılığa, yüksek verimliliğe ve düşük üretim maliyetine sahip olduğu bilinmektedir (Kaya ve Enez, 2019). Bu enzim biyoteknolojik çalışmalarda önemli bir yere sahip olup en değerli endüstriyel enzimler arasında yer almaktadır ve bu durum dünya enzim pazarının %25-33'ünü oluşturmaktadır (Akcan, 2021). İmmobilizasyon yöntemi aracılığıyla amilazların tepkime koşullarındaki değişikliklere karşı direncini yükseltmek, amilazın endüstriyel kullanımını artırmanın bir yoludur (Akbulut ve ark., 2025). Bu enzimin; üretim verimini artırmak, maliyetleri azaltmak, nişasta parçalanmasını (depolimerizasyonunu) kontrol etmek, fizyolojik koşullarda çalışabilmek, yan ürün oluşumunu önlemek, daha düşük aktivasyon enerjisine sahip olmak ve saflaştırma aşamasına ihtiyaç duymamak gibi çeşitli avantajları vardır (Tiarsa ve ark., 2022). Bununla birlikte, amilazların geniş bir uygulama yelpazesi olmasına rağmen, büyük ölçekli kullanımları bazı sınırlamalara sahiptir. Bu sınırlamalar; yüksek maliyet, operasyonel koşullar altında düşük stabilite, tepkime karışımından ürünlerin ayrılmasındaki güçlük ve yeniden kullanılabilirlik eksikliği şeklinde özetlenebilir. Yukarıda belirtilen dezavantajlar, enzimlerin kararlı, inaktif ve geri dönüştürülebilir katı desteklere immobilize edilmesiyle aşılabilmektedir (Azizi ve ark., 2021). α-amilaz enziminin ana ailesi olan GH13, işlev

moduna ve kesme yerine bağlı olarak endo veya ekzo etkili olarak sınıflandırılır. α, β ve γ amilazlar olmak üzere üç tip amilaz bulunmaktadır (Ali ve ark., 2025).

3.1. α -Amilaz (EC3.2.1.1)

α-amilazlar (α-1, 4-glukan-glukanohidrolaz, EC 3.2.1.1), hücre dışı metaloenzimler içerir. Bu enzim, nişasta ve ilgili ürünlerdeki α-1, 4-glukozidik bağları kırarak oligosakkaritlerin oluşumunu sağlar. Temel hidrolitik ürünleri maltotrioz, maltoz, glukoz ve dekstrin olan α-amilaz, kalsiyum içeren bir metaloenzimdir (Ali ve ark., 2025; Yamaguchi ve Miyazaki, 2024). *α*-amilaz ailesi genellikle amiloz ve amilopektindeki α-glukozidik bağları hidrolize eder. Bu süreç, ürünlerin α -anomerik konfigürasyon göstermesine neden olur (Taheri-Kafrani ve ark., 2021)

α-amilaz enzimi endüstriyel ölçekte ilk kez 1939 Japonya'da, *Bacillus subtilis* suşu kullanılarak üretilmiştir. 1970 yılına gelindiğinde ise *B. subtilis* ve *B. licheniformis* kaynaklı α-amilaz enzimleri farklı endüstriyel alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Ünal ve ark., 2019). α-Amilaz, nişasta dönüşümü, fırıncılık endüstrisi, deterjan formülasyonları, kâğıt ve tekstil endüstrileri, yakıt amaçlı alkol üretimi, nişastadan şurup eldesi, içecek üretimi, tıbbi ve biyomedikal uygulamalar ile çiftlik atıklarının biyolojik ayrıştırılması gibi pek çok endüstride kritik bir role sahiptir (Yandri ve ark., 2023). Bununla birlikte, α-amilazların endüstriyel kullanımı, çevresel koşullara karşı hassasiyetleri, düşük operasyonel ve depolama stabiliteleri ile yeniden kullanım ve geri kazanım güçlükleri nedeniyle sınırlıdır (Atiroğlu ve ark., 2021). α-amilaz bitkilerden (örneğin arpa, manyok (*Cassava*), pirinç vb.), hayvanlardan veya mikroorganizmalardan (mantarlar, bakteriler, aktinomisetler vb.) elde edilebilmektedir (Abedi ve ark., 2024). *Aspergillus* cinsine ait mantarlar, α-amilazın ticari üretiminde en önemli kaynaklar arasında yer almaktadır. Ticari öneme sahip türler arasında *A. fumigatus*, *A. flavus* AUMC10636, *A. niger*, *A. oryzae*, *A. ochraceus*, *A. terreus* ve *A. tamarii* MTCC5152 bulunmaktadır (Yandri ve ark., 2023).

3.2. β-Amilaz (EC3.2.1.2)

β-amilaz, GH14 ailesine ait bir ekzo-hidrolaz enzimidir ve yapılandırma mekanizmasının ters çevrilmesi yoluyla polisakkaritlerin indirgeyici olmayan uçlarındaki α-1,4-glukan bağlarını hidrolize ederek maltoz üretir (Yamaguchi ve Miyazaki, 2024). Ancak, amilopektin veya glikojen moleküllerinde bulunan dallanma noktalarını hidrolize edemez. β-amilaz, genellikle pH 4.0–5.5 aralığında optimum aktivite göstermektedir (Farooq ve ark., 2021).

3.3. γ-Amilaz (EC 3.2.1.3)

γ-amilaz, GH15 ailesine ait ekzo-etkili bir glukoamilaz enzimidir (Yamaguchi ve Miyazaki, 2024). Diğer amilaz türlerinden farklı olarak, amiloz ve amilopektinde bulunan indirgenmeyen α-1,4-glukozidik bağları hidrolize ederek glukoz üretir. Ayrıca, α-1,6-glukozidik bağlarını da hidrolize edebilme özelliğine sahiptir. γ-amilazın optimum pH değeri 3'tür, yani en yüksek aktivite, asidik ortamda görülmektedir (Farooq ve ark., 2021).

Bu çalışmada, endüstride ve literatürde en yaygın olarak karşılaşılan amilaz türü olması nedeniyle α-amilaz üzerine odaklanılmıştır.

4.Endüstriyel Alanda α-Amilazın Çeşitli Uygulamaları:

Son yıllarda, α-amilazlar gibi amilolitik enzimlerin çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanımında belirgin bir artış gözlenmektedir. α-amilaz, gıda endüstrisinde özellikle şurup, tatlandırıcı ve içecek üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, nişastanın sakkarifikasyonu ve sıvılaştırılması, peynir olgunlaştırma ve aromalandırma, hayvan yemi üretimi, etanol eldesi, deterjan formülasyonları ve çamaşır yıkama işlemleri, tekstil ve kâğıt endüstrisi gibi birçok alanda da geniş bir kullanım alanına sahiptir (Paul ve ark., 2021). Nişastanın şekerleştirilmesindeki rolü nedeniyle, α-amilaz endüstriyel ve akademik çalışmalarda büyük ilgi görmektedir (Farooq ve ark., 2021). Ayrıca, α-amilaz, sindirim bozukluklarının tedavisinde sindirim tonikleri olarak yaygın biçimde kullanılmakta; dekstran veya dekstrin ile karıştırılmış formları ise farmasötik formülasyonlarda yer almaktadır (Paul ve ark., 2021). Düşük sıcaklıklarda ve alkali pH aralıklarında aktif kalabilen amilazlar ise deterjan endüstrisi açısından büyük öneme sahiptir (Ashok ve ark., 2024). Öte yandan, amilazlar soslar, tahıllar, patatesler ve çikolatalar gibi nişastalı gıdaların lekelerini çıkarmak amacıyla deterjan formüllerine eklenir (Maghraby ve ark., 2023). Kâğıt endüstrisinde, α-amilaz, kaplamalı kâğıtlarda bulunan yüksek Molekül kütleli nişastanın hidrolizinde kullanılmaktadır (Farooq ve ark., 2021). Günümüzde biyoetanol, bir dizi koordineli adımla üretilmektedir. İlk adımda, çeşitli tarımsal atık substratlardan α-amilaz üretilir. İkinci adımda, üretilen α-amilaz, fermente edilebilir şekerler elde etmek amacıyla nişastalı ve lignoselülozik hammaddelerin hidrolizinde kullanılır. Son adımda ise, bu fermente edilebilir şekerler biyoetanole dönüştürülür (Paul ve ark., 2021). α-amilazlar, tekstil endüstrisinde kumaşların tasarımı ve bitim işlemlerinde kullanılmaktadır (Ashok ve ark., 2024).

Amilazlar, işlenmiş gıda sektöründe de yaygın biçimde kullanılmakta olup özellikle fırıncılık, bira üretimi, sindirim destekleyici ürünlerin hazırlanması ile kek, meyve içecekleri ve nişasta şuruplarının üretiminde önemli rol oynamaktadır. α-amilazlar, fırıncılık endüstrisinde sıkça tercih edilen enzimlerdendir. Bu enzimler yalnızca fermente edilebilir kimyasalların üretimini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bayatlamayı önleyerek pişmiş ürünlerin pürüzsüzlüğünü artırır ve böylece raf ömrünü uzatır (Ali ve ark., 2025). Alfa-amilazın hibrit biyo-mikroçiçekleri, artırılmış katalitik aktivite ve stabiliteye sahip, kolay, hızlı ve çevre dostu bir yöntemle sentezlenmiştir. Bu yenilikçi metodoloji, endüstriyel uygulamalara yönelik yüksek aktivite ve stabilite gösteren bir biyokatalizör geliştirilmesi için potansiyel bir yaklaşım sunmaktadır (Maurya ve ark., 2020).

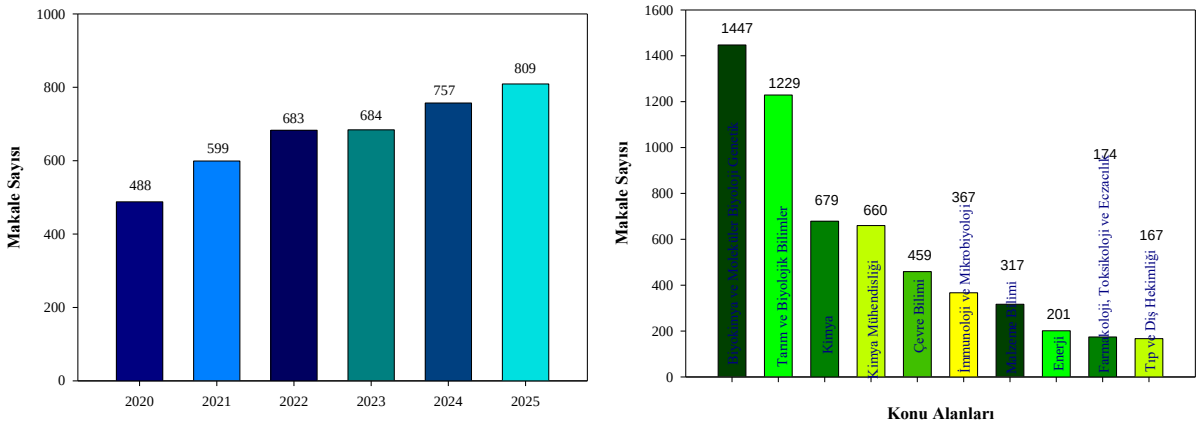
Tekstillerin biyokatalizörler için etkili bir immobilizasyon desteği olarak kullanılması, sağlam ve elyaf bazlı katalitik sistemlerin geliştirilmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. İmmobilize edilen α-amilaz, mısır tanelerinin antioksidan kapasitesini artırmak amacıyla başarıyla kullanılabilmektedir. Sonuç olarak, bu enzim, gıda ve içecek endüstrisinde geniş bir uygulama yelpazesi için uygun bir

adaydır (El-Shishtawy ve ark., 2023). Katı faz fermantasyonunda (KFF) substrat olarak kullanılan elma kabuklarının, α-amilaz üretimi için uygun bir biyolojik dönüşüm sistemi sunduğu gösterilmiştir. Meyve işleme sanayisinden kaynaklanan elma kabuğu atıklarının KFF süreçlerinde *Bacillus licheniformis* VO1 ile değerlendirilmesi, α-amilaz üretimi açısından çevresel iyileştirme uygulamalarında kullanılabilecek potansiyel bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir (Akcan, 2021).

Genel olarak, α-amilazın BDC-Cu MOF'lar üzerinde immobilizasyonu, enzim stabilitesi ve katalitik aktivitede önemli iyileşmeler sağlamış; ayrıca mısır unu ve darı örneklerinin antioksidan potansiyellerinin artırılmasına katkıda bulunmuştur (Al-Harbi ve Almulaiky, 2024). Yapılan bir çalışmada, serbest α-amilaz yerine immobilize enzim kullanımının, arpa maltı hidrolizatlarında %50 (1,5 kat) oranında verim artışına yol açtığı belirlenmiştir. Hosseinipour ve arkadaşları, α-amilazı yeni geliştirilen nanopartiküller üzerine immobilize etmiş ve bu formun fizikokimyasal özelliklerini serbest enzimle karşılaştırmışlardır. Ayrıca, farklı pH ve sıcaklık koşullarında kapsamlı kinetik ve stabilite çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Söz konusu çalışmada, α-amilaz, glutaraldehit ile aktive edilmiş amino-fonksiyonelleştirilmiş silika kaplı manyetik nanopartiküller (AFSMNP'ler) üzerine başarılı bir şekilde immobilize edilmiş ve kovalent bağlama yöntemiyle kitosan ile kaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, termal, pH ve depolama stabilitelerinde; ayrıca enzimin tekrar kullanım performansında immobilizasyona bağlı olarak belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. Öte yandan, Reshmi ve arkadaşları, α-amilazın zirkonya yüzeyine adsorpsiyon yöntemiyle immobilizasyonunu gerçekleştirmiştir. Elde edilen immobilize enzim, nişasta hidrolizi tepkimelerinde kullanılmış ve aktivitesi serbest enzimle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, optimum stabilite için gerekli pH değerinin immobilize enzimde arttığı belirtilmiş; en yüksek stabilitenin serbest enzim için pH 7, immobilize enzim için ise pH 6 olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, immobilizasyonun ardından enzimin pH değişimlerine karşı daha az duyarlılık gösterdiği gözlemlenmiştir (Türköz ve ark., 2024). İmmobilize edilmiş amilaz, yüksek maltoz içeren şurup üretiminde etkili bir şekilde kullanılmış olup, bu durum enzimin gelecekte ticari uygulamalar için potansiyel bir aday olduğunu göstermektedir (Desai ve ark., 2021). α-amilazın maltoz sentezinde kullanımı; biyoyakıt üretimi, şekerleme ve tekstil endüstrisi gibi çeşitli sektörlerin ihtiyaçlarını karşılayabilmesi açısından enzimin çok yönlülüğünü ortaya koymaktadır (Kumar ve ark., 2024). Uygun ve arkadaşları, α-amilazın immobilizasyonu için manyetik poli(2-hidroksietil metakrilat-N-metakriloil-(L)-fenilalanin) polimerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, enzimin substrata olan afinitesinin immobilizasyon sonrasında arttığı ve on döngü sonunda özgül aktivitesinin %85'inin korunduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, mevcut çalışmada α-amilaz ve maltojenik amilazın nano ölçekte birlikte immobilizasyonu gerçekleştirilmiş ve yeni bir nanobiyokatalizör geliştirilmiştir (Torabizadeh ve Montazeri, 2020).

5. Son Beş Yılda Literatürde Rastlanan α-Amilaz İmmobilizasyonu Çalışmaları

Web of Science (WOS) ve DergiPark (DP) sitelerine bakıldığında, endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan enzimlerden biri olan α-Amilaz üzerine yapılan ulusal ve uluslararası çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. WOS'da, "alpha amilase" konu başlığı ile yapılan aramada 1973-2023 yılları arasında, ikisi derleme olmak üzere toplam 44 makale bulunmaktadır. 2020 sonrası çalışma sayısı ise 16'dır (URL 1). DP sitesinde ise "alfa amilaz" anahtar kelimesi ile 5 çalışmaya rastlanmıştır (URL 2). Bilindiği gibi *Science Direct*, başta Elsevier Science olmak üzere, bilim, tıp ve teknoloji alanlarında yayın yapan yayınevleri ve derneklerde basılan makale ve kitap bölümlerini içeren bir veri tabanıdır. Bu bağlamda, daha genel arama yapılabilen ScienceDirect'te, bu terimleri içeren makaleleri bulun (Find articles with these terms) alanına *"alpha amylase immobilization"* yazıldığında 2020-2025 yılları arasında 4020 makale bulunmuştur. Ayrıca, 2026 yılına ait 76 makale mevcuttur (URL 3). Çalışmalar makale türüne (article type) göre incelendiğinde, 1355 tanesinin derleme, 1574'ünün araştırma makalesi, 907 tanesinin kitap bölümü, kalan 184 tanesinin ise ansiklopedi, konferans özeti vd. türlerde olduğu görülmektedir. Şekil 3'ten de görülebileceği gibi, konuya olan ilgi her geçen yıl daha da artmaktadır. Biyokimya, moleküler biyoloji ve genetik, kimya vb. pek çok farklı alanlardaki araştırmacılar α-amilaz immobilizasyonu konusunda araştırmalar yapmaktadırlar.



Şekil 3. ScienceDirect sitesinde yapılan α-amilaz immobilizasyonu literatür tarama sonuçları

Bu çalışmalar arasında, Ocak 2020 – Mayıs 2025 tarihleri arasında immobilizasyon parametreleri incelenen çalışmalar arasında rastgele seçilen 28 makale analiz edilmiştir.

Bu makalelerde kullanılan immobilizasyon yöntemi, enzimin kaynağı veya türü ile destek/taşıyıcı materyaller Tablo 2'de gösterilmiştir. Literatürde, serbest ve immobilize enzimlerin optimum pH (pH_{opt}) ve sıcaklık (t_{opt}) değerleri ile kinetik parametreleri (K_m, V_{max}), diğer makalelerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tabloda yer alan alfa amilazlar, çeşitli bakteri türleri, mantar cinsleri veya ticari amilaz gibi farklı formlardan elde edilmiştir. Tablo 2'deki araştırmalarda kullanılan immobilizasyon yöntemlerinin çoğunun avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de de görülmektedir. Araştırmalarda tercih edilen immobilizasyon yöntemleri, kullanım kolaylığı ve verimlilik açısından önemli yöntemlerdir.

Bilindiği gibi, optimum pH ve sıcaklık, enzimin en yüksek verimde aktif çalıştığı koşullardır. Optimum koşullar sağlanmadığında denatürasyon riski ortaya çıkar ve enzimin çalışma kapasitesi düşer. Bu nedenle, optimum pH ve sıcaklık, immobilizasyon yöntemlerinde kullanılan enzim ve buna bağlı destek malzemesi üzerinde farklı tekniklerle enzimin çalışma hızını, kullanılabilirliğini, stabilitesini ve işlevselliğini etkiler. Bu durum, yapılan çalışmalarda istenilen ya da buna yakın sonuçların elde edilmesini sağlar. Tablo 2'de incelenen makalelere göre de, enzimlerin optimum sıcaklıklarda en iyi performansı sergilediği, optimum pH'da da benzer şekilde en yüksek aktiviteye ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

K_m ve V_{max} değerleri ise enzimin substratla olan ilişkisini açıklar. K_m değeri, enzimin substrata bağlanma eğilimini ifade eder. Düşük K_m değeri enzimin substrata yüksek ilgisini, yüksek K_m değeri ise enzimin substrata düşük ilgisini gösterir. V_{max} ise enzimin maksimum hızda çalıştığını, yani substratın enzimle doygunluğunu ifade eder. Maksimum hızda enzim, en yüksek katalitik aktiviteyi gösterir. Tablo 2'deki K_m sonuçlarına bakıldığında, düşük değerlerin substratın enzime yüksek ilgi gösterdiğini ve verimliliğin en yüksek olduğunu; yüksek K_m değerlerinin ise düşük ilgi gösterdiğini ifade ettiği görülmektedir. V_{max} değerlerine bakıldığında, yüksek sonuçlarda enzimin performansının iyi olduğu, düşük sonuçlarda ise substratın enzime ilgisinin azaldığı ve çalışma seviyesinin düştüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca, destek malzemelerinin kullanıldığı sistemlerde serbest enzimlere kıyasla genellikle daha düşük K_m değerleri ve daha yüksek enzim aktivitesi elde edildiği raporlanmıştır.

Tablo 2'den çıkarılabilecek, diğer önemli bir sonuç ise, uygulanan immobilizasyon yönteminin (adsorpsiyon, kovalent bağlanma vb.) enzimin aktivitesini etkilediğidir. Tabloda özetlenen çalışmalarda kullanılan immobilizasyon yöntemleri arasında adsorpsiyon, kovalent bağlanma, çapraz bağlama, jel-tutuklama, iyonik bağlanma ve elektrospinning gibi teknikler görülmektedir. Bu yöntemler, enzimin kaynağına, işlem sıcaklığına ve destek materyaline göre farklı performanslar sergilemektedir. Örneğin, kitosan-manyetit (CSM-E) destekli sistemde hem adsorpsiyon hem de kovalent bağlanma kullanılarak 35 °C'de uygulanan immobilizasyon, K_m değeri (1,03 mg mL^{-1}) ile serbest enzime göre daha düşük afinite gösterirken, spesifik aktivitede (V_{max}) de belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir (15,38 U mg $protein^{-1}$). Bu durum, destek materyalinin yüzey özelliklerinin enzim substrat etkileşimini sınırlayabileceğini düşündürmektedir.

Kovalent bağlanma yöntemi kullanılarak, APTES-MNP@PCL destek materyaliyle elde edilen sistemler, görece yüksek K_m (6,5 mg mL^{-1}) ve düşük V_{max} (2,46 U mg $protein^{-1}$) değerleriyle substrata düşük afinitenin ve sınırlı aktivitenin göstergesidir. Buna karşın, NM-Combi-CLEAs gibi hibrit sistemler, K_m değerlerini mikromolar düzeylere kadar düşürerek ($3{,}33\times10^{-5}$ mg mL^{-1}), enzim substrat etkileşiminde önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu durum, enzimlerin fiziksel ve kimyasal olarak birden fazla mekanizma ile sabitlenmesinin etkinliğini artırabileceğini göstermektedir.

Jel-tutuklama yöntemiyle sodyum aljinat içinde immobilize edilen α-amilaz örneğinde K_m değeri oldukça düşük (0,15 mg mL^{-1}) olarak tespit edilirken, spesifik aktivitenin (2760,4 U mg $protein^{-1}$) serbest enzimden çok daha yüksek olması, bu yöntemin enzim konformasyonunu koruyarak katalitik etkinliği desteklediğini göstermektedir.

Ayrıca, iyonik bağlanma ile HA (hidroksiapatit) yüzeyine immobilize edilen enzim sistemleri de düşük K_m (0,413 mg mL^{-1}) ve ölçülebilir düzeyde V_{max} değerleri (0,476 U mg $protein^{-1}$) ile dikkat çekmektedir. Bu durum, biyouyumlu ve fonksiyonel yüzeylere sahip desteklerin immobilizasyon etkinliğini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Tablo 2'den de görülebileceği gibi, α-amilaz immobilizasyonunda kullanılan destek malzemeler arasında, aljinat ve kitosan gibi doğal organik polisakkaritler/polimerler, zeolit, kil (bentonit/montmorillonit), hidroksiapatit, ZnO_2 gibi inorganik malzemeler, grafenler, manyetik özelliklere sahip nanoparçacıklar, metal organik ağ yapılar (framework) (MOF), mikro/nano çiçek yapılar vb. yer almaktadır. Genellikle tek bir malzeme değil, pekçok malzemenin birlikteliği ile oluşan kompozit yapıların, enzim destek malzemesi olarak kullanımı dikkat çekicidir. Kompozitler, kendilerini oluşturan bileşenlerin de özelliklerini içeren hibrit yapılardır. Genellikle bir bileşenin kullanımı zorlaştırabilecek, olumsuz özelliği, başka bir bileşenin yapıya katılması ile iyileştirilebilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda,kompozit kullanımı, enzim immobilizasyonunda da hedeflenen özelliklere ulaşmayı kolaylaştırmaktadır.

Tablo 2. Son 5 yılda, örnek α-amilaz immobilizasyonu araştırmalarında kullanılan destek malzemeler, yöntemler ve immobilizasyon parametreleri

İMMOBİLİZASYON YÖNTEMİ	ENZİMİN TÜRÜ ve KAYNAĞI	DESTEK	pH_{opt}	t_{opt} /°C	K_m /mg mL^{-1}	V_{max} /U mg $protein^{-1}$	REFERANS
Adsorpsiyon ve Kovalent bağlanma	Diastaz α-amilaz (1,4-α-D-glukan glukano hidrolaz, EC 3.2.1.1)	Serbest amilaz Kitosan-manyetit (CSM-E) ve kimyasal olarak modifiye formları	5-5,5 7	50 35	0,45 ± 0,02 1,03 ± 0,03	34,48 ± 0,05 15,38 ± 0,05	Bindu ve Mohanan, 2020
Kovalent bağlanma	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz Polikaprolakton (PCL)-fonksiyonalize magnetik nanoparçacıklar (APTES-MNP@PCL)	5,5 6,5	55 65	4,81 ±0,14 8,02 ±0,26	1,52 ±0,11 2,46 ±0,18	Defaei ve ark., 2020
Elektro-eğirme (Elektrospinning)	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz İki farklı polimerik elektrospining elyaf	6,0 6,5	- -	0,323 0,360	0,238 0,237	El-Shishtawya ve ark., 2020
Çapraz bağlanma	*Bacillus amyloliquefaciens'*den	Serbest amilaz Hibrit biyo-mikro çiçek	- -	55 55-75	0,401 ± 0,042 0,342 ± 0,029	4,62 ± 0,46 5,57 ± 0,32	Maurya ve ark., 2020
CLEA ve Kovalent bağlanma	Kombine Fungamyl 800 L (*Aspergillus oryzae*'dan α-amilaz, EC 3.2.1.1) ve Maltogenaz L (*Bacillus subtilis*'den maltogenik amilaz, EC 3.2.1.133)	Serbest amilaz Nano-manyetik kombine çapraz bağlı enzim agregatları (NM-Combi-CLEAs)	6,0 6,0	65 95	$4,86x10^{-4}$±$2,1x10^{-5}$ $3,33x10^{-4}$±$7\ x10^{-5}$	10,95 ± 0,042 9,98 ± 0,057	Torabizadeh ve Montazeri, 2020
Jel-tutuklama	*Aspergillus oryzae'*dan	Serbest amilaz Sodyum aljinat	4,0 4,0	40 40	0,18 0,15	- 2760,4	Zusfahair ve ark., 2020
İyonik bağlanma	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz Hidroksiapatit (HA) ve HA-ZrO_2 nanokompoziti	6,0 6,5	50 60	2,05 0,413	4,31 0,476	Almulaiky ve ark., 2021
Fiziksel adsorpsiyon ve Kovalent bağlanma	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz Metal-Organik nanokompozit (OLB/BSA@ZIF-8)	6,5 6,5	30-40 30-50	9,70 5,55	4,0 3,2	Atiroğlu ve ark., 2021
Kovalent bağlanma	*Aspergillus oryzae'*dan	Serbest amilaz Manyetik zeolit (MAZE) ve Karboksimetilselüloz (CMC) ile kompoziti (MAZE-CMC)	6,5 8,0 8.0	30 30 30	17,78 19,38 18.77	0,273 0,274 0.281	Azizi ve ark., 2021
Kovalent bağlanma	Malttan elde edilen α-amilaz	Serbest amilaz Grafen oksit-manyetit nanopartikülleri	7,0 7,0	40 70	0,6 0,9	450 333,33	Desai ve ark., 2021

Tablo 2. Devamı

Çapraz bağlama	*Aspergillus (terreus, niger, fumigatus, flavus)*	Serbest amilaz Çapraz bağlanmış amilaz agregatları (CLAAs)	6,0 7,0	50 60	5,77 10,47	1225 3629	Ullah ve ark., 2021
Adsorpsiyon	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz Kitin destekli malzeme	5,0 5,5	65 75	1,9 6,04	3508,77 1277,14	Yandri ve ark., 2021
Fiziksel adsorpsiyon	*Rhizobium sp.*	Serbest amilaz Bazalttan elde edilen sugulit cam (BSF)	5,0 5,0	50 50	15,4 3,6	2,3 1,5	Abdel-Hameed ve ark., 2022
Kovalent bağlanma	*Sillago sihama*	Serbest amilaz Çinko sülfür-kitosan hibrit nanoparçacıkları	8,0 8,0	40 40	3,1 ±0,76 3,5 ±0,15	7,15±0,26 6,70±0,31	Bahri ve ark., 2022
Kapsülleme Elektrospinning	*Bacillus licheniformis*'ten	Serbest amilaz Polietilen glikol (PEG)-etil selüloz (EC) elektrospin lifler	6,6 6,0	50 50	5,5 ± 0,3 4,2 ± 0,4	2,1 ± 0,5 1,9 ± 0,2	Hosseini ve ark., 2022
Çapraz bağlama	Ticari glukoamilaz ve α-amilaz	Serbest amilaz *Curcuma longa* tozu ve glutaraldehit çapraz bağlayıcıyla oluşturulan manyetik nanopartiküller (AMNP)	- 7,0	- 50-60	0,32 ± 0,24 0,39 ± 0,15	12,43 ± 0,19 19,27 ± 0,21	Patil ve ark., 2022
Fiziksel adsorpsiyon	*Aspergillus fumigatus*‘dan	Serbest amilaz Kitin -bentonit (CB) hibriti	10 7,5	55 60	3,04 11,57	10,90 3,37	Tiarsa ve ark., 2022
Adsorpsiyon	*Aspergillus oryzae*'den	Serbest amilaz Montmorillonit killeri (Ca-Mt, Na-Mt, Ca-Mt-NaCl)	6,5 6,5 6,5 6,5	40 40 40 50	7,22 11,33 17,12 19,95	11,4 9,29 7,54 17,8	Wang ve ark., 2022
Adsorpsiyon	Arap balsamından saflaştırılmış α-amilaz	Serbest amilaz Hegzaetilendiamin-bakır kompozitleri (CuNPs @HMDA-TA, Cu (II) @HMDA-TA)	6,0 7,0 7,0	50 60 60	1,22 1,39 1,84	36,25 29,68 21,57	El-Shishtawy ve ark., 2023
Kovalent bağlanma	*Bacillus aquimaris*'den türetilen α-amilaz	Serbest amilaz Selüloz/Altın nanoparçacıklar	10 10	70 80	2,699 0,981	0,0171 0,0196	Razzaghi ve ark., 2023
Adsorpsiyon	*Aspergillus fumigatus’*den saflaştırılmış	Serbest amilaz Bentonit /kitosan kompoziti	5,5-6,0 5,5-6,0	50 60	1,69 ± 0,08 2,56 ± 0,09	52,32 ± 3,29 3,78 ± 0,09	Yandri ve ark., 2023

Tablo 2. Devamı

Çapraz bağlanma	Maltogenik amilaz (Mag1)	Serbest amilaz Kombine çapraz bağlı enzim agragatlar (Combi-CLEAs CM Combi-CLEAs-CM-add)	7,0 8,0 7,0	40 30 40	2,08 4,30 3,32	11,87 6,64 7,20	Yip ve ark., 2023
Kovalent bağlanma	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz Bakır bazlı metal-organik yapılar (BDC-Cu MOFs)	5,5 5,5	30-80 30-80	11,67 5,46	0,61 0,37	Al-Harbi ve Almulaiky, 2024
Kapsülleme /Kovalent bağlanma	*Bacillus tequilensis'*den TB5 α-amilaz	Serbest amilaz kalsiyum aljinat boncuklara hapsedilmiş yağdan arındırılmış pirinç kepeği (DORB)	9,0 9,0	60 60	- 0,31	- 222,22	Gupta ve ark., 2024
Kovalent bağlanma	Çemen otu (*Trigonella foenum graecum*)	Serbest amilaz Molibden diselenür nano-çiçekleri ($MoSe_2$ –NF)	5-5,5 5-5,5	50-60 50-60	1,12 3,21	384,14 104,26	Kumar ve ark., 2024
Kovalent ve Çapraz bağlanma	*Bacillus subtilis*'ten	Serbest amilaz İçi boş metal-organik (MOF) kaplı manyetik faz değişim mikrokapsülleri (PCM) (PCM@HZIF-8@α-Amy)	6,0 6,5	50 50	3,919 2,773	1,504 1,853	Liu ve ark., 2024
Kovalent bağlanma	*Aspergillus oryzae*'den	Serbest amilaz Bağlayıcı olarak siyanürik klorür kullanılan, biyoaktif bir Polidopamin (PDA) kaplı polietersülfon (PES) membran	6,5 6,5	55 55	0,8411 2,2147	1,42 1,86	Mehrabi ve ark., 2024
Kovalent bağlanma	*Priestia megaterium*'den α-amilaz	Serbest amilaz Genipin modifiye, çok duvarlı karbon nanotüpler ve silika destekler (CNT/Gen Slc/Gen)	7,0 7,0 7,0	40 40 40	0,1 0,3 0,7	556 885 1035	Akbulut ve ark., 2025

Sonuç olarak, α-amilaz immobilizasyonuna yönelik çalışmalar, seçilen destek materyali ve immobilizasyon yönteminin enzim kinetiği ve aktivitesi üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Jel-tutuklama gibi biyopolimer temelli yöntemlerin yüksek enzim aktivitesi ve düşük K_m değeri ile öne çıktığı, buna karşılık kovalent bağlanma gibi kimyasal yöntemlerin enzim-substrat etkileşimini kısıtlayabildiği görülmektedir. Endüstriyel uygulamalar için ideal immobilizasyon stratejisinin hem yüksek biyokatalitik aktivite hem de işlem stabilitesi sağlayacak şekilde dikkatle seçilmesi gerekmektedir.

Sonuçlar

Enzimlerin farklı destek materyalleri kullanılarak immobilize edilmesi; enzimin substratla etkileşimi, katalitik aktivitesi, depolama stabilitesi ve tekrar kullanılabilirliği gibi temel performans parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Bu süreçte kullanılan yöntemin basit, ekonomik ve çevre dostu olması, yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, endüstriyel uygulamalarda da yaygınlaşmasını sağlamakta, böylece maliyetlerin düşürülmesine ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

α-Amilaz, literatürde ve endüstriyel uygulamalarda, lipazlar gibi bazı yaygın enzimler kadar öne çıkmamış olsa da; geniş uygulama potansiyeli, yüksek katalitik etkinliği ve çevresel toleransı sayesinde gelecek vaat eden enzimler arasında yer almaktadır. Gıda, tekstil, deterjan ve biyoyakıt sektörlerinde kullanılabilirliği düşünüldüğünde, α-amilazın immobilizasyonuna yönelik bilimsel çalışmaların sayısının artırılması gerekmektedir.

Bu derleme çalışması, α-amilaz immobilizasyonu alanında araştırma yapmak isteyen lisansüstü öğrencileri ve araştırmacılar için, son beş yıl içinde yayınlanmış literatür verilerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Aynı zamanda immobilizasyonda kullanılan yöntemler ve taşıyıcı materyaller hakkında detaylı bilgiler sağlayarak, konunun daha iyi anlaşılmasına olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda çalışma, yalnızca literatürdeki güncel bilgileri derlemekle kalmayıp, aynı zamanda alanda Türkçe kaynak eksikliğini gidermeye yönelik bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, lisans düzeyindeki öğrencilerin bilimsel araştırma süreçlerine yönelmelerini teşvik edici bir kaynak olma niteliği taşımaktadır. α-Amilazın immobilizasyonuna yönelik yeni çalışmaların tasarlanmasında bu derleme hem teorik temel, hem de uygulama önerileri açısından yol gösterici bir kaynak olarak değerlendirilebilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Bu çalışma, Ceren Bersu YILMAZ tarafından bitirme tezi olarak hazırlanmış, danışman Demet BAYBAŞ ise gerekli düzenleme ve yönlendirmeleri yapmıştır.

Kaynakça

Abdel-Hameed SAM., Ahmed SA., Mostafa FA., Almasarawi ON., Abdel Wahab WA. Preparation and characterization of sugilite glass from basalt for α-amylase immobilization, statistical optimization of the immobilization process and description of free and immobilized enzyme. Heliyon 2022; e09960, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09960

Abedi E., Kaveh S., Hashemi SMB. Structure-based modification of a-amylase by conventional and emerging technologies: comparative study on the secondary structure, activity, thermal stability and amylolysis efficiency. Food Chemistry 2024; 437: 137903, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137903

Akbulut K., Taranacı S., Özkök S., Varan NE., Yıldırım D., Binay B. Heterologous expression of calcium-independent mesophilic α-amylase from *Priestia megaterium*: immobilization on genipin-modified multi-walled carbon nanotubes and silica supports to enhance thermostability and catalytic activity. Bioorganic Chemistry 2025; 155: 108151, https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2025.108151

Akcan N. *Bacillus licheniformis* VO1'den α-amilaz üretimi için tarımsal endüstriyel atıkların ve fiziksel faktörlerin incelenmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 11(1): 58-67, DOI: 10.21597/jist.780601

Al-Harbi SA., Almulaiky YQ. Copper-based metal-organic frameworks (BDC-Cu MOFs) as supporters for α-amylase: stability, reusability, and antioxidant potential. Heliyon 2024; 10: e28396, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28396

Ali Z., Abdullah M., Yasin MT., Amanat K., Sultan M., Rahim A., Sarwar F. Recent trends in production and potential applications of microbial amylases: a comprehensive review. Protein Expression and Puri Catio 2025; 227: 106640, https://doi.org/10.1016/j.pep.2024.106640

Almulaiky YQ., Khalil NM., El-Shishtawy RM., Altalhi T., Algamal Y., Aldhahri M., Al-Harbi SA., Allehyani ES., Bilal M., Mohammed MM. Hydroxyapatite-decorated ZrO2 for α-amylase immobilization: toward the enhancement of enzyme stability and reusability. International Journal of Biological Macromolecules 2021; 167: 299–308, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.150

Ashok PP., Dasgupta D., Ray A., Suman SK. Challenges and prospects of microbial α-amylases for industrial application: a review. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2024; 40: 44, https://doi.org/10.1007/s11274-023-03821-y

Atiroğlu V., Atiroğlu A., Özacar M. İmmobilization of α-amylase enzyme on a protein @metal–organic framework nanocomposite: a new strategy to develop the reusability and stability of the enzyme. Food Chemistry 2021; 349: 29127, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129127

Azizi V., Mohammadi M., Mokarram RR., Khiabani MS., Hamishehkar H. İmmobilization of α-amylase on modified magnetic zeolite (MAZE) coated with carboxymethyl cellulose (CMC) composite and its properties. LWT-Food Science and Technology 2021; 144: 111214, https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111214

Bahri S., Homaei A., Mosaddegh E. Zinc sulfide-chitosan hybrid nanoparticles as a robust surface for immobilization of *Sillago sihama* α-amylase. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2022; 218, 112754, https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112754

Bindu VU., Mohanan PV. Thermal deactivation of α-amylase immobilized magnetic chitosan and its modified forms: a kinetic and thermodynamic study. Carbohydrate Research 2020; 498: 108185, https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108185

Dağbağlı S. Ultrases işleminin enzim aktivasyonu üzerine etkileri. Akademik Gıda 2024; 22(2): 158-166, DOI: 10.24323/akademik-gida.1543682

Defaei M., Taheri-Kafrani A., Miroliaeic M., Yaghmaeia P. Alpha-amylase immobilized on polycaprolactone-grafted magnetic nanoparticles: improving stability and reusability. J Chem Technol Biotechnol 2020; 95: 2243–2250, DOI 10.1002/jctb.6412

Desai RP., Dave D., Suthar SA., Shah S., Ruparelia N., Kikani BA. İmmobilization of α-amylase on go-magnetite nanoparticles for the production of high maltose containing syrup. İnternational Journal of Biological Macromolecules 2021; 169: 228–238, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.101

El-Shishtawy RM., Al Angari YM., Alotaibi MM., Almulaiky YQ. Acrylic fabric and nanomaterials to enhance α-amylase-based biocatalytic immobilized systems for industrial food applications. International Journal of Biological Macromolecules 2023; 233: 123539, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123539

El-Shishtawya RM., Aldhahric M., Almulaiky YQ. Dual immobilization of α-amylase and horseradish peroxidase via electrospinning: a proof of concept study. International Journal of Biological Macromolecules 2020; 1631353-1631360, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.278

Farooq MA., Ali S., Hassan A., Tahir HM., Mumtaz S. Biosynthesis and industrial applications of α-amylase: a review. Archives of Microbiology 2021; 203: 1281–1292, https://doi.org/10.1007/s00203-020-02128-y

Gupta N., Paul JS., Jadhav SK. Biovalorizing agro-waste 'de-oiled rice bran' for thermostable, alkalophilic and detergent stable α-amylase production with its application as laundry detergent additive and textile desizer. İnternational Journal of Biological Macromolecules 2024; 256: 128470, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128470

Hassan ME., Yang Q., Xiao Z., Liu L., Wang N., Cui X., Yang L. Impact of immobilization technology in industrial and pharmaceutical applications. 3 Biotech 2019; 9: 440, https://doi.org/10.1007/s13205-019-1969-0

Hosseini A., Ramezani S., Tabibiazar M., Mohammadi M., Golchinfar Z., Mahmoudzadeh M., Jahanban-Esfahlan A. İmmobilization of α-amylase in ethylcellulose electrospun fibers using emulsion-electrospinning method. Carbohydrate Polymers 2022; 278: 118919, https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118919

Kaya S., Enez B. Topraktan izole edilen *Bacillus* türlerinden α-amilazın izolasyonu ve karakterizasyonu. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi 2019; 6(3): 494–499, https://doi.org/10.30910/turkjans.595364

Kumar A., Dutt R., Srivastava A., Kayastha AM. İmmobilization of α nanoflowers (MoSe-amylase onto functionalized molybdenum diselenide 2-NFs) as scaffolds: characterization, kinetics, and potential applications in starch-based industries. Food Chemistry 2024; 442: 138431, https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138431

Liu Y., Sun Z., Wu C., Qin X., Liu G., Wei X., Zhang H. Covalent immobilization of α-amylase on hollow metal organic framework coated magnetic phase-change microcapsules for the improvement of its thermostability. İnternational Journal of Biological Macromolecules 2024; 279: 135136, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135136

Maghraby YR., El-Shabasy RM., Ibrahim AH., El-SaidAzzazy HM. Enzyme immobilization technologies and industrial applications. ACSOmega 2023; 8; 5184−5196, https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07560

Maurya SS., Nadar SS., Rathod VK. A rapid self-assembled hybrid bio-microflowers of alpha–amylase with enhanced activity. Journal of Biotechnology 2020; 317: 27-33, https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.04.010

Mehrabi Z., Harsij Z., Taheri-Kafrani A. Polydopamine-functionalized polyethersulfone membrane: a paradigm advancement in the field of α-amylase stability and immobilization. Journal of Biotechnology 2024; 394: 1–10, https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.08.007

Mohammadi ZB., Zhang F., Kharazmi MS., Jafari SM. Nano-biocatalysts for food applications; immobilized enzymes within different nanostructures. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2023; 63(32): 11351–11369, https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2092719

Patil SS., Rathod VK. Combined effect of enzyme co-immobilized magnetic nanoparticles (MNPs) and ultrasound for effective extraction and purification of curcuminoids from curcuma longa. İndustrial Crops & Products 2022; 177: 114385, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114385

Paul JS., Gupta N., Beliya E., Tiwari S., Jadhav SK. Aspects and recent trends in microbial α-amylase: a review. Applied Biochemistry and Biotechnology 2021; 193: 2649–2698, https://doi.org/10.1007/s12010-021-03546-4

Razzaghi M., Homaei A., Hemmati R., Saberi D., Kavousipour S. Cellulose-gold nanohybrid as an effective support to enhance the catalytic efficiency and stability of α-amylase from *Bacillus aquimaris*. Journal of Molecular Liquids 2023; 391: 123399, https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123399

Sharifi M., Sohrabi MJ., Hosseinali SH., Hasan A., Kani PH., Talaei AJ., Karim AY., Nanakali NMQ., Salihi A., Aziz FM., Yan B., Khan RH., Saboury AA., Falahati M. Enzyme immobilization onto the nanomaterials: application in enzyme stability and prodrug-activated cancer therapy. International Journal of Biological Macromolecules 2020; 143: 665–676, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.064

Sharma P., Mondal K., Mondal KC., Thakur N. Hunt for α-amylase from metagenome and strategies to improve its thermostability: a systematic review. World Journal of Microbiology and Biotechnology 2022a; 38: 203, https://doi.org/10.1007/s11274-022-03396-0

Sharma S., Gupta S., Princy, Arya SK., Kaur A. Enzyme immobilization: implementation of nanoparticles and an insight into polystyrene as the contemporary immobilization matrix. Process Biochemistry 2022b; 120: 22–34, https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.05.022

Taheri-Kafrani A., Kharazmi S., Nasrollahzadeh M., Soozanipour A., Ejeian F., Etedali P., Mansouri THA., Razmjou A., Yek SMG., Varma RS. Recent developments in enzyme immobilization technology for high-throughput processing in food industries. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 2021; 6(19): 3160–3196, https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793726

Tiarsa ER., Yandri Y., Suhartati T., Satria H., Irawan B., Hadi S. The stability improvement of *Aspergillus fumigatus* α-amylase by immobilization onto chitin-bentonite hybrid. Hindawi Biochemistry Research International Volume 2022; Article ID 5692438: 9 pages, https://doi.org/10.1155/2022/5692438

Torabizadeh H., Montazeri E. Nano co-immobilization of α-amylase and maltogenic amylase by nanomagnetic combi-cross-linked enzyme aggregates method for maltose production from corn starch. Carbohydrate Research 2020; 488: 107904, https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.107904

Türköz B., Özçelik A., Karacabey E. Gıda endüstrisinde immobilize enzim uygulamaları. NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi 2024; 13(3): 1056-1073, doi: 10.28948/ngumuh.1487845

Ullah H., Pervez S., Ahmed S., Haleem KS., Qayyum S., Niaz Z., Nawaz MA., Nawaz F., Subhan F., Tauseef I. Preparation, characterization and stability studies of cross-linked α-amylase aggregates (CLAAs) for continuous liquefaction of starch. International Journal of Biological Macromolecules 2021; 173: 267–276, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.057

Ünal A., Malkoç S., Ocak İ., Korcan SE. Yerli alfa-amilaz enzimi üretimi için yerli fungus izolasyonu, makroskobik, mikroskobik tanımlaması, DNA dizi analizi ve biyoinformatik değerlendirmeler. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2019; 9(3): 1674-1682, DOI: 10.21597/jist. 542215

Wahab RA., Elias N., Abdullah F., Ghoshal SK. On the taught new tricks of enzymes immobilization: an all-inclusive overview. Reactive and Functional Polymers 2020; 152: 104613, https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104613

Wang K., Lv R., Sun S., Dong F., Liu M., Liu J., Nie X. Nanobiocatalyst consisting of immobilized α-amylase on montmorillonite exhibiting enhanced enzymatic performance based on the allosteric effect. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2022; 211: 112290, https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112290

Yamaguchi H., Miyazaki M. Bioremediation of hazardous pollutants using enzyme-immobilized reactors. Molecules 2024; 29: 2021, https://doi.org/10.3390/molecules29092021

Yandri Y., Ropingi H., Suhartati T., Irawan B., Hadi S. Immobilization of *Aspergillus fumigatus* α-amylase via adsorption onto bentonite/chitosan for stability enhancement. Emerging Science Journal 2023; 2610-9182, DOI: http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2023-07-05-023

Yandri Y., Suhartati T., Satria H., Karlinasari S., Yuwono SD., Hadi S. Stability enhancement of *Bacillus subtilis ITBCCB148* originating α-amylase by immobilization using chitin. J Adv Pharm Educ Res 2021; 11(3): 63-69, https://doi.org/10.51847/FzQcrN5wmD

Yip YS., Manas NHA., Jaafar NR., Rahman RA., Puspaningsih NNT., Illias RM. Combined cross-linked enzyme aggregates of cyclodextrin glucanotransferase and maltogenic amylase from *Bacillus lehensis G1* for maltooligosaccharides synthesis. İnternational Journal of Biological Macromolecules 2023; 242: 124675, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124675

Zusfahair, Ningsih DR., Kartika D., Kurniasih M., Nofiani R., Fatoni A. İmproved reuse and affinity of enzyme using immobilized amylase on alginate matrix. Journal of Physics: Conference Series 2020; 1494: 012028, doi:10.1088/1742-6596/1494/1/012028

url 1: https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/2fce3c09-39a5-432c-84de-97783749ffeb-0186667bfe/41f009d4-f6d8-4090-a315-3397c781f2e6-0186667104/relevance/1 (Erişim tarihi 04.11.2025)

url 2:

https://dergipark.org.tr/tr/search?advanced=1&q=keywords%3A%28alfa%20amilaz%29&section=article (Erişim tarihi 04.11.2025)

url 3:

https://www.sciencedirect.com/search?qs=alpha+amylase+immobilization&years=2025%2C2024%2C2023%2C2022%2C2021%2C2020&lastSelectedFacet=years (Erişim tarihi 01.11.2025)

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1907-1926, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1907-1926, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology



From Waste to Wisdom: Linking Circular Economy Principles with Digital and AI Technologies in Agriculture

İrfan KADIOĞLU[1], Gülay ÖZKAN[2*]

[1]Uludag University, Keles Vocational High School, Finance-Banking and Insurance Programme, 16740, Keles, Bursa.
[2]Yasar University, Faculty of Agricultural Science and Technologies, Department of Agricultural Economics and Agribusiness, 35100, İzmir

[1]https://orcid.org/0000-0002-7626-9431
[2]https://orcid.org/0000-0001-6878-1673
*Corresponding author: gulay.ozkan@yasar.edu.tr

Review Article

Article History:
Received: 09.08.2025
Accepted: 27.01.2026
Published online:15.06.2026

Keywords:
Artificial intelligence
Climate-friendly agriculture
Digital agriculture
Green transition
Precision agriculture
Sustainable farming

ABSTRACT

Agriculture is under increasing environmental, economic, and social pressures from climate change, resource depletion, and food insecurity, necessitating new approaches to production systems. This review examines how circular economy (CE) principles, digital transformation (DT), and artificial intelligence (AI) can be integrated to achieve sustainable agricultural development. A systematic literature review guided by the PRISMA method was conducted, analysing peer-reviewed studies published between 2016 and 2025 using the Web of Science and Scopus databases. The inclusion criteria targeted papers that addressed at least one sustainability dimension and focused on CE, DT, or AI applications in agriculture. The results show three interlinked themes. First, CE practices such as composting, biogas production, water reuse, and valorisation of agricultural waste reduce environmental impacts while creating new economic value streams. Second, DT tools, including Internet of Things (IoT) sensors, blockchain, and data analytics, enhance resource efficiency, supply chain transparency, and decision-making precision. Third, AI applications in crop monitoring, yield forecasting, and disease detection offer substantial productivity gains while minimizing inputs and emissions. However, adoption is hindered by high investment costs, limited digital literacy, regulatory gaps, and uneven infrastructure, particularly among smallholders. The review highlights the need for integrated policy frameworks that align investments in CE and DT, expand rural broadband networks, provide targeted training, and incentivize sustainable practices. A conceptual synthesis is proposed that links technological enablers with environmental, economic, and social outcomes. Addressing these barriers through coordinated multi-stakeholder strategies could accelerate the transition to resilient, environmentally friendly, and inclusive agricultural systems.

Atıktan Bilgiye: Tarımda Döngüsel Ekonomi İlkelerinin Dijital ve Yapay Zekâ Teknolojileriyle Bütünleşmesi

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 09.08.2025
Kabul tarihi:27.01.2026
Online Yayınlanma: 15.06.2026

ÖZ

İklim değişikliği, doğal kaynakların azalması ve gıda güvencesizliği, tarım sektöründe çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan giderek artan baskılar yaratmaktadır. Bu durum, üretim sistemlerinde köklü değişimlere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu derleme çalışması, döngüsel ekonomi (DE)

Anahtar Kelimeler:
Dijital tarım
Hassas tarım
İklim dostu tarım
Sürdürülebilir tarım
Yapay zekâ
Yeşil dönüşüm

ilkeleri, dijital dönüşüm (DD) ve yapay zekâ (YZ) teknolojilerinin birlikte nasıl kullanılarak sürdürülebilir tarımsal kalkınmanın desteklenebileceğini incelemektedir. PRISMA metodolojisi çerçevesinde yürütülen sistematik literatür taramasında, Web of Science ve Scopus veri tabanlarında 2016-2025 yılları arasında yayımlanmış hakemli makaleler değerlendirilmiştir. Çalışmaya, sürdürülebilirliğin en az bir boyutuna değinen ve tarımda DE, DD veya YZ uygulamalarını ele alan araştırmalar dâhil edilmiştir. Bulgular üç ana tema etrafında toplanmaktadır. İlk olarak, kompost üretimi, biyogaz sistemleri, suyun yeniden kullanımı ve tarımsal atıkların ekonomik değere dönüştürülmesi gibi DE uygulamaları hem çevresel etkileri azaltmakta hem de yeni gelir kaynakları yaratmaktadır. İkinci olarak, nesnelerin interneti (IoT) sensörleri, blokzincir ve veri analitiği gibi DD araçları, kaynak verimliliğini artırmakta, tedarik zincirinde şeffaflık sağlamakta ve karar süreçlerini iyileştirmektedir. Üçüncü olarak, ürün izleme, verim tahmini ve hastalık tespitinde kullanılan YZ çözümleri, daha az girdi ve düşük emisyonla önemli verim artışları sağlamaktadır. Ancak yüksek yatırım maliyetleri, düşük dijital okuryazarlık, mevzuattaki boşluklar ve özellikle küçük üreticilerde altyapı eksiklikleri, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını engellemektedir. Çalışma, DE ve DD yatırımlarının uyumlu biçimde yönlendirilmesi, kırsalda internet erişiminin genişletilmesi, hedefe yönelik eğitimlerin artırılması ve sürdürülebilir uygulamaları teşvik eden bütünleşik politika çerçevelerine ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, teknolojik araçlarla çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar arasındaki ilişkiyi gösteren kavramsal bir çerçeve sunulmaktadır. Bu engellerin çok paydaşlı ve koordineli stratejilerle aşılması, tarımda dayanıklı, düşük etkili ve kapsayıcı üretim sistemlerine geçişi hızlandırabilir.

To Cite: Kadıoğlu İ., Özkan G. From Waste to Wisdom: Linking Circular Economy Principles with Digital and AI Technologies in Agriculture. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1907-1926.

1. Introduction

Agriculture today stands at the crossroads of opportunities and crises. On the one hand, advances in science, technology, and resource management offer unprecedented opportunities to transform food systems. On the other hand, global challenges such as climate change, biodiversity loss, soil degradation, and water scarcity threaten the long-term viability of agricultural production (Crippa et al., 2021; Velasco-Muñoz et al., 2021). The Food and Agriculture Organization (FAO) estimates that global food production will need to increase by nearly 50% by 2050 to feed a growing population (FAO, 2020). Meeting this demand on a finite planet requires a paradigm shift from linear, extractive production models to regenerative, efficient, and socially equitable systems (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer et al., 2017).

The prevailing model of agricultural production based on the motto "take-make-dispose" has prioritized short-term yields over long-term resilience. Intensive monocultures, excessive chemical use, and inefficient resource use have degraded soils, polluted water bodies, and increased greenhouse gas emissions (Otero et al., 2023; Cahyadi et al., 2024). In addition, there is socio-economic pressure from rural migration, income inequality, and the marginalization of small farmers (Rotolo et al., 2022). Without transformative change, agriculture risks deepening its role as both a driver and a victim of environmental degradation (Haque et al., 2023).

In recent years, Circular Economy (CE) principles have emerged as a compelling framework for guiding agricultural sustainability. In contrast to the linear model, CE seeks to remove waste from the system, keep products and materials in use for as long as possible, and regenerate natural systems (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer et al., 2017). In agriculture, this means closing nutrient cycles through composting and biochar production, converting waste into renewable energy via biogas systems, recycling water, and upcycling crop residues into animal feed or biomaterials (Agegnehu et al., 2016; Velasco-Muñoz et al., 2021). These approaches not only reduce environmental impacts but also improve farm profitability by lowering input costs and creating new value streams (Ángulo et al., 2024).

In parallel with these developments, the Digital Transformation (DT) of agriculture, driven by innovations such as the Internet of Things (IoT), blockchain, satellite-based remote sensing, and big data analytics, is reshaping how farms operate (Chen et al., 2024; Santos et al., 2024). DT enables precision in irrigation, fertilisation, and pest control, reducing resource wastage and environmental damage (Zheng et al., 2025). It also strengthens supply chain transparency, facilitates compliance with sustainability standards, and empowers consumers to make informed decisions (Sousa-Zomer et al., 2023).

When Artificial Intelligence (AI) is integrated into DT, the potential impact increases even further. AI applications in agriculture include predictive yield modelling, early detection of pests and diseases via image recognition, optimization of resource allocation, and adaptive decision-making based on real-time data (Banerjee et al., 2018; Kamilaris and Prenafeta-Boldú, 2018). These tools can significantly increase productivity, reduce the environmental footprints, and improve resilience to climate variability (Zheng et al., 2025).

Crucially, CE, DT, and AI mutually reinforce each other. CE provides the sustainability framework, DT provides the operational tools, and AI provides the analytical intelligence to optimize agricultural systems. Together, they can transform agriculture into a low-carbon, resource-efficient, and socially inclusive sector (Moreddu, 2016; Cahyadi et al., 2024). However, the integration of these three pillars is not universal. In many contexts, particularly in developing and emerging economies, smallholder farmers face prohibitive upfront costs, limited access to finance, weak infrastructure (particularly internet connectivity), and low digital literacy (Dimitrov and Ivanova, 2017; Haque et al., 2023). Furthermore, legal frameworks often lag technological innovation, leading to uncertainty among investors and adopters (Otero et al., 2023).

These challenges mean that the global potential of CE-DT-AI integration remains largely untapped. There is a pressing need to understand not only the individual contributions of each approach but also their synergies, the conditions that enable adoption, and the barriers that persist. Existing literature on sustainable agriculture often examines these areas separately, focusing, for instance, on circular farming practices without considering digital tools or on digital agriculture without embedding it within a circular framework. Few studies have adopted an integrated lens that combines the

environmental, technological, and socio-economic dimensions (Çalış-Duman, 2022; Çakmakçı and Çakmakçı, 2023).

However, existing literature primarily treats the contributions of CE, DT, and AI to agricultural sustainability as independent dimensions; conceptual models that integrate these three approaches within a single, holistic transformation framework remain quite limited. This situation results in an insufficient explanation of the multidimensional nature of sustainable transformation in agricultural systems.

The conceptual framework of this study is based on four fundamental theoretical approaches. The multi-layered perspective of socio-technical transition theory (Geels, 2002) posits that the integration of CE, DT, and AI entails not only technological but also institutional and actor-based transformations of agricultural production regimes. The circular value creation approach (Bocken et al., 2016) reveals how this transformation serves sustainability goals by narrowing, slowing, and closing resource flows. The Triple Bottom Line approach (Elkington, 1997) strengthens the study's sustainability perspective by integrating the environmental, economic, and social dimensions. Finally, Innovation Systems Theory (Edquist, 2005) emphasizes that the agricultural transformation process occurs within a multi-actor governance structure, and that interactions among public institutions, farmers, and technology providers play a decisive role.

This study addresses this gap by systematically reviewing the global evidence on the integration of CE, DT, and AI in agriculture. Using a structured methodology guided by PRISMA protocols (Page et al., 2021), we synthesised the findings from peer-reviewed studies published between 2016 and 2025. The review organises insights into thematic categories, compares patterns across contexts, identifies persistent barriers, and formulates evidence-based recommendations.

The central research question guiding this work is: *How can Circular Economy principles and Digital Transformation, including AI applications, be jointly implemented to achieve sustainable agricultural outcomes, and what barriers limit their adoption?*

By answering this question, this study seeks to contribute a holistic, policy-relevant perspective on how agriculture can transition towards systems that are environmentally restorative, economically viable, and socially just. The integration of CE, DT, and AI is positioned here not as a distant aspiration but as an actionable pathway, provided that targeted investments, enabling policies, and capacity-building measures are implemented.

In doing so, this review aims to move beyond the descriptive summary of existing studies. Instead, it offers a structured thematic synthesis, highlights critical research gaps, and proposes a roadmap for coordinated action among governments, private sector actors, and farming communities. Framing CE, DT, and AI as interconnected levers for change emphasizes the urgency and feasibility of reconciling technological innovation with ecological regeneration and social justice in agriculture.

2. Materials and Methods

This qualitative literature review assesses the integration of CE principles, DT, and AI applications in sustainable agriculture. The research was structured according to the basic principles of the systematic review method and reported in accordance with the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines (Page et al., 2021). This approach aims to increase the methodological reliability of the research and the validity of its findings.

2.1. Search Strategy and Literature Review

The literature review was conducted between January 10 and February 25, 2025, using the Web of Science Core Collection and Scopus databases. Searches were performed in the fields of title, abstract, and keywords. The keywords and Boolean operators that were used are listed in Table 1.

2.2. Inclusion and Exclusion Criteria

Publications included in the review were peer-reviewed journal articles published between 2016 and February 2025. The year 2016 was chosen as the starting point because, after the adoption of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), circular economy approaches, digital farming practices, and data-driven technologies became significantly more prevalent in the agricultural sustainability literature. To ensure thematic relevance, the search was restricted to studies indexed under the subject categories *Agriculture, Biology,* and *Environmental Sciences* in Web of Science and Scopus. The search included both open-access articles and those accessible through the university library subscriptions. Furthermore, only studies with a DOI number deemed methodologically evaluable were included.

Conversely, publications that were not directly related to the agricultural sector, did not include CE, DT, or AI components, and contained only conceptual discussions or editorial evaluations, and lacked methodological transparency, were excluded from the study.

Table 1. Search queries used in the literature review

Theme	Theme Search Query (Boolean)
Circular Economy	(“circular economy” OR “circular agriculture” OR “agricultural waste” OR “waste valorization”)
Digital Agriculture	(“digital agriculture” OR “precision agriculture” OR "precision farming technologies" OR “smart farming” OR “IoT” OR "digital transformation" OR "blockchain in agri-food supply chain")
Artificial Intelligence	(“artificial intelligence” OR “machine learning”)
Sustainability	(“sustainable agriculture” OR "waste management" OR "renewable energy")
Combined Query	(CE) AND (DT) AND (AI) AND (Sustainable agriculture)

2.3. Study Selection According to the PRISMA Flowchart

A total of 682 records were obtained from searches of the Web of Science and Scopus databases. After removing duplicate studies, 158 records were excluded, leaving 524 records for title and abstract screening. At this stage, 367 studies that were not directly related to the agricultural sector or that focused on sustainability and technology were excluded. Thus, the full texts of 157 articles were evaluated for suitability.

Of the 157 articles that underwent full-text review, 105 publications were excluded because they did not focus on the agricultural sector (n = 42), did not contain a CE, DT, or AI component (n = 31), were purely conceptual/editorial in nature (n = 18), or lacked methodological transparency (n = 14). Consequently, 52 studies were included in the qualitative analysis. A visual summary of this process is presented in the PRISMA flowchart (Figure 1).

2.4. Data Analysis

The analysis was conducted using a qualitative thematic synthesis approach appropriate for integrative review studies. The final set of articles identified through the PRISMA search process was examined in detail, and each study was classified according to its focus on circular economy practices, digital transformation tools, and artificial intelligence applications in agriculture.

Without software-assisted coding, key concepts, methodological approaches, and reported impacts were evaluated iteratively and comparatively across studies, thereby identifying common patterns and differences. This comparative review resulted in three main thematic categories: (i) Circular Agriculture Practices, (ii) Digitalisation and Smart Agriculture, and (iii) Artificial Intelligence and Decision Support Systems. This approach aligns with established frameworks that prioritise narrative and thematic synthesis over statistical integration in reviews of heterogeneous qualitative evidence (Braun and Clarke, 2006; Snyder, 2019).

2.5. Limitations of the Study

This study has several limitations. Firstly, the literature review was restricted to the Web of Science and Scopus databases, which may have excluded relevant studies from other sources. Secondly, the focus on English-language publications may have omitted valuable contributions from other languages.

Additionally, the study employed a qualitative thematic synthesis approach rather than a quantitative meta-analysis; therefore, the findings should be regarded as conceptual rather than statistically generalisable. Finally, there is a risk of publication bias, as successful examples of circular economy, digital transformation, and artificial intelligence applications are more widely represented in the literature than failed or incomplete initiatives.

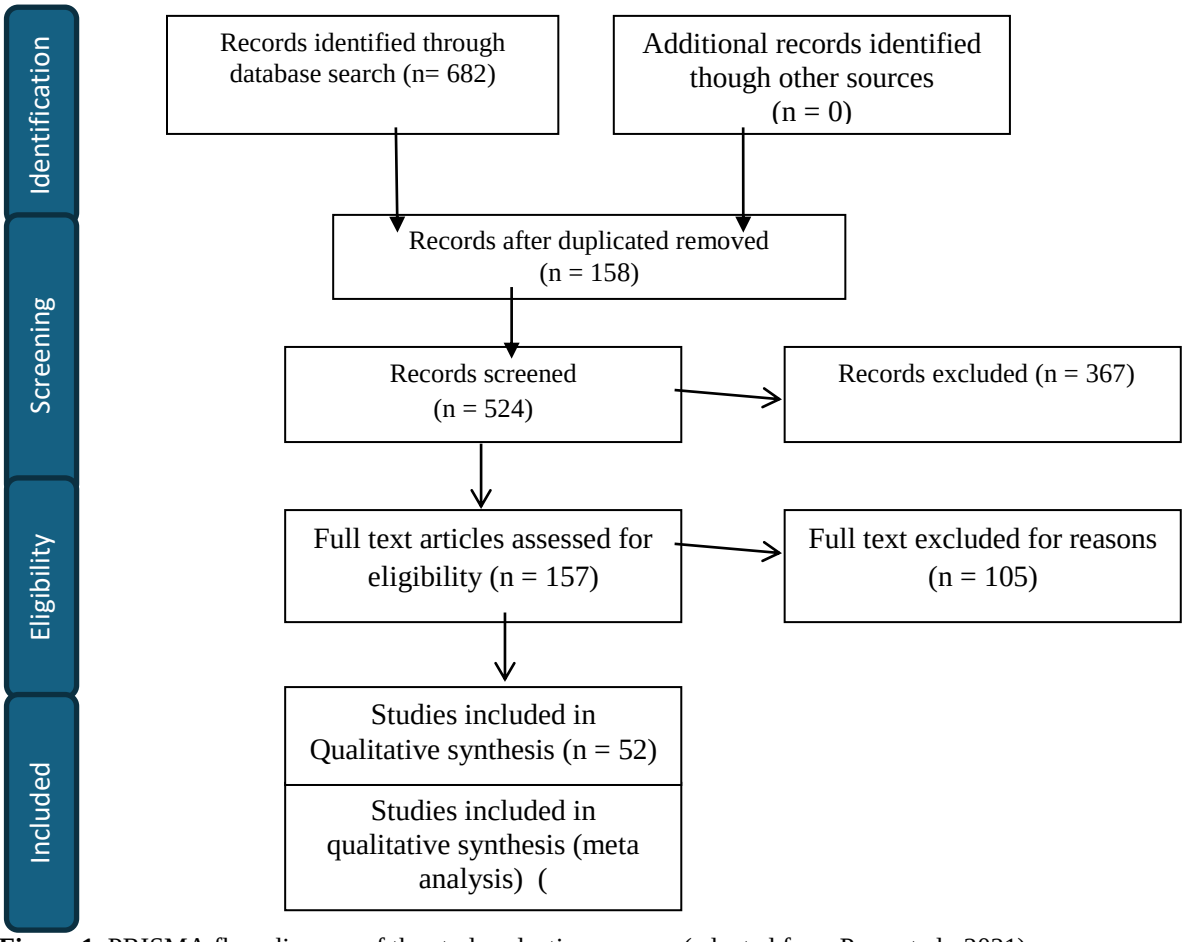


Figure 1. PRISMA flow diagram of the study selection process (adapted from Page et al., 2021)

3. Findings

The literature review revealed four interconnected themes through which CE, DT, and AI contribute to agricultural sustainability: (1) CE practices in agriculture, (2) digital agriculture technologies, (3) AI-enabled agricultural applications, and (4) barriers and enablers affecting adoption. These themes emerged from cross-comparative analysis of the selected studies and enabled the identification of patterns, synergies, and divergences across geographical and socioeconomic contexts.

3.1. CE Practices in Agriculture

Circular farming practices can be considered as "niche innovations" as defined in socio-technical transition theory and have the potential to transform the existing linear farming regime (Geels, 2002). In this context, the practices reported in the literature reflect circular value-creation strategies, as defined by Bocken et al. (2016), in the agricultural sector.

The literature review shows that CE principles are increasingly being operationalized in agriculture to close resource cycles, minimize waste, and increase environmental resilience (Gedik, 2020). Common strategies include nutrient recycling through composting and biochar production (Agegnehu et al., 2016), the generation of renewable energy from agricultural residues via biogas systems (Velasco-Muñoz et al., 2021), and the reuse of treated wastewater for irrigation (Ángulo et al., 2024). These

practices not only mitigate environmental degradation but also offer economic benefits by reducing input costs and creating new revenue streams. Table 2 summarizes the main applications of CE, DT, and AI in agriculture and illustrates their practical use, expected benefits, and examples from the literature.

Table 2. Applications of the CE, DT, and AI.

Technology / Approach	Agricultural Application	Expected Impact	Example Study
CE	Compost and biochar production	Improved soil quality, reduced GHG emissions	Agegnehu et al. (2016)
CE	Biogas production from agricultural residues	Renewable energy, waste reduction	Velasco-Muñoz et al. (2021)
DT	IoT-based soil moisture sensors	Optimised water use	Santos et al. (2024)
AI	Disease detection via image recognition	Early intervention, yield improvement	Kamilaris and Prenafeta-Boldú (2018)
AI + CE	Composting process optimisation	Higher quality organic fertiliser	Zheng et al. (2025)

Empirical evidence from large-scale initiatives such as the European Union's AgroCycle project demonstrates the CE's potential to transform waste streams into value-added products, including organic fertilizers, animal feed, and biomaterials (Toop et al., 2017). Similar approaches have been documented in Asia, where integrated farming systems combine aquaculture, livestock, and crop production to enhance nutrient cycling and minimize waste (Cahyadi et al., 2024). However, the literature also highlights structural challenges, including high initial investment costs, limited technical knowledge, and insufficient market infrastructure for CE-based products (Haque et al., 2023).

The development of robust evaluation frameworks for CE in agriculture can further support policy and investment decisions and ensure that sustainability goals are achieved while maximizing socioeconomic benefits (Rodino et al., 2023). Similar challenges in CE adoption, shaped by socio-economic, infrastructural, and political factors, have been reported in Vietnam, where farmers' willingness and ability to adopt CE practices are influenced by access to credit, market incentives, and clear regulations (Nguyen et al., 2024).

3.2. Digital Agriculture Technologies

Digital farming practices meet the CE's traceability and optimization requirements, enabling reductions in resource use. These findings demonstrate that economic efficiency and environmental sustainability can be achieved simultaneously within the framework of the triple-bottom-line approach (Elkington, 1997).

Digitalization is emerging as a key enabler of CE-aligned farming systems by improving efficiency, traceability, and adaptive management. Technologies such as IoT-based soil moisture sensors,

precision irrigation systems, and GPS-enabled agricultural machinery have been shown to optimize resource use and reduce the environmental footprint (Santos et al., 2024). Blockchain platforms are increasingly used to ensure supply chain transparency and provide consumers with verifiable information on production methods and sustainability certifications (Sousa-Zomer et al., 2023).

Case studies from developed and developing countries have shown that digital tools can significantly improve decision-making, particularly when coupled with real-time environmental monitoring. For example, precision fertilisation systems supported by geospatial data have reduced nutrient runoff and improved yield consistency in European and North American farms (Chen et al., 2024). Nevertheless, uptake remains uneven, with smallholder farmers often excluded due to high technology costs, poor connectivity, and limited access to technical support (Dimitrov and Ivanova, 2017).

3.3. AI Applications

Artificial intelligence-based decision support systems form the cognitive layer of DT in the socio-technical transition process, enabling production regimes to transform into adaptive and learning systems (Geels, 2002).

AI technologies add predictive and adaptive dimensions to digital agriculture, enabling more sophisticated resource management and better risk mitigation. Deep learning algorithms have achieved high accuracy in plant disease and pest detection via image recognition (Kamilaris and Prenafeta-Boldú, 2018). In contrast, machine learning models have been used to predict yields, optimize irrigation schedules, and recommend site-specific cropping practices (Banerjee et al., 2018).

The integration of AI into CE-oriented systems is promising for waste recycling and resource recovery. For example, AI-based models have been used to predict the optimal composting conditions and improve the quality and marketability of organic fertilizers (Zheng et al., 2025). Despite these advances, the adoption of AI is constrained by data availability, computing infrastructure, and the need for farmer training, particularly in rural and resource-constrained areas.

3.4. Barriers and Enablers

The institutional, economic, and technical barriers reported in the literature reveal how CE-DT-AI integration in agriculture takes shape within multi-actor governance structures within the framework of Systems Innovation Theory (Edquist, 2005). From this systems-oriented perspective, the spread of CE, DT, and AI applications in agriculture depends not only on technological readiness but also on the interaction between limiting factors and facilitating conditions. Therefore, barriers and facilitators are considered together to explain how systemic innovation processes are hindered or supported at different levels of governance.

3.4.1. Barriers

The large-scale and sustainable implementation of CE and DT practices in agriculture faces interlinked financial, technical, regulatory, and sociocultural challenges.

Financial constraints are among the most significant obstacles, particularly for small and medium-sized farms. The infrastructure investments required for CE systems, such as biogas plants, composting facilities, and sensor-based monitoring systems, entail high capital costs (Haque et al., 2023). The purchase of hardware, software, and connectivity required for digital agriculture also represents an additional financial burden that is often prohibitively expensive for resource-constrained farmers.

Technical knowledge gaps and limited human resources further complicate adoption. Many farmers in rural areas have limited digital skills, and agricultural extension services are often underdeveloped. The lack of qualified technical support slows down the uptake and effective use of DT tools (Geng et al., 2024). In developing countries, these challenges are exacerbated by limited Internet infrastructure and insufficient financial support for technology adoption (Wang et al., 2023).

Inconsistent regulation and policy uncertainty are significant barriers. Insufficient or inconsistent regulations for waste management, organic fertilization, and carbon accounting create uncertainty for investors and producers (Otero et al., 2023). This lack of clarity can delay investment decisions and slow down the diffusion of innovation practices.

Socio-cultural resistance is another obstacle, especially in rural areas where traditional farming methods prevail. In particular, older generations of farmers may view technological and environmental innovations with caution or distrust, slowing the pace of change (Greenhalgh et al., 2004). These attitudes can be exacerbated by risk aversion and a limited exposure to demonstrably successful case studies. Table 2 summarizes the main barriers and facilitating factors affecting the integration of CE, DT, and AI in agriculture as identified in the reviewed literature.

3.4.2. Enablers

Despite these challenges, strategic public policies and inclusive implementation models can turn obstacles into opportunities and provide significant environmental, economic, and social benefits.

CE practices have the potential to reduce input costs, recycle agricultural waste, and reduce carbon emissions by closing resource loops and improving resource efficiency (Velasco-Muñoz et al., 2021). DT solutions, including precision agriculture, IoT-based monitoring, and blockchain-enabled traceability, can improve production efficiency, market access, and food safety (Chen et al., 2024).

Table 2. Key barriers and enablers for CE-DT-AI integration in agriculture

Category	Barriers	Enablers
Financial	High investment costs, lack of capital among small farmers.	Targeted subsidies, low-interest loans
Technical	Low digital literacy, insufficient technical support.	Locally adapted training programs
Regulatory	Unclear legislation, lack of waste management standards	Certification systems for CE-compliant products
Socio-cultural	Adherence to traditional practices, risk aversion	Awareness campaigns showcasing successful cases

(Sources: Moreddu, 2016; Dimitrov and Ivanova, 2017; Haque et al., 2023)

Effective support tools include targeted financial incentives such as subsidies, tax breaks, and low-interest loans for CE infrastructure and DT tools, collaborative technology sharing models, and capacity-building programs tailored to the local context (Moreddu, 2016). Digital literacy initiatives embedded in agricultural extension services can address knowledge gaps, while public-private partnerships can help spread financial risks and foster innovation.

In addition, inclusive governance frameworks can ensure equitable access to CE-DT innovations by addressing gender inequalities, supporting marginalized groups, and protecting farmers' rights to the data generated on their farms. By aligning regulatory frameworks with sustainability goals, for example, through certification schemes for CE-compliant products, policymakers can create premium markets that reward sustainable practices.

4. Discussion

Although the contributions of CE, DT, and AI to agricultural sustainability are increasingly emphasized in the literature, these approaches are often considered in isolation. To address this conceptual gap, this study proposes a "circular innovation cycle" model that holistically explains the interaction between CE, DT, and AI in agricultural systems (see Figure 2).

The proposed conceptual model integrates the multilayered perspective of socio-technical transition theory (Geels, 2002) with the circular value creation approach (Bocken et al., 2016), demonstrating that sustainable transformation in agriculture is not only a technological but also a structural transition process. Data generated through digital technologies is fed into AI-based decision support systems. These decisions optimize production processes in line with CE principles, thereby ensuring resource efficiency and waste reduction. This feedback mechanism explains the CE-DT-AI synergy, which has not been sufficiently conceptualized in the literature.

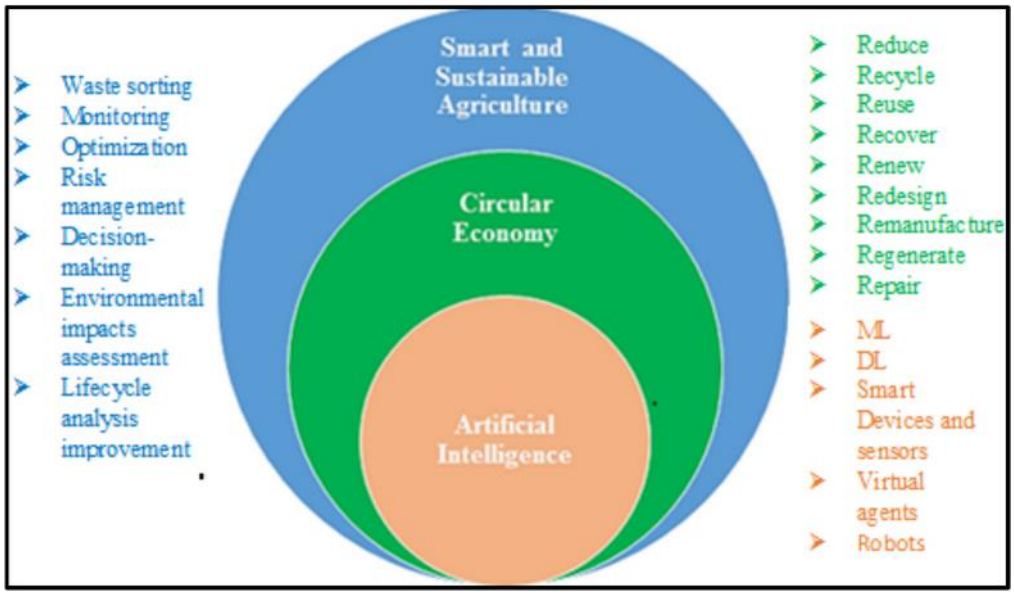


Figure 2. Circular innovation cycle model based on the interaction of CE, DT, and AI in agriculture. (Ali et al., 2025)

Beyond technological efficiency gains, the literature review demonstrates that the integration of CI, DT, and AI has broader systemic impacts on rural development and global sustainability goals. These integrated approaches simultaneously support environmental protection, economic resilience, and social inclusion and are directly aligned with the SDGs, particularly climate action, responsible production and consumption, and ending hunger.

The synthesis of the literature reviewed shows that CE principles, DT, and AI are not isolated innovations but mutually reinforcing components of an integrated sustainability framework for agriculture. CE provides a normative and operational basis for closing resource cycles, reducing waste, and regenerating ecosystems (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer et al., 2017). DT, using precision tools and real-time monitoring, operationalizes the principles of CE by enabling more efficient resource allocation, tracking sustainability performance, and improving transparency along the agricultural and food supply chains (Santos et al., 2024; Sousa-Zomer et al., 2023). AI adds an adaptive, predictive layer that enables farmers to optimize their production strategies and respond dynamically to biophysical and market uncertainties (Kamilaris and Prenafeta-Boldú, 2018; Zheng et al., 2025).

The interaction between these three pillars can be conceptualized as a cyclical innovation cycle. CE defines sustainability goals, such as nutrient recycling, waste utilization, and renewable energy integration, whereas DT provides the measurement and control systems needed to track progress towards these goals. AI then processes data generated by DT tools to refine decision-making, enhance system adaptability, and predict environmental and economic outcomes. Feedback from the AI-driven analysis can, in turn, lead to adjustments in CE practices, creating a continuous cycle of learning and optimization. This integrated model aligns closely with the “socio-technical transition” perspective,

which emphasises the co-evolution of technological systems and institutional frameworks in driving sustainability transformations (Geels, 2002).

However, the review also revealed that integration is uneven and context-dependent. In high-income economies, advanced CE-DT-AI combinations are already being trialled, often supported by strong policy incentives and digital infrastructure (European Commission, 2020). By contrast, in many low- and middle-income countries, CE adoption remains mainly manual and small-scale, with minimal integration of digital or AI components due to financial, infrastructure, and knowledge barriers (Rotolo et al., 2022; Haque et al., 2023). This disparity suggests that while technologies and principles are globally relevant, their implementation pathways must be tailored to specific socio-economic and environmental contexts.

An important insight from this review is that integration is more effective when approached through multistakeholder governance. Studies consistently show that adoption rates increase when farmers, technology providers, policymakers, and researchers co-design solutions aligned with local priorities (Cahyadi et al., 2024). Cooperative models for technology sharing, bundled financial and training support, and participatory policy frameworks have been repeatedly cited as effective mechanisms for overcoming resource and knowledge constraints.

The interplay between the environmental, economic, and social dimensions is also central. For example, AI-assisted precision irrigation not only conserves water (environmental benefit) but also reduces input costs (economic benefit) and can improve the resilience of smallholder farmers (social benefit) (Wang et al., 2023; Chen et al., 2024). Similarly, blockchain-enabled supply chains enhance transparency and consumer trust, thereby creating premium markets for sustainably produced goods and linking sustainability performance to economic incentives.

Nevertheless, the literature lacks long-term empirical evidence on the combined environmental and socio-economic impacts of CE-DT-AI systems. While short-term benefits are well documented, fewer studies address systemic trade-offs such as the embodied carbon in digital equipment or the risks of technological dependency for smallholders. Furthermore, there is limited research on governance frameworks that balance innovation diffusion with equity and inclusiveness, particularly in contexts where technology adoption can exacerbate existing inequalities.

In summary, the integrated adoption of CE, DT, and AI offers a compelling pathway for resilient, low-carbon, and inclusive agricultural systems. However, realizing this potential requires not only technological innovation but also systemic changes, including supportive policies, capacity building, infrastructure development, and sustained stakeholder collaboration. Without such frameworks, integration risks remain a niche innovation accessible only to well-resourced actors, undermining its broader sustainability potential.

5. Research Gaps

This review highlights several significant gaps in the existing literature that limit both the theoretical development and the practical implementation of integrating CE, DT, and AI in agriculture.

First, while individual applications of CE, DT, and AI are well documented, few empirical studies examine their combined systemic impacts. Most research has focused on individual interventions, such as composting, IoT-powered irrigation, or AI-powered pest detection, without examining how these innovations interact when used together. Consequently, the synergistic or potentially conflicting effects of integrated CE-DT-AI systems remain poorly understood.

Second, longitudinal research on the environmental and socio-economic outcomes of such integration is limited. The majority of existing studies have assessed impacts over one or two growing seasons, leaving unanswered questions about long-term soil health, biodiversity, carbon sequestration, and economic resilience. This temporal gap makes it difficult to assess whether short-term efficiency gains translate into lasting sustainability benefits.

Third, the literature is disproportionately concentrated on *high-income countries* with advanced infrastructure and policy support. This geographic bias overlooks the realities of smallholder-dominated agricultural systems in low- and middle-income countries, where adoption barriers are most significant and sustainability needs are most urgent. There is also insufficient analysis of how locally adapted governance models, cultural practices, and traditional ecological knowledge could support CE-DT-AI integration in these contexts.

Fourth, there is a shortage of research examining the *equity and inclusivity dimensions* of integration. Few studies have examined whether digitalisation and AI adoption exacerbate inequalities among farmers by favouring those with greater capital, education, or market access. Similarly, gender-differentiated impacts remain largely unexplored, despite evidence that women farmers face distinct constraints in accessing technology and finance.

Finally, there is an evident gap in the *assessment of systemic trade-offs* and unintended consequences. For example, the embodied carbon footprint of manufacturing and operating advanced digital and AI systems has rarely been quantified, and there has been little examination of the risk of technological dependency that may arise if farmers rely heavily on proprietary platforms.

Addressing these research gaps will require interdisciplinary approaches that combine agronomy, data science, socioeconomics, and policy analyses. Such work should prioritise comparative, cross-regional studies, adopt multi-year research designs, and integrate participatory methods that centre the voices of female farmers and rural communities.

6. Policy Roadmap

The literature shows that integrating renewable energy applications, precision agriculture solutions, and agricultural waste utilisation into rural development policies significantly contributes to job creation, reduces rural-to-urban migration, and increases resilience to climate-related risk. Therefore,

the integration of CE, DT, and AI should be considered not as independent technological interventions but as an integral component of rural development and sustainability policies.

The integration of CE, DT, and AI into agriculture represents a transformative opportunity to achieve sustainability goals. However, this review shows that this potential cannot be realized without targeted policy measures. The following policy roadmap proposes strategic actions for governments, industry actors, and research institutions to address the identified barriers and accelerate adoption in an equitable and context-sensitive manner.

1. *Strengthening Infrastructure and Digital Access:* Reliable internet connectivity, affordable energy, and access to data services are prerequisites for the effective adoption of DT and AI. Policymakers should prioritize broadband expansion in rural areas, support off-grid renewable energy solutions in agricultural communities, and ensure open access to agricultural data where possible. Infrastructure investments should be coupled with mechanisms to reduce the cost of digital equipment through subsidies, tax incentives, or collective procurement programs.

2. *Financial Incentives for Sustainable Technology Adoption*: High upfront costs are a significant obstacle to the integration of CE-DT-AI. Governments can help by offering targeted subsidies, low-interest loans, and grant programs to support the purchase of technologies and CE-based infrastructure, such as composting facilities, biogas systems, and precision irrigation systems. Public-private partnerships can help spread financial risk while encouraging innovation.

3. *Capacity Building and Farmer-Centred Training*: Technical knowledge gaps limit the effective use of digital and AI tools, especially among smallholder farmers. Training programs should be embedded in agricultural extension services and focus on practical context-specific applications. Participatory approaches, in which farmers co-develop solutions with researchers and technology providers, have proven effective in improving adoption and long-term use.

4. *Inclusive and Equitable Technology Governance*: Policymakers must ensure that the benefits of CE-DT-AI integration are distributed fairly. This includes designing programs that explicitly address gender inequalities, supporting marginalized groups, and ensuring that technology platforms are accessible across language, cost, and ease of use. Regulatory frameworks should also protect farmers from exploitative data-ownership models and vendor lock-ins.

5. *Regulatory and Market Alignment*: Clear regulatory guidelines are important for reducing uncertainty and encouraging investment. This includes setting sustainability standards for agricultural products, certifying CE-compliant practices, and integrating digital traceability into the supply chains. Creating premium markets for demonstrably sustainably produced products can create additional economic incentives for adoption.

6. Fostering Research-Policy-Industry Linkages: Bridging the gap between research results and policymaking requires structured mechanisms for dialogue between scientists, policymakers, and industry players. National and regional innovation platforms can serve as hubs for testing and scaling up integrated CE-DT-AI solutions, with the results informing the policy framework. Long-term

monitoring systems should be established to track environmental, economic, and social outcomes and enable adaptive policy adjustments. Table 3 outlines the proposed policy roadmap for promoting the integration of CE-DT-AI in agriculture, focusing on priority action areas and associated policy instruments.

These measures can create the framework conditions necessary for the integrated adoption of CE, DT, and AI in agriculture. By addressing financial, infrastructural, knowledge-based, and regulatory barriers, this roadmap aims to ensure that the transition to sustainable agriculture is technologically feasible and socially inclusive.

Table 3. Policy roadmap for advancing CE-DT-AI adoption in agriculture

Action Area	Strategic Objective	Proposed Policy Instruments
Infrastructure and Access	Strengthen the internet and energy infrastructure in rural areas	Rural broadband investments, off-grid renewable energy
Finance	Unlock investment for CE-DT-AI adoption	Low-interest loans, subsidies, public-private partnerships
Capacity Building	Expand farmer training programmes	Integration of digital literacy into extension services
Equity and Inclusion	Promote gender equality and inclusivity	Special finance and training programmes for women farmers
Markets and Regulation	Create premium markets for sustainable products.	Sustainability standards, CE certification schemes, Green Public Procurement policies, digital traceability requirements, and eco-labelling regulations.

(Sources: European Commission, 2020; Khajuria et al., 2022; Wang et al., 2023)

7. Conclusion

This review examines the overlap among the principles of CE, DT, and AI in agriculture, highlighting their individual contributions, potential synergies, and barriers to widespread adoption. The results show that CE provides a sustainability framework for closing resource cycles and regenerating ecosystems, DT provides operational tools for precision and transparency, and AI adds predictive and adaptive capabilities to optimize performance in real time. When integrated, these approaches can transform agricultural systems into ecologically restorative, economically resilient, and socially inclusive models.

However, the integration of CE, DT, and AI remains uneven, with significant differences between high-income contexts, where supportive infrastructure, policy incentives, and capital resources enable advanced implementation, and between low and middle-income contexts, where structural barriers impede adoption. There are critical gaps in the literature, including a lack of long-term empirical evidence, limited research on smallholder-dominated systems, and insufficient analysis of the equity and inclusion dimensions.

Addressing these challenges requires a coordinated, multi-level response. Policies need to align financial incentives, infrastructure investments, capacity building, and governance reforms to create an enabling environment for adoption. Collaborative approaches involving farmers, researchers, policymakers, and technology providers are essential to ensure that solutions are locally relevant and socially equitable.

The results of this study underline that technological innovation alone is insufficient to achieve a sustainable transformation of agriculture. Linking innovations with supportive policies, participatory governance, and context-dependent implementation strategies is crucial for success. By promoting an integrated CE-DT-AI agenda, stakeholders cannot only increase agricultural productivity and resilience but also make a meaningful contribution to global climate, biodiversity, and development goals.

Authorship Contribution Statement: The authors declare that they have contributed equally to this article.

Declaration of Competing Interests: The author declares no competing interests.

Funding: This research did not receive any specific grants from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Data availability: No datasets were generated or analysed during the current study.

Ethical approval: This study adhered to general ethical guidelines applicable to community question-answering research. As it did not involve human or animal subjects, specific ethical committee approval was not required.

References

Agegnehu G., Bass AM., Nelson PN., Bird MI. Benefits of biochar, compost, and biochar–compost for soil quality, maize yield, and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. Science of the Total Environment 2016; 543: 295–306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054

Ali ZA., Zain M., Hasan R., Al Salman H., Alkhamees BF., Almisned FA. Circular economy advances with artificial intelligence and digital twin: Multiple-case study of Chinese industries in agriculture. Journal of the Knowledge Economy 2025; 16(1): 2192-2228. https://doi.org/10.1007/s13132-024-02101-w

Ángulo MG., Batista MT., Caicedo MIG. Advances and challenges of a circular economy (CE) in agriculture in Ibero-America: A bibliometric perspective. Sustainability 2024; 16(24): 11266. https://doi.org/10.3390/su162411266

Bocken NMP., de Pauw I., Bakker C., van der Grinten B. Product design and business model strategies for a circular economy. Journal of Industrial and Production Engineering 2016; 33(5): 308–320. https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

Banerjee G., Sarkar U., Das S., Ghosh I. Artificial intelligence in agriculture: A literature survey. International Journal of Scientific Research in Computer Science Applications and Management Studies 2018; 7(3): 1–6.

Braun V., Clarke V. Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology 2006; 3(2): 77–101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

Cahyadi ER., Hidayati N., Zahra N., Arif C. Integrating circular economy principles into agri-food supply chain management: A systematic literature review. Sustainability 2024; 16(16): 7165. https://doi.org/10.3390/su16167165

Çakmakçı MF., Çakmakçı R. Remote sensing, artificial intelligence and smart agriculture technology trends of the future. European Journal of Science and Technology 2023; (52): 234–246. https://doi.org/10.5281/zenodo.10439935

Çalış-Duman M. Society 5.0: Human-focused digital transformation. Journal of Social Policy Conferences 2022; (82): 309–336. https://doi.org/10.26650/jspc.2022.82.1008072

Chen T., Lv L., Wang D., Zhang J., Yang Y., Zhao Z., Wang C., Guo X., Chen H., Wang Q., Xu Y., Zhang Q., Du B., Zhang L., Tao D. Empowering agrifood system with artificial intelligence: A survey of the progress, challenges and opportunities. arXiv 2024; arXiv:2305.01899. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01899

Crippa M., Solazzo E., Guizzardi D., Monforti-Ferrario F., Tubiello FN., Leip A. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. Nature Food 2021; 2: 198–209. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9

Dimitrov DK., Ivanova M. Trends in organic farming development in Bulgaria: Applying circular economy principles to sustainable rural development. Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development 2017; 6(1): 10–16. https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0002

Edquist C. Systems of innovation: Perspectives and challenges. In J. Fagerberg, D. C. Mowery, and R. R. Nelson (Eds.), 2025. The Oxford handbook of innovation (pp. 181–208). Oxford: Oxford University Press.

Elkington J. Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. Oxford, UK: Capstone. 1997.

Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation 2013. https://ellenmacarthurfoundation.org

European Commission. Farm to Fork Strategy. European Commission 2020. https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en

FAO. The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations 2020. https://doi.org/10.4060/cb1447en

Gedik Y. Döngüsel ekonomiyi anlamak: teorik bir çerçeve. Turkish Business Journal 2020; 1(2): 110–137. https://dergipark.org.tr/tr/pub/tbj/issue/59142/812070

Geels FW. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. Research Policy 2002; 31(8–9): 1257–1274. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8

Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken NM., Hultink EJ. The circular economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production 2017; 143: 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Geng, W., Zhao, J., Liu, L., Wang, W., Kang, X. Digital technologies adoption and economic benefits in agriculture: A Mixed-methods approach. *Sustainability* 2024); *16*(11), 4431. https://doi.org/10.3390/su16114431

Greenhalgh T., Robert G., Macfarlane F., Bate P., Kyriakidou O. Diffusion of innovations in service organizations: systematic review and recommendations. The Milbank Quarterly 2004; 82(4): 581–629. https://doi.org/10.1111/j.0887-378X.2004.00325.x

Haque F., Fan C., Lee YY. From waste to value: Addressing the relevance of waste recovery to agricultural sector in line with circular economy. Journal of Cleaner Production 2023; 415: 137873. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137873

Kamilaris A., Prenafeta-Boldú FX. Deep learning in agriculture: A survey. Computers and Electronics in Agriculture 2018; 147: 70–90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016

Khajuria A., Atienza VA., Chavanich S., Henning W., Islam I., Kral U., Liu M., Liu X., Murthy IK., Oyedotun TDT., Verma P., Xu G., Zeng X., Li J. Accelerating circular economy solutions to achieve the 2030 agenda for sustainable development goals. Circular Economy 2022; 1(1):100001. https://doi.org/10.1016/j.cecir.2022.100001

Moreddu C. Public-Private Partnerships for Agricultural Innovation: Lessons From Recent Experiences. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers 2016; 92. https://doi.org/10.1787/5jm55j9p9rmx-en

Nguyen, TK., Minh Khue, NT., Tran, QP., Quynh Anh, NT., Cuong, LK., Chu Du, N., Cuong, CV., Thuong, VT., Anh, DH., Anh Vu, N. Examining the factors influencing the level of circular economy adoption in agriculture: Insights from Vietnam. Research on World Agricultural Economy 2024; 5(1): 48–58. https://doi.org/10.36956/rwae.v5i1.992

Otero P., Echave J., Chamorro F., Soria-Lopez A., Cassani L., Simal-Gandara J., Prieto MA., Fraga-Corral M. Challenges in the application of circular economy models to agricultural by-products: pesticides in Spain as a case study. Foods 2023; 12(16): 3054. https://doi.org/10.3390/foods12163054

Page MJ., McKenzie JE., Bossuyt PM., Boutron I., Hoffmann TC., Mulrow CD., Shamseer L., Tetzlaff JM., Akl EA., Brennan SE., Chou R., Glanville J., Grimshaw JM., Hróbjartsson A., Lalu MM., Li, T., Loder EW., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness LA., Stewart LA., Thomas J., Tricco AC., Welch VA., Whiting, P., Moher D. The PRISMA 2020 statement: An

updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021; 372: n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Rodino S., Pop R., Sterie C., Giuca A., Dumitru E. Developing an evaluation framework for circular agriculture: A pathway to sustainable farming. Agriculture 2023; 13(11): 2047. https://doi.org/10.3390/agriculture13112047

Rotolo GC., Vassillo C., Rodriguez AA., Magnano L., Milo Vaccaro M., Civit BM., Covacevich MS., Arena AP., Ulgiati S. Perception and awareness of circular economy options within sectors related to agriculture in Argentina. Journal of Cleaner Production 2022; 373: 133805. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133805

Santos RDA., Teles EO., Freires FGM. Applying the circular economy framework to blockchain agricultural production. Sustainability 2024; 16(18): 8004. https://doi.org/10.3390/su16188004

Snyder H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research 2019; 104: 333–339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Sousa-Zomer TT., Magalhães L., Seuring S. Minimizing food loss and utilizing agricultural waste: The role of supply chain governance in the circular economy. Journal of Cleaner Production 2023; 378: 134639. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134639

Toop TA., Ward S., Oldfield T., Hull M., Kirby ME., Theodorou MK. AgroCycle – Developing a circular economy in agriculture. Energy Procedia 2017; 123: 76–80. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.269

Velasco-Muñoz JF., Mendoza JMF., Aznar-Sánchez JA., Gallego-Schmid A. Circular economy implementation in the agricultural sector: Definition, strategies and indicators. Resources, Conservation and Recycling 2021; 170: 105618. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105618

Wang T., Liu J., Feng Z. Digital economy and sustainable agricultural development: An empirical assessment. Sustainability 2023; 17(10): 4372. https://doi.org/10.3390/su17104372

Zheng Y., Liao F., Tian M. Examining the factors influencing the digital transformation of new agricultural operating entities: insights from Zhejiang, China. Humanities and Social Sciences Communications 2025; 12: 608. https://doi.org/10.1057/s41599-025-04949-y

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(3): 1927-1941, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(3): 1927-1941, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology

Mechanical Properties of Polymer Fiber Reinforced 3D Concrete Printing: A Review

Berrin AKKUŞ[1], Murat GÜNAYDIN[2*]

[1]Selçuk University Cihanbeyli Vocational School, Machinery and Metal Technology, Cihanbeyli-Konya
[2]Selçuk University Kadınhanı Vocational School, Construction Technology, Kadınhanı-Konya

[1]https://orcid.org/0000-0001-8099-5973
[2]https://orcid.org/0000-0002-1186-8724
*Corresponding author: muratgunaydin@selcuk.edu.tr

Review Article

Article History:
Received: 07.08.2025
Accepted: 15.12.2025
Published online: 15.06.2026

Keywords:
3D concrete printing
Polymer fiber reinforcement
Mechanical properties
PE fiber
PP fiber
PVA fiber

ABSTRACT

3D concrete printing is a method used to construct complex structures that are difficult to construct using traditional construction methods. This process involves depositing concrete layer by layer through extrusion without the use of molds. 3D concrete printing allows for low-cost, efficient, and rapid production. However, reinforced concrete must be used to improve its mechanical properties, particularly its low ductility. Traditional reinforcement materials include steel, carbon, glass, and basalt. Using polymer reinforcements instead of traditional reinforcements significantly reduces costs and improves performance. This review examines the mechanical properties of 3D concrete prints produced by reinforcing the most commonly used polymer fibers: PE (polyethylene), PP (polypropylene), and PVA (polyvinyl alcohol), based on literature studies. Research indicates that anisotropy due to fiber type, content, and printing direction significantly affects the performance of 3D concrete prints. Furthermore, compared to 3D concrete prints without fibers, fiber-reinforced 3D concrete prints exhibit higher crack resistance, mechanical strength, and durability. However, the selection of fiber type, materials used in the mixture, and their proportions should be tailored to the application's requirements. Future research is recommended to examine the interaction between optimal fiber content and printing parameters and their impact on fiber orientation. This will allow fiber-reinforced 3D concrete printing to maximize its potential for sustainable infrastructure applications in the construction industry.

Polimer Elyaf Takviyeli 3D Beton Baskının Mekanik Özellikleri: Bir Derleme

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.08.2025
Kabul tarihi:15.12.2025
Online Yayınlanma:15.06.2026

Anahtar Kelimeler:
3D beton baskı
Polimer lif takviyesi
Mekanik özellikler
PE lif
PP lif
PVA lif

ÖZ

3D beton baskı, geleneksel inşaat yöntemleri ile inşa edilmesi zor ve karmaşık biçimli yapıları inşa etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, kalıp kullanılmadan ekstrüzyon yoluyla betonu katman katman biriktiren bir işlemdir. 3D beton baskı yöntemi ile düşük maliyetli, verimli ve hızlı bir şekilde üretim yapılabilmektedir. Ancak baskı betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek ve özellikle düşük sünekliğini artırmak için takviye edilmesi gerekmektedir. Kullanılan geleneksel takviye malzemeleri çelik, karbon, cam ve bazalttır. Geleneksel takviyeler yerine polimer takviyelerin kullanılması maliyeti önemli ölçüde azaltıp performansı artırmaktadır. Bu derlemede; literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak, en çok kullanılan polimer liflerden, PE (polietilen), PP (polipropilen) ve PVA (polivinil alkol) takviye edilerek üretilen 3D beton baskıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Araştırmalar, lif türü, içeriği ve baskı yönüne bağlı anizotropinin, 3D beton baskının performansını önemli ölçüde etkilediğini belirtmektedir. Ayrıca, lifsiz 3D beton baskıya kıyasla, lifle

takviye edilmiş 3D beton baskılar daha yüksek çatlak direnci, mekanik dayanım ve dayanıklılık göstermektedir. Ancak, lif türü ile karışımda kullanılan malzemelerin ve oranlarının seçimi, uygulamanın gereksinimlerine uygun şekilde yapılmalıdır. Gelecekteki araştırmalarda; optimum lif içeriği ile baskı parametreleri arasındaki etkileşimin, lif yönelimi üzerindeki etkisinin incelenmesi önerilmektedir. Böylece, lifle güçlendirilmiş 3D beton baskı, inşaat sektöründe sürdürülebilir altyapı uygulamaları için potansiyelini en üst düzeye çıkarabilir duruma gelebilecektir.

To Cite: Akkuş B., Günaydın M. Mechanical Properties of Polymer Fiber Reinforced 3D Concrete Printing: A Review. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(3): 1927-1941.

1. Introduction

Three-dimensional (3D) printing refers to a method used to fabricate solid objects derived from a digital design. This process involves the successive layering of materials, such as plastic, mortar, clay, metal, or ceramic, from the bottom up to the topmost layer of the digital blueprint. The layering continues until the physical object is fully formed (Alami et al., 2023).

The construction industry has been gradually transitioning toward digitally integrated production methods, aiming to boost productivity and accommodate more complex architectural geometries. The introduction of 3D printing (3DP) technology has opened up new possibilities and perspectives for both researchers and professionals in the construction domain (Wu et al., 2016).

3D concrete printing (3DCP) method has provided many significant advantages over traditional construction. These advantages make its recent developments particularly significant. Cost is one of the key factors in construction. This innovative system can help reduce it. This is mainly due to the elimination of formwork, made possible by the ability of these new cement-based materials to retain their shape when applied layer by layer. Material usage can also be minimized because the printer deposits it only in the areas where it is needed. This avoids the need for traditional methods that require filling the entire mold. Furthermore, the automation of the process significantly reduces both the labor requirements and the amount of waste material. This also improves workers' safety and increases the overall efficiency and productivity of construction. These benefits help balance the higher expenses associated with more advanced materials and equipment. Another advantage of this approach is the reduction in construction time, which is much shorter compared to conventional methods. Finally, this technique allows the creation of more complex and detailed geometric shapes, which have been difficult to achieve using traditional construction systems (Ma et al., 2018; De Schutter et al., 2018; Zhang et al., 2019; El-Sayegh et al., 2020).

The rapid advancement of 3D printing has opened up new possibilities for the construction sector, significantly changing how concrete is used by architects, engineers, and designers. By leveraging digital fabrication, 3D printing offers an eco-friendly approach to overcoming the limitations of traditional manufacturing methods. Nevertheless, in order to fully realize the potential of this technology, it is crucial to focus on improving ductility, especially through the use of reinforcement techniques. This is because, as is widely known, concrete often requires reinforcement in various

structural applications to meet essential criteria such as load-bearing capacity, ductility, durability, and fracture toughness, among others (Lesovik et al., 2021).

To enhance ductility, steel reinforcement bars have traditionally been employed in cementitious systems. Depending on the type and direction of applied loads, these rebars must be manually positioned in zones experiencing high tensile or shear stress to prevent structural collapse following matrix cracking. Nevertheless, one of the major challenges with steel reinforcement is corrosion, which leads to internal expansion within the cementitious matrix and may result in internal cracking (Savija et al., 2013; Savija et al., 2015).

Another limitation of using steel reinforcement in 3D concrete printing (3DCP) is its interference with the nozzle during printing. In traditional construction, reinforcements are used to enhance the mechanical strength of concrete, with formwork ensuring proper placement and bonding of the steel bars. However, the absence of a mold means that the fittings will prevent the nozzle from working, disrupting the printing process and reducing the level of automation. At present, several technologies and techniques have been developed and tested to integrate reinforcement into 3D printed structures. However, none have yet proven fully effective. Therefore, this area remains under continuous study and development (Alonso-Canon et al., 2023).

Figure 1 shows the 3DCP setup of Particle Transport System (PTS) and Particle Attachment Device (PAD) system (Ahmed et al., 2020b).



Figure 1. 3DCP setup of the Particle Addition Device (PAD) system with Particle Transportation System (PTS) (Ahmed et al., 2020b)

Among the many approaches under study, fiber reinforcement has emerged as particularly effective for slender and geometrically complex concrete components. This strategy involves embedding fibers within the cementitious matrix. They serve a crucial function: when structural craFcks occur under stress, fibers aligned perpendicularly to the crack paths help restrict and prevent further propagation. This mechanism enhances tensile performance and durability, similar to that achieved through the use of steel rebars, and ensures the structural integrity even after crack initiation. Fibers are classified based

on their material composition, including types such as steel fibers, glass fibers, synthetic fibers (e.g., carbon and polypropylene), and natural fibers (Wangler et al., 2019; Menna et al., 2020).

Steel fibers contribute to increased tensile and flexural strength in mortar composites, offering benefits like resistance to impact and fatigue. However, they are prone to rust and tend to be relatively expensive (Arunothayan et al., 2021). Carbon fibers, while lightweight and strong with excellent thermal and corrosion resistance, lack toughness and have limited impact resistance. Glass fibers provide good thermal insulation and corrosion resistance but perform poorly against alkali attack and wear (Hambach et al., 2017; Panda et al., 2017; Korniejenko et al., 2020). Although other fibers like basalt, recycled, and natural fibers can reduce the brittle failure in composites, their performance tends to be inferior compared to the aforementioned fibers. As a result, there has been less research focused on their use. Though conventional fibers can help mitigate the brittle failure of 3D printed mortars (3DPMs), they typically induce strain softening under deformation (Cao et al., 2015).

The substitution of conventional fibers with synthetic organic polymer fibers can lead to cost reduction and performance enhancement in 3DPMs. Polymer fibers are high-strength synthetic materials composed of monofilament bundles. When added to mixtures, they effectively control crack initiation and propagation while enhancing impermeability and impact resistance (Panda et al., 2018).

Table 1 gives the physical and mechanical properties of various fibers, including PE, PP, and PVA (Błaszczyk and Smarzewski, 2025).

Table 1. Properties of various fibers (Błaszczyk and Smarzewski, 2025)

Fiber type	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (g/cm^3)	Tensile strength (MPa)	Maximum elongation (%)	Elastic modulus (GPa)
Steel	0.1–1.0	6–62	7.5–7.9	345–2900	0.5–4.0	200–250
Polypropylene	0.015–0.6	12–50	0.90–0.95	270–760	10–80	1.5–11.0
Polyvinyl-alcohol	0.01–0.04	6–12	1.2–1.3	770–2500	5.5–8.0	16–42
Polyethylene	0.023–1.0	12–19	0.92–0.97	80–3800	3–100	5–116
Polyester	0.01–0.9	3–30	1.22–1.38	580–1200	7–35	6–18
Polyoxymethylene	0.2	8–24	1.4–1.5	900–970	15–18	8–10
Polyolefin	0.3–0.7	30–60	0.9–1.01	275–600	15–40	2.7–9
Basalt	0.009–0.45	10–50	1.9–2.8	1245–4840	2.2–3.15	40–110
Glass	0.008–0.025	6–18	2.46–2.74	1400–4650	2.5–5.4	69–87
Carbon	0.007–0.02	6–30	1.4–2.2	1500–4000	0.3–2.5	200–1000

The mixture of 3D printed mortars comprises a binder material, aggregates, additives, fly ash, silica powder, fiber and other supplementary components, along with an appropriate water-to-binder ratio. Factors such as fiber type, dosage, length, and aspect ratio impact the mortar's characteristics. Therefore, considerable differences are observed depending on the type of polymer fiber used. This is mainly due to the inherent performance characteristics of the fibers themselves. Additionally, the interaction between the fibers and the matrix is crucial in influencing the overall mechanical properties of the

mortar. It has been noted that the polymer fiber content in 3D printed mortars typically does not exceed 2.0%. Fibers with an aspect ratio ranging from 30 to 150 are considered most suitable for incorporation into 3D printed mortars. Currently, research on the effects of polymer fibers predominantly focuses on materials like PVA, PP, and PE. There is limited investigation into the impact of other polymer fibers on the properties of 3D printed mortars (Liu and Lv, 2022).

Considering the incorporation of polymer fibers into 3D concrete printing mixtures, an appropriate 3DCP mix design can be defined as the preparation of a mixture that ensures sufficient workability during transportation and extrusion. The mixture should also allow proper extrusion without layer separation and maintain consistent buildability without geometric distortion. The printed element must achieve the required mechanical strength and durability. In addition, controlling and optimizing the printing parameters remains a significant technical challenge. These parameters include the extruder characteristics, such as nozzle diameter and filament width, the printing process, including temperature and printing speed, and structural features, such as layer thickness and infill pattern (Ahmed et al., 2020a).

Figure 2 shows the printing of a hollow wall using a 3D printer and the functional testing of the printed hollow wall by the 3D printer (Jo et al., 2020).



Figure 2. (a) Printing of a hollow wall using the 3D printer and (b) printed hollow wall for functional testing of the 3D printer (Jo et al., 2020).

2. Mechanical Properties

Compressive, tensile, and flexural strengths are the fundamental mechanical properties of 3DCP. The addition of fibers to the 3DCP mixture can have varying effects on these mechanical properties. However, in most cases, fiber incorporation enhances the mechanical performance. These properties significantly influence 3DCPs subjected to loads in different directions. Moreover, the interfacial bonding strength between different 3DCP layers is also important (Ramezani et al., 2023).

This section provides information on the mechanical properties of 3DCP reinforced with PP, PE, and PVA fibers.

2.1. PP Fiber

Polypropylene (PP) fiber is a synthetic linear polymer that is produced through the polymerization of propylene. It possesses numerous benefits, such as low density, high tensile strength, outstanding toughness, resistance to chemical degradation, and efficient thermal insulation properties (Marais et al., 2021).

Polypropylene (PP) fibers are commonly used in conventional concrete to enhance its properties, particularly to reduce shrinkage cracking. Recently, they have also been incorporated into geopolymer mixtures for 3D printed concrete. These fibers have a low density of 0.9 g/cm³ (Al-Qutaifi et al., 2018; Nematollahi et al., 2018).

In conventional concrete, the fiber content is usually kept below 1%, as higher amounts can significantly reduce workability (Ramezanianpour et al., 2013; Zhang et al., 2020). Similarly, in 3D printed concrete, low PP fiber content is necessary to preserve workability and avoid blockages in the extrusion nozzle (Al-Qutaifi et al., 2018).

In a study conducted by Shakor et al., the mechanical behavior of cement mortar used in 3D printing, reinforced with PP fiber filaments, was examined. The findings revealed that uncured mortar samples without fiber reinforcement reached a peak compressive load of 13.45 kN after being compressed 28 days post-mixing. When 1% polypropylene fiber was incorporated into the mortar mix, the maximum compressive load increased to 17.65 kN, indicating improved strength performance (Shakor et al., 2019).

Nematollahi et al. explored the impact of polypropylene (PP) fibers on the hardened characteristics of 3D printed, fiber-reinforced geopolymer mortars. PP fibers, ranging from 0.25% to 1.00% by volume, were added to an optimized geopolymer mix. Compressive strength tests were conducted on hardened specimens under three different loading directions: longitudinal, perpendicular, and lateral. Flexural strength tests were carried out in both longitudinal and lateral directions. Results showed that fiber inclusion enhanced compressive strength primarily when the load was applied perpendicular to the interlayer interface. This was attributed to the tendency of fibers to align parallel to the direction of extrusion. Moreover, the addition of PP fibers significantly boosted the flexural performance of the 3D printed elements (Nematollahi et al., 2018).

Ungureanu et al. developed a concrete mixture incorporating Portland cement, water, sand, limestone, filler, and polypropylene fibers, aimed at advancing sustainable construction through 3D printing. The study assessed both the fresh and hardened mechanical properties of the fiber-reinforced concrete. Over time, mechanical performance consistently improved, with positive trends noted at intervals of 24 hours, 7 days, 14 days, and 28 days across various nozzle diameters. By utilizing nozzles of differing sizes, notable gains in mechanical strength were recorded. After 28 days, tensile strength rose by 19.61% for prints made using a 5 mm nozzle and by 34.12% for those using a 3 mm nozzle, in comparison to results from a 20 mm nozzle. Likewise, compressive strength increased by 20.66% and 25.26% for the 5 mm and 3 mm nozzles, respectively, relative to the 20 mm nozzle (Ungureanu et al., 2023).

The connection between the studies reviewed is based on their examination of the role of polypropylene (PP) fibers in enhancing the mechanical properties of 3D printed concrete. Additionally, they demonstrate that the inclusion of PP fibers boosts compressive and flexural strength, with factors like fiber content, print direction, and nozzle diameter affecting the degree of these improvements.

2.2. PE fiber

Polyethylene (PE) fibers have been utilized as reinforcement materials in both conventional mortars and 3D printed composites. Similar to polypropylene (PP) fibers, PE fibers are particularly effective in minimizing the occurrence and distribution of shrinkage-induced cracking (Yan and Banthia, 2000). These fibers exhibit a density comparable to that of PP fibers, approximately 0.97 g/cm³. They also possess a high elastic modulus of 116 GPa along with a tensile strength of 3000 MPa (Lim et al., 2012). Ding et al. investigated how the use of recycled sand and varying fiber contents influenced the flexural strength and fracture energy of the samples. Their findings showed that increasing the fiber content led to higher flexural strength in both 3D printed and cast specimens tested along three different directions. When the fiber content was raised from 0.25% to 1.4%, the flexural strength of specimens loaded in the X, Y, and Z directions, as well as the cast samples, rose by 420%, 412%, 437%, and 381%, respectively. Hence, the amount of PE fiber plays a key role in determining the material's cracking behavior and overall strength. This enhancement is primarily due to the strong interfacial adhesion between the PE fibers and the matrix. It is also a result of the inherently high tensile strength of the PE fibers (Ding et al., 2021)

In a study by Zhu et al., polyethylene fibers were incorporated into the engineered cementitious composite (ECC) matrix at volume fractions of 1%, 1.5%, and 2%. They evaluated the hardened characteristics of 3D printable PE-ECCs, focusing on compressive and flexural strengths as well as uniaxial tensile behavior. The results demonstrated compressive strengths ranging from 47.5 MPa to 51.1 MPa. Flexural strengths between 13.2 MPa and 19.4 MPa, uniaxial tensile strengths from 5.35 MPa to 5.68 MPa, and tensile strain capacities between 3.57% and 11.43%, depending on fiber dosage. The amount of fiber had a notable impact on flexural strength, with the 2% PE fiber mix achieving a 47% increase in flexural strength compared to the 1% mix. This trend was consistent in both 3D printed and mold-cast ECC specimens. However, as fiber content increased from 1% to 2%, its effect on compressive strength became negligible (Zhu et al., 2019).

Ye et al. investigated ultra-high ductile concrete (UHDC) reinforced with PE fibers at 1.0%, 1.5%, and 2.0% volume fractions for 3D printing applications. The study involved evaluating workability, as well as tensile, compressive, and flexural properties in various directions. It was observed that the tensile strength and strain capacity of printed UHDC with 1.5% and 2.0% PE fibers were slightly lower than their mold-cast counterparts. However, UHDC reinforced with 1.0% PE fibers showed a slight improvement in tensile strain capacity compared to mold-cast versions. Among all, the printed UHDC

containing 1.5% fibers demonstrated the best performance in terms of flexural strength, deformability, and energy dissipation (Ye et al., 2021).

Ding et al. experimented with five different mixtures containing varying PE fiber ratios by weight, 0.00%, 0.25%, 0.50%, 1.00%, and 1.40%, for 3D printing purposes. Initial tensile testing was conducted on mold-cast samples, while flexural testing was performed on both printed and mold-cast specimens to assess basic mechanical performance. The study considered the influence of fiber content, fiber length, and loading direction. As the fiber content increased, the spacing and number of cracks in the printed samples also increased in all three loading orientations. PE fiber addition notably enhanced the flexural strength in every direction tested, effectively mitigating the weaknesses introduced by the layer-by-layer printing process. While fiber length did not significantly affect the peak strength, it did play a key role in shaping the post-peak response of the printed specimens (Ding et al., 2020).

In a study by Xiao et al., 1% PE fibers (by cement weight) were used to reinforce 3D printed concrete that also included recycled fine aggregates sourced from construction and demolition debris. Compressive, tensile, and flexural tests were conducted. The inclusion of PE fibers led to an increase in compressive strength from 22.1 MPa to 28.6 MPa. Furthermore, the tensile strength rose from 1.91 MPa to 3.23 MPa, and the flexural strength improved substantially from 9.22 MPa to 25.8 MPa (Xiao et al., 2021).

The studies are connected by their common focus on examining the impact of PE fibers on improving the mechanical performance of 3D printed concrete and the role of fiber content and alignment in this enhancement. While some studies show that increasing fiber content boosts flexural strength and energy dissipation, others highlight the influence of factors such as loading direction and interlayer bonding. Collectively, these studies demonstrate that PE fibers not only improve the durability of the material but also reduce the weaknesses typically introduced by the layer-by-layer printing process.

2.3. PVA fiber

Polyvinyl alcohol (PVA) fiber is manufactured from polyvinyl alcohol as its base material. It undergoes various stages such as dissolution, spinning, thermal stabilization, cutting, and baling. These steps result in a fiber with high tensile strength and modulus. PVA fibers are introduced into the concrete matrix as monofilaments, dispersed uniformly to form a multi-directional network. This fiber network assists in controlling shrinkage, enhancing surface wear resistance, and improving bonding properties (Vlachakis et al., 2021). Polyvinyl alcohol (PVA) fibers are among the most examined types, used in both traditional mortars and 3D printed mixtures with cement or geopolymer binders. Since many studies have focused on PVA, more parameters have been investigated compared to other fibers. The density of PVA fiber is 1.3 g/cm³ (Soltan and Li, 2018; Nematollahi et al., 2018; Yu and Leung, 2018; Jo et al., 2020)

In a study conducted by Liu et al. a concrete mix reinforced with PVA fibers was specifically developed for 3D printing applications. The research utilized both destructive and non-destructive testing methods to investigate the mechanical anisotropy of PVA fiber-reinforced concrete (PFRC) produced through

3D printing. Fiber contents for the 3D printing mix varied from 0% to 0.7% by weight, with the optimal fiber dosage determined to be 0.5%, offering an ideal balance between mechanical performance and printability. The PFRC with 0.5% PVA fibers exhibited the highest cube compressive strength in the X-direction, reaching 98.2 MPa. It also exhibited the greatest flexural strength in the Z-direction, recorded at 6.8 MPa (Liu et al., 2022).

In another study by Wang et al. the combined effects of polypropylene (PP) and PVA fibers on reducing shrinkage and enhancing crack resistance in 3D printed mortar were investigated. The mechanical properties of fiber-reinforced mortars were evaluated and it was found that the optimum PP fiber content to minimize cracking was 0.3%. At this fiber content, the mortars were found to have 28-day compressive and flexural strengths of 39.2 MPa and 6.9 MPa, respectively. For effective crack resistance with PVA fibers, a content greater than 0.2% was recommended, achieving 28-day compressive and flexural strengths of 41.3 MPa and 8.0 MPa, respectively (Wang et al., 2023).

Udebunu et al. conducted a comprehensive investigation into the formulation, mechanical characterization, and enhancement of cement mortar incorporating PVA fibers at volumetric concentrations of 1%, 2%, and 3% relative to the total cementitious materials. These specific fiber contents were selected to systematically assess their influence on the mechanical properties. They were also used to determine the most optimal reinforcement level. The results demonstrated a substantial improvement in tensile strength with increasing fiber content, Values of 1.96 MPa, 3.17 MPa, and 5.12 MPa were observed for the 1%, 2%, and 3% fiber additions, respectively. Additionally, three-point bending tests on notched samples revealed a significant increase in fracture energy, measured at 1.33 N.mm/mm², 2.98 N.mm/mm², and 3.91 N.mm/mm² for the respective fiber contents. Compressive strength was also enhanced with the increasing fiber concentration, reaching 46.8 MPa, 57.2 MPa, and 73.9 MPa for the 1%, 2%, and 3% PVA fiber additions, respectively (Udebunu et al., 2024).

Luo et al. successfully developed a 3D printable cement-based composite reinforced with PVA fibers for use in digital construction. They evaluated the fresh state properties, including rheology and printability. Printed samples displayed varying failure modes under compressive loading based on direction, indicating mechanical anisotropy in the X, Y, and Z axes. Among these, the compressive strength followed the order: Z-direction > Y-direction > X-direction > conventionally cast specimens (Luo et al., 2024).

The studies focus on the role of PVA fibers in improving the mechanical properties of 3D printed concrete and mortar. They show that the addition of PVA fibers enhances compressive strength, crack resistance, and fracture energy, with the optimal fiber content varying depending on the specific property being targeted. Key factors like fiber content, print direction, and application influence the overall performance.

Summary findings from the studies on PP, PE and PVA fiber reinforced 3DCP are given in Table 2.

Table 2. Summary of findings from reviewed studies

Fiber type	Fiber content (%)	Mechanical effects / Findings	References
PP	0.25–1.0	* A 1% fiber content increased the compressive strength from 13.45 kN to 17.65 kN.	Shakor et al., 2019;
		* Due to fiber orientation, the highest compressive strength was achieved when the load was applied perpendicular to the layer interface.	Nematollahi et al., 2018;
		* With a decrease in nozzle diameter (from 20 mm to 3 mm), compressive and tensile strengths increased by 25.26% and 34.12%, respectively.	Ungureanu et al., 2023.
PE	0.25–2.0	* As the fiber content increased from 0.25% to 1.4%, the flexural strength rose by up to 437%.	Ding et al., 2021;
		* The ECC with 2% fiber showed a 47% increase in flexural strength compared to the 1% fiber mix.	Zhu et al., 2019;
		* The printed UHDC with 1.5% fiber demonstrated the best performance in terms of flexural strength, deformation, and energy dissipation.	Ye et al., 2021;
		* As the fiber content increased, the number of cracks also increased, but the strength and energy absorption capacity improved.	Ding et al., 2020;
		* In 3D printed concrete with 1% fiber, the compressive strength increased from 22.1 MPa to 28.6 MPa, and the flexural strength rose from 9.22 MPa to 25.8 MPa.	Xiao et al., 2021.
PVA	0.2–3.0	* An optimum workability and a compressive strength of 98.2 MPa were achieved with a 0.5% fiber content.	Liu et al., 2022;
		* PVA content above 0.2% significantly increased crack resistance.	Wang et al., 2023;
		* With 1% and 3% fiber content, tensile strength increased from 1.96 MPa to 5.12 MPa, and compressive strength rose from 46.8 MPa to 73.9 MPa.	Udebunu et al., 2024;
		* Mechanical anisotropy was observed depending on the layer orientation (Z > Y > X).	Luo et al., 2024.

3. Results and Discussion

The main purpose of this review is to interpret and compare the effects of three different polymer fibers, PP, PE and PVA, on the mechanical performance of cement-based composites produced with 3D printers and to evaluate future studies. The study examined how fiber properties, dosage, alignment, and interaction with printing parameters influence the strength, ductility, and crack resistance of 3D printed

mortars. This assessment and review highlights that polymer fiber reinforcement is a promising alternative to traditional reinforcement by offering greater compatibility with 3D printing processes.

Some of the reviewed studies compared mortars with different fiber types, some compared printing orientations, some compared molded samples with printed samples, and some compared fiber-reinforced samples with unreinforced samples. Therefore, the authors used the strength increase relative to a reference sample to compare the performance of different formulations. In addition, the references examined differ in conditions such as sample size, fiber addition methods, control sample definition and curing. This sometimes hinders the comparison of results. Taking these considerations into account, the results of the studies reviewed are described below.

Studies on 3DCP containing PP fibers have shown that the low density and high tensile strength of the fibers contribute to noticeable improvements in the mechanical properties of 3D printed mortars. PP fibers effectively enhance compressive and flexural strength, reduce shrinkage-induced cracking, and improve interlayer bonding. However, excessive fiber content tends to decrease workability and can cause extrusion blockages during printing. Therefore, optimal fiber content must be carefully maintained. While PP fibers are advantageous in terms of printability, and durability, their contribution to ductility is relatively limited compared to other polymer fibers.

Studies involving PE fiber consistently show that incorporating the fiber significantly improves the mechanical performance of 3D printed cementitious materials. Increasing fiber content generally enhances flexural and tensile strength, mitigates cracking, and improves energy dissipation. While higher fiber dosages may have limited effect on compressive strength, they play a crucial role in controlling cracking behavior and enhancing ductility. Due to their high elastic modulus and strong interfacial bonding, PE fibers effectively mitigate the layer-induced weaknesses typical of 3D printed materials. Additionally, factors such as fiber alignment, loading direction, and interfacial bonding influence the overall mechanical response. This highlights the importance of optimizing both fiber content and printing parameters to achieve durable and high-performance 3D printed structures.

PVA fiber incorporation has been shown to deliver the most balanced enhancement across all key mechanical properties. Owing to their high tensile strength and strong chemical bonding with the cementitious matrix, PVA fibers significantly improve tensile and flexural strength, crack resistance, and ductility. Optimal PVA contents, typically between 0.5% and 2%, ensure superior mechanical performance while maintaining good printability. Moreover, PVA fibers enhance compressive strength and interlayer adhesion, reducing mechanical anisotropy caused by the layer-by-layer printing process. These advantages make PVA the most effective and widely studied polymer fiber for 3D printed concrete applications.

Another important finding from the reviewed studies is that 3D printed materials exhibit anisotropic properties; mechanical properties vary depending on the printing direction (X, Y, Z axes). Specifically, PP fibers provide higher compressive strength when the load is applied perpendicular to the printing layers, while PVA fibers show higher compressive strength in the X-direction and greater flexural

strength in the Z-direction. These findings highlight the critical role of fiber content, orientation, and printing direction in optimizing the performance of 3D printed concrete structures.

Additionally, the nozzle diameter significantly affects the mechanical properties of 3D printed concrete. Smaller nozzle diameters (5 mm and 3 mm) lead to increased tensile and compressive strength compared to larger diameters, as they create a denser and more homogeneous structure, strengthening the interlayer bonds.

Nevertheless, several research gaps remain. Future studies should focus on understanding the interfacial behavior between fibers and the cementitious matrix under different printing orientations, as well as the influence of fiber alignment on anisotropy and long-term durability. Additionally, further investigation into hybrid fiber systems combining multiple polymer types could provide synergistic improvements in performance and sustainability. Such approaches would enable the optimization of both mechanical and environmental aspects of 3D printed concrete, contributing to the development of durable, efficient, and sustainable digital construction materials.

Declaration of Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Author's Contributions

The authors declare that they have contributed equally to the article.

4. References

Ahmed W., Alnajjar F., Zaneldin E., Al-Marzouqi AH., Gochoo M., Khalid S. Implementing FDM 3D printing strategies using natural fibers to produce biomass composite. Materials 2020a; 13(8): 4065.

Ahmed ZY., Bos FP., van Brunschot MCAJ., Salet TAM. On-demand additive manufacturing of functionally graded concrete. Virtual Physical Prototyping 2020b; 15(2): 194-210.

Alami AH., Olabi AG., Ayoub M., Aljaghoub H., Alasad S., Abdelkareem MA. 3D concrete printing: Recent progress, applications, challenges, and role in achieving sustainable development goals. Buildings 2023; 13(4): 924.

Alonso-Canon S., Blanco-Fernandez E., Castro-Fresno D., Yoris-Nobile AI., Castañon-Jano L. Reinforcements in 3D printing concrete structures. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2023; 23: 25.

Al-Qutaifi S., Nazari A., Bagheri A. Mechanical properties of layered geopolymer structures applicable in concrete 3D-printing. Construction and Building Materials 2018; 176: 690-699.

Arunothayan AR., Nematollahi B., Ranade R., Bong SH., Sanjayan JG., Khayat KH. Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing. Cement and Concrete Research 2021; 143: 106384.

Błaszczyk K., Smarzewski P. Influence of hybrid fibers on workability, mechanical and dynamic properties of ultra-high performance concrete. Applied Sciences 2025; 15(10): 5716.

Cao M., Xu L., Zhang C. Review on micromechanical design, performance and development tendency of engineered cementitious composite. Journal of the Chinese Ceramic Society 2015; 43(5): 632–642.

De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella VN., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete-technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research 2018; 112: 25–36.

Ding T., Xiao J., Zou S., Yu J. Flexural properties of 3D printed fibre-reinforced concrete with recycled sand. Construction and Building Materials 2021; 288: 123077.

Ding T., Xiao J., Zou S., Zhou X. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. Composite Structures 2020; 254: 112808.

El-Sayegh S., Romdhane L., Manjikian S. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2020; 20(2): 1–25.

Hambach M., Rutzen M., Volkmer D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced portland cement paste. Cement and Concrete Composites 2017; 79: 62–70.

Jo JH., Jo BW., Cho W., Kim JH. Development of a 3D printer for concrete structures: Laboratory testing of cementitious materials. International Journal of Concrete Structures Materials 2020; 14(1): 13.

Korniejenko K., Łach M., Chou SY., Lin WT., Cheng A., Hebdowska-Krupa M., Gądek S., Mikuła J. Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods: A comparative study. Materials 2020; 13(3): 579.

Lesovik V., Fediuk R., Amran M., Alaskhanov A., Volodchenko A., Murali G., Uvarov V., Elistratkin M. 3D-printed mortars with combined steel and polypropylene fibers. Fibers 2021; 9(12): 79.

Lim S., Buswell RA., Le TT., Austin SA., Gibb AGF., Thorpe T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction 2012; 21(1): 262–268.

Liu B., Liu X., Li G., Geng S., Li Z., Weng Y., Qian K. Study on anisotropy of 3D printing PVA fiber reinforced concrete using destructive and non-destructive testing methods. Case Studies in Construction Materials 2022; 17: e01519.

Liu J., Lv C. Properties of 3D-printed polymer fiber-reinforced mortars: A review. Polymers 2022; 14(7): 1315.

Luo S., Li W., Wang D. Study on bending performance of 3D printed PVA fiber reinforced cement-based material. Construction and Building Materials 2024; 433: 136637.

Ma GW., Wang L., Ju Y. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material-An emerging technique for construction. Science China Technological Sciences 2018; 61(4): 475–95.

Marais H., Christen H., Cho S., De Villiers W., Van Zijl G. Computational assessment of thermal performance of 3D printed concrete wall structures with cavities. Journal of Building Engineering 2021; 41: 102431.

Menna C., Mata-Falcón J., Bos FP., Vantyghem G., Ferrara L., Asprone D., Salet TAM., Kaufmann W. Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. Cement and Concrete Research 2020; 133: 106079.

Nematollahi B., Vijay P., Sanjayan J., Nazari A., Xia M., Naidu Nerella V., Mechtcherine V. Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopolymers made by 3D printing for digital construction. Materials 2018; 11(12): 2352.

Nematollahi B., Xia M., Sanjayan J., Vijay P. Effect of type of fiber on inter-layer bond and flexural strengths of extrusion-based 3D printed geopolymer. Materials Science Forum 2018; 939: 155-162

Panda B., Paul S., Tan M. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. Materials Letters 2017; 209: 146–149.

Panda B., Unluer C., Tan MJ. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. Cement and Concrete Composites 2018; 94: 307–314.

Ramezani A., Modaresi S., Dashti P., GivKashi MR., Moodi F., Ramezanianpour AA. Effects of different types of fibers on fresh and hardened properties of cement and geopolymer-based 3D printed mixtures: A review. Buildings 2023; 13(4): 945.

Ramezanianpour AA., Esmaeili M., Ghahari SA., Najafi MH. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. Constr Build Mater. 2013; 44: 411–418.

Savija B., Lukovic M., Hosseini SAS., Pacheco J., Schlangen E. Corrosion induced cover cracking studied by X-ray computed tomography, nanoindentation, and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS). Materials and Structures 2015; 48(7): 2043-2062.

Savija B., Lukovic M., Pacheco J., Schlangen E. Cracking of the concrete cover due to reinforcement corrosion: A two- dimensional lattice model study. Construction and Building Materials 2013; 44: 626-638.

Shakor P., Nejadi S., Paul G. A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar. Materials 2019; 12(10): 1708.

Soltan DG., Li VC. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. Cement and Concrete Composites 2018; 90: 1–13.

Udebunu J., Abdolpour H., Sadowski L. Comprehensive experimental investigation of the mechanical properties and performance enhancement of polyvinyl alcohol fiber-reinforced cement mortar. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2024; 25(58): 1-14.

Ungureanu D., Onutu C., Taranu N., Vornicu N., Zghibarcea ŞV., Ghiga DA., Spiridon IA. Microstructure and mechanical properties of cost-efficient 3D printed concrete reinforced with polypropylene fibers. Buildings 2023; 13: 2813.

Vlachakis C., Perry M., McAlorum J. 3D printed self-sensing alkali-activated coatings for civil infrastructure. 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 17-20 May 2021, 1-5, Glasgow, United Kingdom.

Wang L., Hu Y., Wang Q., Cui T. Shrinkage and cracking performance of PP/PVA fiber-reinforced 3D-printed mortar. Journal of Materials in Civil Engineering 2023; 35(6): 04023132.

Wangler T., Roussel N., Bos FP., Salet TAM., Flatt RJ. 2019. Digital concrete: A review. Cement and Concrete Research 2019; 123: 105780.

Wu P., Wang J., Wang X. A Critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. Automation in Construction 2016; 68: 21-31.

Xiao J., Zou S., Ding T., Duan Z., Liu Q. Fiber-reinforced mortar with 100% recycled fine aggregates: A cleaner perspective on 3D printing. Journal of Cleaner Production 2021; 319: 128720.

Yan C., Banthia N. Shrinkage cracking in polyolefin fiber-reinforced concrete. Materials Journal 2000; 97(4): 432–437.

Ye J., Cui C., Yu J., Yu K., Dong F. Effect of polyethylene fiber content on workability and mechanical-anisotropic properties of 3D printed ultra-high ductile concrete. Construction and Building Materials 2021; 281: 122586.

Yu J., Leung CKY. Impact of 3D printing direction on mechanical performance of strain-hardening cementitious composite (SHCC). RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing; 2018.

Zhang D., Yu J., Wu H., Jaworska B., Ellis BR., Li VC. Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile engineered cementitious composites (ECC). Composites Part B: Engineering 2020; 184: 107741.

Zhang J., Wang J., Dong S., Yu X., Han B. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2019; 125: 105533.

Zhu B., Pan J., Nematollahi B., Zhou Z., Zhang Y., Sanjayan J. Development of 3D printable engineered cementitious composites with ultra-high tensile ductility for digital construction. Materials & Design 2019; 181: 108088.