OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 1-18, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 1-18, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Türkiye'nin İklim Eylemi ve Ormancılık Sektöründeki Azaltım ve Uyum Politikaları: Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Çerçevesinde Bir Değerlendirme

Gül TEKİNGÜNDÜZ[1*], Seda SARANAY KAYAR[2], Ahmet ŞENDAĞLI[3]

[1]Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mudurnu Süreyya Astarcı Meslek Yüksekokulu, Ormancılık Bölümü, 14810, Bolu
[2]Tarım ve Orman Bakanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, 06560, Ankara
[3]Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü, 06510, Ankara

[1]https://orcid.org/0000-0002-0785-6472
[2]https://orcid.org/0009-0002-3032-9811
[3]https://orcid.org/0000-0003-4246-8173
*Sorumlu yazar: gulakbulut@ibu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 01.03.2025
Kabul tarihi:01.07.2025
Online Yayınlanma: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Birleşmiş Milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi
İklim değişikliği
Ormancılık politikası
Ulusal katkı beyanı

ÖZ

Birleşmiş Milletler tarafından 2015 yılında üye ülkelerle yerel ve küresel düzeyde ortak olan sorunların çözümü için "Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları" başlığında evrensel bir eylem çağrısı belirlenmiştir. Bu doğrultuda yoksulluğa son vermek, gezegeni korumak ve 2030 yılına kadar tüm insanların barış ve refah içinde yaşamasını sağlamayı esas alan 17 Sürdürülebilir Kalkınma Amacı oluşturulmuştur. İklim değişikliği, 21. yüzyılda insanlığın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan biridir. Bu küresel sorunla mücadele kapsamında, 2015 yılında Paris Anlaşması hazırlanmıştır. Türkiye, 2016 yılında bu anlaşmayı imzalamış ve 2021 yılında Türkiye Büyük Millet Meclisi onayı ile resmi olarak taraf olmuştur. Anlaşmaya göre taraf ülkeler, sera gazı salımlarını azaltma ve iklim değişikliğine uyum sağlama hedeflerini içeren Ulusal Katkı Beyanı sunmakla yükümlüdür. Türkiye bu kapsamda, 2015 yılında ilk beyanını "Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanı" olarak sunmuş, 2023 yılında ise Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'nı Birleşmiş Milletler Sekretaryası'na iletmiştir. Bu çalışma, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'nın 13. maddesi olan iklim eylemi çerçevesinde Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı'nı ormancılık sektöründeki azaltım ve uyum politika belgeleri açısından değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda Türkiye'nin azaltım politikaları arasında Ulusal Orman Envanteri (2025), İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030) öne çıkan kılavuz belgelerdir. Uyum politikalarında ise Ulusal Havza Rehabilitasyon Stratejisi (2023-2033), Çölleşmeyle Mücadele Eylem Planı (2024-2030) ve Orman Genel Müdürlüğü Stratejik Planı (2024-2028) güncel tarihli belgelerdendir. Çalışmanın bulgularının Türkiye'nin 2028 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi Sekretaryası'na sunacağı Ulusal Katkı Beyanı'nın hazırlanmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Çalışma sonuçları, süresi dolan kılavuz belgelerin güncellenmesinin, Türkiye'nin iklim değişikliği politikalarının güçlendirilmesi bağlamında değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Türkiye's Climate Action and Mitigation and Adaptation Policies in the Forestry Sector: An Assessment within the Framework of the United Nations Sustainable Development Goals

Research Article

Article History:
Received: 01.03.2025
Accepted: 01.07.2025
Published online:13.01.2026

ABSTRACT

In 2015, the United Nations established a universal call to action under the title of "Sustainable Development Goals" for the solution of problems common to member countries at local and global levels. Accordingly, 17 Sustainable Development Goals have been established to end poverty, protect the planet,

and ensure that all people live in peace and prosperity by 2030. Climate change is one of the most important challenges facing humanity in the 21st century. Within the scope of combating this global problem, the Paris Agreement was prepared in 2015. Türkiye's signed this agreement in 2016 and officially became a party with the approval of the Grand National Assembly of Türkiye in 2021. According to the Agreement, countries' parties are obliged to submit a National Contribution Declaration, which includes their targets for reducing greenhouse gas emissions and adapting to climate change. In this context, Türkiye submitted its first declaration in 2015 as an "Intended Nationally Determined Contribution". and submitted its Updated First National Contribution to the United Nations Secretariat in 2023. This study aims to evaluate Türkiye's Updated First National Contribution Declaration in terms of mitigation and adaptation policies in the forestry sector within the framework of climate action, Article 13 of the United Nations Sustainable Development Goals. Accordingly, among Türkiye's mitigation policies, the National Forest Inventory (2025), Climate Change Mitigation Strategy and Action Plan (2024-2030) are prominent guiding documents. As for adaptation policies, the National Basin Rehabilitation Strategy (2023-2033), the Action Plan for Combating Desertification (2024-2030), and the Strategic Plan of the General Directorate of Forestry (2024-2028) are among the recent documents. The results of the study are expected to contribute to the preparation of Türkiye's Declaration of National Contribution to be submitted to the United Nations Framework Convention on Climate Change Secretariat in 2028. The results of the study demonstrate that updating of expired guidance documents should be assessed in the context of strengthening Türkiye's climate change policies.

Keywords:
UNFCCC
Climate change
Forest policy
Nationally determined contribution

To Cite: Tekingündüz G., Saranay Kayar S., Şendağlı A. Türkiye'nin İklim Eylemi ve Ormancılık Sektöründeki Azaltım ve Uyum Politikaları: Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Çerçevesinde Bir Değerlendirme. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 1-18.

1. Giriş

Küresel iklim değişikliği içinde bulunduğumuz yüzyılın en önemli gündem konuları arasında yer almaktadır. Dünyada çevresel, politik, ekonomik ve siyasi oluşumların içerisinde iklim değişikliği konusunun yerel, bölgesel ve küresel olmak üzere çeşitli boyutlarda ele alındığı görülmektedir. İklim değişikliği konusunda aktif olarak görev alan ve küresel düzeyde rol üstlenen kuruluşların başında Birleşmiş Milletler (BM) gelmektedir. BM, 1945 yılında kurulan ve aynı yıl 51 üye ülkesi olan, günümüzde ise 193 üye ülke ile faaliyet gösteren uluslararası bir örgüttür. BM dünyadaki ortak sorunları tartışılabilmek, bunun yanında insanlığa fayda sağlayacak ortak çözümler üretebilmek amacıyla faaliyet göstermektedir (UN, 2025a).

BM iklim değişikliği ile mücadelede sorumlulukları paylaşmak, bununla birlikte iklim değişikliği kaynaklı mevcut ve olası sorunlara karşı çözümler sunmak adına 2015 yılında Paris'te düzenlenen BM İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP21), 196 ülkenin kabulü ile Paris Anlaşması sürecini başlatmıştır. Akabinde Paris Anlaşması 4 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir (UNFCCC, 2025). Türkiye Paris Anlaşması'nı 2016 yılında imzalamış olup, 2021 yılında da Türkiye Büyük Millet Meclisi (TBMM) onayı ile anlaşmaya resmi olarak taraf olmuştur (Resmi Gazete, 2021).

Paris Anlaşması temel olarak, küresel sıcaklıkta meydana gelebilecek artışı sanayi öncesi dönemlere kıyasla 2°C'nin altında tutmayı ve bu artışı 1,5°C ile sınırlandırmayı amaçlamaktadır (UNFCCC, 2015). Bu kapsamda anlaşmaya taraf olan her ülkenin kendi ulusal koşulları ölçeğinde sera gazı salınımlarını azaltma ve iklim değişikliğine uyum sağlama konusundaki hedeflerini belirten Ulusal Katkı Beyanı

(NDC) sunma yükümlülüğü bulunmaktadır (UNFCCC, 2025). Türkiye'nin 2030 yılına yönelik emisyon azaltım hedeflerini içeren beyanı 30 Eylül 2015 tarihinde Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) sekretaryasına sunulmuştur. Türkiye 2015 yılında Paris Anlaşması'na henüz taraf olmaması sebebiyle ilk sunulan beyan "Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanı (INDC)" olarak adlandırılmıştır (TCDB, 2025). Ardından 2022 yılında BMİDÇS 27. Taraflar Konferansı Bakanlar Oturumu kapsamında Türkiye NDC belgesini ilan etmiştir (ÇŞİDB, 2022). 2023 yılına gelindiğinde Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) bünyesinde kurum ve kuruluşların katkılarıyla hazırlanan "Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci Ulusal Katkı Beyanı" BMİDÇS sekretaryasına sunulmuştur (ÇŞİDB, 2023a).

BM Paris Anlaşması sürecinin de başladığı 2015 yılında, üye ülkelerle yerel ve küresel düzeyde ortak olan sorunların çözümü için "Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları" başlığında evrensel bir eylem çağrısı belirlenmiştir. Bu doğrultuda "yoksulluğa son vermek, gezegeni koruyarak ve 2030 yılına kadar tüm insanların barış ve refah içinde yaşamasını sağlamak" amaçlarına erişmek için 17 Sürdürülebilir Kalkınma Amacı (SKA) oluşturulmuştur (UNDP, 2025). BM 2015 yılında üye ülkelerle birlikte oluşturduğu SKA'ların bütünleşik olduğunu, bu amaçlar temelinde gerçekleştirilecek bir eylemin diğer SKA'ların sonuçları etkileyeceğini savunmaktadır (BM Türkiye, 2025).

Bu çalışma BM SKA 13. madde olan iklim eylemini, Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesi kapsamında, ormancılık sektöründeki azaltım ve uyum politikaları açısından değerlendirmeyi amaçlamaktadır. SKA 13. madde olan iklim eylemi başlığında yer alan hedefler azaltım ve uyum politikaları kapsamında incelenmiştir. Literatürde SKA'lar kapsamında son yıllarda genellikle genel sera gazı emisyonları, enerji sektörü veya şehirleşme gibi alanlara odaklanan çalışmalar bulunmakla birlikte (Meydan, 2025, Doğaner, 2022, Karakuş ve ark., 2022, Yıldırım ve Nuri, 2018), ormancılık sektörü özelinde SKA 13 ile uyumlu araştırmalarda yer almaktadır (Baumgartner 2019, Louman ve ark., 2019). Türkiye'nin NDC belgesinde yer alan ormancılık politika belgelerinin SKA 13 hedefleriyle olan uyumuna dair yapılacak bir analizin NDC belgesinin güçlendirilmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı amaçlayarak, Türkiye'nin güncellenmiş birinci NDC belgesinde yer alan ormancılık politika belgelerinin iklim eylemi bağlamında değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Araştırma kapsamında Türkiye'nin Paris Anlaşması'na yönelik hazırlanan NDC belgesinde ormancılık sektörü açısından mevcut politika belgelerine katkı sağlamak adına öneriler geliştirilmiştir.

2. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (BM SKA)

Sürdürülebilir kalkınma kavram olarak ilk kez 1987 yılında Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu (Bruntland Komisyonu) tarafından hazırlanan BM Ortak Geleceğimiz raporunda yer almaktadır. Bu rapora göre Sürdürülebilir kalkınma "gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan bugünün ihtiyaçlarını karşılayan kalkınma" olarak tanımlanmaktadır (Brundtland, 1987). Sürdürülebilir kalkınma, dünyayı herkes için daha yaşanılabilir bir yer haline getirmek amacıyla

çeşitli hedef ve amaçları belirleyen, bununla birlikte siyasi gündemlerin de bir parçası durumundadır (Halkos ve Gkampoura, 2021). Sürdürülebilir kalkınma sürdürülebilirliğin temel felsefesinden hareketle, toplumun ihtiyaçlarını gideren ve bunun yanında refah seviyesini arttıracak ekonomik, ekolojik, çevresel ve sosyal faaliyetlerin tamamında etkili olan bir kavramdır. Bu nedenle sürdürülebilirlik hem politika yapıcılar hem karar vericiler hem de küresel düzeyde toplumlara yön veren kurum-kuruluşlar için önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir. BM sürdürülebilirlik kavramının çıkış noktası olması nedeniyle uluslararası düzeydeki kılavuz kuruluşların başında gelmektedir.

BM SKA'ların zeminini 2012 yılında Rio de Jenerio'da düzenlenen BM Sürdürülebilir Kalkınma Konferansı'nda hazırlamıştır. Ardından 2014 yılında 17 maddeden oluşan bir taslak belge oluşturulmuş, 2015 yılında ise BM Genel Kurulu'nda görüşülmüştür (Mishra ve ark., 2024). Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi, BM üye devletlerinin onayı neticesinde 2015 yılında kabul edilmiştir. 2030 Gündemi insanlar ve gezegen için şimdi ve gelecekte barış ve refahı sağlamak için ortak bir plan sunmaktadır. Bu amaçla küresel bir ortaklık için acil bir eylem çağrısı olan SKA'lar oluşturulmuştur. SKA'lar gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeleri kapsayacak şekilde hazırlanmıştır (UN, 2025b). SKA'lar 17 madde, 169 hedef ve 232 göstergeden oluşmaktadır (Şekil 1). SKA'lar ülkelerin ortak stratejiler oluşturması ve bunların yerel düzeyde uygulanmasında sektörel entegrasyon için bir fırsattır (García-Feijoo ve ark., 2020). SKA'lara ulaşılması ekonomik büyüme ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengesizliğin ortadan kaldırılması ve sürdürülebilir büyümeye giden yol açısından ayrıca önemlidir (Dai ve ark., 2024).

Şekil 1. SKA'lar özet

BM tarafından onaylanan 17 SKA ve kısa tanımlamalar Tablo 1'de sunulmuştur. Sürdürülebilirlik göstergelerinin sürdürülebilirliği gerçekçi ve güvenilir bir şekilde değerlendirebilmesi, ölçebilmesi ve doğru bilgi iletebilmesi için belirli ölçütleri karşılaması gerekmektedir (ESS, 2012). Sürdürülebilir kalkınma sosyal, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik olmak üzere birbiriyle ilişkili üç kavramın bileşkesidir (Purvis ve ark., 2019). SKA'lar temelde ekonomik, ekolojik, sosyal koşulları hedef alan eşitlik, adalet ve hakkaniyet ilkeleri temelinde hazırlanmış bütüncül maddelerden oluşmaktadır.

Tablo 1. SKA'lar ve Açıklamaları (*S*BB, 2019; UN, 2025b)

SKA'lar		Kısa açıklaması
SKA1	Yoksulluğa son	Yoksulluğun her şeklini her yerde bitirmek
SKA2	Açlığa son	Açlığı sona erdirmek, gıda güvenliği ile sağlıklı beslenmeye erişmek ve sürdürülebilir tarım uygulamalarını desteklemek
SKA3	Sağlıklı bireyler	Sağlıklı ve kaliteli yaşam koşullarını farklı yaş gruplarında sağlamak
SKA4	Nitelikli eğitim	Kapsayıcı ve hakkaniyet temelli eğitim fırsatı sağlayarak yaşam boyu öğrenimi herkes için teşvik etmek
SKA5	Toplumsal cinsiyet eşitliği	Cinsiyet eşitliğini sağlayarak kız çocukları ve kadınları güçlendirmek
SKA6	Temiz su ve sanitasyon	Temiz suya erişim ve su kaynaklarının sürdürülebilirliğini sağlamak
SKA7	Erişilebilir ve temiz enerji	Enerjiye erişimde sürdürülebilir, güvenilir ve karşılanabilir olanakları sağlamak
SKA8	İnsana yakışır iş ve ekonomik büyüme	Ekonomik büyüme ile üretim tabanlı istihdam olanaklarını desteklemek
SKA9	Sanayi, yenilikçilik ve altyapı	Altyapı tesislerini güçlendirmek, sanayide sürdürülebilirlik ile yenilikçiliği desteklemek
SKA10	Eşitsizliklerin azaltılması	Ulusal ve uluslararası ölçekte eşitsizlikleri yok etmek
SKA11	Sürdürülebilir şehirler ve topluluklar	Şehirleri daha dayanıklı ve güvenli hale getirmek
SKA12	Sorumlu tüketim ve üretim	Üretim ve tüketimde sürdürülebilir olanakları oluşturmak
SKA13	İklim eylemi	İklim değişikliğinin olumsuz etkileri ile mücadele de faaliyete geçmek
SKA14	Sudaki yaşam	Denizler, okyanuslar gibi su kaynaklarını koruyarak sürdürülebilir kullanımını sağlamak
SKA15	Karasal yaşam	Karasal ekosistemlerde alan koruma ve kullanımında sürdürülebilirliği sağlamak, ormanların sürdürülebilir yönetimini desteklemek, biyoçeşitliliği korumak, arazi kullanımında koruma temelli yaklaşımları esas almak ve çölleşme ile mücadele etmek
SKA16	Barış, adalet ve güçlü kurumlar	Herkes için adil, hesap verebilir, kapsayıcı kurumları oluşturmak
SKA17	Amaçlar için ortaklıklar	Sürdürülebilir kalkınmada küresel düzeyde ortaklıklar kurmak

Tablo 1'de yer alan SKA'lar, küresel düzeyde kalkınmanın sosyal, ekonomik ve çevresel açılardan güçlenmesini destekleyen kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır. Her bir amaç, ilgili hedef ve göstergelerle daha anlaşılabilir hale getirilmiştir. Bu durum dünya genelindeki tüm ülkelerin kendi koşulları dahilinde atacakları somut adımların belirlenmesinde yol göstericidir. SKA'lar uygulayıcı ülkelerde politikacılar, sivil toplum ve iş dünyası ile birlikte bireysel yönelimlerde önemli bir rehber durumundadır. SKA'lar ile ilgili hedef ve göstergelerin uygulanması dünya genelinde daha adil, kapsayıcı, eşitlikçi ve doğa ile bütünleşik bir yaşamın sağlanması açısından önemlidir.

SKA'lar arasında yer alan 13. Amaç olan "İklim Eylemi", iklim değişikliği kaynaklı tehlikeler ile doğal afetlere karşı dayanıklılığın arttırılması ve uyum kapasitesinin geliştirilmesi, iklim değişikliği ile ilgili alınacak önlemlerin ilgili politika belgelerine entegre edilmesi, iklim değişikliği konusunda kapasite geliştirilmesi konularında hedefler içermektedir (UN, 2025b). SKA 13, diğer SKA'ların başarısı açısından da kritik bir role sahiptir. İklim değişikliği yoksulluktan gıda güvenliğine, doğal kaynak yönetiminden ekonomik büyümeye, sudaki yaşamdan karasal yaşama kadar pek çok sürdürülebilir kalkınma amacını doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte erişilebilir temiz enerji, sanayi yenilikçilik ve altyapı başlıkları doğrudan iklim değişikliği ile ilişkili konulardır. Bu çalışmada, SKA 13'ün ormancılık sektörüyle olan ilişkisi ele alınmış; Türkiye'nin NDC belgesi çerçevesinde bu hedefe yönelik mevcut politika belgeleri değerlendirilmiş ve eksik ya da geliştirilebilecek alanlar tespit edilmiştir.

SKA'lar temelde birbirine bağlı ve birbirini etkileyen bir yapıya sahip olup, sosyal, ekonomik ve çevresel hedefleri içeren bütüncül bir kalkınma vizyonu sunmaktadır. Bu bağlamda, SKA 13 iklim eylemi, yalnızca çevresel sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda toplumsal refah ve ekonomik büyüme açısından da kritik bir öneme sahiptir. İklim değişikliğinin etkileri, kırılgan topluluklar üzerinde derin sosyal adaletsizlikler yaratırken (Wright ve Nance, 2012); tarım, enerji ve sanayi gibi temel ekonomik sektörleri de doğrudan etkilemektedir (Dellink ve ark., 2019). Bu nedenle iklim eylemi sadece çevresel açıdan katkı sağlayan bir fayda mekanizması olmayıp, ekonomik açıdan yoksulluğun azaltılması, ekonomik dayanıklılığın artırılması, sosyal açıdan toplumsal eşitliğin sağlanması ve sürdürülebilirliğin sosyal ve ekonomik boyutlarının desteklenmesi nedeniyle de merkezi bir konumdadır. Bu çerçevede, SKA'ların çevresel boyutunu güçlendiren yaklaşımlar, sosyal ve ekonomik boyutlarla bütünleştirilerek daha kapsayıcı ve etkili bir sürdürülebilir kalkınma anlayışına ulaşmada önemli katkılar sağlayabilmektedir.

3. Türkiye'nin Paris Anlaşması Süreci ve Taahhütleri

Küresel iklim değişikliği 21. yüzyılda ekonomik, çevresel ve sosyal etkileriyle dünyanın en önemli gündem maddelerinin başında gelmektedir. Bu nedenle iklim değişikliği konusunda atılacak adımlar küresel düzeyde çaba ve katkı gerektiren bir süreç olarak öne çıkmaktadır. Paris Anlaşması iklim değişikliği konusunda küresel düzeyde çabaların kesişme noktası olarak değerlendirilebilir. Anlaşmanın yükümlülükleri ve taraf devletlerden beklenen ulusal katkılar iklim değişikliğine uyum ve iklim değişikliği ile mücadelede önemli adımlardır.

2015 yılında Paris'te gerçekleştirilen BM İklim Değişikliği Konferansı'nda (COP21) 196 taraf ülkenin kabulü ile Paris Anlaşması süreci başlamıştır. Türkiye 2015 yılında Paris Anlaşması'nı kabul eden ülkeler arasındadır. Anlaşmanın yürürlüğe girmesinde küresel düzeyde sera gazı emisyonlarının %55'ini oluşturan, en az 55 tarafın anlaşmayı onaylaması koşulu bulunmaktadır. Paris Anlaşması bu koşulun karşılanması neticesinde 4 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe girmiştir (TCDB, 2025).

Türkiye Paris Anlaşması'nı 2016 yılında imzalamış olup (ÇŞİDB, 2025; TCDB, 2025), anlaşmaya taraf olma durumu 2021 yılında TBMM onayı ile resmiyet kazanmıştır (Resmi Gazete, 2021). Meclis onayı

Türkiye'nin Paris Anlaşması'nın hükümlerini kabul etmesi anlamına gelmekte olup, bu durum anlaşmanın taraflardan beklediği yükümlülükleri de beraberinde getirmektedir. Bu yükümlülüklerin başında taraf ülkelerin NDC belgelerini BMİDÇS Sekretaryasına sunması gelmektedir. Türkiye 30 Eylül 2015 tarihinde 2030 yılı itibariyle gerçekleşmesini öngördüğü NDC belgesini BMİDÇS Sekretaryasına sunmuştur. Ancak belgenin sunulduğu 2015 tarihinde Türkiye'nin Paris Anlaşması'na henüz taraf olmaması sebebiyle ilk sunulan belge INDC yani Niyet Edilen Ulusal Katkı Beyanı'dır (TCDB, 2025). 2022 yılında COP 27 (27. Taraflar Konferansı) Bakanlar Oturumu'nda Türkiye NDC belgesini ilan etmiştir. 2023 yılında ise ÇŞİDB bünyesinde diğer kurum ve kuruluşlarında katkıları ile hazırlanan Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesi, BMİDÇS sekretaryasına sunulmuştur (ÇŞİDB, 2023b).

Türkiye'nin Paris Anlaşması sürecindeki taahhütlerine bakıldığında ilk olarak 2015 yılında sunulan INDC belgesinde 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını 2015 seviyesine kıyasla %21 oranında azaltma hedefi bulunmaktadır. Esasen bu durum artıştan bir azaltım hedefidir (Kuran, 2019; Türkeş, 2023; Şeker, 2024). 2022 yılına gelindiğinde Türkiye 27. Taraflar Konferansı'nda (COP27) 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını %41 oranında azaltma yönündeki hedefini açıklamıştır (ÇŞİDB, 2023b). Bununla birlikte Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi de bulunmaktadır (ÇŞİDB, 2025).

Fransa'da bulunan BM Sürdürülebilir Kalkınma Çözümleri Ağı (SDSN) bünyesindeki SKA Dönüşüm Merkezi tarafından hazırlanan Avrupa Sürdürülebilir Kalkınma Raporu 2025, Avrupa ve AB ülkelerinin SKA endeks ve göstergelerini değerlendirmektedir (Lafortune ve Fuller, 2025). Raporda Türkiye aday ülkeler kategorisinde yer almakta olup, performansına ilişkin değerlendirmeler bulunmaktadır. Avrupa ülkelerinin SKA endeks sıralaması ve puanlarına bakıldığında Türkiye'nin tüm ülkeler arasında en düşük endeks puanı ile son sırada yer aldığı görülmektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Avrupa Ülkeleri'nin SKA Endeks Sıralaması ve Puanları (Lafortune ve Fuller, 2025)

SKA Endeks Sıralaması	**Ülke adı**	**SKA Endeks Puanı**	**SKA Endeks Sıralaması**	**Ülke adı**	**SKA Endeks Puanı**
1	Finlandiya	81,1	18	Estonya	71,7
2	Danimarka	79,7	19	İrlanda	71,5
3	İsveç	79,4	20	İspanya	71,2
4	Avusturya	77,3	21	Letonya	70,6
5	Norveç	76,2	22	Portekiz	70,6
6	Almanya	75,0	23	Slovakya	70,6
7	Fransa	73,9	24	Malta	69,3
8	Slovenya	73,8	25	Macaristan	68,8
9	Çekya	73,7	26	Litvanya	67,8
10	İzlanda	73,4	27	Lüksemburg	67,6
11	Polonya	73,3	28	Yunanistan	66,5
12	Birleşik Krallık	72,7	29	Romanya	64,2
13	İsviçre	72,4	30	Sırbistan	63,2
14	Hırvatistan	72,4	31	Bulgaristan	62,9
15	İtalya	72,3	32	Kıbrıs	62,7
16	Belçika	72,2	33	Kuzey Makedonya	62,5
17	Hollanda	71,9	34	Türkiye	59,1

Türkiye için oluşturulan SKA endekslerindeki değişimlere bakıldığında 17 SKA'nın hiçbirinde hedef düzeyine ulaşılamadığı görülmektedir. Mevcut göstergeler, Türkiye'nin SKA endeksinin ilgili başlıklarda yeterli bir görünüm sergilemediğini ortaya koymaktadır (Şekil 2). Özellikle "Sağlık ve Kaliteli Yaşam" ile "Temiz Su ve Sanitasyon" konularında zorlukların devam ettiği görülmektedir. Buna ek olarak, "Yoksulluğa Son", "Açlığa Son", "Erişilebilir ve Temiz Enerji", "Sorumlu Üretim ve Tüketim", "İklim Eylemi" ve "Sudaki Yaşam" başlıklarında önemli düzeyde zorlukların devam ettiği bilgisi yer almaktadır. Bununla birlikte "Amaçlar İçin Ortaklıklar" başlığında gösterge paneli açısından bilgi mevcut olmayıp, geri kalan başlıkların tamamında büyük zorlukların devam ettiği görülmektedir.

Türkiye için "Amaçlar için Ortaklıklar" başlığında veri bulunmaması, uluslararası iş birlikleri, çok aktörlü yönetişim yapıları gibi destek mekanizmalarının etkinliğinin arttırılmasının gerekliliğini işaret etmektedir. Diğer başlıklarda görülen "büyük zorlukların devam etmektedir" ifadesi bu alanlarda sürdürülebilirlik politikalarının hedef odaklı olmasında iyileştirmelere ihtiyaç duyduğu anlamına gelmekte olup, bu durum Türkiye'nin SKA'ları entegre etme sürecinde çok boyutlu karar verme ile yapısal reformların gerekliliği konusunda faaliyetlerini güçlendirmesi beklenmektedir.

Gösterge panelleri dışında trend değişimleri incelendiğinde, SKA başarısının gerçekleştiği ve mevcut başarının korunduğu başlık bulunmamaktadır. Sınırlı sayıda orta derecede iyileşme bulunmakta olup, bunlar; "Yoksulluğa Son", "Sağlıklı ve Kaliteli Yaşam", "Nitelikli Eğitim", "Temiz Su ve Sanitasyon", "Sanayi Yenilikçilik ve Altyapı" ile "Sudaki Yaşam" şeklindedir. Bunun yanında "Toplumsal Cinsiyet Eşitliği", "Erişilebilir ve Temiz Enerji", "İnsana Yakışır İş ve Ekonomik Büyüme", "Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar", "Karasal Yaşam" ile son olarak "Barış, Adalet ve Güçlü Kurumlar" başlıklarında durgunlaşma trendinin olduğu görülmektedir. SKA'lar arasında azalan trendleri "Açlığa Son", "Eşitsizliklerin Azaltılması", "Sorumlu Üretim ve Tüketim" ile "İklim Eylemi" başlıklarında görmekteyiz.

Şekil 2. SKA Panoları ve Türkiye'nin İlerleme Trendleri

Türkiye'nin SKA'lara ilişkin performansı, gösterge panelleri ve trendler temelinde değerlendirildiğinde politika ve uygulama açısından birtakım boşlukları işaret etmektedir. SKA13 iklim eylemi açısından Türkiye'nin endeksi değerlendirildiğinde, önemli zorlukların devam ettiği ve hedefe ulaşmada azalan bir başarı eğilimi gösterdiği görülmektedir. Bu göstergelerdeki durgunlaşma ya da azalma trendleri, SKA'ların birbirini tamamlayıcı yapısı göz önüne alındığında, bütüncül sürdürülebilirlik perspektifini tehdit eden önemli unsurlar olarak değerlendirilmektedir. Özellikle bu araştırmanın odak noktasında yer alan "İklim Eylemi" başlığının azalan trendler arasında yer alması, bu konuda güçlendirme mekanizmalarının etkinleştirilmesi açısından önem arz etmektedir.

4. Materyal ve Metot

Çalışmanın materyalini Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesi, BM SKA13. maddesi ve Türkiye'nin iklim değişikliği bağlamında ormancılık konusundaki temel politika belgeleri oluşturmaktadır. Araştırmada literatür değerlendirmesine dayalı ikincil veriler kullanılmış olup, belgesel tarama-doküman analizi yapılmıştır. Doküman analizi (belgesel tarama) kayıt ve belgeleri incelemek suretiyle veri elde etme yöntemidir. Bu yöntemde araştırmanın amacına yönelik kaynakların temin edilmesi, okunarak not alınması ve elde edilen bilgilerin-verilerin değerlendirilmesi aşamaları bulunmaktadır (Karasar, 2005). Bowen'a (2009) göre doküman analizi; belli bir amaca yönelik olarak incelenmesi hedeflenen belgelerde ilgili temalar ile örüntüleri inceleme ve değerlendirme sürecini ifade eder. Araştırma konusu hakkında çeşitli kurum ya da kuruluşlarca yazılmış, hazırlanmış çeşitli yazı, belge veya raporların araştırılması, toplanması ve incelenmesi doküman analizi olarak kabul edilmektedir (Seyidoğlu, 2016; Sak ve ark., 2021). Yöntemin kuramsal arka planı olarak nitel araştırma paradigmalarından doküman analizi, özellikle politika analizlerinde ve stratejik belgelerin içerik incelemelerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Wesley, 2014).

Araştırmanın yöntemi doküman analizi esasına dayalı mevcut durum analizi ile boşluk analizi olmak üzere (Kim ve Ji, 2018) iki aşamalı olarak tasarlanmıştır. İlk olarak mevcut durum analizi kapsamında, Türkiye'nin 2023 yılında BMİDÇS sekretaryasına sunmuş olduğu Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesinde ormancılık sektörüne yönelik politika belgelerinin durumu değerlendirilmiştir. İkinci olarak ise boşluk analizi kapsamında mevcutta var olan ancak NDC belgesinde yer almayan, bu doğrultuda Türkiye'nin 2028 yılında BMİDÇS sekretaryasına sunması planlanan NDC belgesi için altlık oluşturacak bir kaynak hazırlanması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım mevcut olan politika belgelerinin eksikliğinin yorumlanmasının dışında, 2028 yılında sunulması beklenen NDC belgesinin ormancılık sektörü açısından güçlendirilmesine olanak sağlayacak biçimde politika belgelerinin eklenmesine yönelik öneriler sunulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda araştırmanın yöntemi dokuman analizinin uygulanmasının yanında mevcut durum analizi ve boşluk analizi ile çok katmanlı bir değerlendirme yapma olanağı sunmaktadır.

5. Bulgular

5.1. *SKA13 İklim Eylemi Kapsamında Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC Belgesi*

Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesi 2023 yılında BMİDÇS sekretaryasına sunulmuş olup, bu belge Türkiye'nin mevcut ve 2030 hedefine yönelik iklim politikaları, Türkiye'nin azaltım politikaları, Türkiye'nin uyum politikaları ana başlıklarından oluşmaktadır. Bu araştırmada Türkiye'nin Birinci Güncellenmiş NDC belgesini SKA 13. madde ile ilişkilendirmek amacıyla, Türkiye'nin azaltım ve uyum politikaları değerlendirilmiştir (Tablo 3). Türkiye'nin azaltım politikaları; enerji, sanayi, ulaştırma, tarım, bina, atık, arazi kullanımı, arazi kullanım değişikliği ve ormancılık (AKAKDO) olmak üzere 7 alt başlıktan oluşmaktadır. Uyum politikalarında azaltım politikaları ile benzer olarak; tarım ve ormancılık sektörü, su sektörü, afet risk yönetimi, şehircilik sektörü, kırsal kalkınma sektörü, halk sağlığı sektörü ve uyum hedefleri olmak üzere 7 alt başlık bulunmaktadır. Çalışmanın amacı kapsamında azaltım ve uyum politikalarında odaklanılan başlıklar AKAKDO ile ormancılık sektörüdür. Azaltım başlığında ormancılık arazi kullanımı ile birlikte ele alınırken, uyum politikalarında ormancılık sektörü tarım ile aynı başlık altında bulunmaktadır. Bu bağlamda azaltım konusunda tarım ve ormancılık birlikte ele alınırken, uyum konusunda tarım ve ormancılık ayrı değerlendirilmektedir.

Tablo 3. Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC Belgesi Azaltım ve Uyum Politika Başlıkları

Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC Belgesi	
Türkiye'nin azaltım politikalarındaki ana başlıklar	**Türkiye'nin uyum politikalarındaki ana başlıklar**
Enerji	Tarım ve ormancılık
Sanayi	Su
Ulaştırma	Afet risk yönetimi
Tarım	Şehircilik
Bina	Kırsal kalkınma
Atık	Halk sağlığı
AKAKDO	Uyum hedefleri

SKA13 "İklim Eylemi" kapsamında beş alt hedef bulunmaktadır. Bu hedeflerden üçü Türkiye açısından geçerlilik taşımaktadır. Tablo 4'te yer aldığı üzere, Türkiye için uygulanabilir olan hedefler şunlardır:

- İklim değişikliğine bağlı tehlikeler ve doğal afetlere karşı dayanıklılığı artırmak ve uyum kapasitelerini güçlendirmek (13.1),
- İklim değişikliğine ilişkin önlemleri ulusal politika, strateji ve planlama süreçlerine entegre etmek (13.2),
- İklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması ve uyum süreçleri kapsamında eğitim, farkındalık ve kurumsal-bireysel kapasiteyi geliştirmek (13.3).

Tablo 4'te yer alan 13.a ve 13.b numaralı hedeflerin Türkiye için bağlayıcılığı bulunmamaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından yayımlanan değerlendirme raporunda yer aldığı üzere, 13.a hedefi gelişmiş ülkelerin gelişmekte olan ülkelere yönelik finansal yükümlülüklerini tanımlamakta; 13.b hedefi ise özellikle az gelişmiş ülkeler ile gelişmekte olan küçük ada devletlerinde kırılgan gruplara (kadınlar, gençler, yerel topluluklar)

yöneliktir (SBB, 2019). Dolayısıyla bu iki hedefin Türkiye açısından analiz edilmesi uygun görülmemektedir.

Tablo 4. SKA13. Madde İklim Eylemi ve Hedefleri

Hedef	Açıklaması
13.1	Ülkelerin iklim değişikliği kaynaklı tehlikeler ve doğal afetlere olan dayanıklılıklarını arttırmak, uyum kapasitelerini güçlendirmek
13.2	İklim değişikliği konusunda oluşturulacak önlemlerin ulusal politikalar ile stratejilere dahil edilerek planlama süreçlerinde yer vermek
13.3	İklim değişikliğinin önlenmesi ve etkilerinin azaltılması bununla birlikte iklim değişikliğine uyum ve erken uyarı konularında kurumsal ve bireysel kapasitenin geliştirilmesi, eğitim, farkındalık çalışmalarının desteklenmesi
13.a	Gelişmekte olan ülkelerin ihtiyaçları için; 2020 yılından itibaren tüm kaynaklardan yıllık 100 milyar ABD Dolarının ortaklaşa harekete geçirilmesi amacıyla BMİDÇS taraf olan gelişmiş ülkelerin taahhütlerini gerçekleştirmelerini sağlamak ve Yeşil İklim Fonuna sermaye oluşumu için faaliyete geçmek
13.b	En az gelişmiş ülkelerde ve gelişmekte olan küçük ada devletlerinde; kadınlar, gençler ile yerel ve marjinal toplulukları esas alan planlamalarla yönetim kapasitesini artıracak mekanizmaları teşvik etmek

5.2. *Türkiye'nin Ormancılık Temelinde Azaltım ve Uyum Politikaları*

Bu bölümde Türkiye'nin ormancılık sektöründeki iklim değişikliği ile mücadeleye yönelik azaltım (sera gazı salımlarının azaltılması) ve uyum (iklim değişikliğinin etkilerine adaptasyon) politikaları, Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesi kapsamında incelenmiştir. Türkiye'nin NDC belgesinde, azaltım başlığı altında "AKAKDO", uyum başlığında ise "Tarım ve Ormancılık Sektörü" başlığı bulunmaktadır. Bu sektörler, özellikle Paris Anlaşması kapsamında sunulan ulusal hedefler doğrultusunda iklim politikalarının önemli bir bileşenidir. Bu kapsamda, Türkiye'de ormancılık sektörü özelinde geliştirilen ve SKA13 hedefleri ile uyumlu, süreli politika, strateji ve eylem planı belgeleri, azaltım ve uyum başlıklarında sınıflandırılarak Tablo 5'te sunulmuştur. Ancak burada yalnızca süreli belgeler (belirli bir dönem için geçerli olan strateji, plan, program vb.) değerlendirmeye alınmış olup, süreli olmayan kanun ve yönetmelik gibi belgeler değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Tablo 5'te sunulan belgelerin BM SKA13 hedefleri ile ilişkisine bakıldığında; OGM Stratejik Planı (2019–2023), Ulusal Ormancılık Programı (2004–2023), Çölleşmeyle Mücadele Ulusal Strateji ve Eylem Planı (2019-2030) belgeleri, iklim değişikliğine yönelik önlemlerin ulusal planlama süreçlerine entegre edilmesini amaçlayan SKA13.2 hedefiyle doğrudan ilişkilidir. Ulusal Kuraklık Yönetimi Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2017-2023), Türkiye Arazi Tahribatının Dengelenmesi Ulusal Raporu (2016-2019), Erozyonla Mücadele Eylem Planı (2013-2017), Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Seferberliği Ulusal Eylem Planı (2008-2012), Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2013-2017), Taşkın Yönetim Planları (2023) doğal afetlere karşı dayanıklılık ve uyum kapasitesinin artırılması yönünde SKA13.1 hedefine katkı sağlar. Eğitim, farkındalık ve kapasite geliştirme yönünde strateji içeren belgelerden Ulusal Sürdürülebilir Orman Yönetimi Kriter ve Göstergelerini Uygulama Kılavuzu (2019) ve Ulusal Kırsal Kalkınma Stratejisi (2014-2020) SKA13.3 ile örtüşmektedir. Bu belgeler aynı zamanda, Türkiye'nin Paris Anlaşması'nın yükümlülüklerini yerine getirmede önemli

araçlar olarak değerlendirilebilir. Paris Anlaşması'nın temel ilkelerinden biri olan "ulusal katkıların belgelenmesi ve güncellenmesi" kapsamında, bu belgeler Türkiye'nin iklim değişikliğinin etkilerine karşı azaltım ve uyum kapasitesini güçlendirmektedir.

Tablo 5. Türkiye'nin Azaltım ve Uyum Politika Belgeleri

Azaltım; Arazi kullanımı, arazi kullanım değişikliği ve ormancılık (AKAKDO)
• OGM Stratejik Planı (2019-2023) • Ulusal Ormancılık Programı (2004-2023) • Ulusal Sürdürülebilir Orman Yönetimi Kriter ve Göstergelerini Uygulama Kılavuzu (2019) • Ulusal Orman Envanteri (2025) • Çölleşmeyle Mücadele Ulusal Strateji ve Eylem Planı (2019-2030) • Anadolu Bozkır Ekosistemleri için İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi (2022-2036)
Uyum; Tarım ve ormancılık sektörü
• Ulusal Kuraklık Yönetimi Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2017-2023) • Ulusal Ormancılık Programı (2004-2023) • Çölleşmeyle Mücadele Ulusal Stratejisi ve Eylem Planı (2015-2023) • Türkiye Arazi Tahribatının Dengelenmesi Ulusal Raporu (2016-2019) • Erozyonla Mücadele Eylem Planı (2013-2017) • Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Seferberliği Ulusal Eylem Planı (2008-2012) • Ulusal Kırsal Kalkınma Stratejisi (2014-2020) • Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2013-2017) • Taşkın Yönetim Planları (2023) • Anadolu Bozkır Ekosistemleri için İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi (2022-2036)

Türkiye'nin 2023 yılında sunduğu Güncellenmiş Birinci NDC belgesi, içerik olarak 2023 yılı öncesinde hazırlanmış olan politika belgelerine dayanmaktadır. Bu belgeler, ormancılık sektöründe iklim değişikliği ile mücadele kapsamında azaltım "AKAKDO" ve uyum "Tarım ve Ormancılık Sektörü" başlıkları altında sınıflandırılmıştır. Tablo 5'te belirtilen belgeler üzerinden yapılan incelemede, bazı belgelerin hem azaltım hem de uyum kapsamına girdiği görülmektedir. Bu doğrultuda Ulusal Ormancılık Programı (2004-2023) ve Anadolu Bozkır Ekosistemleri için İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi (2022-2036) belgeleri hem azaltım hem de uyum başlığında yer almaktadır. Çölleşmeyle Mücadele Ulusal Stratejisi ve Eylem Planı her iki başlıkta yer almakla birlikte, azaltım başlığında 2019-2030 yıllarını kapsayan belgeyle, uyum başlığında ise 2015-2023 yıllarını kapsayan belgeyle eklenmiştir. Ancak Tablo 5'te yer alan bazı belgelerin, Güncellenmiş NDC'nin sunulduğu tarih itibarıyla süresi dolmuş durumdadır. Azaltım başlığında Ulusal Sürdürülebilir Orman Yönetimi Kriter ve Göstergelerini Uygulama Kılavuzu (2019), uyum başlığında Türkiye Arazi Tahribatının Dengelenmesi Ulusal Raporu (2016-2019), Erozyonla Mücadele Eylem Planı (2013-2017), Ağaçlandırma ve Erozyon Kontrolü Seferberliği Ulusal Eylem Planı (2008-2012), Ulusal Kırsal Kalkınma Stratejisi (2014-2020), Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2013-2017) hali hazırda NDC'nin sunulduğu tarihte süresi dolmuş olan belgelerdir. NDC'de bu tür süre aşımı olan belgelerin yer alması, Türkiye'nin iklim uyum stratejilerinde politika döngüsünün yenilenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu durum aynı zamanda SKA13.1 (iklim değişikliğine bağlı tehlikeler ve doğal afetlere karşı dayanıklılığı artırmak ve uyum kapasitelerini güçlendirmek) ve SKA 13.3 (iklim

değişikliğinin etkilerinin azaltılması ve uyum süreçleri kapsamında eğitim, farkındalık ve kurumsal-bireysel kapasiteyi geliştirmek) hedefleriyle ilişkilendirilmesi gereken belgelerin etkinliğini azaltmaktadır.

Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesinde azaltım ve uyum başlıklarında yer almayan ancak iklim politikalarına rehberlik eden genel politika belgeleri de bulunmaktadır. Bu belgelerden süreli olan strateji ve eylem planları Tablo 6'da verilmiştir. Bu strateji ve eylem planları, sektörler ve disiplinler arası yaklaşımların katkılarıyla hazırlanmış olup, Türkiye'nin Paris Anlaşması yükümlülüklerinden, özellikle SKA 13.2 numaralı hedef olan "iklim değişikliğine ilişkin önlemleri ulusal politika, strateji ve planlama süreçlerine entegre etmek" açısından değerlendirilebilir. Bu kapsamda 11. Kalkınma Planı (2019-2023) ve Orta Vadeli Program (2023-2025), NDC'nin uygulanabilirliğini artırabilecek politik çerçeveyi sunmaktadır. Bir diğer politika belgesi olan Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021) ise düşük sera gazı emisyonları ile iklim değişikliğine dirençli kalkınma ekseninde Paris Anlaşması'nın 2.1 (c) maddesiyle örtüşmektedir (İDB, 2025).

Politika belgelerinin SKA13 hedefleri ile eşleşme düzeyi dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler, Türkiye'nin ormancılık politikalarının iklim eylemi ile ne ölçüde bütünleştiğini ortaya koymak açısından önemlidir. Belgelerin tarihsel açıdan güncelliği Türkiye'nin SKA13 kapsamındaki yükümlülüklerinin politika belgeleriyle desteklenmesi açısından önem arz etmektedir.

Tablo 6. Türkiye'nin İklim Politikalarına Rehberlik Eden Genel Politika Belgeleri

Politika belgesi	İlgili kurum-kuruluş
• Türkiye İklim Değişikliği Stratejisi (2010-2023)	ÇŞB
• İklim Değişikliği Eylem Planı (İDEP) (2011-2023)	ÇŞB
• İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2011-2023)	ÇŞB
• Orta Vadeli Program (2023-2025)	SBB
• 11. Kalkınma Planı (2019-2023)	SBB
• Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023)	ETKB
• Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021)	STB
• Ulusal Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı (2053)	UAB
• Türkiye Ulusal Enerji Planı (2020-2035)	ETKB

Paris Anlaşması'nın 4. Maddesinde yer alan "taraf ülkelerin her beş yılda bir NDC sunmalarını ve her yeni beyanın bir öncekine göre daha iddialı hedefler içermesini öngörmektedir" ifadesinden yola çıkarak Türkiye'nin 2028 yılında NDC belgesi sunması beklenmektedir. Buna göre 2028 yılında sunulması beklenen NDC belgesinde yer alması gereken güncel tarihli önemli kılavuz belgeler aşağıda verilmiştir (Tablo 7).

Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesinde TOB tarafından hazırlanmış olan OGM Stratejik Planı (2024-2028) yer almamaktadır. Stratejik planda olduğu üzere benzer şekilde Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı (CSBB) tarafından hazırlanan Orta Vadeli Program (2024-2026) içerik açısından uyum politikaları içermektedir. Bu belgenin Türkiye'nin Güncellenmiş Birinci NDC belgesini sunduğu tarihte yayınlanmamış olması sebebiyle uyum politika belgeleri içerisinde yer almadığı

düşünülmektedir. Azaltım ve uyum politikalarında yukardaki belgeler dışında süreli olmayan kanun, yönetmelik, tebliğ gibi belgelerde bulunmakta olup, bu belgeler çalışmaya dahil edilmemiştir.

Tablo 7. Türkiye'nin İklim Değişikliği Konusundaki Güncel Politika Belgeleri

Politika belgesi	İlgili kurum-kuruluş
• 12. Kalkınma Planı (2024-2028)	SBB
• TOB Stratejik Planı (2024-2028)	TOB
• ÇŞİDB Stratejik Planı (2024-2028)	ÇŞİDB
• 2023 Net Sıfır Emisyon Hedefi	ÇŞİDB
• Orta Vadeli Program (2024-2026)	SBB
• İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (İDASEP) (2024-2030)	ÇŞİDB
• İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (İDUSEP) (2024-2030)	ÇŞİDB
• Ulusal Havza Rehabilitasyon Stratejisi-UHRS (2023-2033)	OGM
• Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2023-2027)	TRGM
• Çölleşmeyle Mücadele Ulusal Strateji ve Eylem Planı (2024-2030)	ÇŞİDB
• Anadolu Bozkır Ekosistemleri için İklim Değişikliğine Ekosistem Tabanlı Uyum Stratejisi (2022-2036)	TOB
• Orman Genel Müdürlüğü Stratejik Planı (2024-2028)	OGM

İklim değişikliği konusunun doğrudan ilişkili olduğu kurum ve kuruluşların kılavuz niteliğinde olan politika belgelerinin incelenmesi neticesinde oluşturulan liste, Türkiye'nin 2023 yılı sonrasına ait stratejik yönelimlerini ve iklim politikalarındaki güncel yaklaşımları yansıtmaktadır. Türkiye İklim Değişikliği Stratejisi, İklim Değişikliği Eylem Planı, İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı, 11. Kalkınma Planı, Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı, Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı süresi dolmuş olan belgelerdir. İklim değişikliği strateji ve eylem planı belgelerinin hazırlandığı tarihte bakanlık adının Çevre ve Şehircilik Bakanlığı olması sebebiyle tabloda ilgili kurum-kuruluş olarak belgelerin hazırlandığı dönemdeki bakanlık adı verilmiştir. Bu belgeler, yalnızca ormancılık sektörü özelinde değil; aynı zamanda tarım, arazi yönetimi, su kaynakları ve enerji verimliliği gibi iklim değişikliği ile doğrudan ilişkili tüm sektörleri kapsayarak, Paris Anlaşması'nın yükümlülüklerinin yerine getirilmesi açısından temel referans niteliği taşımaktadır. Bu belgeler hem doğrudan hem de dolaylı yoldan azaltım ve uyum politikaları ile bağlantılı olup, Türkiye'nin NDC hedeflerinin oluşturulmasında kullanılabilecek güncel kurumsal belgeler olarak değerlendirilmelidir. Örneğin; İklim Değişikliği Azaltım Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030) ve İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030) hem bir sonraki raporlama süreci açısından güncel tarihli belgeler olup hem de Türkiye'nin uzun vadeli emisyon azaltım ve iklim adaptasyonu hedeflerini ortaya koymakta kılavuz görevi görmektedir. Orman Genel Müdürlüğü Stratejik Planı (2024-2028) ise ormancılık sektörü özelinde alınacak politika kararlarını yönlendirilmesi açısından önemlidir. Aynı zamanda bu belgeler Paris Anlaşması 5.1 ve 5.2 maddesinde de yer alan orman alanlarının bütüncül ve sürdürülebilir yönetimi için alternatif politika yaklaşımları açısından önemlidir (İDB, 2025). Ayrıca, 2023 Net Sıfır Emisyon Hedefi ve Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2023-2027) gibi belgeler de Paris Anlaşması 2.1(b) ve 2.1(c) maddelerindeki taahhütlerin uygulanabilirliğine katkı sunan planlar olarak değerlendirilebilir. Sonuç olarak Tablo 7'de yer alan belgeler Türkiye'nin 2028 yılında sunması

beklenen NDC belgesi için önemli bir referans çerçevesi sunmaktadır. Bu sayede Paris Anlaşması hedefleriyle özellikle tarihsel perspektifte uyumlu bir politika setinin oluşmasına katkı sağlamaktadır.

6. Sonuçlar

Türkiye iklim değişikliği müzakerelerinde Paris Anlaşması sürecinde katılım odaklı bir yaklaşım benimsemiş olup, bu doğrultuda ilgili kurum-kuruluşlar tarafından önemli politika belgeleri oluşturulmuştur. Araştırmada, Paris Anlaşması'nın dünya gündemine gelmesinden itibaren uluslararası süreçte kaydedilen aşamalar, Türkiye'nin politika belgeleri üzerinden değerlendirilmiştir.

SKA13 iklim eylemi, bir yandan ülkeleri iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı dirençli duruma getirmeye çalışırken, diğer taraftan Paris Anlaşması'nın gerekliliklerini karşılamayı teşvik etmektedir. SKA13 iklim eylemi kapsamında Türkiye'nin iklim değişikliği sürecini ormancılık politikası araçlarından biri olan uluslararası sözleşmeler açısından değerlendirmenin uluslararası yükümlülükleri yerine getirmede faydalı olacağı düşünülmektedir. SKA'ların insanlık için elzem olduğu kabul edilmesine rağmen, farklı ülkelerdeki uygulamalar farklı hızlarda ilerlemektedir (UN, 2016). Ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadele politikalarını güçlendirmesi bütünleşik bir süreç olup, politikaların uygulanması ve takibinin sağlanması ile bu süreç desteklenmelidir. İklim değişikliği sürecinin başarılı bir biçimde yönetilebilmesi iklim politikaları ile iklim eylemlerinin örtüşmesi ile mümkün olacaktır.

Çalışmanın bulguları, Türkiye'nin NDC belgesi ile SKA13 iklim eylemi hedefleri arasında daha iyi bir uyum sağlanabilmesi için, politika belgelerinin güncellenmesi ve uygulanabilirliğinin artırılması gerektiğini göstermektedir. Türkiye'nin NDC belgesinde yer alan bazı kılavuz belgelerin sürelerinin son bulması sebebiyle bulgular başlığında sunulmuş olan güncel tarihli belgelerin eklenmesi önemlidir. Ayrıca Türkiye'nin 2028 yılında sunması beklenen NDC belgesinde OGM Stratejik Planı (2024-2028), TOB Stratejik Planı (2024-2028), ÇŞİDB Stratejik Planı (2024-2028) belgelerinin bulunması faydalı olacaktır. Sunulan tüm politika belgelerinin içeriklerinin Türkiye 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda ağaçlandırma, karbon yutak alanlarının artırılması, sürdürülebilir arazi yönetim tekniklerinin yaygınlaştırılması ve doğa temelli çözümlere ağırlık verilmesi esasına dayanarak güçlendirilmesi Paris Anlaşması'nda etkin bir taraf olma yolunda önemli katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma Türkiye'nin Paris Anlaşması sürecinde sunmakla yükümlü olduğu NDC belgesini SKA13 iklim eylemi hedefleri ile ilişkilendirmek suretiyle, mevcut durumun değerlendirilmesi ve 2028 yılında sunulması beklenen NDC için politika belgeleri ölçeğinde altlık oluşturmayı hedeflemektedir. Dolayısıyla, belgelerin yalnızca varlık düzeyinde değerlendirilmesi, içerik derinliği açısından sınırlılık oluşturmaktadır. Ancak bu sınırlılığa rağmen, yapılan mevcut durum analizi ve boşluk analiz Türkiye'nin ormancılık sektörü özelinde azaltım ve uyum başlıklarında hangi alanlarda belge eksikliği bulunduğunu ortaya koyarak politika yapıcılara bir çerçeve sunmaktadır. Türkiye'nin NDC belgesinin, SKA13 iklim eylemi hedefi ile entegrasyonunun belge temelli değerlendirilmesi, özellikle ormancılık sektörü açısından özgün bir perspektif sağlamaktadır. Bu yaklaşım, uluslararası yükümlülüklerin yerine getirilmesinde ve iklim değişikliği ile mücadelede Türkiye'nin rolünü güçlendirecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması durumu söz konusu değildir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Gül Tekingündüz: Araştırmanın konusunun belirlenmesi, araştırma tasarımı, makale yazımı

Seda Saranay Kayar: Literatür taraması, verilerin temini, makale yazımı

Ahmet Şendağlı: Literatür taraması, verilerin temini, makale yazımı

Kaynakça

Baumgartner RJ. Sustainable development goals and the forest sector—A complex relationship. Forests 2019; 10(2): 152.

BM Türkiye 2025. Birleşmiş Milletler Türkiye: Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları. https://turkiye.un.org/tr/sdgs, Erişim tarihi 06.02.2025.

Bowen GA. Document analysis as a qualitative research method. Qualitative Research Journal 2009; 9 (2): 27-40.

Brundtland. World commission on environment and development: our common future (Brundtland Report) (No: A/42/427). United Nations. 1987.

ÇŞİDB 2022. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://iklim.gov.tr/turkiye-ulusal-katki-beyani-ni-cop27-de-acikladi-haber-84, Erişim tarihi 06.02.2025.

ÇŞİDB 2023a. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://iklim.gov.tr/db/turkce/dokumanlar/turkiye-cumhuriyeti--8230-102-20230512125223.pdf, Erişim tarihi 05.02.2025.

ÇŞİDB 2023b. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://www.iklim.gov.tr/guncellenmis-birinci-ulusal-katki-beyani-sunuldu-haber-11392023b, Erişim tarihi 06.02.2025.

ÇŞİDB 2025. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. https://iklim.gov.tr/paris-anlasmasi-i-34, Erişim tarihi 06.02.2025.

Dai J., Ahmed Z., Alvarado R., Ahmad M. Assessing the nexus between human capital, green energy, and load capacity factor: Policymaking for achieving sustainable development goals. Gondwana Research 2024; 129: 452-464.

Dellink R., Lanzi E., Chateau J. The sectoral and regional economic consequences of climate change to 2060. Environmental and resource economics 2019; 72: 309-363.

Doğaner A. Sürdürülebilir ekonomik kalkınma için Türkiye'de dirençli şehirler. Çevre Şehir ve İklim Dergisi, 2022; 1(2): 59-80.

ESS 2012. European Statistical System. https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5923349/QAF_2012-EN.PDF, Erişim tarihi 06.02.2025.

García-Feijoo M., Eizaguirre A., Rica-Aspiunza A. systematic review of sustainable-development-goal deployment in business schools. Sustainability 2020; 12(1): 440.

Halkos G., Gkampoura EC., Where do we stand on the 17 sustainable development goals? An overview on progress. Economic Analysis and Policy 2021; 70: 94-122.

İDB 2025. İklim Değişikliği Başkanlığı. https://iklim.gov.tr/db/turkce/dokumanlar/paris-anlasmasi-13-20220808231948.pdf, Erişim tarihi 06.05.2025.

Karakuş DN., An N., Turp MT., Kurnaz L. AB yeşil mutabakatı ve sürdürülebilir kalkınma amaçları kapsamında temel uygulama yaklaşımlarına küresel bakış. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2022; 24(1): 47-67.

Karasar N. Bilimsel araştırma yöntemi (17.Baskı.). Ankara: Nobel Yayın Dağıtım; 2025.

Kim S., Ji Y. Gap analysis. The international encyclopedia of strategic communication 2018; 8: 1-6.

Kuran H. Kyoto'dan Paris'e Avrupa Birliği iklim politikaları ve etkinliğinin incelenmesi. Türkiye Siyaset Bilimi Dergisi 2019; 2(2): 47-71.

Lafortune G., Fuller G. Europe sustainable development report 2025: SDG Priorities for the New EU Leadership. Paris: SDSN and Dublin: Dublin University Press. 2025.

Louman B., Keenan R. J., Kleinschmit D., Atmadja S., Sitoe AA., Nhantumbo I., Morales JP. SDG 13: Climate action—impacts on forests and people. Sustainable development goals: Their impacts on forests and people 2019; 419-444.

Meydan B. Sürdürülebilir kalkınma hedefleri kapsamında TR33 bölgesi illerinin performanslarının TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 2025; 27(Özel Sayı): 227-249.

Mishra M., Desul S., Santos CAG., Mishra SK., Kamal AHM., Goswami S., Baral KA. Bibliometric analysis of sustainable development goals (SDGs): A review of progress, challenges, and opportunities. Environment, Development and Sustainability 2024; 26(5): 11101-11143.

Purvis B., Mao Y., Robinson D. Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. Sustainability Science 2019;14(3): 681-695.

Resmi Gazete 2021. Paris Anlaşması'nın onaylanmasının uygun bulunduğuna dair kanun, Sayı: 31621. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/10/20211007-7.pdf, Erişim tarihi 06.02.2025.

Sak R., Sak İTŞ., Şendil ÇÖ., Nas E. Bir araştırma yöntemi olarak doküman analizi. Kocaeli Üniversitesi Eğitim Dergisi 2021;4(1): 227-256.

SBB 2019. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı: sürdürülebilir kalkınma amaçları değerlendirme raporu. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2020/03/Surdurulebilir-Kalkinma-Amaclari-Degerlendirme-Raporu_13_12_2019-WEB.pdf, Erişim tarihi 05.02.2025.

Seyidoğlu H. Bilimsel arastırma ve yazma el kitabı. İstanbul: Güzem Yayınları; 2016, 8.

Şeker C. Örgütlerde yeşil mutabakat. İstanbul: Eğitim Yayınevi; 2024.

TCDB 2025. T.C. Dışişleri Bakanlığı, Paris Anlaşması. https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa, Erişim tarihi 06.02.2025.

Türkeş M. İklim değişikliği savaşımı, iklim diplomasisi ve Türkiye. Mimarlık 2023; 429.

UN 2016. United Nations: The sustainable development goals report. https://unstats.un.org/sdgs/report/2016/the%20sustainable%20development%20goals%20report%202016.pdf, Erişim tarihi 06.02.2025.

UN 2025a. United Nations: about us. https://www.un.org/en/about-us, Erişim tarihi 06.02.2025.

UN 2025b. United Nations: The 17 goals sustainable development. https://sdgs.un.org/goals, Erişim tarihi 06.02.2025.

UNDP 2025. United Nations Development Programme. https://www.undp.org/sustainable-development-goals, Erişim tarihi 06.02.2025.

UNFCCC 2015. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/news/finale-cop21, Erişim tarihi 06.02.2025.

UNFCCC 2025. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement?gad_source=1, Erişim tarihi 06.02.2025.

Wesley JJ. The qualitative analysis of political documents. In: From text to political positions. John Benjamins Publishing Company, 2014; 135-160.

Wright B., Nance E., Toward equity: Prioritizing vulnerable communities in climate change. Duke FL & Soc. Change 2012; 4: 1.

Yıldırım O., Nuri Fİ. Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ilişkisi. Uluslararası Bankacılık Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi 2018; 1(1): 105-143.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 19-28, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 19-28, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Mersin/Yenişehir İlçesinde Peyzaj Bitkileri Olarak Kullanılan Gimnosperm ve Angiosperm Türlerinin Klorofil İçeriği Üzerine Bir Çalışma

Ece GENÇ[1*], Muhyettin ŞENTÜRK[2], Rıza BİNZET[3]

[1-3]Mersin Üniversitesi, Fen Fakültesi Biyoloji Anabilim Dalı, Mersin

[1]https://orcid.org/0009-0002-7872-5928
[2]https://orcid.org/0000-0002-6772-1764
[3]https://orcid.org/0000-0003-0336-8305
*Sorumlu yazar: ecegenc10@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 11.03.2025
Kabul tarihi: 04.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
CO_2 emisyonu
Klorofil
Mersin
Fotosentez
Çevre kirliliği
Peyzaj

ÖZ

Çağımızın en çok tartışılan iki konusu olan karbondioksit (CO_2) emisyonu ve iklim değişikliği, pek çok açıdan karşımıza çıkmakta ve bilimsel olarak çözüm üretilmesi gereken en önemli meseleler arasında yer almaktadır. Daha yaşanabilir, sürdürülebilir çevre ve şehirler oluşturmak için CO_2 emisyonunu düşürmek son derece önemlidir. Bu amaçla Mersin/Yenişehir ilçesinin peyzajında kullanılan bitkilerin klorofil miktarlarının CO_2 emisyonunu düşürme ilişkisi araştırılmıştır. Çalışmada Yenişehir peyzajında kullanılan 31 farklı Gimnosperm ve Angiosperm bitkilerinin 50 farklı yaprağından ve her yaprağın 3 farklı noktasından klorofil ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında 9 Gimnosperm türü ve 22 Angiosperm türüne ait, klorofil içeriği, yapraktaki klorofil miktarını dolaylı olarak ölçen, taşınabilir klorofil metre cihazı (Minolta SPAD-502, Osaka, Japan) kullanılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre 9 Gimnosperm bitki türü arasından, en yüksek klorofil ortalama değerine ülkemizin doğal bir türü olan *Pinus pinea* (Fıstık çamı) sahip olurken, en düşük klorofil ortalama değeri *Cupressus sempervirens* (Servi)'de olduğu tespit edilmiştir. 22 Angiosperm bitki türü arasından, en yüksek klorofil ortalama değerine *Euonymus japonicus* (Yeşil Taflan), en düşük klorofil ortalama değerine ise *Jacaranda mimosifolia* (Jakaranda) ve *Cercis siliquastrum* (Erguvan) türlerinin sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın en önemli bulgusu, öngörülemeyen bir CO_2 artışının, bitkilerin klorofil miktarlarına bağlı olarak peyzajda kullanılabilecek yerli veya yabancı bitkileri nasıl etkileyeceğidir. Elde edilen veriler, doğru bitki seçimi ile iklim değişikliğine karşı daha etkili çözümler sunulabileceğini ve bu türlerin, CO_2 emisyonunu azaltma çabalarına katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

A Study on the Chlorophyll Content of Gymnosperm and Angiosperm Species Used as Landscape Plants in Mersin/Yenişehir District

Research Article

Article History:
Received: 11.03.2025
Accepted: 04.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
CO_2 emission
Chlorophyll
Mersin
Photosynthesis
Environmental pollution

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO_2) emissions and climate change are two of the most debated issues of our time, emerging in various aspects of life and ranking among the most critical problems requiring scientific solutions. Reducing CO_2 emissions is essential for creating more livable and sustainable environments and cities. In this context, the relationship between the chlorophyll content of plants used in the landscape design of the Yenişehir district (Mersin, Türkiye) and their potential to mitigate CO_2 emissions was investigated. Chlorophyll measurements were conducted on 50 different leaves from 31 different Gymnosperm and Angiosperm plant species commonly used in the landscape, with three measurement points per leaf. A

Landscape

portable chlorophyll meter (Minolta SPAD-502, Osaka, Japan), which indirectly measures leaf chlorophyll content, was used for data collection. Among the 9 Gymnosperm species analyzed, *Pinus pinea* (Stone pine), a native species of Türkiye, had the highest average chlorophyll value, while *Cupressus sempervirens* (Mediterranean cypress) had the lowest. Among the 22 Angiosperm species, *Euonymus japonicus* (Japanese spindle) showed the highest chlorophyll average, whereas *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda) and *Cercis siliquastrum* (Judas tree) had the lowest values. The most significant finding of the study is how an unpredictable increase in CO_2 levels may affect native and non-native plants in landscaping, depending on their chlorophyll content. The results suggest that appropriate plant selection could contribute to more effective responses to climate change and support efforts to reduce CO_2 emissions.

To Cite: Genç E., Şentürk M., Binzet R. Mersin/Yenişehir İlçesinde Peyzaj Bitkileri Olarak Kullanılan Gimnosperm ve Angiosperm Türlerinin Klorofil İçeriği Üzerine Bir Çalışma. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 19-28.

1. Giriş

Çevre; fiziksel, kimyasal, biyolojik, sosyal, ekonomik ve kültürel unsurların etkileşim içinde olduğu bir sistemdir ve sağlıklı bir yaşam ancak sağlıklı bir çevre ile mümkündür (İbadullayeva ve ark., 2019). Günümüzde çevre sorunlarının başlıca nedenlerinden biri, nüfus artışına bağlı olarak doğal kaynakların hızla tüketilmesidir. Gıda, su ve enerji gibi temel ihtiyaçlara yönelik talep arttıkça, bu kaynakların sürdürülebilir yönetimi zorlaşmakta ve çevre üzerindeki baskı artmaktadır. Sanayileşmeyle birlikte artan enerji ihtiyacı, özellikle fosil yakıt kullanımını artırarak sera gazı emisyonlarını ve küresel ısınmayı tetiklemektedir. Endüstriyel atıklar, tarım ilaçları ve kimyasal gübreler su ve toprak kirliliğine neden olurken; taşıt sayısındaki artış da hava kirliliğini ve sera gazı salımını artırmaktadır. Ormanlar atmosferdeki karbonu dengeleyen önemli yutak alanlar olup, orman alanlarının tarım, yerleşim ve sanayi için tahrip edilmesi karbon tutma kapasitesini azaltmaktadır. Bu durum sera gazlarının atmosferde birikmesine, dolayısıyla küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmakta; aşırı hava olaylarının sıklığı ve şiddetini artırarak ekosistemlerde geri dönüşü zor tahribatlara yol açmaktadır. Dünya nüfusunun yaklaşık %50'sini barındıran şehirler ise en yüksek CO_2 emisyonlarının kaynağı durumundadır (Mancuso, 2022).

Küresel ısınma ve iklim değişikliği konuları tüm ülkeler için önemli birer sorun haline geldikten sonra, küresel ısınmaya neden olan sera gazlarının etkilerini azaltmak konusuna odaklanılmıştır. Sera gazları, CO_2, su buharı, metan ve nitröz oksit gibi gazlardan oluşur. Bu gazlar arasında sera etkisini en çok artıran gaz CO_2'dir. CO_2 salınımı, büyük ölçüde ekonominin birçok alanında kullanılan kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan kaynaklanmaktadır (Aydın, 2013). Atmosferde biriken sera gazları, güneş ışığının yeryüzüne ulaşmasına izin verirken, geri yansıyan yer ışınına karşı daha az geçirgendir. Bu durum, yeryüzüne ulaşan enerjinin bir kısmının uzaya kaçamayarak atmosferdeki sera gazları tarafından emilmesine yol açar ve böylece yerküre beklenenden daha fazla ısınır. Bu doğal süreç, sera etkisi olarak bilinir ve küresel ısınma ile iklim değişikliklerine yol açar (Bayraç ve Emrah, 2016). Karbondioksit, en fazla üretilen sera gazı olduğundan, sera etkisinin başlıca nedeni olarak ortaya çıkar. Bütün bu olumsuz etkileri belli bir seviyede tutmak ve sürdürülebilir bir çevre bırakmak için birçok uluslararası sözleşmeler düzenlenmiştir.

Karbondioksit (CO_2), fotosentez sürecinde bitkiler tarafından kullanılan temel inorganik bileşenlerden biridir. Bitkiler, atmosferdeki CO_2'yi stomalar aracılığıyla alarak, ışık enerjisi yardımıyla organik bileşiklere dönüştürürler. Fotosentez hızı; CO_2 yoğunluğu, ışık şiddeti, sıcaklık, su miktarı ve mineral varlığı gibi çevresel faktörlerin yanı sıra, bitkinin yapısal özellikleriyle (stoma sayısı, klorofil ve kloroplast miktarı, yaprak yüzeyi vb.) da doğrudan ilişkilidir (Reece ve ark., 2013; Özsayın, 200). Fotosentezde kullanılan enzimlerin aktivitesi de büyük ölçüde çevresel koşullara bağlı olarak değişmekte olup, bu süreçte özellikle sıcaklık ve pH faktörleri belirleyici rol oynamaktadır.

Klorofil, fotosentezin gerçekleşebilmesi için gerekli olan ışık enerjisinin emilimini sağlayan temel pigmenttir ve bitkinin fotosentetik kapasitesini doğrudan etkiler. Bu bağlamda, farklı bitki türlerinin klorofil içeriği, çevresel stres faktörlerine karşı dayanıklılıkları ve karbon fiksasyon verimleri açısından önemli bir belirleyicidir.

Bu çalışmada, Mersin ili Yenişehir ilçesinde peyzaj düzenlemelerinde kullanılan Gymnosperm (açık tohumlu) ve Angiosperm (kapalı tohumlu) türlerin klorofil içerikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, farklı bitki gruplarının fotosentetik kapasitelerini belirleyerek, çevresel koşullara adaptasyon düzeylerini değerlendirmektir. Elde edilecek veriler, sadece bitkilerin estetik ve ekolojik değerleri açısından değil, aynı zamanda atmosferdeki karbondioksit seviyesini düşürmeye katkı sağlayabilecek türlerin belirlenmesi açısından da önem arz etmektedir. Bu bağlamda, peyzaj alanlarında fotosentetik verimliliği yüksek bitkilerin tercih edilmesi, karbon emisyonunun azaltılmasına yönelik stratejik bir adım olarak değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmamızda Mersin ilinin Yenişehir ilçesinde peyzaj bitkisi olarak kullanılan 3'ü doğal yayılışlı, 6'sı yabancı kökenli olmak üzere 9 Gimnosperm (Açık Tohumlu) ve 9'u doğal yayılışlı, 13'ü yabancı kökenli olmak üzere 22 Angiosperm (Kapalı Tohumlu) bitkisinin 50 farklı yaprağından ve her yaprağın 3 farklı noktasından Minolta SPAD-502 klorofil ölçüm cihazı kullanarak klorofil miktarı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada klorofil ölçümü yapılan bitkilerin listesi aşağıda Tablo 1'de verilmiştir. Ölçümler 2024 yılı vejetasyon döneminde Mersin ili Yenişehir ilçesi park ve bahçelerinde peyzaj bitkisi olarak kullanılan bitkilerin yaprak örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

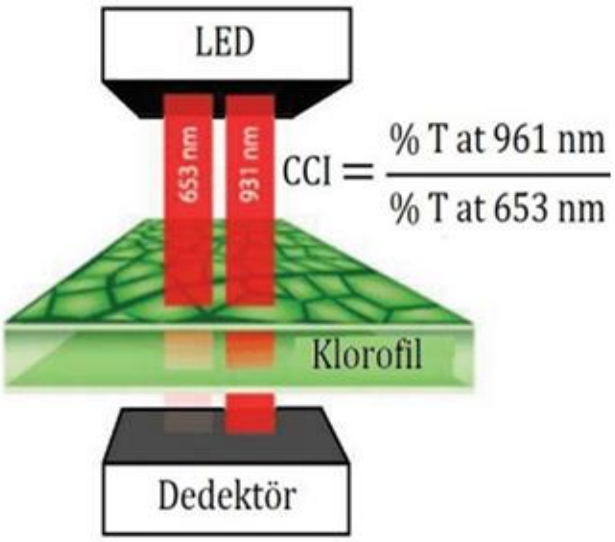
Tablo 1. Çalışılan bitki taksonları ve Türkçe İsimleri

	Bitki Taksonları	Türkçe Adı	Familyaları
Gimnospermler (Açık Tohumlular)	*Pinus brutia* Ten.	Kızılçam	Pinaceae
	Pinus pinea L.	Fıstık Çamı	Pinaceae
	Cupressus sempervirens L.	Servi	Cupressaceae
	Cupressus arizonica Greene*	Arizona Servisi	Cupressaceae
	Platycladus orientalis (L.) Franco*	Mazı	Platanaceae
	Cycas revoluta Thunb.*	Sikas	Cycadaceae
	Araucaria araucana (Molina) K. Koch.*	Arokarya	Araucariaceae
	Juniperus horizontalis Moench*	Sürünücü Ardıç	Cupressaceae
	Taxodium distichium (L.) L.C. Rich.*	Amerikan Bataklık Servisi	Cupressaceae
Angiosperm (Kapalı Tohumlular)	*Platanus orientalis* L.	Çınar	Platanaceae
	Liquidambar orientalis Mill.	Günlük Ağacı	Altingiaceae
	Laurus nobilis L.	Defne	Lauraceae
	Rosmarinus officinalis L.	Biberiye	Lamiaceae
	Nerium oleander L.	Zakkum	Apocynaceae
	Cercis siliquastrum L.	Erguvan	Fabaceae
	Ceratonia siliqua L.	Keçiboynuzu	Fabaceae
	Pyracantha coccinea M.Roem.	Ateş Dikeni	Rosaceae
	Tilia tomentosa Moench	Gümüşi Ihlamur	Malvaceae
	Lantana camara L.*	Çalı Minesi	Verbenaceae
	Melia azedarach L.*	Tesbih Ağacı	Meliaceae
	Robinia pseudoacacia L.*	Yalancı Akasya	Fabaceae
	Schinus molle L.*	Yalancı Karabiber Ağacı	Anacardiaceae
	Cascabela thevetia (L.) Lippold*	Sarı Zakkum	Apocynaceae
	Jacaranda mimosifolia D. Don*	Jakaranda	Bignoniaceae
	Brachychiton populneus (Schott & Endll,) R.Br.*	Japon Kavağı	Malvaceae
	Hibiscus rosa-sinensis L.*	Japon Gülü	Malvaceae
	Ruellia simplex C.Wright*	Brezilya Petunyası	Acanthaceae
	Euonymus japonicus Thunb.*	Yeşil Taflan	Celastraceae
	Jasminum mesnyi Hance*	Sarı Yasemin	Oleaceae
	Bauhinia variegata L.*	Orkide Ağacı	Fabaceae
	Bougainvillea glabra Choisy*	Begonvil	Nyctaginaceae

*Yabancı kökenli bitki türleri

2.1. Klorofil Ölçümleri

Klorofilmetre Inada'nın (1963) prensiplerine göre tasarlanıp üretilmiştir. Relatif klorofil yoğunluğunu yaprak dokusundaki kırmızı (659 nm) ve infrared (940 nm) bölgeleri ölçümü yapılarak belirlenmiştir. Klorofilmetre bitki yaprağına kırmızı ve yakın kızıl ötesi (NIR) bantlarda ışınım göndererek geçirgenlik (transmission) değerinden yaprak klorofil miktarını hesaplayan elektro-optik bir cihazdır (Şekil 1). Klorofilmetre kırmızı (~650 nm) ve yakın kızıl ötesi (NIR) (~930 nm) bantlarda ışınım üreten iki adet LED (Light Emitting Diode) ışık kaynağından ve karşı tarafta ışınımı algılayan bir ışık algılayıcından (Detector) oluşur (Apogee, 2024). Bitki yaprağı ışınım kaynağı ile ışınım algılayıcı arasında yerleştirilir. Yaprağın diğer tarafına geçen ışınım miktarı ile yaprak içinde bulunan klorofil miktarı arasındaki ilişkiden faydalanılarak yaprak klorofil içeriği hesaplanır ve ekranda gösterilir.



Şekil 1. Klorofilmetrenin çalışma ilkesi (Apogee, 2024)

Şekil 2. *Platycladus orientalis* (Mazı) bitkisinin klorofil ölçümü

3. Bulgular

Yapılan ölçümlere göre tür bazında ortalama değer ve standart sapma değerleri (Tablo 2) verilmiştir. 3'ü yerli, 6'sı yabancı 9 Gimnosperm ve 9'u yerli, 13'ü yabancı 22 Angiosperm bitkisinin klorofil değerleri ölçülmüştür. Klorofil değerleri incelendiğinde ortalama değerlerin 5,1 ile 74,43 arasında değiştiği gözlenmiştir. Gimnospermler'de en yüksek ortalama değere sahip ilk üç bitki sırasıyla *P. pinea, A. araucana* ve *C. revoluta* olmuştur. *P. pinea'*da 30,10 değeri ile Gimnospermler'de en yüksek ortalama klorofil değeri bulunmuştur. Gimnospermler'de en düşük ortalama değeri ise *C. sempervirens*'de 5,10 olarak ölçülmüştür. Angiospermler için tablo değerlerini incelediğimizde en yüksek ortalama değere sahip ilk üç bitkinin ise sırasıyla *E. japonicus*, *C. thevetia* ve *H. rosa-sinensis* olduğu görülmektedir. *E. japonicus* 74,43 klorofil değeri ile Angiospermler'de en yüksek klorofil ortalama değerine sahip olduğu saptanmıştır. Angiospermler'de ise *J. mimosifolia* ve *C. siliquastrum* 22,10 klorofil ortalama değeri ile en düşük değere sahip bitkiler olmuştur. Tüm klorofil değerlerine bakıldığında ise ölçüm yapılan 31 peyzaj bitkisinin içerisinde en düşük klorofil değeri *C. sempervirens*'de ölçülmüştür. En yüksek değer ise *E. japonicus* bitkisinde ölçülmüştür.

Tablo 2. Mersin, Yenişehir ilçesinde peyzajda kullanılan bazı bitkilerin klorofil ölçümleri ve standart sapmaları

	BİTKİ TAKSONLARI	**ORTALAMA ± STANDART SAPMA**
Gimnospermler (Açık Tohumlular)	*Pinus brutia*	11,10 ±7,30
	Pinus pinea	30,10 ±12,88
	Cupressus sempervirens	5,10 ±2,89
	Cupressus arizonica	7,90 ±4,04
	Platycladus orientalis	8,10 ±2,77
	Cycas revoluta	16,10 ±9,70
	Araucaria araucana	22,10 ±8,76
	Juniperus horizontalis	8,10 ±3,89
	Taxodium distichium	12,10 ±5,70
Angiospermler (Kapalı Tohumular)	*Platanus orientalis*	30,10 ±6,79
	Liquidambar orientalis	41,78 ±3,58
	Laurus nobilis	46,92 ±4,51
	Rosmarinus officinalis	24,10 ±9,51
	Nerium oleander	48,09 ±10,98
	Cercis siliquastrum	22,10 ±4,09
	Ceratonia siliqua	39,91 ±5,15
	Pyracantha coccinea	36,09 ±8,29
	Tilia tomentosa	48,71 ±5,18
	Lantana camara	42,40 ±7,52
	Melia azedarach	35,90 ±5,53
	Robinia pseudoacacia	22,10 ±8,90
	Schinus molle	48,05 ±12,72
	Cascabela thevetia	62,73 ±8,08
	Jacaranda mimosifolia	22,10 ±8,79
	Brachychiton populneus	35,31 ±4,55
	Hibiscus rosa-sinensis	61,71 ±9,05
	Ruellia simplex	41,50 ±4,62
	Euonymus japonicus	74,43 ±6,59
	Jasminum mesnyi	57,57 ±8,04
	Bauhinia variegata	39,36 ±6,18
	Bougainvillea glabra	54,15 ±5,61

Klorofil ölçümleri yapılan her bitki örneğinin ayrıca ilgili kısımları araziden toplanmış, herbaryum kurallarına uygun olarak kurutulmuş ve herbaryum örneği olarak hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan herbaryum örnekleri etiketlenmiş ve etiket bilgileri eklenerek Mersin Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü Herbaryumu'nda (MERA) koruma altına alınmıştır.

4. Tartışma

Çalışmamızda Mersin ilinin Yenişehir ilçesinde peyzaj bitkisi olarak kullanılan 3'ü yerli, 6'sı yabancı 9 Gimnosperm ve 9'u yerli, 13'ü yabancı 22 Angiosperm türünün 50 farklı yaprağından ve her yaprağın 3 farklı noktasından Minolta SPAD-502 klorofil ölçüm cihazı kullanarak ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Çetin (2016) tarafından Apogee CCM-200 marka klorofilmetre ile gerçekleştiren Chlorophyll Concentration Index (cci) biriminde elde edilen sonuçlarda, *E. japonicus*'un güneşte ortalama 140,90 cci ve gölgede ortalama 47,40 cci klorofil ortalama değeri bulmuştur (Çetin, 2016). Bu çalışmada elde edilen ölçüm sonuçlarında ise *E. Japonicus'*un klorofil miktarının 74,43 ortalama değerine sahip olduğu bulunmuştur. *E. japonicus* türündeki bu farklı değerlerin bulunmasının birçok sebebi olabilir. Bu sebeplerden en önemlisinin klorofil ölçüm zamanlarının farklı olmasıdır.

Zeren ve ark. (2018) tarafından farklı çevresel koşullarda gerçekleştirilen çalışmada, Apogee CCM-200 cihazı kullanılarak yapılan ölçümlerde *P. orientalis* türünün yapraklarındaki ortalama klorofil miktarı 11,48 olarak belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada aynı tür için hesaplanan ortalama klorofil değeri 30,10 olup, önceki bulgulardan belirgin şekilde daha yüksektir. Bu farklılık, klorofil miktarının yalnızca tür içi genetik özelliklerden değil, aynı zamanda ışık yoğunluğu, sıcaklık, toprak özellikleri, nem düzeyi ve besin maddesi mevcudiyeti gibi çevresel faktörlerden de güçlü biçimde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Bitkilerin morfolojik, anatomik ve fizyolojik özelliklerinin çevresel koşullara adaptasyon sürecinde değişkenlik gösterdiği literatürde de sıkça vurgulanmaktadır.

Benzer şekilde, Zeren ve ark. (2018) çalışmasında *T. tomentosa* türü için klorofil ortalama değeri 35,16 olarak raporlanmıştır. Bu çalışmada ise aynı türün klorofil değeri 48,71 olarak hesaplanmıştır. Bu iki değer arasındaki fark daha sınırlı olmakla birlikte, yine çevresel koşulların ve mikroklimatik etkenlerin klorofil sentezi üzerindeki etkisini desteklemektedir. Aynı araştırmada *Robinia pseudoacacia* türü için belirlenen 20,38'lik klorofil ortalaması da, bu çalışmada 22,10 olarak ölçülmüştür. Her üç türde de gözlenen klorofil miktarlarındaki farklılıklar, ölçümlerin yapıldığı alanların ekolojik özellikleri ile birlikte, mevsimsel koşullar, toprak yapısı, bitki yaşları ve bakım uygulamaları gibi faktörlerin etkisini yansıtmaktadır. Dolayısıyla, bitkilerde klorofil düzeylerinin yorumlanmasında çevresel ve fizyolojik değişkenlerin dikkate alınması gerekliliği açıkça ortaya çıkmaktadır.

Çetin ve ark. (2018) tarafından Samsun ilinde peyzajda kullanılan bazı bitkilerde Apogee CCM- 200 marka klorofilmetre ile gerçekleştirilen çalışmada, klorofil ortalama değeri *N. oleander*'de 79,30, *R. pseudoacacia'*da 11,04, *P. orientalis'*te 25,26 ve *E. japonicus*'da 57,84 olarak ölçmüştür (Çetin ve

ark., 2018). Bu çalışmada ise söz konusu bitkiler için klorofil ortalama değerleri *N. oleander'*de 48,09 *R. pseudoacacia'*da 22,10 *P. orientalis*'te 30,10 ve *E. japonicus*'da ise 74,43 olarak hesaplanmıştır. Klorofil ortalama değerlerine bakıldığında bu 4 tür için de klorofil ölçümlerinde farklılıklar gözlenmiştir.

Çalışma sonucunda türler arasında farklar tespit edilmiştir. SPAD okumalarının yaprak kalınlığından ve kloroplast hareketliliğinden etkilendiği de bilinmektedir (Sardoel ve ark., 2014). Yapraklardaki klorofil miktarı pek çok çevresel faktörden etkilenerek değişiklik göstermektedir. Bunların yanında bitki türü ve yaprağın pozisyonunun da yapraktaki klorofil miktarını etkilediği bilinmektedir (Gond ve ark., 2012). Klorofil miktarı bitkinin soğuğa toleransının belirlenmesinde de bir göstergedir (Perks ve ark., 2004). Knudson ve ark. (1977) klorofil tayini ile fasulye yapraklarında meydana gelen ozon zararının kesin ve pratik olarak ölçülebileceğini belirtmektedir. Rose ve Haase'a göre klorofil ölçümleri, donmaya maruz kaldıktan sonra fide canlılığının soğuk dayanıklılığını ve strese karşı direncini test etmek için de kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Rose ve Haase, 2002). Yaprak klorofil içeriğinin yaprak azot miktarı ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Azotun belli değerler arasında olması bitkinin sağlık ve beslenme durumu hakkında bilgi vermektedir. Dolayısıyla yapraklar üzerinde klorofilmetre kullanarak yapılan hızlı, düşük maliyetli, zahmetsiz ve bitkiye zarar vermeyen klorofil içerik ölçümleri, bitki beslenme durumunu anlamada da pratik bir şekilde kullanılabilir (Demiralay ark., 2019). Klorofil miktarının tespiti uygulamada pek çok alanda kullanılabilir. Klorofil miktarı pek çok faktöre bağlı olarak değişmektedir ve bundan dolayı klorofil miktarındaki değişimin uygulamada etkin olarak kullanılabilmesi için bu konudaki çalışmaların arttırılmasına, geliştirilmesine ve çeşitlendirilmesine ihtiyaç vardır. Ekolojik koşulların değiştiği her bölge için ayrı ayrı ölçümlerin yapılması ve değerlendirilmesi çalışılmaya açık bir konudur.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, Mersin ili Yenişehir ilçesinde peyzaj düzenlemelerinde kullanılan bazı Gymnosperm ve Angiosperm bitki türlerinin yapraklarındaki klorofil içeriklerini belirleyerek, bu türlerin karbon tutma potansiyellerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Klorofil miktarı, bitkilerin fotosentetik kapasitesinin önemli bir göstergesi olup, dolaylı olarak atmosferdeki karbondioksit (CO_2) seviyesinin azaltılmasına katkı sağlayabilecek bitkilerin belirlenmesinde kullanılabilir bir parametredir.

Çalışma bulgularına göre, *P. pinea* açık tohumlular arasında en yüksek klorofil içeriğine sahip yerli bir tür olarak öne çıkmıştır. Bu özelliği, hızlı büyüme kapasitesi, derin kök sistemi ve çevresel stres koşullarına toleransı ile birleştiğinde, peyzaj alanlarında hem ekolojik hem de işlevsel bir tür olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Benzer şekilde, kapalı tohumlular arasında *E. japonicus* türü en yüksek klorofil ortalamasına sahip olmuş, çevresel koşullara dayanıklılığı ve düşük bakım gereksinimiyle kentsel peyzajlar için uygun bir alternatif olarak ön plana çıkmıştır.

Bununla birlikte, klorofil değeri yüksek olmasına rağmen *C. thevetia* gibi bazı türlerin toksik özellikleri nedeniyle peyzaj uygulamalarında dikkatle değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmalıdır. Bu

türlerin kontrolsüz kullanımı halk sağlığı açısından risk oluşturabileceğinden, yer seçimi ve kullanım amacına göre uygun türlerin tercih edilmesi önem arz etmektedir.

Araştırma sonucunda, klorofil içeriği ile fotosentetik verimlilik ve dolayısıyla karbon tutumu arasında güçlü bir ilişki olduğu, bu bağlamda da bitki seçiminin yalnızca estetik değil, çevresel işlevsellik açısından da bilinçli yapılması gerektiği ortaya konulmuştur. Yerli türlerin tercih edilmesi hem biyolojik çeşitliliğin korunması hem de uzun vadede sürdürülebilir ve ekonomik peyzaj uygulamalarının geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu doğrultuda, kentsel peyzaj planlamalarında çevreye uyumlu, fotosentetik kapasitesi yüksek ve ekosistem sağlığına katkı sağlayabilecek bitki türlerinin bilimsel verilere dayalı olarak seçilmesi, iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir strateji olarak değerlendirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A - Üniversite Öğrencileri Yurt İçi Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamından desteklenmiştir

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Apogee Instruments Inc., Logan, UT 84321, USA. 2024. MC-100 Chlorophyll Concentration Meter. https://www.apogeeinstruments.com/content/MC-100-manual.pdf. Erişim Tarihi: 22.02.2025.

Aydın D. Ülkeler arası CO_2 emisyonun azaltılması yönde etkinlik çalışması. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2013; 30: 120-135.

Bayraç HN., Emrah D. Türkiye'de iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi 2016; 11(1): 23-48.

Çetin M. Peyzaj çalışmalarında kullanılan bazı bitkilerde klorofil miktarının değişimi. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty 2016; 16(1): 239-245.

Çetin İZ., Cesur A., Keskin R., Akarsu H. Bazı peyzaj bitkilerinde klorofil miktarının değişimi: Samsun Örneği. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences 2018; 4(1): 1-10.

Demiralay M., Sadıklar MS., Tilki F. İki farklı tip tahribatsız portatif klorofil metre kullanarak Artvin'de yayılış gösteren sapsız meşede (*Quercus*, Fagaceae) klorofil tahmini. Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi 2019; 20(1): 28-35.

Gond V., DePury DGG., Veroustraete F., Ceulemans R. Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content; Scaling-up to estimate fapar and carbonbalance in a multilayer. Multispecies Temperate Forest, Tree Physiology 2012; 19(10): 673-679.

Inada K. Studies on a method for determining the deepness of green and color chlorophyll content of intact crop leaves and its practical applcations: 1. Principle for estimating the deepness of green color and chlorophyll content of whole leaves. Japanese Journal of Crop Science 1963; 32(2): 157-162.

İbadullayeva J., Jumaniyazova K., Azimzadeh S., Canıgür S., Esen F. Çevre kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri. Türk Tıp Öğrencileri Araştırma Dergisi 2019; 1(3): 52-58.

Knudson LL., Tibbitts TW., Edward GE., Measurement of ozone ınjury by Korkmaz H., & Alkan S. Bitkilerde allokasyonu etkileyen faktörler. Journal of the Institute of Science and Technology 1977; 7(4): 23-32.

Mancuso S. Dünya bitkileri. Alfa Yayınevi; 2022.

Özsayın S. Karbondioksit gübrelemesi. Akdeniz Üniversitesi Ziraat FakültesiToprak Bölümü Lisans Tezi 56: Antalya, Türkiye, 2009.

Perks MP., Osborne BA., Mitchell DT. Rapid predictions of cold tolerance in douglas-fir seedlings using chlorophyll fluorescence after freezing. New Forests 2004; 28(1): 49-62.

Reece JB., Urry LA., Cain ML., Wasserman SA., Minorsky PV., Jackson RB. Campbell biyoloji. Ankara: Palme Yayınevi; 2013.

Rose R., Haase D. Chlorophyll fluorescence and variations in tissue cold hardiness in response to freezing stress in douglas-fir seedlings. New Forests 2002; 23(2): 81-96.

Sardoel AS., Rahbarian P., Shahdadneghad M. Evaluation chlorophyll contents assessment on three indoor ornomental plants with plant growth regulators. European Journal of Experimental Biology 2014; 4: 306-310.

Zeren İ., Cesur A., Keskin R., Akarsu H. Bazı peyzaj bitkilerinde klorofil miktarının değişimi: Samsun örneği. Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences 2018; 4(1): 1-10.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 29-54, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 29-54, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Görünüm ve Özellik Tabanlı Bir Bakış İzleme Modelinin Geliştirilmesi: TrGaze24**

Adem Mehmet YILDIZ[1*], Ömer KIRMACI[2], Adem UZUN[3], Mehmet DEMİRBAĞ[4]

[1,2] Kırklareli Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kırklareli
[3] Bursa Uludağ Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü, Bursa
[4] Bursa Uludağ Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Eğitimi Bölümü, Bursa

[1]https://orcid.org/0000-0002-4033-0122
[2]https://orcid.org/0000-0002-0954-1263
[3]https://orcid.org/0000-0001-6935-346X
[4]https://orcid.org/0000-0002-0881-8486
*Sorumlu yazar: ademmehmetyildiz@klu.edu.tr
** Bu makale sorumlu yazarın doktora tezinden üretilmiştir.

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 13.03.2025
Kabul tarihi:06.07.2025
Online Yayınlanma: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Bakış izleme modeli
Göz veri seti
Göz izleme
Evrişimli sinir ağı mimarisi

ÖZ

Bu çalışmada, çok modlu analitikler için bakış noktaları ile açılarını tahmin etmek amacıyla görünüm ve özellik tabanlı yöntemlere dayalı bir bakış izleme modeli geliştirilmiştir. İlk olarak bir göz veri seti oluşturulmuştur. Veri toplama sürecinde, 25 noktalı bir kalibrasyon tasarımı kullanılarak laboratuvar ortamında 128 katılımcıdan veri elde edilmiştir. TrGaze24 olarak adlandırılan veri setinden tahmin modeli oluşturmak için bir evrişimli sinir ağı (CNN) tasarlanmış ve yüz görüntülerinden çıkarılan sağ ve sol gözlere ait 18.410 göz görüntüsü, göz açıları ve yüz özellikleri modele girdi olarak sunulmuştur. Çıktılar, ekran üzerindeki hedef noktaların x ve y koordinatları ile bakış açısı vektörleri şeklinde belirlenmiştir. Modelin performansı için ortalama mutlak hatalar hesaplanmıştır, bakışa ait noktasal uzaklıkların tahminlerinde 3,74 cm ve açısal vektörlerin tahminlerinde 3,32 derece hata oranıyla literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla oldukça başarılıdır. Özellikle eğitim teknolojileri açısından, bilgisayar destekli eğitim ortamlarında web kamerası tabanlı bakış izleme sistemlerin temelini oluşturma potansiyeli taşımaktadır. Bu model, öğrenme analitiklerinde bilişsel süreçlerin incelenmesine olanak tanırken, aynı zamanda psikoloji, reklamcılık ve sosyal bilimler gibi alanlarda da kullanılabilirliğiyle dikkat çekmektedir.

Development of an Appearance- and Feature-Based Gaze Tracking Model: TrGaze24

Research Article

Article History:
Received: 13.03.2025
Accepted: 06.07.2025
Published online: 13.01.2026

Keywords:
Gaze tracking model
Eye dataset
Eye tracking
Convolutional neural network architecture

ABSTRACT

This study developed a gaze tracking model based on appearance- and feature-based methods to predict gaze points and angles within the scope of multimodal analytics. First, an eye dataset was created. During the data collection process, data were obtained from 128 participants in a laboratory setting using a 25-point calibration design. To create a prediction model from the dataset, which is called TrGaze24, a convolutional neural network (CNN) was designed. The model utilized 18,410 eye images (right and left eyes) extracted from facial data, along with gaze angles and facial features, as inputs. The outputs were defined as the x and y coordinates of target points on the screen and gaze direction vectors. The model's performance was evaluated by calculating mean absolute errors, with point-based gaze predictions showing an error of 3.74 cm and angular vector predictions showing an error of 3.32

degrees. These results demonstrated significant success compared to similar studies in literature. Particularly in educational technologies, the model holds potential to form the foundation of webcam-based gaze tracking systems in computer-assisted learning environments. In addition to enabling the analysis of cognitive processes in learning analytics, the model also stands out for its applicability in fields such as psychology, advertising, and social sciences.

To Cite: Yıldız AM., Kırmacı Ö., Uzun A., Demirbağ M. Görünüm ve Özellik Tabanlı Bir Bakış İzleme Modelinin Geliştirilmesi: TrGaze24. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 29-54.

1. Giriş

Bu çalışmada, eğitim teknolojileri gibi düşük maliyetli sistemlerin ihtiyaç duyduğu, donanım bağımsız bakış izleme uygulamaları için yeni bir çözüm önerilmektedir. Mevcut sistemlerin yüksek donanım maliyeti ve sınırlı ölçeklenebilirliği, eğitim ortamlarında yaygın kullanımı zorlaştırmaktadır. Özellikle webcam tabanlı sistemlerde, düşük çözünürlüklü görüntülerle yüksek doğruluk sağlamak halen önemli bir sorundur. Bu bağlamda, bu çalışmada TrGaze24 adlı yeni bir göz veri seti oluşturulmuş ve görünüm ile özellik tabanlı verileri birlikte kullanan çok modlu bir evrişimli sinir ağı mimarisi geliştirilmiştir. Bu model hem bakış noktalarını hem de bakış yönünü yüksek doğrulukla tahmin etmeyi hedeflemektedir. Çalışmanın temel amacı, düşük maliyetli donanımlarla çalışan, genellenebilir ve çok modlu bir bakış izleme modelinin geliştirilmesidir.

Göz hareketleri, bireylerin görsel dikkat akışını belirleyen temel mekanizmalardan biri olarak, insan davranışını ve algısını anlamak için nörobilim ve psikoloji disiplinlerinde geniş çapta araştırılmıştır (Radach ve ark., 2003). Göz fiksasyonları, sarsılmalar, yumuşak takipler ve göz kırpmaları gibi olayların kaydedilmesi, göz izleme yöntemlerini hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için vazgeçilmez bir araç haline getirmiştir (Saxena ve ark., 2023). Göz hareketlerini ölçmek için ilk girişimler, aynalar, oftalmometreler ve mercekler gibi basit optik cihazlarla gerçekleştirilmiştir (Tinker, 1936). Ancak göz izleme yöntemleri, Delabarre (1898), Huey (1898) ve Buswell (1935)'in çalışmalarıyla bilimsel bir araştırma alanı olarak gelişmeye başlamıştır.

Modern dönemde göz izleme yöntemleri, genellikle hassas ve pahalı donanımlara dayanmakta olup, bu donanımlar arasında Tobii, EyeLink, Smarteye ve Gazepoint gibi firmaların ürettiği ekran tabanlı cihazlar bulunmaktadır (Saxena ve ark., 2023). Buna karşın, GazeRecorder, Eyeware ve RealEye gibi yazılım sistemleri donanım gereksinimlerini ortadan kaldırarak daha düşük maliyetli ve erişilebilir çözümler sunmaktadır. Ayrıca, EYEDIAP (Mora ve ark., 2012), Columbia (Smith ve ark., 2013), GazeCapture (Krafka ve ark., 2016), RT-GENE (Fischer ve ark., 2018), MPIIGaze (Zhang ve ark., 2019), Gaze360 (Kellnhofer ve ark., 2019) ve ETH-XGaze (Zhang ve ark., 2020) gibi açık erişimli veri setleri, çeşitli yaş, cinsiyet ve etnik kökenlerden bireylerin göz hareketlerine ilişkin geniş bir veri tabanı sağlamaktadır. Bu veri setleri, açık kaynaklı yazılımlar ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak eğitilmekte ve bakış analizi çalışmalarında kullanılmaktadır.

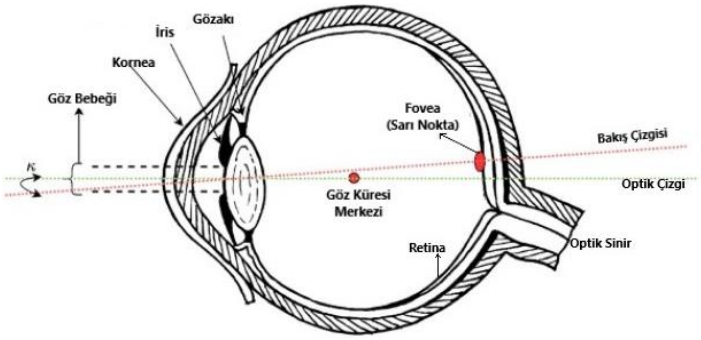
Öğretim ortamında göz takibi hem öğretmene hem de öğrenciye fayda sağlayan bilgiler sunar. Öğretmen, öğrencilerin ne kadar iyi ilerlediği konusunda fikir sahibi olur ve her öğrencinin zorlandığı

belirli yönlerde yardımcı olmayı amaçlayan kişiselleştirilmiş ders planlarına izin verir. Öğrenciye gelince, sistemden alınan göz izleme bilgileri, dijital bir değerlendirme haritası çıkararak görsel bir rehber verir ve öğrencinin anlayışını sağlamlaştırmaya yardımcı olur (Lopes ve ark., 2024). Bu da öğrencilerin kendi alanlarında başarılı olmalarına ve uzman seviyesine daha çabuk ulaşmalarına yardımcı olacaktır. Bakış verileri öğrencilerin izleme davranışlarını gösteren çok modlu öğrenme analitikleri olarak kullanılmaktadır (Crescenzi-Lanna, 2020). Göz hareketlerinin analizi, yalnızca okuma ve izleme alışkanlıklarını anlamakla kalmayıp, bilişsel süreçlerin keşfedilmesi (Just ve Carpenter, 1976; Yecan ve Çağiltay, 2006), kullanıcı etkileşimlerinin tasarlanması (Bondareva ve ark., 2013) ve duygusal durumların değerlendirilmesi (Porta ve ark., 2012) gibi alanlarda da önemli bir role sahiptir. Özellikle eğitim ortamlarında, göz izleme teknolojileri, öğrenen ve içerik arasındaki etkileşimlere dair önemli ipuçları sunmaktadır (Sharma ve ark., 2020; Altan ve Çağiltay, 2023). Göz analizi, bilgisayarlı görme, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik ve insan-bilgisayar etkileşimi gibi çoklu ortam uygulamalarında önemli bir araç olarak kullanılmaktadır.

Göz hareketleri, bireylerin dikkat yönelimi, duygusal ve zihinsel durumları hakkında zengin bilgiler sunar (Frischen ve ark., 2007). Göz izleme, göz hareketlerini ölçümleme süreci olarak tanımlanırken, bakış izleme, bu verilerin baş pozisyonu ve görsel çevreye göre analiz edilmesi anlamına gelmektedir. Sıklıkla birbirinin yerine kullanılan bu terimler, farklı alanlarda çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Örneğin, elektro-okülografi, kızılötesi okülografi ve video okülografi gibi yöntemler göz hareketlerini ölçmekte etkili araçlardır (Chennamma ve Yuan, 2013).

Bakış izleme yöntemleri, fiziksel engelliler için gözle yazı yazma (Majaranta ve Räihä, 2002), bilişsel ve davranışsal terapi (Grillon ve ark., 2006), görsel arama (Greene ve Rayner, 2001), pazarlama ve reklamcılık (Rayner ve ark., 2001), nörobilim (Snodderly ve ark., 2001), psikoloji (Rayner, 1998), insan-bilgisayar etkileşimi (Jacob, 1990; Goldberg ve ark., 2002) ve eğitim (Sağlam ve Yilmaz, 2021) gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Bakış analizi, bireylerin düşüncelerini, niyetlerini ve dikkatlerini anlamada kritik bir araç olarak, multidisipliner çalışmaların odağında yer almaktadır.

İnsan gözü, en fazla bilgiyi alan ve bakış yönünü sezgisel olarak yansıtabilen duyu organıdır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, göz küresi, göz küresi duvarı ve şeffaf içeriklerden oluşan, yaklaşık 12 mm'lik bir yarıçapa sahip küresel bir şekildir.



Şekil 1. Göz anatomisi (Ghosh ve ark., 2024).

Göz küresi duvarının dış zarı, kornea ve gözakı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. İris, tunica vasculosa adı verilen tabakanın bir parçasıdır ve merkezinde göze gelen ışık miktarını düzenleyen dairesel bir açıklık olan gözbebeği bulunur. İç zar ise çok sayıda fotoreseptör hücre içeren retina tabakasından meydana gelir. Retinanın içeriği, aköz hümör, mercek ve vitrözden oluşmaktadır. Göze giren ışık, kornea, göz sıvısı, lens ve vitröz gövdesi gibi bir dizi optik ortamdan geçer ve bu süreçte her ortamın sınırında yansıma ve kırılma meydana gelir. Retinada görüşün en keskin olduğu ve görüntünün ayrıntılarının algılandığı özel bölge, sarı nokta olarak bilinen foveadır (Liu ve ark., 2022).

Bakış çizgisi, gözbebeği, kornea ve göz küresi merkezini birbirine bağlayan bir doğrultudur. Optik çizgi ise fovea ile korneanın merkezini birleştirir. Bakış çizgisi, genel anlamda bakışın gerçek yönü olarak kabul edilir. Görsel ve optik eksenlerin kesişim noktasına "gözün düğüm noktası" adı verilir ve bu nokta, anatomik olarak korneanın merkezi ile tanımlanır. Düğüm noktası, genellikle nesneye bağlı açısal kaymayı ifade eden kappa (K) açısını kodlar (Ghosh ve ark., 2024). Bu bireysel dengeleme, bakış izleme cihazlarının nesneye bağlı kalibrasyon gerekliliğinin arkasındaki temel motivasyonu oluşturmaktadır.

Bilgisayarlı görme yöntemleriyle bakış izleme işlemlerini gerçekleştirebilmek için öncelikle gözün görünen bölgelerinin ve kafanın duruş açısı parametrelerinin çıkarılması gereklidir. Göz küresi, dışarıdan görünen kısmından daha büyük olup, göz kapaklarının arkasında ve kafatasının içinde yer alır. Bununla birlikte, göz küresinin hareketleri üç boyutlu bir yapıda değil, yatay ve dikey düzlemde iki boyutlu olarak gerçekleşir. Fovea, optik çizgi ekseninin yatayda yaklaşık 4-5° ve dikeyde 1,5° altında yer alır (Ghosh vd., 2024).

Bakış izleme, optik çizginin tahmin edilmesi ve gözlemlenen sahneye göre bakış noktasının belirlenmesini ifade eder. Bazı araştırmacılar, bakış tahminini basitleştirmek amacıyla bakış çizgisi yerine optik çizgiyi kullanmayı tercih etmektedir (Liu ve ark., 2022). Bilgisayarlı görme yöntemleri, yüzün ve gözün görünen bölgelerindeki parametreleri işleyerek bakış izleme için gerekli ilk verileri sağlar ve bu doğrultuda analiz süreçlerini destekler.

Bakış izleme yaklaşımları, aşağıdaki görsel bilgileri girdi olarak kullanır (Sugano ve ark., 2013; Lu ve ark., 2017):

a) Yüz görünüşü ve kafa pozları: Göz bakışı hem göz hareketi hem de baş duruşuyla ilişkilidir. Yüz işaretleri, kafa pozunu belirlemek ve görünüm bilgilerini sağlamak için kullanılır.

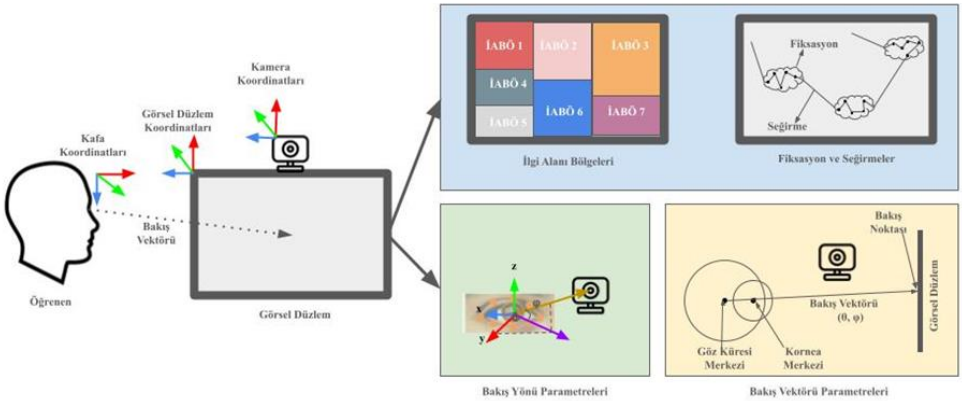
b) Göz görünümü: Göz bölgesi, baş duruşunun tutarlılığına bağlı olarak bakış yönü tahmini için kullanılabilir.

c) Göz bebeği/iris elipsi: Optik açı, gözün bakış yönüne göre değişir ve iris görüntüleme elipsi bu bilgiyi yansıtır.

d) Göz köşe noktaları: Göz hareketine göre değişmeyen bu noktalar, referans ve kırpma için önemlidir.

e) Parıltılar: Kornea üzerindeki ışık yansımaları, göz hareketi ve kafa hareketi etkilerini analizde kullanılır; ışık koşulları doğruluğu etkileyebilir.

Bakış tahmini, kullanıcı görüş hattını belirlemeyi hedefler. Tipik bir kurulumda (Şekil 2), veri yakalama sensörleri (ör. eye tracker veya webcam) ve görsel düzlem (ekranlar) kullanılır. Bakış vektörlerine ait açısal temsiller kurulumun ardından algoritmalar yardımıyla gerçekleştirilir.



Şekil 2. Bakış tahmini kurulumu (Ghosh ve ark., 2024).

Bakış yönü kalibrasyonunda, kafanın x, y, z eksenleriyle birlikte görsel düzlem ve kamera koordinatları dikkate alınır. Theta (θ) ve phi (Φ) açıları bakış vektörü parametreleri olarak dahil edilir ve görsel düzlem üzerindeki bakış noktaları x ve y koordinatlarına kalibre edilir. Böylece yeni kafa ve göz açısı verileriyle görsel düzlemdeki bakış noktaları ya da açısal kayma tahmin edilebilir. Elde edilen bu tahminler doğrultusunda araştırmacı tarafından görsel düzlem üzerinde belirlenen İlgi Alanı Bölgeleri (İABÖ) üzerinde ne kadar bakış verisi toplandığı, fiksasyon ve seğirme durumları çıkarılabilir. İlgi alanları, katılımcıların bakışlarını ekrandaki belirli bir alana ne sıklıkta ve ne kadar süreyle sabitlediklerini değerlendirmek için göz izleme verilerinde yaygın olarak kullanılır. Bu bilgi, gözlerdeki bakış düzeyini anlamak için kullanılır (Jongerius ve ark., 2021). Seğirmeler hızlı ve refleksif göz hareketleridir ve öncelikli olarak görsel çevrede yeni bir konuma uyum sağlamak için kullanılır. Optokinetik ölçümün bir parçası olarak seğirmeler, gönüllü veya istemsiz olarak gerçekleştirilebilir (Duchowski, 2017). Seğirmeler genellikle 10 ile 100 ms arasında sürer. Fiksasyonlar, dikkat odağının bir ilgi nesnesi üzerinde sabitlendiği göz hareketleridir. Fiksasyonlar üç tip minyatür göz hareketi ile karakterize edilir: bunlar titreme, kayma ve mikro seğirmelerdir (Duchowski, 2017). Sabitlemeler sırasında, bakışları sabit tutmak için kontrol sisteminde mevcut olan gürültü nedeniyle minyatür göz hareketleri meydana gelir. Bu gürültü sabitleme alanında, yaklaşık 5° görüş açısında meydana gelir. Altta yatan doğal sürecin basitleştirilmesi için bu gürültü sabitleme sırasında göz ardı edilir.

1.1. Bakış Analizinde Kullanılan Yöntemler ve Veri Setleri

Bakış analizi, başa takılan sistemler ve uzaktan izleme sistemleri gibi donanımlarla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemler, özellik tabanlı ve görünüm tabanlı yöntemler kullanarak bakış yönünü belirlemek için çeşitli algoritmalar uygular. Akıllı gözlükler, sanal gerçeklik başlıkları, kameraya sahip cihazlar ve göz izleme cihazları bu süreçte yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir.

1.1.1. Özellik tabanlı yöntemler

Özellik tabanlı yöntemler, gözlerin ayırt edici özelliklerini (gözbebeği çevresi, göz köşeleri, kornea yansımaları gibi) kullanarak bakış tahmini yapar (Iannizzotto ve La Rosa, 2011). Bu yöntemler, aydınlatma ve bakış açısı değişikliklerine daha az duyarlı yerel özelliklere odaklanır. Ancak açık havada veya güçlü ortam ışığında performans sorunları yaşanabilir. Ayrıca doğru iris ve göz bebeği özelliklerinin eksikliği tahmin doğruluğunu etkileyebilir.

Özellik tabanlı yöntemler ikiye ayrılır:

• *İki boyutlu yöntemler:* Bakış koordinatlarını tahmin etmek için parametrik veya parametrik olmayan eşleme teknikleri kullanır. Sinir ağları gibi yaklaşımlar, görüntü özelliklerini bakış noktalarına eşlemek için tercih edilir (Baluja ve Pomerleau, 1993; Torricelli ve ark., 2008; Demjén ve ark., 2011). Basit ve kalibrasyon gerektirmeyen bir yapıya sahip olmasına rağmen, kafa pozu değişikliklerine karşı hassastır ve doğruluk sınırlamaları vardır (Hansen ve Ji, 2010).

• *Üç boyutlu yöntemler:* Gözün geometrik modeli ile bakış yönü vektörünü üç boyutlu olarak tahmin eder. Bu yöntemler, kamera ve ışık kaynaklarının küresel geometrik modeli gibi parametreleri gerektirir. Gözün optik ekseni ve görsel ekseni yeniden oluşturularak bakış noktası tahmini yapılır (Hansen ve Ji, 2010; Reale ve ark., 2010; Sigut ve Sidha, 2011; Taba, 2012).

1.1.2. Görünüm tabanlı yöntemler

Bakış tahmini için görünüm tabanlı modeller açıkça özellikleri çıkarmaz, bunun yerine görüntü içeriklerini doğrudan ekran koordinatlarına eşlemek amacıyla girdi olarak kullanır (Hansen ve Ji, 2010). Görünüm tabanlı yöntemler, gözleri doğrudan fotometrik görünüme dayalı olarak algılar ve izler. Görünüm tabanlı teknikler, görüntü verilerini ekran koordinatlarıyla eşleştirerek bakış yönünü tahmin etmek için görüntü içeriğini kullanır (Orozco ve ark., 2009; Lu ve ark., 2011). Başlıca görünüm temelli yöntemler dönüştürülebilir modeller (Rikert ve Jones, 1998), gri ölçekli birim görüntüleri (Yang ve ark., 2012), görünüm manifoldu modeli (Tan ve ark., 2002), Gauss enterpolasyonu (Sugano ve ark., 2013) yöntemleridir. Görünüm tabanlı yöntemlerde haritalama doğrudan görüntü içerikleri üzerinde yapıldığından genellikle kameraların ve geometri verilerinin kalibrasyonunu gerektirmez.

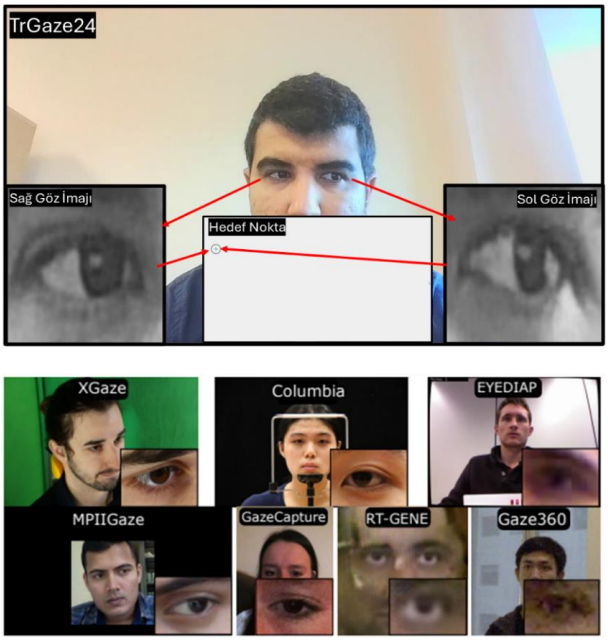
Görünüme dayalı bakış tahmin yöntemleri girdi olarak doğrudan göz görüntülerini kullanır ve bu nedenle potansiyel olarak düşük çözünürlüklü göz görüntüleriyle çalışabilir. İlk çalışmalar sabit bir kafa pozunu varsayarken (Baluja ve Pomerleau, 1993; Tan ve ark., 2002; Sewell ve Komogortsev, 2010; Sugano ve ark., 2014), son çalışmalar 3 boyutlu kafa pozuyla birlikte ele alınan yöntemlere de odaklanmıştır (Lu ve ark., 2012; Lu ve ark., 2014). Görünüm tabanlı yöntemler, özellik tabanlı yöntemlere göre daha fazla miktarda kullanıcıya özel eğitim verisi gerektirir (Zhang ve ark., 2015). Makine öğrenmesinin hızla gelişmesiyle birlikte görünüm tabanlı yönteme artan ilgi duyulmuş ve bakış takibi için birçok veri seti önerilmiştir (Tablo 1).

Tablo1. Bakış analizinde kullanılan veri setleri.

Veri Seti	Ortam	N	Uzaklık	Veri Tipi	Yıl
ColumbiaGaze	Lab	56	200 cm	5880 Resim	2013
UT Multiview	Lab	50	60 cm	64000 Resim	2014
EYEDIAP	Lab	16	80-120 cm	94 Video	2014
TabletGaze	Lab	51	-	816 Video	2016
MPIIGaze	İç	15	40-60 cm	213659 Resim	2017
MPIIFaceGaze	İç	15	40-60 cm	37667 Resim	2017
RT-GENE	Lab	15	≈182 cm	122531 Resim	2018
Gaze360	İç-Dış	238	≈ 220 cm	169748	2019
EVE	Lab	54	-	4200 Video	2020
GazeCapture	İç	1474	-	2445504 Resim	2016
ETH-XGaze	Lab	110	100 cm	1083492 Resim	2020
TrGaze24	**Lab**	**128**	**40-60 cm**	**18410 Resim**	**2024**

ColumbiaGaze (Smith ve ark., 2013), farklı bakış ve baş pozlarına sahip 56 deneğin 5.880 görüntüsünü içerir. Her kişi için 21 farklı bakış yönü vardır ve veriler, 7 yatay ve 3 dikey bakış konumuyla kısıtlı bir laboratuvar ortamında toplanmıştır. UT-Multiview (Sugano ve ark., 2014) veri seti, keyfi baş pozlarıyla göz bölgelerinin 3 boyutlu yeniden yapılandırılmasına sahip 50 katılımcının yoğun bakış etiketlerine sahiptir. EYEDIAP (Mora ve ark., 2012) veri seti, kafa duruşu, kişi ve 3 boyutlu hedef değişikliklerinin yanı sıra ortam ve algılama koşullarındaki değişikliklerle ilgili ana zorlukların üstesinden gelmek için tasarlanmıştır. TabletGaze (Huang ve ark., 2016), kapalı bir ortamda bir tablet kullanılarak toplanan 4 farklı duruşa ve 35 bakış konumuna sahip 51 denekten oluşan geniş, kısıtsız bir veri kümesidir. TabletGaze veri seti de 7×5 grid formatında toplanmıştır. MPIIGaze (Zhang ve ark., 2019) veri seti, üç aylık bir süre boyunca bir dizüstü bilgisayar önünde doğal günlük olaylar sırasında 15 denekten toplanan 213.659 görüntüyü içermektedir. MPIIGaze veri seti, dizüstü bilgisayar ekranındaki rastgele noktaların katılımcılara gösterilmesiyle toplanmaktadır. Bu veri kümesinde yalnızca göz bölgesinin girdi olarak kabul edildiğini lütfen unutmayın. MPIIFaceGaze (Zhang ve ark., 2019) veri seti, yüzün tamamı dikkate alındığında bakışın daha doğru bir şekilde tahmin edilebileceği hipoteziyle MPIIGaze veri setinden derlenmiştir. RT-GENE (Fischer ve ark., 2018) veri seti, çeşitli bakış ve baş poz açılarıyla daha doğal bir ortamda kaydedilir. Temel açıklaması, mobil göz izleme gözlüklerine sahip bir hareket yakalama sistemi kullanılarak yapılmıştır. Gaze360 (Kellnhofer ve ark., 2019), geniş bir kafa pozu aralığına sahip, kısıtlamasız iç ve dış mekân ortamlarında 238 denekten toplanan geniş ölçekli bir bakış tahmin veri setidir. EVE (Park ve ark., 2020) ayrıca insan bakışını ekran koordinatında haritalamak için farklı kamera görüntüleri ile sınırlı iç mekân ortamında toplanan video kayıtlarından oluşmaktadır. GazeCapture (Krafka ve ark., 2016) mobil cihazlarda kitle kaynak kullanımı yoluyla toplanmıştır. 1.474 denekten yüz görüntüleri toplamak için bir IOS uygulaması geliştirdi; bunların 1.249'u iPhone, 225'i ise IPad kullanıyordu. Sınırsız bir 2B bakış tahmin modelinin öğrenilmesi için uygun olan, çeşitli aydınlatma koşulları ve kafa pozları altında yüz görüntüleri ve bunların 2B bakış açıklamalarını sağlar. Ancak kafa pozu bazı ekstrem kafa pozlarını içermiyor, kamera mesafeleri de azdır. ETH-XGaze (Zhang ve ark., 2020), geniş bir kafa pozu yelpazesine sahip, yüksek çözünürlüklü görüntüler içeren, kısıtlı bir ortamda toplanan büyük ölçekli bir veri kümesidir. Veri seti, verilere daha fazla zorluk eklemek için

farklı kamera konumlarından ve aydınlatma koşullarından görüntüler içerir. ETH-XGaze veri seti mevcut veri setleri ile karşılaştırıldığında en geniş kafa ve göz açılarına sahiptir. Öte yandan ETH-XGaze, özellikle yüz bölgesindeki etkin çözünürlük olmak üzere mevcut veri kümeleriyle karşılaştırıldığında en yüksek görüntü çözünürlüğüne sahiptir. Araştırmada oluşturulan ve "TrGaze24" olarak adlandırılan veri setinde, dizüstü bilgisayara entegre 30 fps bir kamera kullanılarak 1024x768 çözünürlükte görüntüler alınmıştır. Veri setine sorumlu yazarın bağlı olduğu kurum web sayfasından ya da sorumlu yazar ile iletişime geçerek ulaşabilirsiniz. Şekil 3'te geliştirdiğimiz TrGaze24 veri setinden ve farklı veri kümelerinden bazı örnekleri ve karşılık gelen kırpılmış göz görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3. TrGaze24 ve diğer farklı bakış tahmini veri kümelerinden veri örnekleri ve bunlara karşılık gelen kırpılmış görüntüleri.

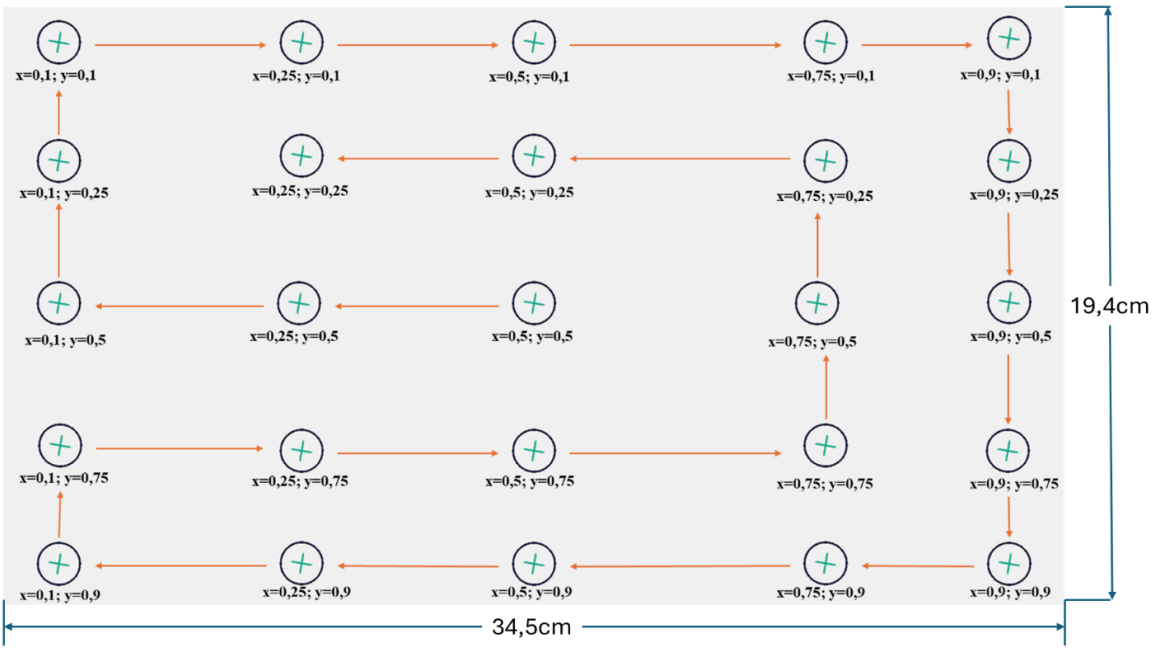
ETH-XGaze en yüksek görüntü çözünürlüğüne ve kalitesine sahiptir. Columbia veri kümesi de yüksek görüntü çözünürlüğüne sahiptir, ancak veri kümesi yalnızca 5.880 örnekten oluşur. EYEDIAP, MPIIGaze, RTGENE ve Gaze360 da oldukça yüksek çözünürlüklü görüntülere sahipken katılımcının kameradan uzakta olması etkili göz bölgesi çözünürlüğünün düşük olmasına neden olmaktadır. TrGaze24 veri setinin özelliği ise 76 erkek ve 52 kadın olmak üzere toplam 128 kişiden oluşmasıdır. Ek olarak TrGaze24 veri seti, sağ ve sol gözlere ait gri formatta ve 64x64 çözünürlükte 18.410 imajdan oluşmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Araştırmada bakış izleme modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle bir veri seti oluşturulmuştur. Veri seti oluşturma aşamasının ardından evrişimli sinir ağı modeli (CNN) tasarlanmıştır.

2.1. Veri Setinin Oluşturulması

Bu çalışmada öncelikle Python 3.6 yazılımında 5x5lik bir düzlemde 25 noktadan oluşan kalibrasyon uygulaması tasarlanmıştır (Şekil 4). Kalibrasyon sürecinde ham veri seti oluşturulmuştur.



Şekil 4. 25 noktalı kalibrasyon platformu.

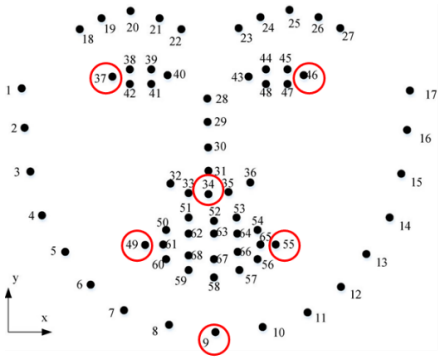
On adet dizüstü bilgisayardan oluşan bir bilgisayar laboratuvarına katılımcılar belirli aralıklarla çağrılmış ve çalışma hakkında bilgilendirilmişlerdir. Araştırmaya 76 erkek ve 52 kadın olmak üzere toplam 128 üniversite öğrencisi gönüllü olarak katılmıştır. Veri toplama işlemleri 2024 yılı aralık ayında yapılmıştır. Katılımcılar kalibrasyon uygulaması çalıştırıldığında bilgisayarların web kamerası açılmış ve ortasında + simgesi bulunan yuvarlak şekil ekranın orta noktasından (x=0,5 ve y=0,5) başlayarak her bir noktada 2 saniye görüntü çekerek toplam 50 saniye boyunca veri toplamıştır. Bilgisayarlar 15inç (genişlik =344 mm, yükseklik 214 mm) boyutundaydı ve kalibrasyon platformu 1920x1080 çözünürlükteydi. Katılımcılar veri toplama sürecinde yuvarlak simgeyi takip ettiler ve görüntüleri bilgisayara entegre olan 30fps web kamerası yardımıyla 1280x720 çözünürlükte çekildi ve jpg formatında kaydedildi. Bu görüntüler ön işleme için kullanılacak veri setine dosya yolu ile görüntüye ait kalibrasyon noktasın x ve y eksenindeki ondalığı, temsil ettiği pikseli ve santimetre değeriyle birlikte kaydedilmiştir. Örneğin tam ortadaki noktanın 0 ile 1 arasındaki ondalık temsili x ekseninde 0,5 ve y ekseninde 0,5 iken piksel temsili x ekseninde 960 y ekseninde ise 540'tır. Milimetre cinsinden temsili ise x ekseninde 17,25, y ekseninde ise 9,7 cm'dir.

2.2. Veri Ön İşleme

Ön işleme aşamasında veri setinden bakış tahmini modeli için kullanılacak girdi görüntüleri ile öznitelikler çıkarılmıştır. Ön işlemede ilk başta ham imaj üzerinden yüz görüntüsü çıkarılmıştır. Pratiğe dökülmüş, laboratuvar dışı uygulamalarda imajlar sahte yüz görüntüleri içerebilir bu nedenle hızlı tespitler için LightFFDNet gibi sinir ağı modelleri kullanılabilir (Jabbarlı ve Kurt, 2004). Bu çalışmada Python 3.6 ile geliştirilmiş ön işleme algoritması Viola-Jones Algoritmasını (Viola ve Jones, 2004) barındıran bir yüz algılama modeliyle imaj üzerindeki yüzü algılamış ve girdi görüntüleri için yüz

imajından sağ ve sol göze ait bölgeler kırpılmıştır. Sağ ve sol göze ait imajlar 64x64 bir çözünürlükte ve gri formatta kaydedilmiştir. Sayısal girdileri oluşturan öznitelik bilgilerini ise yüze ait açılar oluşturmaktadır.

Web kamerasından algılanan yüz görüntüsü 2 boyutlu yapıdadır. Yüzün ve gözlerin iki boyutlu görüntülerinden üç boyutlu uzayda açılarını hesaplamak için bazı yöntemlere ihtiyaç duyulur. Yüz açısına ait öznitelikleri çıkarmak için iki boyutlu görüntüden Euler açılarının çıkarılması gerekmektedir. Görüntüden yüz çıkarıldıktan sonra, kafa pozu tahmininde kullanılan bazı yüz noktalarını yüzden seçmemiz gerekir. Bu amaçla Dlib (Davis, 2015) kütüphanesi kullanılmıştır. 2 boyutlu bir görüntüden başın 3 boyutlu yönünü belirlemek için eğitilmiş modelleri kullanan bu kütüphaneler yardımıyla burun, gözler, ağız ve çeneden itibaren farklı yüz noktalarına ait bölgeler çıkarılabilmektedir (Şekil 5-a). Bu noktalar eğitilmiş kütüphanelerle arttırılabilir. Literatürde en çok kullanılanı ise 68 noktalı yüz noktası modelidir (Kazemi ve Sullivan, 2014). 3 boyutlu uzaydaki benzerlikleri bulmak için bu 2 boyutlu dönüm noktası noktalarından projeksiyonla 3 boyutlu bir insan yüzü modeli oluşturulur. 3 boyutlu matrisi oluşturmak için bu 68 nokta içinden göz köşeleri (37 ve 46), burun ucu (34), ağız köşeleri (49 ve 55) ve çene ucu (9) noktalarının x ve y koordinatları alınmıştır. 3 boyutlu nesneyi oluşturduktan sonra döndürme matrisinden Euler açıları hesaplanmıştır.



a) 68 noktalı yüz işareti

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

b) Döndürme matrisi

Şekil 5. 68 noktalı yüz işareti (a) ve döndürme matrisi (b)

Yüz noktalarından çıkarılan bir döndürme matrisi (Şekil 5-b) yardımı ile yüzün x, y ve z eksenindeki açıları hesaplanabilir. Bu matris yardımı ile iki boyutlu görüntünün Euler açıları denklem 1,2,3 hesaplanabilir.

$$\alpha = tan^{-1}(r_{32}/r_{33}) \tag{1}$$

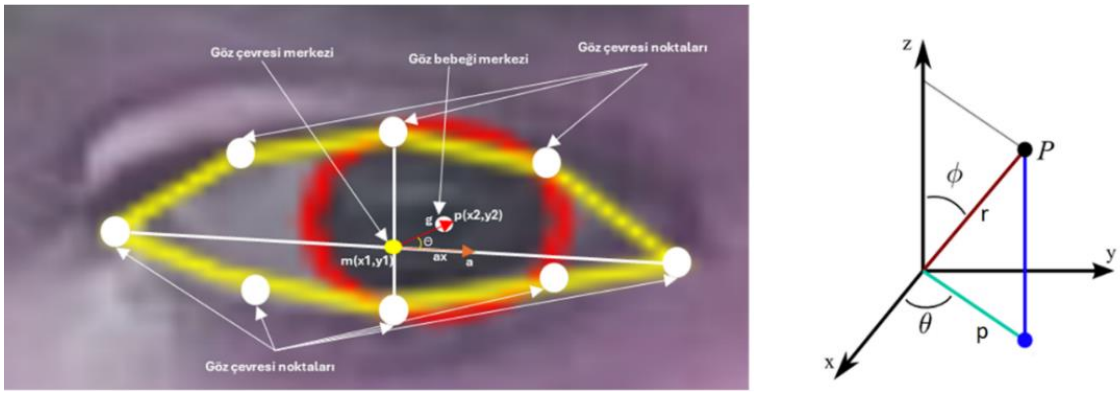
$$\beta = tan^{-1}\left(-r_{31}/\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}\right) \tag{2}$$

$$\gamma = tan^{-1}(r_{21}/r_{11}) \tag{3}$$

Denklem 1 yüzün sağa sola hareketi durumunda yaptığı açıyı verir. X ekseni üzerinde gerçekleşen bu dönme açısı "yaw" açısı olarak da tanımlanabilir. Denklem 2 yüzün yukarı aşağı hareketi durumunda

yaptığı açıyı verir. Y ekseni üzerinde gerçekleşen bu dönme açısı "pitch" açısı olarak da tanımlanabilir. Denklem 3 yüzün sağ ve sol omuzlara doğru hareketi olduğu durumda yaptığı açıyı verir. Z ekseni üzerinde gerçekleşen bu dönme açısı "roll" açısı olarak da tanımlanabilir.

Göz açısına ait özniteliklerin çıkarılması için de göz bebeği ve göz çevresine ait noktaların çıkarılması gerekir. Bu noktalar Mediapipe (google-ai-edge/mediapipe, 2020) kütüphanesiyle çıkarılmış ve küresel koordinatları hesaplanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Göz çevresi referans noktalarına sahip göz merkezi ve g bakış vektörünü bulmak için göz merkezine çizilen sanal eksen ile küresel koordinatları.

İki boyutlu görüntüden elde edilen bilgiler doğrultusunda göz çevresi merkezi (m) ve göz bebeği merkezinin (p) ax yatay eksen üzerindeki açısı (Θ) hesaplanabilir (Denklem 4 ve 5).

$$D = \|g\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \tag{4}$$

$$\theta = \begin{cases} \cos^{-1}(ga_x) \;\; eğer \; y_2 - y_1 \leq 0 \\ 360 - \cos^{-1}(ga_x) \quad diğer \end{cases} \tag{5}$$

Göz bebeği merkezi ve göz çevresi merkezi arasındaki uzaklığın ters kosinüsü yatay eksen üzerindeki açıyı verir. Dikey eksendeki açının da çıkarılması için bir tür küresel koordinat hesaplamasına ihtiyaç duyulur. İki boyutlu göz imajından göz çevresi ve göz bebeği merkezinin arasındaki x ve y eksenindeki uzaklıklar çıkarılarak yatay açı (Θ) hesaplanabiliyor ancak z eksenin göre bir uzaklıktan dikeydeki açıyı (Φ) hesaplamak için küresel bir koordinat hesaplaması yapmak gerekir (Denklem 6). Göz küresinin yarı çapı (r) yetişkin bir insanda ortalama 12 mm'dir ve göz bebeğinin bu yarı çapa uzaklığı sabit olarak kullanılır.

$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{r}{p}\right) \tag{6}$$

Göz bebeği merkezinin göz küresine olan uzaklık (r) sabiti, diğer bir deyişle göz küresinin yarı çapı ve göz bebeği merkezinin göz çevresi merkezine olan uzaklığına (p) bölümünden elde edilen değerin ters tanjantı dikey eksendeki açıyı vermektedir. Gözlerin yatay ve dikeyde yaptıkları açıları elde ettikten

sonra sinir ağı mimarisinin de çıktı olarak kullanacağı bakışın açısal vektörün ($\vec{g}$) hesaplaması için Denklem 7 kullanılmıştır.

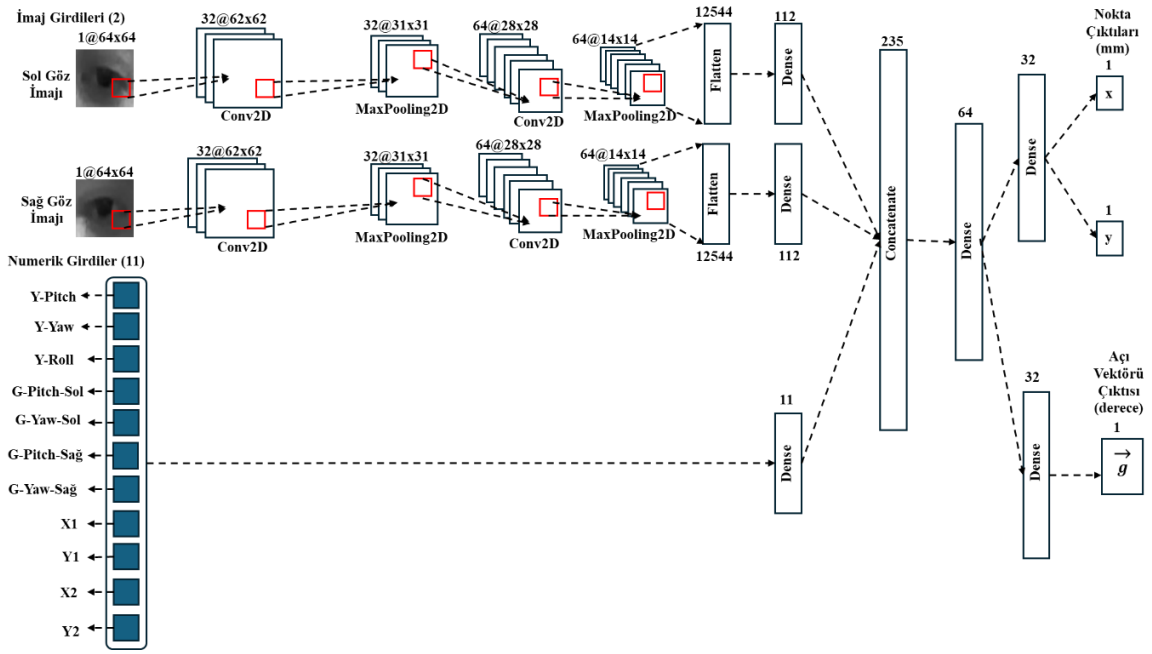
$$\|\vec{g}\| = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2}$$
$$g_x = \cos\Phi * \cos\theta \quad (7)$$
$$g_y = \cos\Phi * \sin\theta$$
$$g_z = \sin\Phi$$

Bakış vektörü genellikle 3 boyutlu uzayda (x,y,z) bileşenlerini içerir ve birim uzunlukta normalize edilmiş bir vektör olarak ifade edilir. Ortak bakış vektörü her iki gözden elde edilen bakış vektörünün ortalamasıdır.

Ön işleme adımlarında yüz resimlerinden çıkarılan sağ ve sol gözlere ait imajların diskteki dosya yolları, yüzün/kafanın pitch, yaw, roll değerleri (Y_Pitch, Y_Yaw, Y_Roll), sağ ve sol gözlere ait pitch ve yaw değerleri (G_Pitch_Sol, G_Yaw_Sol, G_Pitch_Sağ, G_Yaw_Sağ) ile yüzün imajdaki pozisyonunun köşe noktaları (X1, Y1, X2, Y2) girdi verileri olarak kaydedilmiştir. Çıktı verilerini oluşturan bakışın ekranda ait olduğu x, y noktaları ve bakışlara ait vektör açıları ($\vec{g}$) Evrişimli Sinir Ağı Mimarisinin eğitim verisini oluşturmak üzere csv formatında kaydedilmiştir.

2.3. Evrişimli Sinir Ağı (CNN) Mimarisinin Tasarlanması

Bakış izleme modelinin tasarımı için çok modlu bir CNN mimarisi tasarlanmıştır (Şekil 7). Bu modele göre veri setinde yer alan ve gri formattaki 64x64 çözünürlükteki sol ve sağ göze ait imajlar girdi imajları olarak yer almaktadır. Özellik/numerik girdiler olarak; yüze ait pitch, yaw ve roll açıları, sağ ve sol gözlere ait pitch ve yaw değerleri, yüzün imajdaki pozisyonunun köşe noktaları veri setinden alınmıştır. Çıktı ise x ve y noktalarına ait mm değerleri ile bakışa ait vektör açısıdır. Veri setinin %80'i eğitim %20'si test/doğrulama seti olarak kullanılmıştır. Mimari çoklu imaj ve numerik girdi alması nedeniyle çok modlu bir derin öğrenme ağı temeline sahiptir.



Şekil 7. Bakış izleme için tasarlanan çok modlu evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisi.

Şekil 7'de sol göz ve sağ göze ait imaj girdileri, iki farklı gri ölçekli görüntüyü temsil eder. Her biri 64x64 boyutunda ve tek kanallıdır. İlk katman olarak bu görüntüler modelin işlemeye başlayacağı verileri sağlar. Konvolüsyonel (Conv2D) katmanlar, görüntüdeki özellikleri öğrenmek için filtreler kullanır. İlk Conv2D katmanında 32 filtre (62x62 boyutunda) ve ardından 64 filtre (28x28 boyutunda) kullanılmıştır. Her bir Conv2D katmanı, aktivasyon fonksiyonu olarak Doğrultulmuş Lineer Ünite (ReLU) kullanarak doğrusal olmayan özellikleri öğrenir. Maksimum havuzlama (MaxPooling2D) katmanları, özellik haritalarının boyutunu küçültmek için kullanılır. Havuzlama işlemiyle, her bir filtre çıktısının önemli özelliklerini korurken, boyutlar azaltılır. Tek boyutlu (Flatten) katmanlarında görüntü işleminden elde edilen iki boyutlu özellik haritaları, tamamen bağlı katmanlarda kullanılabilmesi için tek boyutlu bir diziye dönüştürülür. Giriş özelliklerini ağırlıklandırarak ve ReLU foksiyonunu uygulayarak yüksek seviyeli özellikleri öğrenir. Görüntü girişlerinden elde edilen özellikler, 112 birimden oluşan tam bağlantı (Dense) katmanlarında işlenir. Özellik girdileri olarak temsil edilen numerik girdiler, modelin 11 adet sayısal veri girişini almasını sağlar. Sayısal veriler ayrı bir Dense katmanında işlenir. Bağlama (Concatenate) katmanında, iki görüntüden ve numerik verilerden elde edilen bilgileri birleştirir. Bu, modelin tüm girdiler arasındaki ilişkileri öğrenmesine olanak tanır. Çıkış boyutu, tüm birleştirilen katmanların boyutlarının toplamıdır. Son Dense katmalarında birleştirilmiş veriler ardışık Dense katmanda işlenir. İlk Dense katman 64 birim, diğer Dense katmanları ise 32 birim içerir. Bu işlem, çıktılar için gerekli yüksek seviyeli özelliklerin öğrenilmesini sağlar. Bakılan noktalara ait değerlerin ve açı vektörü modelin çıktısını ayrı ayrı temsil eder. Her biri 32 birimlik Dense katmanın sonucu olarak ayrı ayrı işlenir ve sonuçlanır. Bu çıktı, modelin tahmin edeceği hedef değerdir. Modelde mimari tek seferde eğitilir ve her iki amaç için ayrı eğitim modelleri çıkarır. Bunlardan ilki bakışın x ve

y düzleminde yer alan noktasal yerinin tahmini diğeri de açısal hatasını gösteren açı vektörü çıktılarıdır. Bu iki parametrenin ortalama mutlak hataları modelin çalışma performansını göstermektedir.

Bakış izleme modellerinin performans değerlendirmeleri araştırmacıların ve kullanıcıların amaçlarına göre değişkenlik gösterebilir. Çoğunlukla kullanılan performans değerlendirmeleri iki boyutlu düzlemde bakılan noktanın nokta, piksel, cm ya da mm cinsinden tahminlemesi yapılacaksa öklit mesafesi ele alınırken, iki veya üç boyutlu bakış yönü tahminlemeleri için performans değerlendirmelerinde açısal hata kullanılır (Akinyelu ve Blignaut, 2020; Pathirana ve ark., 2022). Bu araştırmada hem nokta tahminlemesi hem de bakış yönü tahminlemesi yapmayı amaçladığımız için noktasal ve açısal hatanın performans değerlendirmeleri ayrı ayrı ele alınmıştır.

Noktasal uzaklığın ortalama mutlak hatasını (DMAE) bulmak için gerçek bakış noktaları ile tahmini bakış noktaları arasındaki öklit uzaklığının ortalama mutlak hatası eğitilmiş modelden hesaplanmıştır (Denklem 8).

$$DMAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \sqrt{(x_g - x_t)^2 + (y_g - y_t)^2} \tag{8}$$

Noktasal uzaklığın ortalama mutlak hatası gerçekte bakılan nokta ile tahmin edilen noktanın doğrusal mesafesini hesaplayarak modelin performansını ortaya çıkarır. Noktasal hata ne kadar düşük olursa tahmin performansı da o kadar yüksek olur.

Bakış yönünün ortalama mutlak hatasını ($\vec{g}$MAE) bulmak için gerçek ve tahmini bakış konumları arasındaki açısal sapmaların ortalama mutlak hatası eğitilmiş modelden hesaplanmıştır (Denklem 9).

$$\vec{g}\ MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left|\vec{g}_{gerçek} - \vec{g}_{tahmin}\right| \tag{9}$$

Bakış yönü doğruluğunu değerlendirmek için vektörlerin doğrusal mesafesi yerine açısal fark daha anlamlıdır, çünkü bakış yönü, bireyin odaklandığı belirli bir alan veya hedefle doğrudan ilişkilidir. Gerçek uygulama alanlarında bakılan noktanın neresi olduğunun tespiti ortaya çıkarılır ancak geçerli ve güvenilir bir saptamanın yapılabilmesi için açısal hatanın minimize edilmesi ön koşuldur. Bu araştırma amacı doğrultusunda ise oluşturulan veri setindeki açısal hatalar görünüm ve özellik tabanlı yöntemlerle minimize edilmiştir. Açısal sapmaların ortalama mutlak hatası, bakış yönü tahmininde vektör bazlı bir ölçüm olduğu için, tahmin doğruluğunu anlamak ve çeşitli uygulama alanlarında sistem performansını değerlendirmek için hayati bir metriği temsil eder. Modelin açısal hatalarında meydana gelen ortalama mutlak hatası sonuçlar bölümünde ele alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Gönüllü olarak araştırmaya katılan 128 kişiyle oluşturulan veri setine ait bulgular literatüre yeni bir katkı sunmuştur. Görünüm tabanlı ve özellik tabanlı özellik tabanlı yöntemleri bir arada kullan evrişimli sinir

ağına ait bulgular da yeni bir yaklaşım öne sürmüştür. Göz veri setine ait tanımlayıcı istatistik bulguları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Göz veri setine ait tanımlayıcı istatistik bulguları.

Değişken	N	Mean	SD	Min	Maks	Çarpıklık	Basıklık
Göz Pitch	18410	23,00	11,05	-25,28	79,93	0,08	-0,43
Göz Yaw	18410	-0,39	9,37	-35,98	35,93	0,20	0,28
Kafa Pitch	18410	-7,66	5,38	-25,43	16,65	-0,15	0,28
Kafa Yaw	18410	-1,35	4,29	-36,50	20,99	-0,33	1,31
Kafa Roll	18410	-0,59	3,09	-15,35	11,72	-0,01	1,05

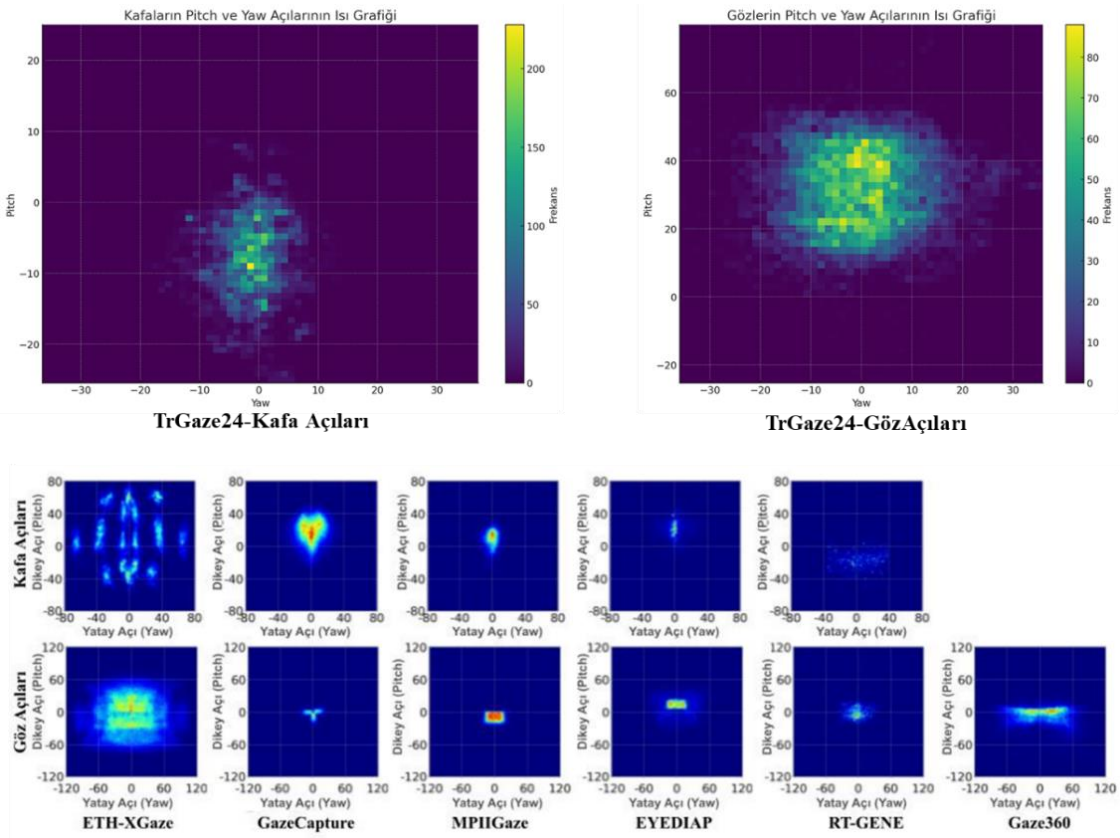
Sağ ve sol gözlerin yatayda (yaw) ve dikeyde (pithc) yaptığı ortak açı değerlerine ait minimum ve maksimum değerleri incelendiğinde dikey eksendeki açı değerleri minimum -25 ile maksimum +80 arasında iken yatay eksendeki açı değerleri ise minimum -35 ile maksimum +35 arasındadır. Kafaların yatayda (yaw) ve dikeyde (pitch) yaptıkları açı değerlerine ait minimum ve maksimum değerler incelendiğinde dikey eksende minimum -25 ile maksimum +16 derece arasında iken yatay eksendeki açı değerleri ise -36 ile +20 arasındadır. Kafaların yalpa (roll) açısına bakıldığında minimum -15 ile maksimum +11 derece arasında değiştiği gözlenmiştir. Çarpıklık ve basıklık değerleri ise verilerin normal bir dağılımda olduklarını göstermektedir. Tablo 3'te mevcut veri setleri ve TrGaze24 veri setindeki kafa ve bakış pozlarının karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 3. Veri setlerinin kafa ve bakış pozları.

Veri Seti	Kafa Pozları Pitch/Yaw	Bakış Pozları Pitch/Yaw
ColumbiaGaze	P(-00◦,+00◦) Y(-30◦,+30◦)	P(-15◦,+15◦) Y(-10◦,+10◦)
UT Multiview	P(-35,51◦,+41,93◦) Y(-39,90◦,+38,78◦)	P(-66,48◦,+55,43◦) Y(-77,92◦,+80,80◦)
EYEDIAP	P(-48,95◦,+66,31◦) Y(-95,99◦,+94,80◦)	P(-84,68◦,+66,31◦) Y(-162,28◦,+168,91◦)
MPIIGaze	P(-51,39◦,+62,14◦) Y(-73,14◦,+73,14◦)	P(-48,94◦,+13,05◦) Y(-52,38◦,+44,07◦)
MPIIFaceGaze	P(-45,58◦,+66,32◦) Y(-81,71◦,+101,93◦)	P(-39,25◦,+15,18◦) Y(-45,26◦,+36,99◦)
RT-GENE	P(-63,39◦,+26,70◦) Y(-37,49◦,+37,50◦)	P(-80,76◦,+34,29◦) Y(-50,89◦,+66,69◦)
Gaze360	(±90◦; NA)	P(-78,22◦,+89,26◦) Y(-179,88◦,+179,88◦)
ETH-XGaze	P(-89,50◦,+89,31◦) Y(-148,27◦,+175,6◦)	P(-89,69◦,+89,21◦) Y(-178,99◦,+177,05◦)
TrGaze24	**P(-25,43◦,+16,65◦) Y(-36,50◦,+20,99◦)**	**P(-25,28◦,+79,93◦) Y(-35,98◦,+35,93◦)**

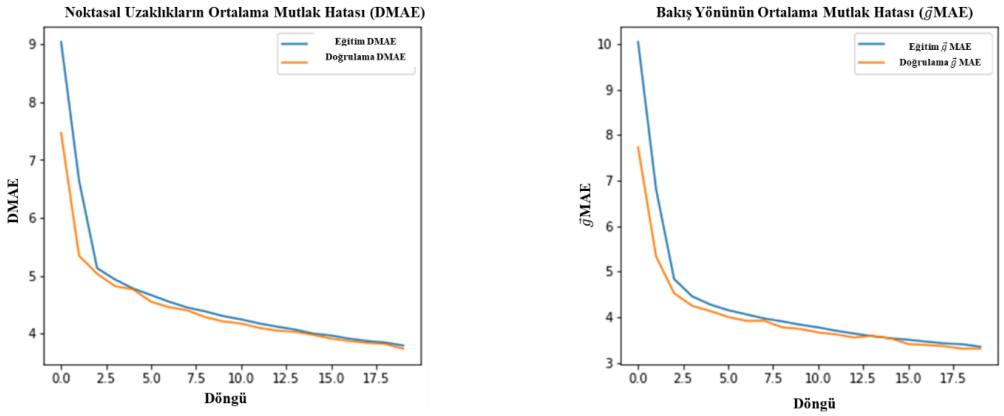
ColumbiaGaze (Smith ve ark., 2013), laboratuvar ortamında ve çene destekleriyle oluşturulmuş bir veri tabanıdır bu nedenle kafa ve göz açıları kontrollü ve belirli bir aralıktadır. ETH-XGaze (Zhang ve ark., 2020) veri tabanı geniş bir açı aralığına sahiptir ancak bu durum açısal hataları arttırabilir. Diğer veri tabanları ise çeşitli kafa ve göz açılarına sahiptir. Literatüre kazandırdığımız TrGaze24 veri tabanının açı aralıkları çok geniş olmasa da açısal hatalarının düşük olacağı dolayısıyla da eğitilmiş modelin tahminleme performansının yüksek olacağı varsayılmaktadır.

Kafaların ve gözlerin dikeyde (pitch) ve yatayda (yaw) yapmış olduğu açıların ısı haritasına ait grafikler diğer veri setleriyle birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Farklı veri tabanlarındaki kafaların ve gözlerin dikeyde (pitch) ve yatayda (yaw) yapmış olduğu açıların ısı haritası ve frekansları.

Yukarıdaki görselde yer alan karşılaştırmalı ısı haritaları, TrGaze24 veri setinin hem baş hem de göz açıları bakımından dengeli ve kontrollü bir dağılım sunduğunu ortaya koymaktadır. TrGaze24'te kafa pozisyonları genellikle merkezi ve dar bir aralıkta yoğunlaşırken, göz bakış açıları daha geniş bir spektruma yayılmıştır. Bu durum, veri setinin hem doğal baş pozisyonlarını koruyarak hem de çeşitli bakış yönlerini kapsayacak şekilde tasarlandığını göstermektedir. Veri setinin işlenmiş yapısı elde edildikten sonra evrişimli sinir ağı modelini tasarlanmıştır. Sağ ve sol göze ait 64x64 çözünürlükte göz imajları ile algılanan yüzün pozisyonuna ve gözlerin açılarına ait öznitelik bilgileri 11 adet numerik girdi olarak eğitime tabi tutulmuştur. Bakışların iki boyutlu düzlemdeki x ve y noktaları ile bakış yönünün açısal vektörü ise modelin çıktısını oluşturmaktadır. Modelin iki boyutlu düzlemdeki noktasal uzaklığın ve bakış yönünün açısal vektörünün performansını gösteren eğitimin ortalama mutlak hata grafikleri Şekil 9'da gösterilmektedir. Model 20 döngüde eğitilmiştir.



Şekil 9. Modelin eğitim ve doğrulama setlerinde noktasal uzaklıklarının ve bakış yönünün ortalama mutlak hata grafikleri.

Şekil 9'da modelin hem eğitim hem de doğrulama setlerinde noktasal uzaklıklarının ve bakış yönünün ortalama mutlak hata değerleri düzenli olarak azalmıştır, bu da modelin öğrenme kapasitesinin iyi olduğunu ve doğrulama setinde genelleme yeteneğinin yeterli olduğunu göstermektedir. Modelin noktasal uzaklıkları için ortalama mutlak hatası (DMAE) 3,7435 cm'dir. Modelin bakış vektörünün yönüne ait ortalama mutlak hatası ($\vec{g}\ MAE$) 3,3235 derecedir. Literatürde yer alan çalışmalarda geliştirilmiş modellerin noktasal ve açısal doğruluklarına ait bulguların karşılaştırması Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Önceki çalışmalarla karşılaştırma.

Referans	**Mimari**	**Veri Seti**	**Performans**
(Zhang ve ark., 2017)	CNN (Uzamsal)	EYEDIAP	DMAE:8,56 cm $\vec{g}\ MAE$:6◦
(Zhang ve ark., 2017)	CNN (Uzamsal)	MIIGaze	DMAE:4,2 cm $\vec{g}\ MAE$:4,8◦
(Palmero ve ark., 2018)	CNN (Çok Modlu Tekrarlayan)	MIIGaze	$\vec{g}\ MAE$:4,2◦
(Chong ve ark., 2018)	CNN (Çok Görevli)	EYEDIAP	$\vec{g}\ MAE$:6,4◦
(Lian ve ark., 2019)	CNN (Çok Görevli)	EYEDIAP	DMAE:3,87 cm $\vec{g}\ MAE$:4,8◦
(Mahanama ve ark., 2020)	Gaze-Net	MPIIGaze	$\vec{g}\ MAE$: 2,84◦
(Mahanama ve ark., 2020)	Gaze-Net	Columbia	$\vec{g}\ MAE$: 5,9◦
(X. Xu ve ark., 2024)	CMFS-Net	GazePC	DMAE:5,12 cm
(X. Xu ve ark., 2024)	CMFS-Net	TabletGaze	DMAE:2,67 cm
TrGaze24	**CNN (Çok Modlu)**	**TrGaze24**	**DMAE: 3,74 cm** **$\vec{g}\ MAE$: 3,32◦**

TrGaze24 veri setinden eğitilmiş modelin ortalama mutlak hatası noktasal uzaklıklar için 3,74 cm, bakış vektörü için ise 3,32 derece olarak hesaplanmıştır. Zhang ve ark. (2017) çalışmalarında EYEDIAP ve MPIIGaze veri setleri üzerinde çalışmışlardır. Görüntülerdeki piksel ve bölgeler arasındaki mekânsal (spatial) ilişkileri analiz eden bir uzamsal CNN modeli kullanmışlardır. Veri setlerindeki göz imajları 224x224 çözünürlükte alınmıştır ve sinir ağı mimarisinin performans değerlendirmesinde EYEDIAP veri seti için ortalama mutlak hata uzaklıklarda 8,56 cm açılarda ise 6 derecedir. MPIIGaze veri setinde ise ortalama mutlak hata uzaklıklarda 4,2cm açılarda ise 4,8 derecedir. Palmero ve ark. (2018)

çalışmalarında görüntü ve özellik girdileri kullanan çok modlu ve tekrarlayan bir CNN modeli geliştirmişlerdir. Modelin MPIIGaze veri seti üzerindeki açısal hatası 4,2 derecedir. Chong ve ark. (2018) çalışmalarında birden fazla görevi aynı anda çözmek için tasarlanmış çok modlu bir CNN modeli geliştirmişlerdir. Model ortak bir taban katmanı kullanarak görevler arasında bilgi paylaşır ve her görev için ayrı çıktı katmanlarına sahiptir. Modelin EYEDIAP veri seti üzerindeki açısal hatası 6,4 derecedir. Lian ve ark. (2019)'de çalışmalarında çok modlu bir CNN modeli geliştirmişler ve EYEDIAP veri tabanı üzerinde performans değerlendirmesi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre uzaklık hatası 3,87 cm, açısal hata 4,8 derecedir. Bir diğer mimari ise Gaze-Net modelidir, Mahanama ve ark. (2020) tarafından göz bölgesi görüntülerinden bakış yönünü tahmin etmek amacıyla geliştirilmiş bir capsule network mimarisidir. Model, geleneksel yöntemlere kıyasla nesnelerin poz ve yönelim bilgilerini daha iyi temsil ederek bakış yönü tahmininde yüksek doğruluk sağlar. İki aşamalı bir süreç izleyen Gaze-Net, önce bakış yönünü sınıflandırır, ardından kesin yön tahmini yapar. Modelin MPIIGaze veri setindeki ortalama mutlak hata değeri 2,84 derece, Columbia veri setinde ise 5,9 derece olarak elde edilmiş. CMFS-Net (Common Mode Features Suppression Network), Xu ve ark. (2024) tarafından bakış noktası tahmini için geliştirilmiş bir modeldir. Giriş ve referans görüntüleri arasındaki ortak mod özelliklerini bastırarak bakış sapmasını tahmin eder ve bir çeşit öklit mesafesi hesaplaması yapan Point-Mean algoritmasıyla bakış noktasını belirler. Modelin GazePC veri setindeki ortalama mutlak hata değeri 5,12 cm, TabletGaze veri setinde ise 2,67 cm olarak elde edilmiş.

Öte yandan Mahanama ve ark. (2020) araştırmalarında MPIIGaze ve Columbia veri setleri üzerinde çalışmışlardır. Gaze-Net adını verdikleri evrişimli sinir ağı mimarisinde model 100 döngüde çalıştırılmıştır. MPIIGaze veri setinde 2,84 derece, Columbia veri setinde ise 5,9 derecelik ortalama mutlak hatalar elde etmişlerdir. Bu sonuç oldukça etkilidir ancak eğitim sürecinde döngü sürecinin fazlalığı eğitim süresinin de uzaması anlamına gelir. Fiziksel olarak en çok kullanılan araçlardan Tobii göz takip cihazının da 0,5 derece ve 1 cm'lik bir hata payı vardır (Falch ve Lohan, 2024). Bu araştırmada 20 döngüde elde ettiğimiz 3,736 derecelik ortalama mutlak hata, mimarinin kısa sürede yüksek doğruluk verdiğini göstermektedir. TrGaze24 veri setinde elde ettiğimiz 3,74 cm'lik ve 3,32 derecelik ortalama mutlak hata değerleri literatürdeki örneklerine kıyasla oldukça iyi sonuçlardır. Öyle ki bu performans değerleri her biri ortalama 20 saniye süren 20 döngüde eğitilmiş bir modelden elde edilmiştir. Döngü sayısının arttırılması uzaklık ve açı hatasını daha da düşürecektir.

4. Sonuç

Bu araştırma iki ana yapı üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlardan ilki bir göz veri setinin oluşturulması, sağ ve sol gözlere ait imajların yüz görüntülerinden ayrıştırılması ile kafa ve gözlere ait açı özniteliklerinin çıkarılmasıdır. Diğeri ise oluşturulmuş veri setinden evrişimli sinir ağı modeli tasarlamaktır. Evrişimli sinir ağı modelinin noktasal ve açısal hataların ortaya çıkarılması sağlanarak performansı değerlendirilmiştir. Veri setini oluşturmak için araştırmaya 76 erkek ve 52 kadın olmak üzere toplam 128 üniversite öğrencisi gönüllü olarak katılmıştır. Laboratuvar ortamında toplanan göz verileri 25

noktalı bir düzlem üzerinde meydana gelen bakışlardan elde edilmiştir. Toplam 18410 adet sağ ve sol göz imajından oluşan göz veri seti kafa pozları ve göz pozlarına ait açılar ile yüzün imaj üzerindeki pozisyon bilgilerini içermektedir. TrGaze24 adını verdiğimiz göz veri setine ait kafa açı değerleri, laboratuvar ortamında oluşturulmuş EYEDIAP (Mora ve ark., 2012), ColumbiaGaze (Smith ve ark., 2013), UT Multiview (Sugano ve ark., 2014) veri setleriyle benzerlik gösterirken, GazeCapture (Krafka ve ark., 2016) ve MPIIGaze (Zhang ve ark., 2019) gibi günlük hayat ortamlarından oluşturulmuş veri setleriyle de benzerlik göstermektedir. Elde ettiğimiz veri setinin bir özelliği de hedef noktaların çokluğudur (25 adet). Bu denli fazla hedef noktaya sahip olan TabletGaze veri seti 35 adet hedef barındırmaktadır (Huang ve ark., 2016). Ancak onların katılımcı sayısı ise 51 kişi ile sınırlıdır. Veri seti oluşturma aşamasının ardından veri seti için evrişimli sinir ağı modeli oluşturulmuştur. 25 noktaya ait x ve y noktaları ile gözlerin ortak açı vektörünün ayrı çıktılar olarak kullanıldığı evrişimli sinir ağı mimarisinde sağ ve sol gözlere ait imajlar gri skalada ve 64x64 çözünürlükte iki adet girdi veri kümesini oluşturmuştur. Kafa açıları ve göz açılarının yanında yüzün 1024x768 çözünürlükteki görüntüsünün pozisyonları da sinir ağı mimarisinin girdilerini oluşturmuştur. Görüntü ve özellik girdilerini aynı anda girdi olarak kullanan çok modlu bir CNN mimarisi oluşturulmuştur. Veri setinin %80'i eğitim %20'si ise test ya da doğrulama için kullanılmıştır. 20 döngüde eğitilen modelin ortalama mutlak hatası noktasal uzaklıklar için 3,74cm açısal vektörler için 3,32 derece olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç literatürdeki çoğu yaklaşıma (Zhang ve ark., 2017; Chong ve ark., 2018; Palmero ve ark., 2018; Lian ve ark., 2019; Mahanama ve ark., 2020; Xu ve ark., 2024) kıyasla oldukça etkili ve düşük değerlerdir. Modelin döngü sayısının arttırılması hata değerlerini de düşürecektir. Gelecekte farklı yaklaşımlarla bu hatalar düşürülebilir. Veri setinin gelecekte daha da genişletilmesi ve farklı sinir ağı mimarileriyle doğruluğunun arttırılması hedeflenmektedir. Oluşturulmuş bu bakış izleme modelinin araştırmacılara gelecekte eğitim, psikoloji, reklamcılık ve sosyal bilimler çalışmalarında veri toplama aracı olarak destek olması planlanmaktadır. Model web kamerası yardımıyla bakış tahmini yapabilen bir sistemin çekirdeğini oluşturarak masaüstü ve web ortamlarına taşınabilir. Böylece göz izleme cihazlarının pahalı olması, tek seferde laboratuvar ortamında az sayıda kullanıcıyla çalışma kısıtlılıklarını ortadan kaldırarak yüksek doğruluklarda tahminlemeler gerçekleştirebilir.

Eğitim teknolojileri çalışmalarında çok modlu öğrenme analitikleri için göz verilerinin araştırmalara dahil edilmesi araştırmacılara gerçek zamanlı davranış verilerini sunmada etkili bir veri toplama yöntemi olabilir. Bakış takibi sistemleri için önerilen modeller öğrenme ortamlarında yalnızca öğrencilerin bakış yörüngesini doğru bir şekilde takip etmek ve bireysel olarak öğrencinin ve tüm öğrencilerin dikkat dalgalanmalarını etkili bir şekilde analiz etmekle kalmayıp, aynı zamanda öğrencilerin öğrenme sürecini değerlendirmek için değerli bir referans sağlar (Xu ve ark., 2023). Çok modlu öğrenme analitiklerinden olan bakış değerleri eğitim öğretim süreçleri esnasındaki gerçek durumları ortaya çıkararak bilişsel süreçlerin değerlendirilmesinde önemli rol oynayabilir. Araştırmada pahalı ve kullanılabilirliği kısıtlı bakış izleme yaklaşımlarına alternatif olabilecek maliyeti düşük ve tek seferde birçok öğrenciye sunulabilecek etkili olabilecek bir yöntem sunulmuştur.

Bu araştırmanın bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır. Model, laboratuvar ortamında toplanan verilerle eğitildiği için gerçek dünya koşullarında (örneğin sınıf içi gözlem, hareketli ortamlar, değişken ışık koşulları) performans farklılıkları gösterebilir. Ayrıca, veri seti yalnızca sabit konumlu bir kamerayla sınırlıdır; mobil cihazlar üzerindeki uygulamalarda genellenebilirliği test edilmemiştir. Gelecek çalışmalarda modelin sınıf içi eğitim ortamlarında, gerçek zamanlı uygulamalarda ve mobil cihazlar üzerinde test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, bireysel farklılıkların etkisini değerlendirmek üzere kişiselleştirilmiş modeller geliştirilebilir. TrGaze24 veri setinin kapsamı genişletilerek daha fazla yaş ve kültürel demografi içeren kullanıcılarla zenginleştirilmesi, modelin genellenebilirliğini artıracaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağladıklarını beyan ederler.

Etik Kurul

Bu araştırma sorumlu yazarın doktora tezinden üretilmiştir ve tezinin bir bölümünü oluşturan bu araştırma Bursa Uludağ Üniversitesi Araştırma ve Yayın Etik Kurulları (Sosyal ve Beşerî Bilimler Araştırma ve Yayın Etik Kurulu) 29 Kasım 2024 tarih, 2024-11 oturum ve Karar No 13 sayılı etik kurul raporu ile onaylanmıştır.

Kaynakça

Akinyelu AA., Blignaut P. Convolutional neural network-based methods for eye gaze estimation: a survey. IEEE Access 2020; 8: 581-605. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013540

Altan T., Çağiltay K. An eye-tracking analysis of spatial contiguity effect in educational animations. Learning and Collaboration Technologies: Second International Conference 2023; 3-13, Los Angeles, CA, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20609-7_1

Baluja S., Pomerleau D. Non-intrusive gaze tracking using artificial neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems 1993; 753-760.

Bondareva D., Conati C., Feyzi-Behnagh R., Harley JM., Azevedo R., Bouchet F. Inferring learning from gaze data during interaction with an environment to support self-regulated learning. In: H. C. Lane, K. Yacef, J. Mostow, P. Pavlik (Ed.), Artificial intelligence in education. Springer 2013; 229-238. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39112-5_24

Buswell GT. How people look at pictures: a study of the psychology and perception in art. Univ Chicago Press 1935.

Chennamma HR., Yuan X. A survey on eye-gaze tracking techniques. arXiv preprint arXiv:1312.6410, 2013; https://doi.org/10.48550/arXiv.1312.6410

Chong E., Ruiz N., Wang Y., Zhang Y., Rozga A., Rehg JM. Connecting gaze, scene, and attention: generalized attention estimation via joint modelling of gaze and scene saliency. In Proceedings of the European conference on Computer Vision 2018; 383-398. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01228-1_24/FIGURES/7

Crescenzi-Lanna L. Multimodal learning analytics research with young children: a systematic review. British Journal of Educational Technology 2020; 51(5): 1485-1504. https://doi.org/10.1111/BJET.12959

Davis EK. dlib Library 2015; https://github.com/davisking/dlib. (Erişim tarihi: 11 Ekim 2024).

Delabarre EB. A method of recording eye-movements. The American Journal of Psychology 1898; 9(4): 572-574. https://doi.org/10.2307/1412191

Demjén E., Aboši V., Tomori Z. Eye tracking using artificial neural networks for human computer interaction. Physiological Research 2011; 60(5): 841-844. https://doi.org/10.33549/physiolres.932117

Duchowski AT. Eye tracking methodology: Theory and practice. Springer International Publishing 2017.

Falch L., Lohan KS. Webcam-based gaze estimation for computer screen interaction. Frontiers in Robotics and AI 2024; 11. https://doi.org/10.3389/FROBT.2024.1369566/BIBTEX

Fischer T., Chang HJ., Demiris Y. RT-GENE: Real-time eye gaze estimation in natural environments. In: Proceedings of the European Conference on Computer Vision 2018; 334-352. https://openaccess.thecvf.com/content_ECCV_2018/html/Tobias_Fischer_RT-GENE_Real-Time_Eye_ECCV_2018_paper.html

Frischen A., Bayliss AP., Tipper SP. Gaze cueing of attention: visual attention, social cognition, and individual differences. Psychological Bulletin 2007; 133(4): 694-724. https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.4.694

Ghosh S., Dhall A., Hayat M., Knibbe J., Ji Q. automatic gaze analysis: a survey of deep learning-based approaches. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2024; 46(1): 61-84. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2023.3321337

Goldberg JH., Stimson MJ., Lewenstein M., Scott N., Wichansky AM. Eye tracking in web search tasks: design implications. Proceedings of the 2002 Symposium on Eye Tracking Research & Applications 2002; 51-58. https://doi.org/10.1145/507072.507082

google-ai-edge/mediapipe. GitHub- google-ai-edge/mediapipe: Cross-platform, customizable ml solutions for live and streaming media 2020; https://github.com/google-ai-edge/mediapipe. (Erişim tarihi: 11 Ekim 2024)

Greene HH., Rayner K. Eye movements and familiarity effects in visual search. Vision Research 2001; 41(27): 3763-3773. https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00154-7

Grillon H., Françoise R., Bruno H., Daniel T. Use of virtual reality as therapeutic tool for behavioural exposure in the ambit of social. In International Conference Series on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies 2006.

Hansen DW., Ji Q. In the eye of the beholder: a survey of models for eyes and gaze. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2010; 32(3): 478-500. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.30

Huang Q., Veeraraghavan A., Sabharwal A. TabletGaze: unconstrained appearance-based gaze estimation in mobile tablets. arXiv 2016; https://doi.org/10.48550/arXiv.1508.01244

Huey EB. Preliminary experiments in the physiology and psychology of reading. The American Journal of Psychology 1898; 9(4): 575-586. https://doi.org/10.2307/1412192

Iannizzotto G., La Rosa F. Competitive combination of multiple eye detection and tracking techniques. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2011; 58(8): 3151-3159. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2102314

Jacob RJK. What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems 1990; 11-18. https://doi.org/10.1145/97243.97246

Jongerius C., Callemein T., Goedemé T., Van Beeck K., Romijn JA., Smets EMA., Hillen MA. Eye-tracking glasses in face-to-face interactions: manual versus automated assessment of areas-of-interest. Behavior Research Methods 2021; 53(5): 2037-2048. https://doi.org/10.3758/s13428-021-01544-2

Jabbarlı G., Kurt M. LightFFDNets: Lightweight convolutional neural networks for rapid facial forgery detection. arXiv 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.11826

Just MA., Carpenter PA. Eye fixations and cognitive processes. Cognitive Psychology 1976; 8(4): 441-480. https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3

Kazemi V., Sullivan J. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2014; 1867-1874. https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.241

Kellnhofer P., Recasens A., Stent S., Matusik W., Torralba A. Gaze360: Physically unconstrained gaze estimation in the wild. arXiv 2019; https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.10088

Krafka K., Khosla A., Kellnhofer P., Kannan H., Bhandarkar S., Matusik W., Torralba A. Eye tracking for everyone. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2016; 2176-2184. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.239

Lian D., Zhang Z., Luo W., Hu L., Wu M., Li Z., Yu J., Gao S. RGBD based gaze estimation via multi-task cnn. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence 2019; 33(01): 2488-2495. https://doi.org/10.1609/AAAI.V33I01.33012488

Liu J., Chi J., Yang H., Yin X. In the eye of the beholder: a survey of gaze tracking techniques. Pattern Recognition 2022; 132: 108944. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.108944

Lopes A., Ward AD., Cecchini M. Eye tracking in digital pathology: a comprehensive literature review. Journal of Pathology Informatics 2024; 15: 100383. https://doi.org/10.1016/J.JPI.2024.100383

Lu F., Chen X., Sato Y. Appearance-based gaze estimation via uncalibrated gaze pattern recovery. IEEE Transactions on Image Processing 2017; 26(4): 1543-1553. https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2657880

Lu F., Okabe T., Sugano Y., Sato Y. A head pose-free approach for appearance-based gaze estimation. Procedings of the British Machine Vision Conference 2011; 126: 1-11. https://doi.org/10.5244/C.25.126

Lu F., Okabe T., Sugano Y., Sato Y. Learning gaze biases with head motion for head pose-free gaze estimation. Image and Vision Computing 2014; 32(3): 169-179. https://doi.org/10.1016/j.imavis.2014.01.005

Lu F., Sugano Y., Okabe T., Sato Y. Head pose-free appearance-based gaze sensing via eye image synthesis. Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition 2012; 1008-1011. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6460306

Mahanama B., Jayawardana Y., Jayarathna S. Gaze-Net: Appearance-based gaze estimation using capsule networks. In Proceedings of the 11th Augmented Human International Conference 2020; 1-14. https://doi.org/10.1145/3396339.3396393

Majaranta P., Räihä KJ. Twenty years of eye typing: systems and design issues. In Proceedings of the 2002 Symposium on Eye Tracking Research & Applications 2002; 15-22. https://doi.org/10.1145/507072.507076

Mora KAF., Odobez JM. Gaze estimation from multimodal kinect data. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2012; 25-30. https://doi.org/10.1109/CVPRW.2012.6239182

Orozco J., Roca FX., Gonzàlez J. Real-time gaze tracking with appearance-based models. Machine Vision and Applications 2009; 20(6): 353-364. https://doi.org/10.1007/s00138-008-0130-6

Palmero C., Selva J., Bagheri MA., Escalera S. Recurrent CNN for 3D Gaze estimation using appearance and shape cues. British Machine Vision Conference 2018; https://arxiv.org/abs/1805.03064v3

Park S., Aksan E., Zhang X., Hilliges O. Towards end-to-end video-based eye-tracking. In: Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference 2020; 747-763. Glasgow, UK. https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.13120

Pathirana P., Senarath S., Meedeniya D., Jayarathna S. Eye gaze estimation: a survey on deep learning-based approaches. Expert Systems with Applications 2022; 199: 116894. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.116894

Porta M., Ricotti S., Perez CJ. Emotional e-learning through eye tracking. Proceedings of the 2012 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON) 2012; 1-6. https://doi.org/10.1109/EDUCON.2012.6201145

Radach R., Hyona J., Deubel H. The mind's eye: cognitive and applied aspects of eye movement research. Elsevier 2003.

Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. Psychological Bulletin 1998; 124(3): 372-422. https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372

Rayner K., Rotello CM., Stewart AJ., Keir J., Duffy SA. Integrating text and pictorial information: eye movements when looking at print advertisements. Journal of Experimental Psychology: Applied 2001; 7(3):219-226. https://doi.org/10.1037/1076-898X.7.3.219

Reale M., Hung T., Yin L. Pointing with the eyes: gaze estimation using a static/active camera system and 3d iris disk model. 2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2010; 280-285. https://doi.org/10.1109/ICME.2010.5583014

Rikert TD., Jones J. Gaze estimation using morphable models. Proceedings Third IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition 1998; 436-441. https://doi.org/10.1109/AFGR.1998.670987

Sağlam Z., Yilmaz FGK. Eğitim araştırmalarında göz izleme: araştırmalardaki eğilimlerin belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi 2021; 41(3): 1621-1649. https://dergipark.org.tr/en/pub/gefad/issue/67470/892733

Saxena S., Fink LK., Lange EB. Deep learning models for webcam eye tracking in online experiments. Behavior Research Methods 2023; 56: 3487–3503. https://doi.org/10.3758/s13428-023-02190-6

Sewell W., Komogortsev O. Real-time eye gaze tracking with an unmodified commodity webcam employing a neural network. CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems 2010; 3739-3744. https://doi.org/10.1145/1753846.1754048

Sharma K., Giannakos M., Dillenbourg P. Eye-tracking and artificial intelligence to enhance motivation and learning. Smart Learning Environments 2020; 7(1): 13. https://doi.org/10.1186/s40561-020-00122-x

Sigut J., Sidha SA. Iris center corneal reflection method for gaze tracking using visible light. IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2011; 58(2): 411-419. https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2087330

Smith BA., Yin Q., Feiner SK., Nayar SK. Gaze locking: passive eye contact detection for human-object interaction. Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology 2013; 271-280. https://doi.org/10.1145/2501988.2501994

Snodderly DM., Kagan I., Gur M. Selective activation of visual cortex neurons by fixational eye movements: implications for neural coding. Visual Neuroscience 2001; 18(2): 259-277. https://doi.org/10.1017/S0952523801182118

Sugano Y., Matsushita Y., Sato Y. Appearance-based gaze estimation using visual saliency. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2013; 35(2): 329-341. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.101

Sugano Y., Matsushita Y., Sato Y. Learning-by-synthesis for appearance-based 3d gaze estimation. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2014; 1821-1828.

Taba IB. Improving eye-gaze tracking accuracy through personalized calibration of a user's aspherical corneal model. University of British Columbia. PhD Thesis. 2012; 122. https://doi.org/10.14288/1.0072558

Tan KH., Kriegman DJ., Ahuja N. Appearance-based eye gaze estimation. Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision 2002; 191-195. https://doi.org/10.1109/ACV.2002.1182180

Tinker MA. Eye movements in reading. The Journal of Educational Research 1936; 30(4): 241-277. https://www.jstor.org/stable/27526226

Torricelli D., Conforto S., Schmid M., D'Alessio T. A neural-based remote eye gaze tracker under natural head motion. Computer Methods and Programs in Biomedicine 2008; 92(1): 66-78. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2008.06.008

Viola P., Jones MJ. Robust real-time face detection. International Journal of Computer Vision 2004; 57(2): 137-154. https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb

Xu H., Zhang J., Sun H., Qi M., Kong J. Analyzing students' attention by gaze tracking and object detection in classroom teaching. Data Technologies and Applications 2023; 57(5): 643-667. https://doi.org/10.1108/DTA-09-2021-0236/FULL/PDF

Xu X., Chen J., Li C., Fu C., Yang L., Yan Y., Lyu Z. Robust gaze point estimation for metaverse with common mode features suppression network. IEEE Transactions on Consumer Electronics 2024; 70(1): 2090-2098. https://doi.org/10.1109/TCE.2024.3351190

Yang XH., Sun JD., Liu J., Li XC., Yang CX., Liu W. A remote gaze tracking system using gray-distribution-based video processing. Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications 2012; 24(03): 217-227. https://doi.org/10.4015/S1016237212500044

Yecan E., Çağiltay K. Cognitive styles and students' interaction with an instructional website: tracing users through eye-gaze. In Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies 2006; 340-342. https://doi.org/10.1109/ICALT.2006.1652438

Zhang X., Park S., Beeler T., Bradley D., Tang S., Hilliges O. ETH-XGaze: A large-scale dataset for gaze estimation under extreme head pose and gaze variation. arXiv 2020; 365-381. https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.15837

Zhang X., Sugano Y., Fritz M., Bulling A. Appearance-based gaze estimation in the wild. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2015; 4511-4520.

Zhang X., Sugano Y., Fritz M., Bulling A. It's written all over your face: full-face appearance-based gaze estimation. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops 2017; 51-60.

Zhang X., Sugano Y., Fritz M., Bulling A. MPIIGaze: real-world dataset and deep appearance-based gaze estimation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2019; 41(1): 162-175. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2778103.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 55-74, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 55-74, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Glioksilik Asit'in, Toksik Gösterge Parametreleri Kullanılarak İn Vivo Etkilerinin Araştırılması

Aytül UZUN AKGEYİK[1*]

[1]Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 66000,Yozgat

[1]https://orcid.org/ 0000-0002-5602-0524
*Sorumlu yazar: aytul.uzun@yobu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 25.03.2025
Kabul tarihi:06.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Glioksilik asit
Allium cepa L.
Klastojenik etki
Mikronükleus

ÖZ

Bu çalışmada, parfüm, gıda ve ilaç endüstrilerinde yaygın kullanılan glikoksilik asidin (GA) toksisitesi, *Allium cepa* L. testi kullanılarak değerlendirilmiştir. Toksisitesi değerlendirilirken fizyolojik parametreler açısından kök uzunlukları, ağırlık artışları ve çimlenme yüzdelerine, sitogenetik parametreler açısından mitotik indeks (Mİ), mikronükleus (MN) oranı ve kromozom hasarların oluşumuna, anatomik parametreler açısından ise meydana gelen anatomik farklılıklar belirlenerek elde edilen veriler istatistiksel açıdan değerlendirilmiştir. Bu kapsamında soğan yumruları birbirine yakın ağırlıkta olmak üzere biri kontrol ve beşi uygulama grubu olarak ayrılmıştır. Kontrol de bulunan *A.cepa* yumruları distile su ile işleme tabi tutulurken, deney gruplarındaki soğanlar 10, 25, 50, 100 ve 250 ppm GA konsantrasyonlarıyla 20˚C sıcaklıkta karanlık bir ortamda 72 saat boyunca bekletilmiştir. Araştırma sonucunda, kontrol grubuna kıyasla GA uygulanmış gruplarda kök uzunluğu, ağırlık artışı ve çimlenme yüzdesi oranlarında azalış, yine Mİ oranınında da azalış olduğu tespit edilirken; sitogenetik parametrelerden kromozomal anormalliklerin ve MN sıklığının uygulama doz miktarının artmasıyla istatistiksel açıdan arttığı belirlenmiştir. GA uygulamasına bağlı olarak kök hücrelerinde fragment oluşumu, eşit olmayan kromatin dağılımı, vagrant kromozom, yapışık kromozom, c-mitoz ve kromozom köprüleri gibi kromozomal hasarlar belirlenmiştir. Anatomik hasarlar bakımından; kontrol grubu ile karşılaştırıldığında GA kök ucu hücrelerinde hücre deformasyonu, yassılaşmış hücre çekirdekleri, nekroz, korteks hücre deformasyonu, korteks hücrelerinde GA birikimi, korteks hücre duvarlarında kalınlaşma ve belirsiz vasküler doku gibi anatomik değişimlere neden olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra, anatomik hasarın derecesinin uygulanan doz miktarı arttıkça yükseldiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, fizyolojik, anatomik ve sitogenetik parametreler kullanılarak glikoksilik asitin *A. cepa* kök ucu hücrelerinde doz bağımlı toksik etki gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 100 ve 250 ppm gibi yüksek uygulama dozlarına ulaşıldığında, ciddi toksisiteye neden olabileceği belirlenmiş ve MN sıklığı dikkate alınarak değerlendirilen etkiler, klastojenik etkinin varlığını göstererek genotoksik hasar açısından önemli bir bulgu olarak kabul edilmiştir.

Investigation of the In Vivo Effects of Glyoxylic Acid Using Toxic Indicator Parameters

Research Article

Article History:
Received: 25.03.2025
Accepted: 06.07.2025
Published online: 13.01.2026

Keywords:
Glyoxylic acid
Allium cepa L.

ABSTRACT

In this study, the toxicity of glyoxylic acid (GA), which is widely used in the perfume, food, and pharmaceutical industries, was evaluated using the *Allium cepa* L. test. The assessment of toxicity was conducted by analyzing physiological parameters such as root length, weight gain, and germination percentage; cytogenetic parameters including mitotic index (MI), micronucleus (MN) frequency, and chromosomal damage; and anatomical parameters by identifying anatomical alterations. The obtained data were statistically

Clastogenic effect
Micronucleus

analyzed.For this purpose, onion bulbs of similar weight were divided into six groups: one control and five treatment groups. The *A. cepa* bulbs in the control group were treated with distilled water, while those in the experimental groups were exposed to GA at concentrations of 10, 25, 50, 100, and 250 ppm in a dark environment at 20˚C for 72 hours. As a result of the study, compared to the control group, a decrease was observed in root length, weight gain, and germination percentage, as well as in the mitotic index in the GA-treated groups. Furthermore, among the cytogenetic parameters, the frequency of chromosomal abnormalities and micronuclei (MN) increased statistically in correlation with the applied dose. Chromosomal damage, including fragment formation, unequal chromatin distribution, vagrant chromosomes, sticky chromosomes, C-mitosis, and chromosome bridges, was identified in root cells exposed to GA. In terms of anatomical damage, compared to the control group, GA treatment led to cell deformation, flattened nuclei, necrosis, cortical cell deformation, GA accumulation in cortical cells, thickened cortical cell walls, and indistinct vascular tissue in root tip cells. Furthermore, the severity of anatomical damage was found to increase proportionally with higher GA doses. In conclusion, glyoxylic acid exhibited a dose-dependent toxic effect on *A. cepa* root tip cells. Severe toxicity was evident at 100 ppm and 250 ppm. The increase in MN size confirmed the presence of clastogenic activity, highlighting its genotoxic potential.

To Cite: Uzun Akgeyik A. Glioksilik Asit'in, Toksik Gösterge Parametreleri Kullanılarak İn Vivo Etkilerinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 55-74.

1. Giriş

Glioksilik asit (glikoksilik asit veya oksoasetik asit olarak da bilinir), hem bir aldehit (-CHO) hem de bir karboksilik asit (-COOH) fonksiyonel grubu içeren, oldukça reaktif bir organik asittir. Bu çift fonksiyonel yapısı, onu organik sentezlerde çok yönlü bir reaktif yapar. Moleküler Formülü $C_2H_2O_3$ olan moleküler ağırlığı ise 74,035 g/mol dür. Glioksilik asit (GA) ilk olarak 1856 yılında Debus tarafından keşfedilmiştir (Debus, 1857).

Glioksilik asit, bifonksiyonel yapısı sayesinde organik sentezlerde yaygın olarak kullanılan önemli bir aldo-asittir. Örneğin, β-laktam antibiyotikleri (metisilin, oksasilin ve nafasilin) (Sidorenko ve Yakovlev, 1997; Bruggink, 2001), anti-enflamatuar ajanlar (allantoin) ve antihipertansif ajanlar (atenolol) gibi farmasötik ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır. GA'dan sentezlenen önemli bir ürün de vanilin olup, parfüm, gıda ve ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, agrokimyada (glifosat üretimi) da GA'nın kullanım alanı bulunmaktadır (Pozdniakov ve ark., 2019).

GA'dan elde edilen bileşikler arasında en çok talep görenler allantoin ve vanilin olup, 2017 yılında toplam asit tüketiminin %30'undan fazlası bu ürünlerin üretimi için kullanılmıştır. Küresel tahminlere göre, önümüzdeki beş yıl içinde GA pazarında yıllık ortalama %5,27 büyüme beklenmektedir.

2016 yılında 76,7 milyon dolar olan GA küresel pazarının, 2023 yılı sonuna kadar 849,1 milyon dolara ulaşması öngörülmektedir (Pozdniakov ve ark., 2019). Glioksilik asit, uçucu organik bir bileşik olup, akrolein, akrilik asit, maleik asit ve sinnamik asidin ozonolizi sonucu oluşmaktadır (Grosjean ve ark., 1994). Akrilik asit ve akrolein, insan sağlığı ve ekosistemler açısından en tehlikeli bileşiklerden bazıları olarak sınıflandırılmaktadır (ABD Çevre Koruma Ajansı, 1990; ABD Çevre Koruma Ajansı, 1994). Her ikisi de yıllık üretimi 1 milyon poundu aşan yüksek üretim hacmine sahip kimyasallar arasındadır (ABD Çevre Koruma Ajansı, 1990).

Bitkilerde ve canlı organizmalarda glioksilik asit, glikolik asidin oksidasyonu, glisinin deaminasyonu veya Krebs döngüsündeki trikarboksilik asitlerin metabolizması sonucunda oluşur; ayrıca doğada olgunlaşmamış meyvelerde bulunur. Hayvan ve insan vücudunda GA, birçok metabolik sürecin bir bileşeni, amino asit değişiminin aktif bir katılımcısı ve bakteri, mantar ve bitkilerin yağ asitlerini karbonhidratlara dönüştürmesini sağlayan gloksilat döngüsünün bir ara ürünü olarak işlev görür (Pozdniakov ve ark., 2019).

Anderson ve ark., (2008) yaptıkları hayvan deneylerinde farelerin cildine oldukça yüksek dozda glioksilik asit uygulanması sonucu, kombine lenf nodu analizi (LLNA) kullanılarak bir duyarlılık oluşturucu olarak tanımlanmıştır. Fenotipik analiz sonuçları, glioksilik asidin T hücre aracılı bir duyarlılık oluşturucu olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Robert ve ark., (2024) son zamanlarda, saç düzleştirme işlemi sonrasında üç ardışık akut böbrek yetmezliği geçiren bir hasta vakasını raporlamışlardır. Düzleştirme işlemi için kullanılan kremde glikoksilik asit olduğu tespit etmişlerdir. Böbrek hasarına yol açan olası altta yatan mekanizmaları incelemek amacıyla, dört grup fareye (i) düzleştirme ürününü, (ii) %10 glikoksilik asit içeren bir krem, (iii) %10 glikolik asit içeren bir krem ve (iv) kontrol kremi uygulandı. Glikolik asit uygulaması idrar oksalat atılımını hafifçe artırırken, glikoksilik asit ve düzleştirme ürününün, idrar oksalat atılımını dramatik şekilde artırarak deriden emilim sonrasında kalsiyum oksalat nefropatisine yol açtığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, glikoksilik asit muhtemelen cilt yoluyla emildiğini, oksalata metabolize olduğunu ve idrarda kalsiyum oksalat kristalleşmesini teşvik ettiğini tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, glikoksilik asit içeren kozmetik ürünlerin akut böbrek hasarına neden olabileceği ve bu ürünlerin kullanımının durdurulması gerektiği bildirilmiştir.

Allium cepa L. testi, sahip olduğu düşük kromozom sayısı (2n = 16) ve büyük hücresel yapısı nedeniyle, kromozomal hasarların ve mitotik döngüdeki değişimlerin incelenmesi açısından önemli bir model organizma olarak kabul edilmektedir. Kromozomal değişimlerin analizi, yapısal anomalilerin belirlenmesine olanak sağlarken, aynı zamanda kromozomlarda meydana gelen sayısal değişikliklerin de tespit edilmesine imkân tanımaktadır. Bu test sistemi; düşük maliyetli oluşu, birden fazla kök geliştirebilme yeteneği, kısa sürede sonuç vermesi ve uygulanabilirliği gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, çekirdek yapısının ve hücresel anormalliklerin mikroskobik olarak kolaylıkla gözlemlenebilmesi, araştırmalarda tercih edilme nedenleri arasındadır (Fiskesjö, 1985).

Bu çalışmanın amacı, günümüzde pek çok alanda kullanılan glioksilik asitin in vivo koşullar altında *Allium cepa* testi kullanılarak değişen konsantrasyonlardaki toksik etki ve seviyesini anatomik, fizyolojik ve sitogenetik parametrelerle gösterebilmektir. Bu çalışma kapsamında glioksilik asit uygulanmış soğanlarda fizyolojik olarak kök uzunluğu, çimlenme yüzdesi, ağırlık kazanımı, sitogenetik açıdan MN sıklığı, Mİ, kromozomal anormallikler ve anatomik hasarlar açısından incelenmiştir. Ayrıca bu kapsamda bahsedilen tüm bu parametrelerle glioksilik asit'in toksik etkileri *A.cepa* 'da ilk kez incelenmiştir.

2.Materyal ve Metot

2.1. A. cepa 'da Doz Uygulama ve Fizyolojik Değişim Parametrelerin Belirlenmesi

Bu çalışmada kullanılan *A.cepa* soğanları, Yozgat'ta bulunan yerel bir satıcıdan temin edilmiştir. Glioksilik asit monohidrattan (Sigma –Aldrich, CAS Numarası: 563-96-2) 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 100 pmm ve 250 ppm glioksilik asit içerecek şekilde çalışma dozları hazırlanmıştır. Yapılan araştırmada *A. cepa* yumruları yaklaşık eşit büyüklükte ve sağlıklı olanları seçilerek kullanılmıştır. Soğanlar beş gruba ayrılmıştır: Grup I kontrol grubu, diğer dört grup ise uygulama gruplarıdır. Soğanlar, plastik kaplara yerleştirilmiş ve 72 saat süreyle 20 ˚C'de bir etüvde karanlık ortamda çimlenmeye bırakılmıştır. Uygulama süresi boyunca kontrol grubundaki soğanlar distile su ile, uygulama gruplarındaki soğanlar ise sırasıyla 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 100 pmm ve 250 ppm'lik dozlarda glioksilik asit ile muamele edilmiştir. Çimlenme sonucunda kök uçları mm cinsinden ölçülmüştür. Ayrıca ağırlık kazanımları hassas terazi ile ölçülerek (g/fide) belirlenmiştir. Ağırlık kazanımı, doz uygulama öncesi ve sonrası alınan ölçümler ile belirlenmiştir. Yapılan çimlenme deneyleri üç tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çimlenme yüzdeleri için aşağıdaki eşitlik (1) kullanılmıştır.

$$\text{Çimlenme Yüzdesi \%} = \left(\frac{\text{Çimlenen Tohum Sayısı}}{\text{Toplam Tohum sayısı}}\right) \text{x}100 \qquad (1)$$

2.2. Anatomik Değişim Parametreleri Belirlenmesi

Allium cepa L. kök ucu meristematik hücrelerindeki anatomik hasarları tespit etmek için kök uçları distile su ile kimyasaldan arındırılarak enine kesitler hazırlanmıştır ardından %1'lik metilen mavisi ile renklendirilmiştir. Boyanan örnekler binoküler araştırma mikroskobunda (Olympus, BX43, dijital kamera (Olympus, SC50)), 400X büyütme altında incelenmiştir (Macar ve ark., 2024). Glioksilik asitin neden olduğu meristematik hücre hasarının şiddeti aşağıdaki gibi derecelendirilmiştir: (-): hasar yok, (+): hafif hasar, (++): orta derecede hasar, (+++): yoğun hasar.

2.3. Sitogenetik Değişim Parametrelerinin Belirlenmesi

Kromozomal hasarlar ile MN ve Mİ çalışmalarını gerçekleştirmek amacıyla, çimlenmiş kök uçları yaklaşık 1 cm uzunlukta kesilerek alınmıştır. Kesilen kök uçları sitogenetik analizler için iki hazırlanan 3: glasiyel asetik asit 1: distile su içerisinde (Klarke fiksatörü) sabitlendi, %96'lık etanolde 15 dakika yıkanmıştır. Uygulamada kullanılacak zamana kadar %70'lik etanolde, +4 °C'de saklanmıştır. Kök uçlarının hidroliz işlemi için 1N HCI'de 60°C'de, 17 dakika inkübe edilmiştir. Daha sonra %45'lik CH_3COOH'de (asetik asit) 30 dakika tutulup, 24 saat asetokarmin de bekletildi. 1 damla %45'lik CH_3COOH damlatılarak kök uçları ezildi ve binoküler araştırma mikroskobu yardımıyla mitotik anormallikler fotoğraflanmıştır (400X) (Staykova ve ark., 2005).

Çalışmadaki MN tespiti için, Fenech ve ark., (2003) tarafından belirlenen kriterler esas alınarak tespit edilmiştir. Bu kriterlere göre; (i)-MN asetokarmin ile boyandığında ana hücre çekirdeğine teması

olmamalı, temas durumunda aralarındaki sınır ayırt edilebilir durumda olmalı, (ii)-MN ana çekirdeğin en fazla üç'te bir oranında olmalı, (iii)-MN yuvarlak bir görünüme sahip olmalıdır.

Belirtilen parametrelerle hazırlanan lam-lamel arasındaki örnekler, Mİ oranını belirlemek için binoküler araştırma mikroskobunda incelendi. Hücrelerin proliferasyon (çoğalma) hızını belirlemek için kullanılan Mİ yüzdesi eşitlik (2)'de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Bu amaçla, her bir kök ucundan 1000 hücre olmak üzere toplamda 10.000 hücre sayılmış ve oran yüzdelik olarak belirlenmiştir (Fiskesjö, 1985).

$$\text{Mitotik İndeks } \% = \left(\frac{\text{Bölünen Hücre Sayısı (N')}}{\text{Analiz Edilen Toplam Hücre Sayısı}}\right) \text{x}100 \qquad (2)$$

2.4. İstatistiksel Değerlendirme

Uygulama sonrası elde edilen verilerin analizi, SPSS istatistik V 23,0 (IBM Corp., ABD, 2015) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışılan gruplardaki istatistiksel farklılıklar, Tek Yönlü ANOVA ve Duncan testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Veriler, ortalama ± SS şeklinde ifade edilmiş olup, P değeri 0,05'in altında olduğunda istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Glioksilik Asitin Fizyolojik Etkileri

Allium cepa L. 'nin kök büyümesi üzerindeki glioksilik asitin etkileri, konsantrasyon ve uygulama süresine bağlı olarak değişmiştir (Şekil 1, 2). Yapılan çalışmalar, aşırı dozdaki glioksilik asitin kök uzamasını engellediğini ve morfolojik değişikliklere neden olduğunu ortaya koymuştur. 10 ppm glioksilik asitin, tüm uygulama süresi boyunca kök büyümesi üzerinde kök uzunluğu açısından azalma eğilimde bir etki yaptığı gözlenmiştir. Glioksilik asitin, 25 ppm konsantrasyonun da kök büyümesini önemli ölçüde inhibe etmiştir ($p<0,05$). 50 ppm ve 100pmm'lik glioksilik asitin konsantrasyonunda, uygulamanın 24. saatinden sonra belirgin toksik etkiler ortaya çıkmış ve glioksilik asit kök büyümesini önemli ölçüde engellemiştir ($p<0,05$). 250 ppm glioksilik asit seviyesinde, 24. saat haricinde kalan tüm uygulama süresi boyunca kök büyümesi gözlemlenmemiştir (Şekil 2).

Glioksilik asitin kök morfolojisi üzerindeki etkileri de farklı dozlardaki glioksilik asit konsantrasyonlarına göre değişiklik göstermiştir. 25 ppm GA seviyesinde, 48 saatlik uygulama sonrasında kök uçları bodurlaşmış ve hafifçe bükülmüştür. 50 ppm GA seviyesinde ise hem kök uçlarında bodurlaşma hem de kök sayısında azalma gözlenmiştir. 100 ppm GA seviyesinde, 24 saatlik uygulamanın ardından kök uçları ciddi şekilde bodurlaşmış ve farklı yönlere bükülmüştür. 250 ppm glioksilik asitin seviyesinde ise kök uçlarının ciddi şekilde bozulduğu ve uzamanın minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1).

Glioksilik asitin uygulama sonrası 72. saatteki kök uzunluğuna (cm) etkisi Tablo 1'de verilmiştir. GA 'nın kök uzunluğu üzerinde inhibe edici etkisi uygulama dozunun artışıyla birlikte kök uzunluğunun

azaldığının tespiti yapılmıştır. Grupların ortalama kök uzunlukları Grup I'de 8,82±1,41 cm, Grup II'de 4,02±0,85 cm, Grup III'te 2,97±0,07 cm, Grup IV'te 1,69±0,43 cm, Grup V'te 0,41±0,73 cm ve Grup VI'da 0,22±1,22 cm olarak ölçülmüştür. Kontrol grubunda yapılan ölçümler de maksimum kök uzunluğu varlığı belirlenirken, 250 ppm glioksilik asit dozu ile muamele edilen Grup VI'da kök uzunluğunun minimum seviyede olduğu tespit edilmiştir. Fan ve ark., (2021) inhibitör bileşiklerin, kimyasalların ve metal iyonlarının bitki kökleri tarafından su ve mineral madde alımını engellediğini bildirilmiştir.

Tablo 1. Glioksilik asit uygulamasının 72 saat sonrasında kök uzunluğuna (cm) etkisi.

Gruplar	Minimum	Maximum	Ortalama
Grup I	7,39	9,68	$8,82\pm1,41^{a*}$
Grup II	3,89	4,79	$4,02\pm0,85^{b*}$
Grup III	2,34	3,62	$2,97\pm1,07^{c*}$
Grup IV	1,08	2,09	$1,69\pm0,43^{d*}$
Grup V	0,2	0,6	$0,41\pm0,73^{e*}$
Grup VI	0,1	0,3	$0,22\pm1,22^{f*}$

Grup I: Kontrol (distile su), Grup II: 10 ppm, Grup III: 25 ppm, Grup IV: 50 ppm, Grup V: 100 ppm, Grup VI: 250 ppm * Veriler ortalama ± SS olarak gösterildi (n = 10). Ortalamalardaki istatistiksel fark için "Ducan" testi kullanıldı ve "one-way" varyans analizi kullanılarak saptandı. Aynı sütunda bulunan, farklı harfler ile belirtilen ortalamalar istatistiksel açıdan önemi ($P<0,05$) göstermektedir.

Bu çalışmada glioksilik asit uygulamasının ağırlık artışını baskıladığı belirlenmiştir. GA uygulama sonrası canlı ağırlık artışına (g/f) etkisi Tablo 2' de verilmiştir. Uygulama süresinin sonunda, ortalama ağırlık artışları Grup I'de 5,71g, Grup II'de 3,78 g, Grup III'te 2,16 g, Grup IV'te 1,21 g, Grup V'te 0,69 ve Grup VI'da 0,51 olarak ölçülmüştür. En fazla ağırlık artışı kontrol grubunda belirlenmiştir. Uygulanan GA'nın doz miktarı ile ağırlık artışı arasında ters orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Glioksilik asitin yapısında hidroksil (-OH) grubu bulunmaktadır ve bu hidroksil gruplarının bitkideki mevcut moleküller gruplara bağlanarak bitkinin besin alışını engelleyerek ağırlık artışına engel olabileceği düşünülmektedir. GA 'nın in vivo koşullar altında ağırlık artışı üzerindeki etkilerini araştıran kapsamlı bir çalışma bulunmamakla birlikte farklı kimyasallarla yapılan çalışmalar literatür de mevcuttur. Çavuşoğlu ve ark., (2024) lunularik asitin uygulaması sonrası fizyolojik parametrelerdeki azalmaya sebep olduğu, lunularik asitin mitotik hücre bölünmesini azaltarak soğan köklerinden makro ve mikro besin maddelerinin alımını engellediği ve kök hücrelerine yapısal zarar verdiğini belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada, Pline ve ark., (2002), glifosatın pamuk fideleri üzerindeki fizyolojik ve morfolojik etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak, glifosatın 0,01 μM konsantrasyonun da glifosata dirençli ve dirençsiz pamuk fidelerinde yan kök gelişimini engellediğini göstermişlerdir.

Tablo 2. Glioksilik asit uygulamasının 72 saat sonrasında canlı ağırlık artışına (g/fide) etkisi

Gruplar	Başlangıç	Son	Ağırlık Artışı (g)
Grup I	12,38±1,32^{b*}	18,09±1.95^{a*}	+5,71
Grup II	11,08±1,55^{b*}	14,86±2,25^{b*}	+3,78
Grup III	12,11±1,7^{c*}	14,27±1,47^{c*}	+2,16
Grup IV	10,80±1,96^{c*}	12,01±1,18^{d*}	+1,21
Grup V	11,83±1,43^{a*}	12,49±1,02^{bc*}	+0,69
Grup VI	9,53±1,9^{b*}	10,04±1,43^{d*}	+0,51

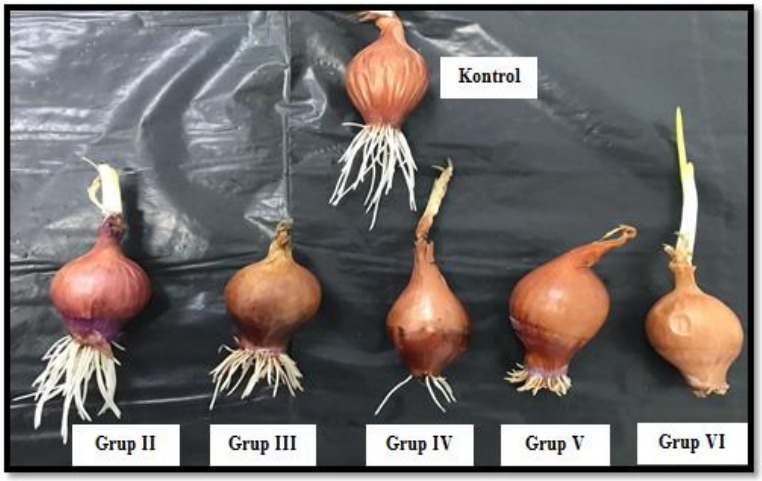
Grup I: Kontrol (distile su), Grup II: 10 ppm, Grup III: 25 ppm, Grup IV: 50 ppm, Grup V: 100 ppm, Grup V: 250 ppm

A. cepa test materyalinin farklı dozlarda glioksilik asit ile muamele edilmesi çimlenme üzerinde de inhibe edici bir etki göstermiştir. Çimlenme yüzdesi Grup I'de %100, Grup II'de %84, Grup III'te %62, Grup IV'te %38, Grup V'te %26 ve Grup VI'da%22 olarak belirlenmiştir (Tablo 3). Glioksilik asit uygulama sonrası doz artışıyla birlikte *A.cepa* çimlenme yüzdesi üzerinde önemli derecede azalmaya neden olduğu görülmüştür. Özellikle çimlenme üzerinde 100 ppm ve 250 ppm düzeylerinde çimlenmeyi engelleyici faktörün daha etkili olduğu görülmektedir. Çimlenme yüzdesi açısından en yüksek değer kontrol grubunda gözlemlenirken, en düşük oran 250 ppm glioksilik asit uygulanan Grup VI'da tespit edilmiştir. Uygulanan doz miktarı ile çimlenme yüzdesi arasında ters bir orantı olduğunun tespiti yapıldı. Benzer şekilde, Kurt ve ark., (2018), paraben uygulamasının *A. cepa*'daki çimlenme ile ilgili parametreleri olumsuz etkilediğini bildirmiştir.

Tablo 3. Glioksilik asitin uygulama sonrası çimlenme yüzdesi üzerine etkisi

Gruplar	Toplam bulb sayısı	Çimlenen	Çimlenmeyen	Çimlenme yüzdesi
Grup I	50	50	0	%100
Grup II	50	42	8	%84
Grup III	50	31	19	%62
Grup IV	50	19	31	%38
Grup V	50	13	37	%26
Grup VI	50	11	39	%22

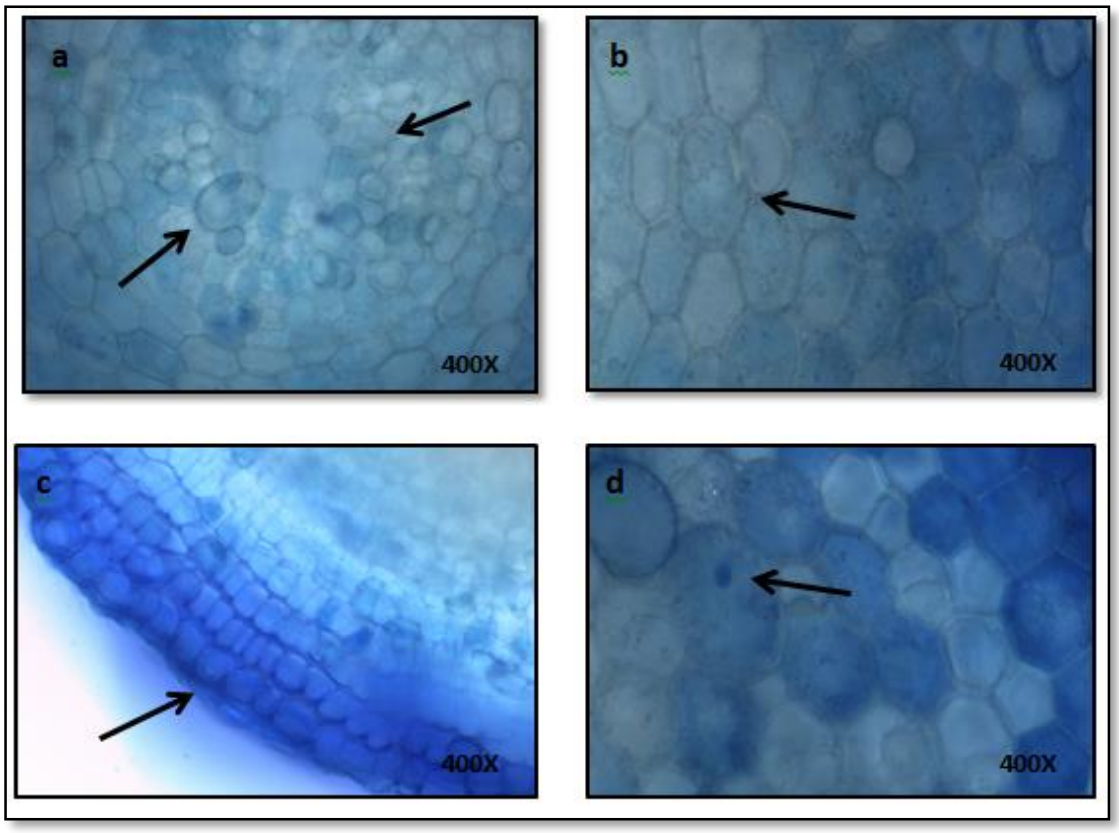
Grup I: Kontrol, Grup II: 10 ppm, Grup III: 25 ppm, Grup IV: 50 ppm, Grup V: 100 ppm, Grup V: 250 ppm



Şekil 1. Glioksilik asitin uygulama sonrası çimlenme durumları. Grup I: Kontrol (distile su), Grup II: 10ppm, Grup III: 25ppm, Grup IV: 50 ppm, Grup V: 100 ppm, , Grup VI: 250ppm.

3.2. Glioksilik Asitin Anatomik Parametreler Üzerine Etkileri

Glioksilik asit uygulaması sonrası oluşan anatomik hasarlar Şekil 3'te gösterilmiştir. Kontrol grubuna ait kök ucu meristematik hücrelerinde anatomik hasar açısında incelendiğinde anatomik açıdan bir hasara rastlanmamıştır (Şekil 2). Fakat uygulama grupları içerisinde glioksilik asitin düşük dozdaki (10ppm) uygulamasında; epidermis hücrelerinde deformasyonlar, korteks hücre duvarı kalınlaşması ve korteks kücrelerinde madde birikimi gibi anatomik değişimler tespit edilmiştir (Tablo 4). Yine 50, 100 ve 250 ppm uygulama dozlarında yassılaşmış çekirdek ve belirgin olmayan iletim elemanları gözlenmiştir. Ksilem ve floemde oluşan yapısal deformasyonlar, su ve besin iletimini aksatarak bitkide fizyolojik stresin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. 50, 100 ve 250 ppm'deki yassılaşmış çekirdek varlığı bize dozun artışıyla beraber çekirdek hasarlarının da artabileceğini göstermektedir. Daha koyu hafif kahverengi şekilde görülen nekrozun yüksek dozdaki 100 ve 250 ppm uygulama grubunda orta derece ve şiddetli hasar boyutunda oluşmuş olması aşırı toksisiteye karşı geliştirilen bir anatomik hasar olduğunu göstermektedir. Bu tür nekrotik hasarlar, özellikle bitkinin gelişimini olumsuz etkileyerek büyüme de yavaşlamaya ve bitkinin ölümüne neden olabilir. Yine korteks hücreleri arasında madde birikimin en düşük doz olan 10 ppm'den itibaren görülmeye başlaması da düşük dozlarda dahi hücre duvarına ve epidermise vermiş olduğu hasarın göstergesi olarak yorumlanmıştır. Korteks hücreleri arasında biriken maddeler hücreler arası boşlukların dolmasına neden olarak gaz alışverişini su ile besin iletimini engelleyebilir. Epidermis tabakasında meydana gelen zararlar, patojenlerin bitkiye nüfuz etmesini kolaylaştırarak enfeksiyon riskini artırabilir.



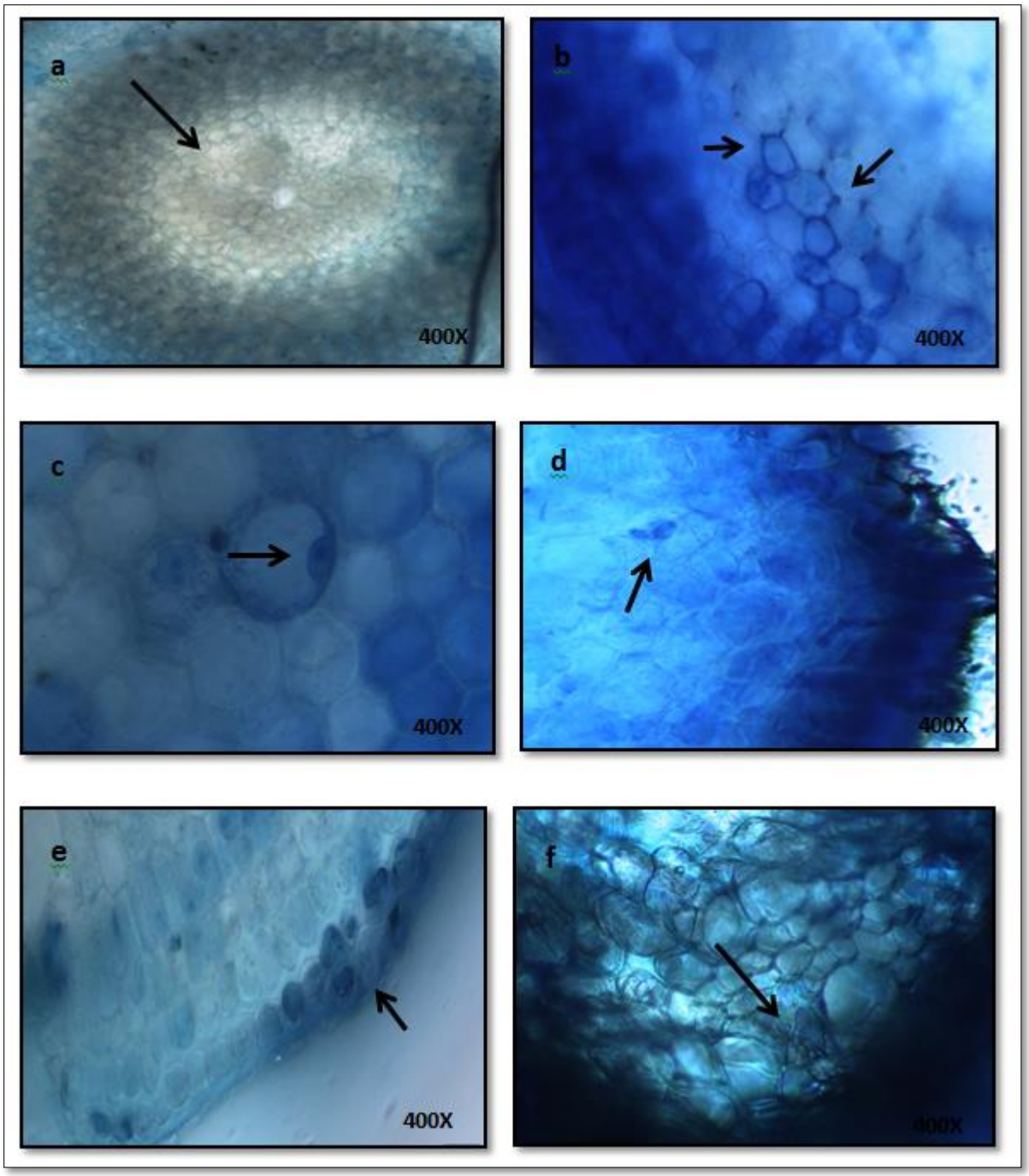
Şekil 2. Kontrol grubuna ait kök ucu meristematik hücrelerinin görünümü; a: Belirgin iletim demeti, b: Normal korteks hücre görünümü, c: Epidermis hücrelerinin normal görüntüsü, d: Hücre çekirdeğinin normal şekli.

Tablo 4. Glioksilik asitin *A. cepa* köklerinde meydana gelen anatomik hasarların şiddeti

Gruplar	BİE	KHDK	YHÇ	KHMB	EHD	KHN
Grup I	_	_	_	_	_	_
Grup II	_	+	_	+	+	_
Grup III	+	++	_	++	++	_
Grup IV	++	++	++	++	++	+
Grup V	+++	++	+++	++	+++	++
Grup VI	+++	+++	+++	+++	+++	+++

Grup I: Kontrol (distile su), Grup II: 10ppm, Grup III: 25ppm, Grup IV: 50ppm, GrupV: 100ppm, GrupVI: 250ppm. BİE: Belirsiz İletim Elemanları, KHDK: Korteks Hücre Duvarında Kalınlaşma, YHÇ: Yassılaşmış Hücre Çekirdeği, KHMB: Korteks Hücrelerinde Madde Birikimi, EHD: Epidermis Hücrelerinde Deformasyon, KHN: Korteks Hücrelerinde Nekrosiz. (–): Hasar yok, (+): Az hasar, (++): Orta derecede hasar, (+++): Şiddetli hasar.

Literatürde benzer bir çalışmada, Türkmen ve ark., (2009), *A. cepa* kök ucu hücrelerinde petrol atık suyu uygulayarak gerçekleştirdikleri çalışmada anatomik hasarlar tespit etmişlerdir. Korteks parankimasında kimyasal bileşiklerin birikmesi, hücre ölümü, hücre çekirdeğinin anormal şekli ve belirsiz iletim dokusu gibi anatomik hasarları tespit etmişlerdir. Öztürk ve ark., (2020) potasyum bromat uygulaması sonrası *A. cepa* kök meristem hücrelerinde doza bağlı anatomik hasarlara neden olduğunu, bunlar arasında nekroz, hücre deformasyonu, korteks hücre duvarının kalınlaşması, bazı maddelerin korteks hücrelerinde birikmesi ve düzleşmiş hücre çekirdeği bulunduğunu bildirmiştir. Ayrıca gıda katkı maddeleri ve kimyasal ajanların *A. cepa* kök meristem hücrelerinde anatomik değişiklikleri araştıran çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin, Yalçın ve ark., (2021) tartrazini 200 mg/L dozunda uyguladıklarında soğan yumrularının meristem hücrelerinde belirsiz vasküler doku, epidermis hücre hasarı, korteks hücre duvarı kalınlaşması ve düzleşmiş hücre çekirdeği gibi hasarlara neden olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada bileşik yapıdaki $ZnSO_4$ uygulamasının kök meristem hücreleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve kontrol grubunun meristem hücrelerinde herhangi bir hasar belirtisi gözlemlenmezken maruziyet dozu ile orantılı olarak, $ZnSO_4$'a maruz kalan kök uçlarında epidermis hücre hasarı, yassılaşmış hücre çekirdekleri, korteks hücre hasarı ve iletim dokusunun kalınlaşması gibi hasarlar farklı şiddetlerde gözlemlenmiştir (Üstündağ ve ark., 2024). Yine Co maruziyetinin *A. cepa* kök ucu meristem hücrelerinde farklı anatomik hasar türlerine yol açtığını bildirmişlerdir (Kalefetoğlu ve ark., 2021). Sonuç olarak, bitkilerde meydana gelen anatomik hasarın analizi, çevresel stres koşullarının ve toksik maddelerin bitki üzerindeki etkilerini belirlemede kritik bir gösterge olarak değerlendirilebilir.

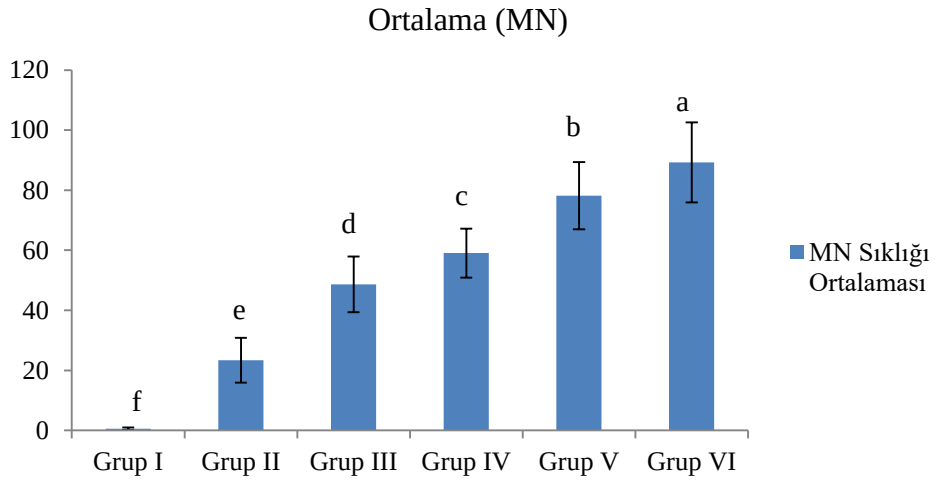


Şekil 3. Glioksilik asit uygulamasının meristem hücrelerinde oluşturduğu anatomik hasarlar; a:Belirgin olmayan iletim elemanları. b:Korteks hücre duvarında kalınlaşma, c: Yassı hücre çekirdeği, d: Korteks hücrelerinde madde birikimi, e: Epidermis hücrelerinde deformasyon, f: Korteks hücrelerinde nekroz.

3.3. Glioksilik Asitin Sitogenetik Parametreler Üzerine Etkisi

Glioksilik asitin sitogenetik etkileri MN oluşumu, Mİ oranı ve kromozomal hasarlar belirlenerek incelenmiştir. Çalışılan glioksilik asitin MN oluşumu üzerindeki etkileri Şekil 2 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Glioksilik asitin, uygulama dozuna bağlı olarak *A. cepa* kök ucu hücrelerinde MN oluşumunu teşvik ettiği tespit edilmiştir. Kontrol grubu olan Grup I'de yalnızca birkaç MN oluşumu tespit edilirken, uygulama dozunun artmasıyla birlikte MN oluşumunun arttığı tespit edilmiştir.

Ortalama MN oluşumları Grup I'de 0,5± 0,42, Grup II'de 23,35 ± 7,48, Grup III'te 48,65 ± 9,27, Grup IV'te 59,05 ± 8,13, Grup V'te 78,18±11,19 ve Grup VI'da 89,27±13,32 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. Glioksalik asit *A. cepa* 'nın ortalama MN oluşum sıklığı üzerine etkisi. Grup I: Kontrol (distile su), Grup II: 10ppm, Grup III: 25ppm, Grup IV: 50ppm, GrupV: 100ppm, GrupVI: 250ppm.

Küçük MN, oluşumu genellikle kromozom kırılması sonucu oluşan klastojenik bir etkiyi yansıtmaktadır. *A. cepa* L. hücrelerinde uyguladığımız glioksalik asit sonrası genellikle küçük boyuttaki MN oluşumları göstermektedir. Ayrıca, MN sıklığı da, uygulanan glioksalik asit konsantrasyonu arttıkça artmış ve maksimum MN sıklığı 250 ppm'de gözlemlenmiştir. Majer ve ark., (2002) toprakta bulunan ağır metallerin *Tradescantia*'da mikronükleus sıklığı üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve mikronükleus sıklığında doza bağlı artış olduğunu belirlemişlerdir. Başka bir çalışmada Karaismailoğlu (2015), 2 g/L prometryn uygulamasının istatistiksel olarak anlamlı bir sitotoksik etki göstermediğini, fakat yüksek dozlara çıkıldığında MN oluşumlarında artışa neden olduğunu bildirmiştir. Çavuşoğlu ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uygulama gruplarındaki tohumlar, 72 saat boyunca thiamethoxam'ın üç farklı dozu 100, 250 ve 500 mg/kg ile muamele etmişlerdir. *A. cepa* kök ucu meristem hücrelerinde, kontrol grubunda yalnızca birkaç MN oluşumu gözlenmişken, thiamethoxam'a maruz kalan tüm tohumlarda MN oluşumunda önemli bir artış tespit edilmiş ve MN sıklığı, thiamethoxam dozlarının artmasıyla birlikte yüselmiştir. MN sıklığı ile thiamethoxam dozları arasında belirli bir doz-etki ilişkisi olduğunu bildirmişlerdir. Leme ve ark., (2008) Guaeca Nehrinde tespit ettikleri petrol ve türevlerinde bulunan organik bileşikler karışımı olan petrol hidrokarbonların suyuna maruz kalan *A. cepa*'nın meristematik hücrelerinde, tüm kromozomal ve nükleer anormalliklerin sıklığı, negatif kontrolde bulunanlardan daha yüksek bulunmuştur. Ancak, bu farklılıkların tamamı istatistiksel olarak anlamlı olmadığı sadece kromozomal kırıklar, loblu çekirdekler, nükleer tomurcuklanmalar, mikronükleuslar (MN) ve mini hücrelerin sıklığı, negatif kontrol grubuyla karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Tablo 5. Glioksilik Asitin Mİ Üzerine Farklı Dozlardaki Etkisi

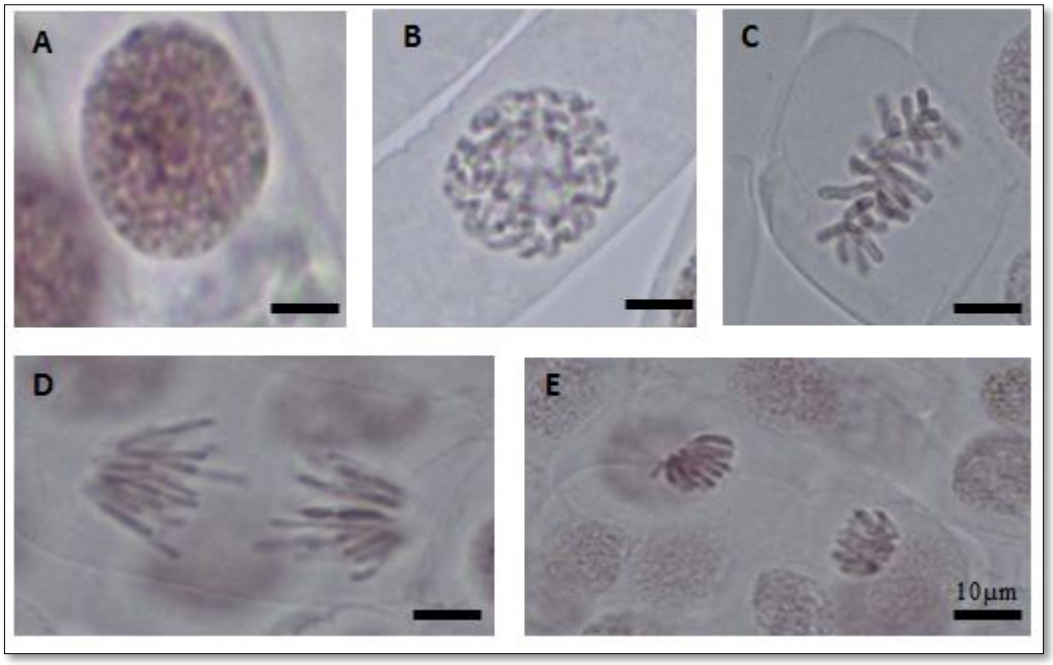
Gruplar	Kök ucu sayısı (n)	Minimum Bölünen Hücre	Maksimum Bölünen Hücre	Mitotik İndeks (Mİ) Ortalaması	Yüzde Mİ (%)
Grup I	10	843	942	897±28,42[a*]	%8,97
Grup II	10	731	864	792±19,16[b*]	%7,92
Grup III	10	637	751	691±37,23[c*]	%6,91
Grup IV	10	503	587	557±32,31[d*]	%5,57
Grup V	10	401	495	459±27,25[e*]	%4,59
Grup VI	10	387	413	401±16,17[f*]	%4,01

Grup I: Kontrol (distile su), Grup II: 10 ppm, Grup III: 25 ppm, Grup IV: 50 ppm, Grup V: 100 ppm, Grup VI: 250 ppm. Her grupta bulunan her bir kök ucundan 1.000 hücre olmak üzere toplamda 10.000 hücre incelenmiştir.* Veriler ortalama ± standart sapma (SS) (n = 10) olarak gösterilmiştir. Ortalamalardaki istatistiksel fark için "Ducan" testi kullanıldı ve "one-way" varyans analizi kullanılarak saptandı. Aynı sütunda yer alan, farklı harflerle işaretlenen ortalamalar, istatistiksel olarak anlamlı farkları (P<0,05) göstermektedir.

Glioksilik asit uygulaması mitotik indeks yüzdesine olan etkisi Tablo 5'de verilmiştir. Kontrol grubunda ortalama %8,97 oranında mitotik indeks tespit edilirken, glioksilik asitin maruziyeti sonrasın da Mİ yüzdesinde hızlı bir azalış olduğu saptanmıştır. Mitotik indeksin yüksek olması, hücre bölünmesin gerçekleştiğinin kanıtı olması bakımından önem taşımaktadır. *A.cepa* kök uç meristemlerinde yüksek mitotik indeks büyüme hızını gösterecektik. Mitotik indeks ile kök uzunluğu karşılaştırıldığında, azalan mitotik indeks değerleriyle birlikte doza bağlı olarak kök uzunluğunun azaldığı ve çimlenmenin de düştüğü tespit edilmiştir.

Kontrol grubu olan Grup I ile karşılaştırıldığında, glioksilik asite maruz kalan Grup II'de %1,05, Grup III'de %2,06, Grup IV'de %3,4, Grup V'de %4,38 ve Grup VI'da %4,96 oranlarında Mİ yüzdesinde azalma gözlemlenmiş olup, bu azalışın istatistiksel olarak anlamlı olduğu (P<0,05) tespit edilmiştir. Mitotik indeksteki en yüksek düşüş 250 ppm uygulama dozunda görülmüş olup bu durum fizyolojik parametrelerde çalışılmış olan çimlenme yüzdesi ve kök uzunluğuyla da paralellik göstermektedir Wiez, (1990) in yaptığı bir çalışmada mitotik indeks için kontrol grubunun %22'sinin altına düştüğünde, çalışılan organizma üzerinde ölümcül etkilere yol açabileceğini söylemiştir. Bu çalışmada, glioksilik asit için, kontrol ile karşılaştırıldığında 25 ppm'de mitotik indeksin kontrol grubuna kıyasla %22 altına düştüğü görülmektedir. Yine 100 ve 250 ppm uygulama dozunda düşen Mİ oranın sebebi glioksilik asitin hücrede mitotik bölünme aşamalarını engellenmiş ya da çekirdek hasarlarına sebep olarak hücrenin bölünmeye gitmesini engellemiş olabileceği düşünülmektedir. Herrero ve ark., (2012), propilparabenin *A. cepa*'da doz bağımlı bir şekilde mitotik aktiviteyi azalttığını bildirmiştir. Benzer şekilde, Todorovac ve ark., (2020), metilparaben, etilparaben ve bütilparabenin Mİ'i azalttığını ve nekrotik hücre sıklığının artırdığını raporlamıştır. Liu ve ark., (1992) yapmış oldukları çalışmada, potasyum dikromat ve krom nitrat bileşiklerinin farklı uygulama dozları *A. cepa* L. meristamatik hücrelerinde mitotik indeks üzerine etkileri belirlenmiş ve çalışılan iki kimyasal bileşiğin hücre bölünmesini engellediğini, mitotik indeks oranını azalttığını belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada Bıçakçı ve ark., (2017) diazinon uygulama dozundaki (50, 250 ve 500 mg/L) artışa bağlı olarak Mİ' in

azaldığı, MN oranının arttığı gösterilmiştir. Yaptıkları çalışmada Mİ oranın azalması, diazinonun hücrenin çoğalmasına ve büyümesini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir.



Şekil 5. Kontrol grubundaki *A. cepa* kök ucu hücrelerinde mitoz aşamaları; A-interfaz, B-profaz, C-metafaz, D-anafaz, E- telofaz. (Binoküler mikroskop altında ölçeklendirme =10 µm).

Tablo 6. Glioksilik asit'in farklı dozlarının kromozomal anormallik sıklığı

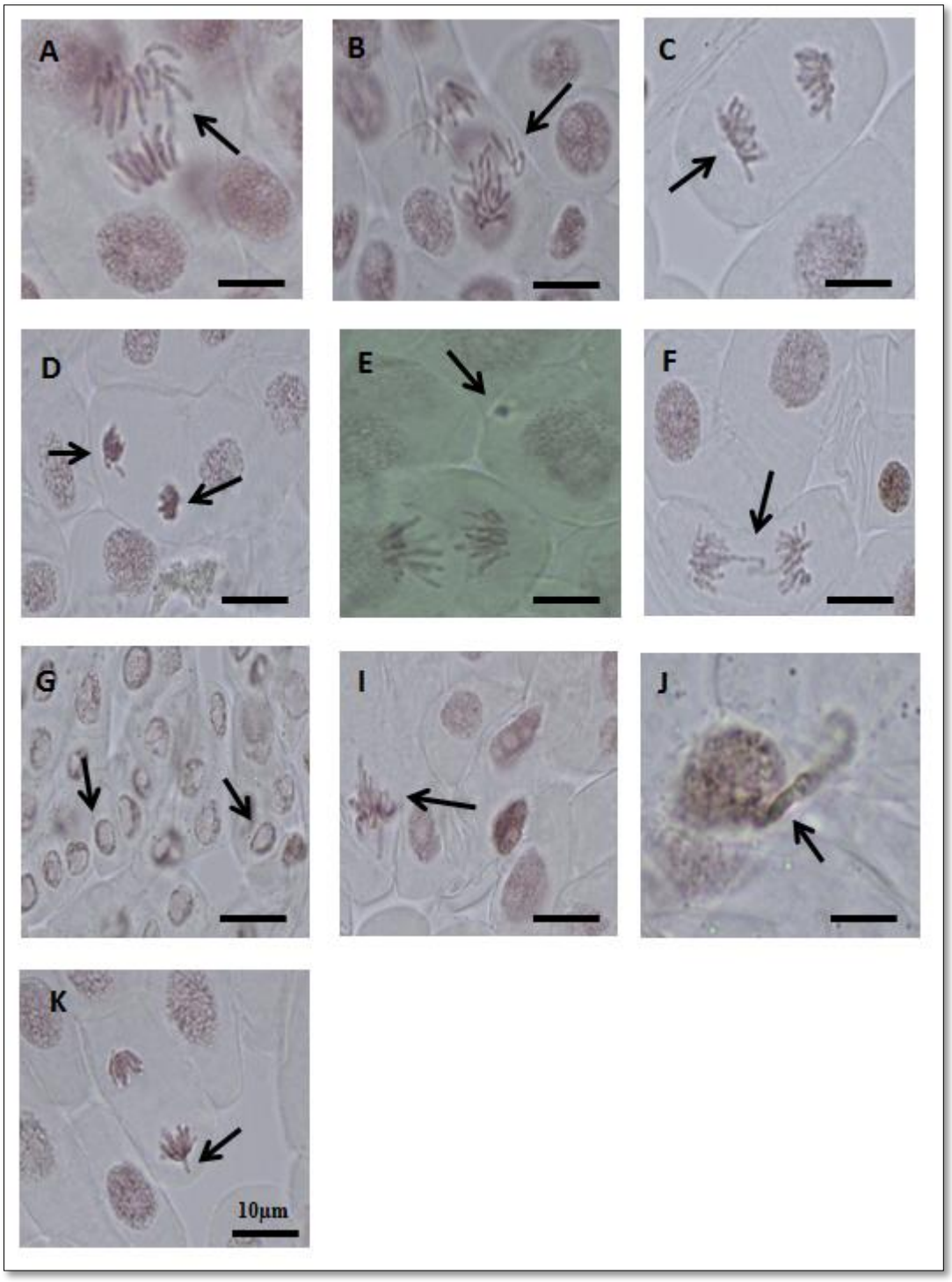
Gruplar	Kök ucu sayısı	Bölünen Hücre Sayısı	FRG	EKD	VK	YK	CM	KK
Grup I	10	100	0,00±0,00^{f*}	0,30±0,38^{f*}	0,00±0,00^{f*}	0,00±0,00^{f*}	0.00±0.00^{f*}	0.00±0.00^{f*}
Grup II	10	100	14,87±5,08^{e*}	7,82±4,17^{e*}	2,86±1,73^{e*}	3,34±1,21^{e*}	2.03±2.19^{e*}	1.09±1.55^{e*}
Grup III	10	100	17,16±4,34^{d*}	11,17±2,43^{d*}	6,42±7,08^{d*}	5,04±3,76^{d*}	3.83±4,36^{d*}	2.75±2,18^{d*}
Grup IV	10	100	31,23±4.52^{c*}	24,35±3,19^{c*}	13,48±2.93^{c*}	10,19±2,69^{c*}	8.65±3.43^{c*}	6.15±3.04^{c*}
Grup V	10	100	68,19±2,23^{b*}	38,22±5,31^{b*}	29,36±3,51^{b*}	23,43±4,77^{b*}	19,47±4,72^{b*}	16,53±4,44^{b*}
Grup VI	10	100	75,41±2,83^{a*}	51,56±4,5^{a*}	43,47±5,24^{a*}	32,14±3,17^{a}	29,87±6,53^{a}	21,±5,78^{a*}

***** Kromozom hasarları; her bir grupta, her kök ucundan 100 hücre, toplamda ise 1.000 hücre sayılarak belirlendi. FRG: Fragment, EKD: Eşit olmayan kromatin dağılımı, VK: Vagrant kromozom, YK: Yapışkan kromozom, CM: C-Mitoz, KK: Kromozom Köprüsü. Veriler ortalama ± SS olarak gösterildi (n = 10). Aynı satırda, farklı harfler ile belirtilen ortalamalar istatistiksel açıdan anlamlıdır (P<0,05).

Yapılan kromozomal anormallik çalışmasının istatistiksel verileri Tablo 6 da belirtilmiştir. Uygulama sonrası glioksilik asit ile indüklenen kromozomal hasarların sıklığının fragment oluşumu>eşit olmayan kromatin dağılımı> vagrant kromozom>yapışkan kromozom>C-mitoz>köprü oluşumu şeklinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6). Glioksalik asit uygulamasının kromozomlar üzerindeki en yüksek etkisi fragment oluşumu olarak tespit edilmiştir. Fragmentler, DNA'nın fosfodiester bağlarının kırılması ve kopmasıyla oluşmaktadır. Bu tür kırılmalar ciddi sonuçlar doğurabilir ve MN oluşumları, translokasyonlar, inversiyonlar ve silinmeler gibi yeni düzenlemelere yol açabilir. Eşit olmayan

kromatin dağılımı, hücre bölünmesi esnasında genetik materyalin eşit olmayan şekilde aktarılmasına sebep olarak çeşitli hücresel anormalliklerin oluşmasına neden olabilir. Vagrant kromozom oluşumları ise iğ iplikçiklerinin doğru bir şekilde çalışmaması sonucu kromozomların kutuplarda doğru konumlanamamasından kaynaklanmaktadır. Kontrol grubunda (Şekil 5), sadece birkaç yapışkan kromozom gözlemlenirken, GA'ya maruz bırakılan 5 uygulama grubunda kromozomal hasarların doza bağlı olarak arttığı ve bu artışların istatistiksel olarak anlamlı olduğu ($P < 0,05$) tespit edilmiştir. Literatürde kimyasallarla ilgili yapılan pek çok kromozom anormallik çalışması bulunmaktadır. Örneğin; Lerda ve ark., (2005) mikotoksinler grubunda bulunan ve toksik bir bileşik olan fumonisin FB1'in *Allium cepa*'nın meristematik köklerinde klastojenik etkilere neden olduğunu belirlemişlerdir. *Allium cepa* kök ucu testi, 10 µg/g konsantrasyonun da FB1'in kromozom seviyesinde genotoksisite oluşturduğunu göstermiştir. FB1'in sitogenetik etkileri açısından, kromozomal anormallikler, kardeş kromatid değişimi, mikronükleus oluşumu ve *Allium cepa*'da görülen kromozomal anormalliklerin sıklığında artış tespit etmişlerdir.

Evandri ve ark., (2003) uyguladıkları (1 µM-100 µM) dozlarda BDE-99 ve Aroclor 1254 kimyasallarını *A. cepa* testinde incelemiş ve 100 µM (56 mg/L) konsantrasyonuna kadar sitotoksik bir etki bulmamışlardır. Bu, kök şekli ve büyümesi üzerinde herhangi bir etkinin olmamasıyla kendini gösterdiğini ve Mİ üzerindeki etkisizliğiyle de belirlenmiştir. BDE-99 yapısal kromozom aberasyonları açısından kontrol grubundan anlamlı bir fark göstermemiştir. Ancak, Aroclor 1254 için doz bağımlı bir artış olduğunu gözlemişler ve toplam kromozom anormalliklerin arttığını bildirmişlerdir. *A. cepa* kök hücrelerinde Aroclor 1254'ün neden olduğu daha yüksek kromozom anormallik seviyesi, özellikle kromozom parçalanmalarının artışıyla ilişkilendirilerek, klastojenik bir etkiyi işaret ettiğini belirtmişlerdir. Acar ve ark., (2020) benzil benzoatın uygulanması sonrası indüklediği kromozom hasarları arasında en yüksek hasarın fragment oluşumu olduğunu bildirmiştir. Diğer kromozom anormallikleri ise; yapışkan kromozom, kromozom köprüsü, kromatin eşitsiz dağılımı ve c-mitoz olarak bildirilmiştir. Kontrol grubunda ise istatistiksel olarak anlamlı bir kromozomal hasar gözlemezlerken, uygulama gruplarında tüm kromozomal hasarların uygulama miktarına bağlı olarak arttığını bildirilmiştir.



Şekil 6. Glioksilik asit uygulaması sonrası *A.cepa* kök ucu hücrelerinde oluşan kromozom hasarları; A- anafazda eşit olmayan kromatin dağılımı, B-anafaz da fragment, C-kutup düzleşmesi, D-kutup kayması, E-MN, F-anafaz da köprü oluşumu, G-vakoulleşmiş hücre çekirdeği I-yapışık kromozom, J-çekirdekte anormal tomurcuk oluşumu K-vagrant kromozom. (Binoküler mikroskop altında ölçeklendirme=10 µm).

Türkoğlu, (2007) tarafından yapılan başka bir çalışmada, gıdalarda koruyucu olarak kullanılan borik asit, sodyum benzoat, potasyum sitrat ve sitrik asit, *A. cepa* soğanlarına 20-100 ppm arasındaki dozlarda uygulandığı ve sonuç olarak anafaz köprüsü, c-mitoz, geri kalan kromozom ve yapışkan kromozom gibi kromozomal anormalliklerin varlığını tespit etmiştir. Çalışmada uygulama süresi ve doz arttıkça

kromozomal anormalliklerin arttığını da bildirilmiştir. Akgündüz ve ark., (2020) yapmış olduğu çalışmada, kişisel bakım ürünlerinde koruyucu ve antiseptik olarak kullanılan fenoksiethanol maruziyeti sonrasında c-mitoz, kromozom köprüsü, serbest kromozom, fragment, ters kutuplaşma ve kromatinin eşitsiz dağılımı gibi farklı kromozomal anormallikler gözlemlenmiştir. En yüksek kromozomal anormallik sıklığı 10 mM fenoksiethanol uygulamasında gözlemlenmiş ve tüm kromozomal anormallik oluşumları fenoksiethanol uygulama dozu arttıkça arttığı belirlenmiştir. Bu çalışmada en sık gözlemlenen kromozomal anormallikler fragment ve serbest kromozom olduğu belirtilmiştir.

Sitogenetik açıdan yapılan çalışmalar, yalnızca biyolojik süreçlerin anlaşılması için değil, aynı zamanda çevresel ve endüstriyel faktörlerin genetik düzeydeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından da büyük bir önem taşımaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, glioksalik asidin *A. cepa* test materyali üzerinde doza bağlı toksik etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. En yüksek toksik etki 250 ppm konsantrasyon da elde edilmiş, fakat 100 ppm dozunda en yüksek dozdaki toksik etkiye yakın etkiler gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle korteks hücrelerinde meydana gelen madde birikimi, yassılaşmış bir forma dönüşen hücre çekirdeği gibi anatomik değişiklikler ve yüksek fragment oluşumuyla kromozom yapısının bozulması klastojenik bir genotoksik etki yaratmıştır. Sonuç olarak, günlük hayatta parfüm, gıda ve ilaç endüstrilerinde yaygın olarak kullandığımız birçok ürünün yapısında bulunan glioksalik asit, uygulanan tüm doz seviyelerinde in vivo koşullarda ökaryotik bir model olan *A.cepa* üzerinde toksik etkilere sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu tür çalışmalarda, özellikle toksik etkinin mekanizmasının netleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, glioksalik asitin toksik etki mekanizması özellikle MN sıklığı dikkate alınarak etkileri belirlenmiştir. Mikronükleus oluşumu, genetik hasar ve klastojenik etkinin bir belirtisi olarak kabul edilir.

Kromozom kırıkları, oluşan vagrant kromozomların varlığı ve eşit olmayan kromatin dağılımı özellikle genetik materyalin düzensiz bir şekilde paylaşılmasına, çeşitli gen mutasyonlarına yol açabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle, glioksalik asitin kullanımının sınırlandırılması zorunlu olup, yapılacak farklı ökaryotik çalışmalarla da akut ve kronik toksik etkileri gün yüzüne çıkarılması sağlanmalıdır.

Teşekkür

Çalışma, herhangi bir kurum ya da kuruluş tarafından desteklenmemiştir.

Kaynakça

ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA). 1990 Yüksek üretim hacimli (hpv) kimyasallar programı listesi. Çevre Koruma Ajansı; Washington, Dc. 1990.

ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA). Akrilik asit için kimyasal özet. Kirliliği Önleme Ve Zehirli Maddeler Ofisi; Washington, DC, 1994.

Acar A., Türkmen Z., Çavuşoğlu K., Yalçın E. Investigation of benzyl benzoate toxicity with anatomical, physiological, cytogenetic and biochemical parameters in in vivo. Caryologia 2020; 73(3): 21-32.

Akgündüz MÇ., Çavuşoğlu K., Yalçın E. The potential risk assessment of phenoxyethanol with a versatile model system. Sci Rep 2020; 10: 1209.

Anderson SE., Ham JE., Munson AE. Irritancy and sensitization potential of glyoxylic acid. Journal of Immunotoxicology 2008; 5(2): 93-98.

Bıçakçı U., Çavuşoğlu K., Yapar K., Acar A., Yalçın E. The ınvestigation of diazinon toxicity in root tip cells of *Allium cepa* (Onion) L. Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Dergisi 2017; 7(3): 49-56.

Bruggink A. Synthesis of β-lactam antibiotics: Chemistry, Biocatalysis & Process Integration. Netherlands: Springer-Science Business Media, B.V; 2001.

Çavuşoğlu D., Çavuşoğlu K., Çavuşoğlu K. Identification of cyto- and genotoxic effects of lunularic acid in *Allium cepa* L. root tip meristem cells. Cytol. Genet. 2024; 58(2): 178–189.

Çavuşoğlu K., Yalçin E., Türkmen Z., Yapar K., Sağir S. Physiological, anatomical, biochemical, and cytogenetic effects of thiamethoxam treatment on *Allium cepa* (amaryllidaceae) L.. Environ Toxicol 2012; 27(11): 635-643.

Debus H. On the action of nitric acid on alcohol at common temperatures, "This residue consisted almost entirely of the aldehyde of glyoxylic acid; I proposed to call it Glyoxal, C2H4O3. Philosophical Magazine, 4th series, 1857; 13(89): 39–49.

Evandri MG., Mastrangelo S., Costa LG., Bolle P. In vitro assessment of mutagenicity and clastogenicity of BDE-99, a pentabrominated diphenyl ether flame retardant. Environmental and Molecular Mutagenesis 2003; 42(2): 85-90.

Fan X., Zhou X., Chen H., Tang M., Xie X. Crosstalks between macro-and micronutrient uptake and signaling in plants, Front. Plant Sci. 2021; 12: 663477.

Fenech M., Chang WP., Kirsch-Volders M., Holland N., Bonassi S., Zeiger E. Human micronnucleus project. HUMN Project: Detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using ısolated human lymphocyte cultures. Mutation Research 2003; 534(1-2): 65-75.

Fiskesjö G. The allium test as standard in environmental monitoring. Hereditas 1985; (102): 99-112.

Grosjean E., Williams EL., Grosjean D. Atmospheric chemistry of acrolein. Sci. Total Environ. 1994; 153: 195–202.

Herrero O., Pérez Martín JM., Fernández Freire P., Carvajal López L., Peropadre A., Hazen MJ. Toxicological evaluation of three contaminants of emerging concern by use of the A. cepa test. Mutat Res 2012; 743(1-2): 20–24.

Kalefetoğlu Macar T., Macar O., Yalçın E., Çavuşoğlu K. Protective roles of grape seed (*Vitis vinifera* L.) extract against cobalt (II) nitrate stress in *Allium cepa* L. root tip cells. Environ Sci Pollut Res 2021; 28(1): 270–279.

Karaismailoğlu MC. The evaluation of the genotoxic and cytotoxic effects of pyriproxyfen insecticide on *Allium cepa* somatic chromosomes with mitotic activity, chromosome abnormality and micronucleus frequency Turk. J. Life Sci. 2016; 1(2): 65-69.

Kurt D., Acar A., Cavusoglu D., Yalcin E., Cavusoglu K. Genotoxic efects and molecular docking of 1,4-dioxane: combined protective efects of trans-resveratrol. Environ Sci Pollut Res 2021; 28: 54922–54935.

Leme DM., Angelis DF., MarinMorales MA. Action mechanisms of petroleum hydrocarbons present in waters impacted by an oil spill on the genetic material of *Allium cepa* root cells. Aquatic Toxicology 2008; 88(4): 214-219.

Lerda D., Bistoni MB., Peralta N., Ychari S., Vazquez M., Bosio G. Fumonisins in foods from Cordoba (Argentina), presence and genotoxicity. Food and Chemical Toxicology 2005; 43: 691-698.

Lui D., Jiang W., Li M. Effects of trivalent and hexavalent chromium on root growt hand cell division of *Allium cepa*. Hereditas 1992; 117(1): 23-29.

Öztürk G., Çavuşoğlu K., Yalçın E. Dose-response analysis of potassium bromate-induced toxicity in *Allium cepa* L. meristematic cells. Environ. Sci. Pollut. Res. 2020; 27(34): 43312–43321.

Pozdniakov MA., Zhuk IV., Lyapunova MV. Glyoxylic acid: synthesis, isolation, and crystallization. Russ Chem Bull 2019; 68(3): 472–479.

Robert T., Tang E., Kervadec J., Desmons A., Hautem JY., Zaworski J., Daudon M., Letavernier E. Hair-straightening cosmetics containing glyoxylic acid induce crystalline nephropathy, Kidney International 2024; 106(6): 1117-1123,0085-2538.

Sidorenko SV., Yakovlev SV., Rus. Med. Zh. [Russ. Med. J.], 1997; 21, 2.

Staykova TA., Ivanova EN., Velcheva IG. Cytogenet-ic effect of heavy metal and cyanide in contaminedwaters from the region of Southwest Bulgaria. J CellMol Biol. 2005; 4(1): 41-46.

Todorovac E., Durmisevic I., Cajo S., Haverić A., Mesic A. Evaluation of DNA and cellular damage caused by methyl-, ethyl- and butylparaben in vitro. Toxicol Environ Chem 2020; 103(1): 85–103.

Türkmen Z., Çavuşoğlu K., Çavuşoğlu K., Yapar K., Yalçın E. Protective role of royal jelly (honeybee) on genotoxicity and lipid peroxidation, induced by petroleum wastewater, in Allium cepa L. root tips. Environmental Technology 2009; 30(11): 1205-1214.

Türkoğlu Ş. Genotoxicity of five food preservatives tested on root tips of Allium cepa L. Mutat Res. 2007; 626(1): 4-14.

Üstündağ Ü., Çavuşoğlu K., Yalçın E. Comparative analysis of cyto-genotoxicity of zinc using the comet assay and chromosomal abnormality test. Environ Sci Pollut Res Int. 2024; 31(44): 56140-56152.

Wiez AD., Analysis of the cell in the root meristemof Allium cepa under the influence of Ledakrin. Folia Histo-chem Cytobiol 1990; 26: 79–96.

Yalçın E., Kalefetoğlu Macar T., Macar O., Çavuşoğlu K. Protective role of green coffee against cytotoxic and genotoxic effects of food dye tartzanine in A. cepa L root tip cells. Acad. Food J. 2021; 19(1): 49–58.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 75-85, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 75-85, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Aksaray İli'nde Araç Türüne Göre Dağılım ve Gelecek Tahminleri: İstatistiksel Bir Çalışma

Hümeyra BOLAKAR TOSUN[1*]

[1]Civil Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-6710-2277
*Corresponding author: humeyrabolakar@aksaray.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 06.02.2025
Kabul tarihi:02.04.2025
Online Yayınlanma: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Şehir İçi ulaşım
Araç türleri
Karayolu taşımacılığı

ÖZ

Bu çalışma nüfus olarak günden güne kalabalıklaşan Aksaray ili için 2014-2024 yılları arasındaki yıllık araç türlerine ait sayılar veri olarak kullanılarak, Doğrusal regresyon analizi yöntemi ile araç türlerine ait büyüme miktarları analiz edilerek, gelecek yıllara yönelik tahminler sunmaktadır. Sonuçlar, Aksaray'da trafik sıkışıklığının artacağını ve yerel ulaşım altyapısının gelecekteki talepleri karşılamak için önemli yatırımlara ihtiyaç duyulacağını göstermektedir. Bu çalışma, beklenen büyüme modelleri ve kentsel planlama ile trafik yönetiminin önümüzdeki yıllarda karşılaşacağı zorluklar hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.

Vehicle Distribution by Type in Aksaray Province and Future Predictions: A Statistical Study

Research Article

Article History:
Received: 06.02.2025
Accepted: 02.04.2025
Online Publishing:13.01.2026

Keywords:
Urban transportation
Vehicle types
Road transportation

ABSTRACT

This study provides estimates for the upcoming years by using the annual vehicle types between 2014-2024 as data for the increasingly crowded Aksaray province, and by analyzing the growth rates of vehicle types with the linear regression analysis method. The results show that traffic congestion will increase in Aksaray and that significant investments will be needed in the local transportation infrastructure to meet future demands. This study provides valuable information about the expected growth patterns and the challenges that urban planning and traffic management will face in the coming years.

To Cite: Bolakar Tosun H. Vehicle Distribution by Type in Aksaray Province and Future Predictions: A Statistical Study. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 75-85.

1. Introduction

Transportation is rapidly shaping up as one of the biggest environmental problems of the future. Road traffic is known as the fastest growing source of greenhouse gases. Road construction is one of the biggest causes of wildlife habitat destruction, and both traffic and new roads are causing increased general trespass and problems in the local environment. However, the policies behind these problems are not very solution-oriented. Transportation directly affects people's lives, and pressure for policy change is increasing day by day due to the public's perception of a 'transportation crisis'. In addition to

solving transportation problems, this situation also creates the opportunity to propose more environmentally sustainable transportation policies.

Increasing population density around the world has brought about increased vehicle traffic. Due to rising population density, traffic on the roads has increased significantly in the last 20 years, especially in the USA and other countries (Schrank and Lomax, 2007).

Problems in the urban transportation system caused by the increasing number of vehicles in traffic are a common problem in most cities. Especially the city center, long-term problems can be seen in city traffic due to many reasons such as incorrect parking, density of pedestrians and vehicles, lack of good infrastructure of the roads used by vehicles, poor signaling system, and the behavior of vehicle owners in traffic (Çinicioğlu et al., 2013). The increasing number of vehicles in traffic causes many difficulties and problems that affect various aspects of urban life, the environment and general transportation systems. Some key problems with the increasing number of vehicles are:

1. Traffic congestion: As the number of vehicles on the roads increases, traffic congestion becomes an important problem. This causes travel times to increase, fuel consumption to increase and frustration among drivers.

2. Air pollution: The increase in the number of vehicles causes air pollution to increase. Exhaust emissions release pollutants such as carbon monoxide, nitrogen oxides and particulate matter, which can have harmful effects on air quality and public health (KGM, 2008).

3. Environmental Impact: Increased vehicle use contributes to environmental degradation, including habitat loss, deforestation, and increased greenhouse gas emissions. This situation exacerbates climate change and negatively affects ecosystems.

4. Infrastructure Imperative: The increasing number of vehicles may strain the existing transportation infrastructure. Roads, bridges and public transportation systems may become inadequate to meet increasing demand, resulting in maintenance difficulties and the need for costly expansions.

5. Accident Rates: Higher traffic volumes are generally associated with an increased likelihood of accidents. As more vehicles share the road, the risk of collisions and road deaths increases, potentially leading to a greater burden on healthcare systems.

6. Decrease in Quality of Life: Traffic congestion and increased noise levels from vehicular traffic can reduce the overall quality of life in urban areas. Residents may experience stress, decreased mobility, and a decrease in overall well-being.

7. Dependence on Fossil Fuels: The majority of vehicles are still dependent on fossil fuels, contributing to the depletion of non-renewable resources and the release of pollutants. Transitioning to more sustainable and environmentally friendly transport options is crucial to reducing these problems

8. Urban Planning Challenges: Vehicle flow can create challenges for urban planners in designing and managing city spaces. Striking a balance between meeting transportation needs and maintaining livable, walkable urban environments is becoming more complex (KGM, 2013).

In recent years, private car acquisition in our country has increased. The number of private cars is increasing rapidly due to the ease of It increases in this way. Vehicle occupation areas of private cars. It is quite a lot compared to minibuses and buses. This situation causes traffic congestion in our cities.

The presence of motor vehicles in cities affects transportation dynamics significantly. Aside from the sheer number of vehicles, the modal distribution of trips is also crucial. Unfortunately, the proportion of trips made using public transportation is declining as urban transportation issues become more prevalent. Many cities are currently grappling with transportation challenges due to insufficient planning and resources.

The literature has defined five basic criteria (Knupter et al., 2018; Litman, 2021) that evaluate the primary factors influencing modal distribution preferences in transportation. These criteria are proximity, modal integration, affordability, inclusiveness, and social status. The first criterion, proximity, determines the distance between urban public spaces and homes and workplaces (Erkip, 1997). It includes the location of the workplace and home in accessibility, the starting point for accessing the squares, the access time to the square, and the time to reach the square by walking (Levinson, 1998). Modal integration refers to the seamless connection between different modes of transportation, ensuring that users can transition efficiently between public transport, cycling, and walking, thereby improving overall accessibility and convenience (Litman, 2021). Affordability is another vital factor in effective urban transportation and transportation type selection, which includes monthly disposable income for transportation and monthly transportation expenses (Knupter et al., 2018; Rivas et al., 2018). Inclusiveness ensures that transportation systems are accessible to all individuals, including those with disabilities, the elderly, and economically disadvantaged populations, by providing equal mobility opportunities (Knupter et al., 2018). Finally, social status plays a significant role in transportation preferences, as individuals may choose specific modes of transport based on perceived prestige, convenience, and societal acceptance (Litman, 2021).The transportation sector aims to eliminate interregional imbalances, support development and their complementary effects. Transportation policies can be used as a tool of economic development. Transport activities and accessibility are most important factors that determine the transportation networks and vehicles.

The study examined the types of transportation used and made future predictions. The discussion includes measures that can be taken to ensure legal balance in the future.

2. Materials and Methods

The linear regression analysis involves fitting a linear trend line to the data, which is then used to predict the number of vehicles for each category from 2025 to 2030. Excel software is utilized to calculate the regression equation and generate forecasts for each vehicle type based on historical growth patterns.

Regression analysis is a statistical technique used to examine the relationship between a dependent variable and one or more independent variables. It allows researchers to model and understand how changes in the independent variables (predictors) influence the dependent variable (outcome). The most

common form is linear regression analysis, which assumes a straight-line relationship between the variables. By fitting a regression model to the data, it's possible to make predictions and quantify the strength of the relationship between the variables. Linear Regression analysis is widely used in fields like economics, engineering, and social sciences to analyze trends and forecast future outcomes. Linear Regression analysis is primarily used for predicting outcomes and understanding relationships between variables. For example, it can forecast future sales based on advertising expenditures or analyze how changes in temperature affect energy consumption. By examining historical data, regression offers valuable insights into the behavior of systems and processes, enabling decision-makers to plan more effectively. Additionally, regression helps identify which variables significantly influence outcomes, guiding improvements and optimizations across various sectors, including healthcare, business, and environmental sciences (Chatterjee et al., 2015; Freund et al., 2006; Draper, 1998).

This study analyzes vehicle type data from 2014 to 2024 and uses linear regression analysis to forecast the distribution of vehicles in Aksaray for the period 2025-2030. These predictions will assist local authorities in making informed decisions about future transportation needs. The methodology used in this study is based on linear regression analysis, which is a widely used statistical technique to forecast future trends based on historical data.

The data used in this study was obtained from two main sources: the Aksaray Provincial Traffic Directorate, which provided annual statistics on vehicle registrations categorized by type, and National Transport and Infrastructure Reports, which contained transportation trends at a national level. These national reports were used to cross-check and validate the regional trends observed in Aksaray, ensuring data accuracy. The registered vehicle types were classified into several categories: Automobiles, referring to passenger cars used for personal and commercial purposes; Light Trucks, which are commercial vehicles weighing less than 3.5 tons and mainly used for small-scale freight transport; Tractors, primarily used in agriculture and rural areas for farming operations; Motorcycles, including all two-wheeled motorized vehicles such as scooters and standard motorcycles; Trucks, which are heavy commercial vehicles used for large-scale freight transport; Minibuses, small public transport vehicles typically serving short-distance routes; Buses, larger passenger transport vehicles used for long-distance and high-capacity transit; and Special-purpose vehicles, a category encompassing ambulances, fire trucks, construction vehicles, and other specialized service vehicles. By analyzing these vehicle categories, this study provides a comprehensive understanding of the transportation landscape in Aksaray and its implications for traffic congestion and infrastructure planning.

The general formula for a linear regression model is:

$y=\beta 0+\beta 1x+\epsilon y$

Where:

- y represents the dependent variable (the number of vehicles of a specific type),
- x represents the independent variable (time, or years since the start of the study),
- $\beta 0$ is the intercept of the line,

- $\beta 1$ is the slope of the line (rate of change),
- ϵ is represents the error term.

For each vehicle type (private cars, buses, trucks, motorcycles, etc.), we fit a linear regression model to historical data, where time (in years) is the independent variable, and the number of vehicles is the dependent variable. By applying this model, vehicles for each type in future years was predicted.

3. Findings and Discussion

Table 1 shows the Vehicle Count data on Aksaray province state roads between 2014 and 2024. The values are given in thousands (x1000) for ease of representation and comparison.

Table 1. Vehicle Count (between 2014 and 2024) (Source: Aksaray Municipality, Traffic Department)

Year	Vehicle Count (piece)
2014	112.500
2015	115.410
2016	118.420
2017	122.130
2018	125.040
2019	128.050
2020	131.060
2021	133.970
2022	137.680
2023	143.391
2024	152.171

The annual average daily traffic data of Aksaray province state roads is examined in Table 2, which shows the breakdown of vehicle types from 2014 to 2024. The total sum of vehicle types should match the values in Table 1 for consistency.

Table 2. Annual Average Daily Vehicle Values (between 2014 and 2024) (Source: Aksaray Municipality, Traffic Department)

Year	Automobiles (piece)	Light Trucks (piece)	Tractors (piece)	Motorcycles (piece)	Trucks (piece)	Minibuses (piece)	Buses (piece)	Special-purpose vehicles (piece)
2014	60.000	20.000	15.000	10.000	5.000	1.000	1.000	500
2015	61.500	20.500	15.200	10.500	5.100	1.050	1.050	510
2016	63.000	21.000	15.500	11.000	5.200	1.100	1.100	520
2017	65.000	21.500	16.000	11.500	5.300	1.150	1.150	530
2018	66.500	22.000	16.200	12.000	5.400	1.200	1.200	540
2019	68.000	22.500	16.500	12.500	5.500	1.250	1.250	550
2020	69.500	23.000	16.800	13.000	5.600	1.300	1300	560
2021	71.000	23.500	17.000	13.500	5.700	1.350	1.350	570
2022	73.000	24.000	17.500	14.000	5.800	1.400	1.400	580
2023	74.092	24.216	17.650	16.786	7.245	1.430	1.367	605
2024	79.918	25.000	18.000	18.000	7.652	1.525	1.427	649

Table 3 presents the predicted vehicle count for Aksaray province from 2025 to 2030. These predictions are based on a linear regression model. The reliability of the regression analysis is measured by statistical indicators such as R-squared and confidence intervals, which should be included to ensure validity.

Table 3. Predicted Vehicle Count (between 2025-2030)

Year	Predicted Vehicle Count(piece)
2025	169.500
2026	174.000
2027	178.500
2028	183.000
2029	187.500
2030	192.000

Figure 1 illustrates the predicted vehicle count trend from 2025 to 2030, generated using linear regression analysis. The x-axis represents the years, while the y-axis represents the vehicle count (in thousands). The figure visually represents the increasing trend and should include confidence intervals to depict the reliability of the predictions. The reason for choosing a 5 year forecast period is to provide more reliable and applicable forecasts in terms of short and medium-term planning. While long-term forecasts (e.g. 10 years or more) increase uncertainties, the 5-year period provides more manageable and reliable results in terms of economic, demographic and infrastructural variables. In addition, since

local governments' transportation and infrastructure policies are usually based on 5-year development plans, forecasts made during this period can turn into more directly applicable data.

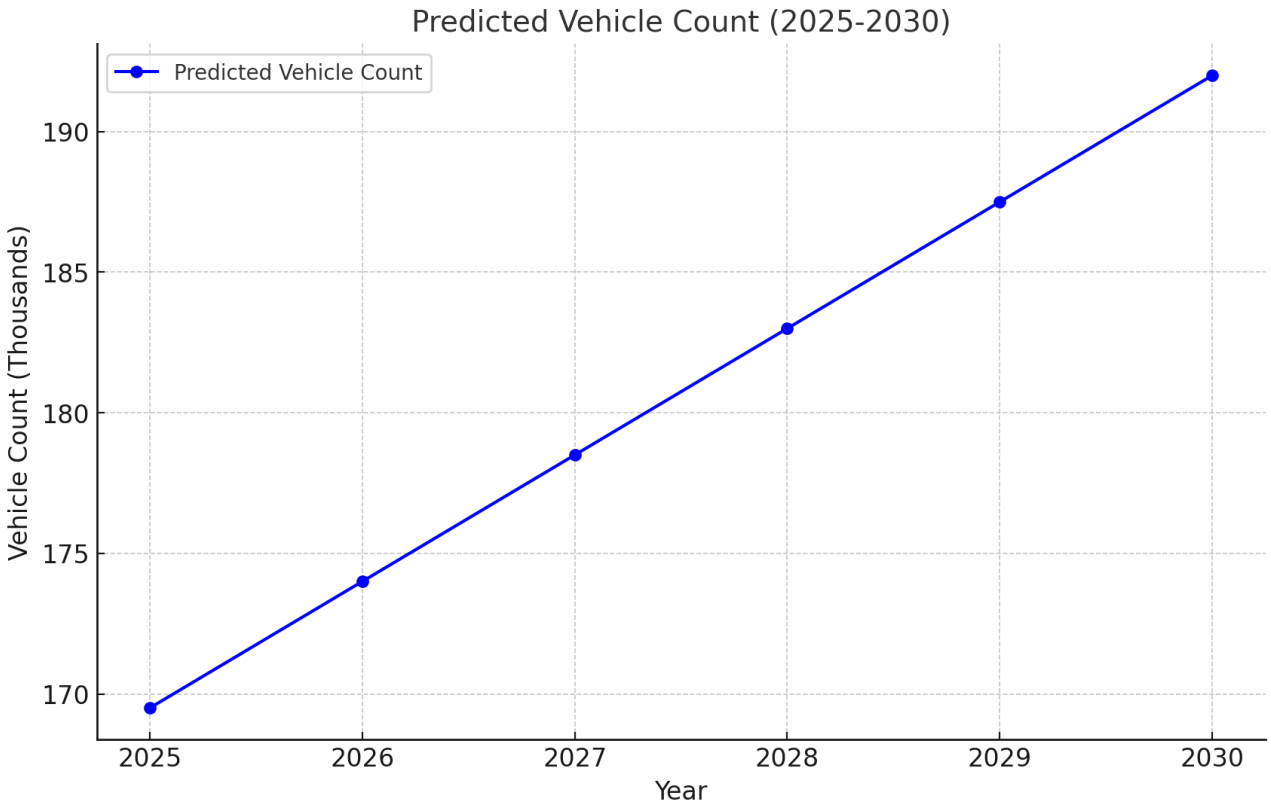


Figure 1. Predicted Vehicle Count

Table 4 provides the forecast for annual average daily vehicle values from 2025 to 2030. These values are derived using a linear regression model and align with the predicted vehicle count trends.

According to the regression analysis results:

R-squared (R^2): 0.977 → The model explains 97.7% of the dependent variable.

F-statistic: 641.1 and p-value: 1.01e-13 → It shows that the model is significant.

Year coefficient: 1.6515 → Annual average increase amount.

P>|t| values: 0.000 → Regression coefficients are statistically significant.

Figure 2 presents the forecast of annual average daily vehicle traffic values from 2025 to 2030. The vertical scale should be adjusted to clearly show the variation over the years. The increasing trends in different vehicle types should be highlighted and interpreted in detail.

To ensure statistical reliability, the regression analysis results should include confidence intervals, R-squared values, and significance levels. This will provide a clearer understanding of the stability of the annual growth rate and potential uncertainties in predictions.

Table 4. Forecast Annual Average Daily Vehicle Values (between 2025-2030)

Year	Automo-biles (piece)	Light Trucks (piece)	Tractors (piece)	Motorcy-cles (piece)	Trucks (piece)	Mini-buses (piece)	Buses (piece)	Special-purpose vehicles (piece)
2014	60.000	20.000	15.000	10.000	5.000	1.000	1.000	500
2015	61.500	20.500	15.200	10.500	5.100			510
2016	63.000	21.000	15.500	11.000	5.200	1.100	1.100	520
2017	65.000	21.500	16.000	11.500	5.300	1.100	1.100	530
2018	66.500	22.000	16.200	12.000	5.400	1.200	1.200	540
2019	68.000	22.500	16.500	12.500	5.500	1.250	1.000	550
2020	69.500	23.000	16.800	13.000	5.600	1.300	1.300	560
2021	71.000	23.500	17.000	13.500	5.700	1.000	1.000	570
2022	73.000	24.000	17.500	14.000	5.800	1.400	1.400	580
2023	74.000	24.200	17.600	16.700	7.200	1.400	1.300	605
2024	79.900	25.000	18.000	18.000	7.600	1.500	1.400	649
2025	80.500	25.500	18.200	18.200	7.700	1.000	1.400	660
2026	81.200	26.000	18.500	18.500	7.800	1.600	1.400	670
2027	82.000	26.500	18.800	18.800	7.900	1.600	1.500	680
2028	82.800	27.000	19.100	19.100	8.000	1.700	1.500	690
2029	83.600	27.500	19.400	19.400	8.100	1.000	1.500	700
2030	84.400	28.000	19.700	19.700	8.200	1.800	1.500	710

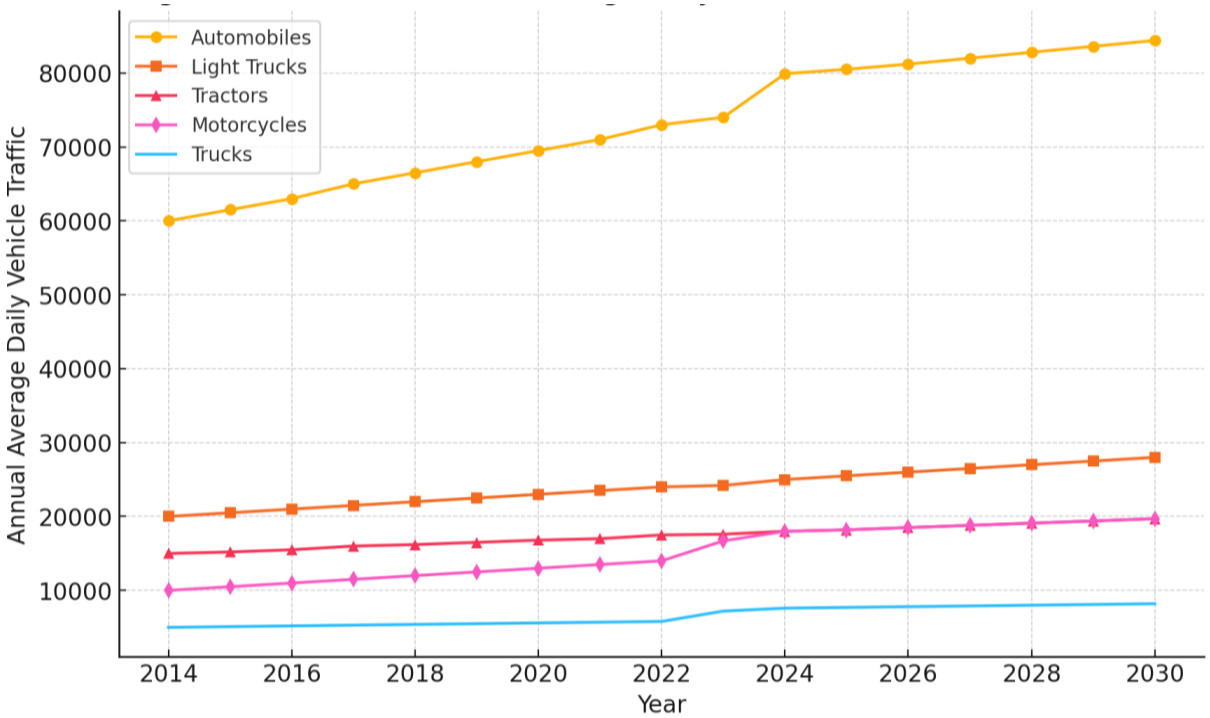


Figure 2. Forecast annual average daily vehicle traffic values (between 2025-2030)

Using regression analysis, predictions for vehicle numbers in Aksaray from 2025 to 2030 were made. The results indicate that vehicle numbers across all categories will continue to rise, with a stable annual growth rate. For instance:

- Automobiles are predicted to increase from 79,918 in 2024 to 84,400 by 2030, adding about 5,000 vehicles in the next six years.
- Light Trucks will increase from 25,000 in 2024 to 28,000 by 2030, showing a steady growth of 3,000 vehicles.
- Tractors are expected to grow from 18,000 in 2024 to 19,700 by 2030, an increase of 1,700 vehicles.
- Motorcycles will rise from 18,000 in 2024 to 19,700 by 2030, adding 1,700 vehicles over six years.
- Trucks will increase from 7,600 in 2024 to 8,200 by 2030, growing by 600 vehicles.
- Minibuses are expected to increase from 1,500 in 2024 to 1,800 by 2030, reflecting a moderate growth of 300 vehicles.
- Buses will remain stable at 1,500 vehicles from 2024 to 2030, showing no significant change.
- Special-purpose vehicles will increase from 649 in 2024 to 710 by 2030, adding 61 vehicles in six years.

The rise in vehicle numbers in Aksaray mirrors the overall development of infrastructure, commerce, and urbanization in the province. The rapid increase in automobiles and motorcycles indicates growing personal mobility, which is likely to lead to greater traffic congestion and challenges related to parking spaces.

Moreover, the rise in light trucks and tractors reflects the continued expansion of agricultural and transportation sectors. The increasing number of minibuses and buses indicates a rising demand for public transportation, highlighting the need for enhanced public transit systems.

Local authorities should consider these trends and plan for improved road infrastructure, expanded public transportation services, and increased parking facilities. Implementing smart transportation systems and traffic management strategies could help mitigate the negative effects of rising vehicle numbers.

These predictions suggest a consistent rise in vehicle numbers across all types, which will likely result in increased traffic congestion and higher demand for transportation infrastructure.

4. Conclusion

The results of the linear regression analysis indicate that private cars will continue to dominate the vehicle landscape in Aksaray, with a projected annual increase of approximately 1000 vehicles per year. This steady rise in private car ownership underscores the growing affluence and urbanization within the province, as more individuals seek personal vehicles for convenience and mobility. However, this

growth also brings about pressing challenges, particularly in terms of traffic congestion, parking shortages, and environmental impact.

On the other hand, while the number of buses, trucks, and motorcycles are expected to grow as well, the growth rates are comparatively slower. Buses, although a key component of public transport, will require substantial investments to improve service efficiency and accessibility. The moderate increase in trucks indicates a steady need for freight transportation, but infrastructure for heavy vehicles should be carefully planned to avoid strain on road networks. Similarly, motorcycles, while beneficial for their efficiency in crowded cities, also pose safety risks that need to be addressed through proper regulation and infrastructure.

In conclusion, the study underscores the importance of forward-thinking policies and infrastructure planning to accommodate the expected growth in vehicle ownership in Aksaray. While the trends analyzed point to continued growth in private car ownership, with corresponding increases in buses, trucks, and motorcycles, the province has an opportunity to shape its future transportation system in a way that balances mobility, sustainability, and safety.

By embracing a multi-modal transportation approach, focusing on environmental sustainability, and planning for future technological changes, Aksaray can ensure that its transportation system meets the needs of its growing population while addressing key challenges such as congestion, pollution, and road safety. The findings and recommendations provided by this study can serve as a foundation for policymakers, urban planners, and stakeholders to develop a cohesive and sustainable strategy for Aksaray's transportation future.

Conflict of Interest Declaration

The author of the article do not have any conflict of interest.

References

Aksaray Municipality, Traffic Department. Traffic Data Records. 2024.

Chatterjee S., Ali S. Hadi. Regression analysis by example. John Wiley & Sons, 2015.

Çinicioğlu EN., Atalay M., Yorulmaz H. Trafik kazaları analizi için bayes ağları modeli. Bilişim Teknolojileri Dergisi 2013; 6(2): 41-52.

Draper Norman R., Harry Smith. Applied regression analysis. Vol. 326. John Wiley & Sons, 1998.

Erkip F. The distribution of urban public services: The case of parks and recreational services in Ankara. Cities, 1997; 14: 353-361.

Freund Rudolf J., William J. Wilson., Ping SA. Regression analysis. Elsevier, 2006.

Karayolları Esnek Üstyapıları Projelendirme Rehberi. Ankara: T.C. Ulaştırma Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü; 2008.

Karayolları Genel Müdürlüğü. Karayolu teknik şartnamesi (yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üst yapı ve çeşitli işler). Ankara: KGM; 2013.

Knupter SM., Pokotilo V., Woetzel J. Elements of success: Urban transportation systems of 24 global cities. McKinsey Company, 2018.

Levinson D. Accessibility and the journey to work. Journal of Transport Geography 1998; 6: 11–21.

Litman T. Evaluating accessibility for transport planning: measuring people's ability to reach desired services and activities. Victoria Transport Policy Institute, 2021.

Rivas ME., Serebrisky T., Suárez-Alemán A. How affordable is transportation in Latin America and the Caribbean? Technical Note No. IDB-TN-1588, Washington, 2018.

Schrank DL., Lomax TJ. The 2007 urban mobility report (No. NTIS-PB2008103659). Texas Transportation Institute, 2007.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 86-104, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 86-104, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Forecast Models Derived by Trend Analysis for the BRICS Economies' Primary Energy Consumption

Imene ROGAI[1,2,a], İzzet KARAKURT[1,b,*], Gökhan AYDIN[1,c]

[1]Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Mining&Energy Research Group, Trabzon, Türkiye
[2]Karadeniz Technical University, Graduate School of Natural and Applied Science, Trabzon, Türkiye

[a]https://orcid.org/0000-0007-5470-2189
[b]https://orcid.org/0000-0002-3360-8712
[c]https://orcid.org/0000-0002-6670-6458
*Sorumlu yazar: karakurt@ktu.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 07.04.2025
Accepted: 06.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Primary energy consumption
Trend analysis
Model
Forecast
BRICS economies

ABSTRACT

In this study, trend analysis-based forecast models were derived for the primary energy consumptions (PECs) of Brazil, the Russian Federation, India, China and South Africa economies, known as the BRICS worldwide using total population (TP) and PECs as independent and dependent variables from 1985 to 2023. The established models were then statistically verified by several indices. A variety of error indicators were also employed to assess the forecasting accuracies of the established models. Additionally, the PECs of the BRICS economies were projected from 2025 to 2035 using the proposed models. The results reveal that the future PECs of the related economies can be successfully projected with the proposed models. Moreover, the forecasting results make it abundantly evident that substantial rises are anticipated for the related economies' future PECs. It is thought that the study's results will allow the way for the proposal and establishment of sustainable strategies for controlling the PECs of the BRICS economies using the proposed methodology.

BRICS Ekonomilerinin Birincil Enerji Tüketimi için Trend Analiziyle Türetilen Tahmin Modelleri

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 07.04.2025
Kabul tarihi:06.07.2025
Online yayımlanma tarihi:13.01.2026

Anahtar kelimeler:
Birincil enerji tüketimi
Trend analizi
Model
Tahmin
BRICS ekonomileri

ÖZ

Bu çalışmada, dünya çapında BRICS olarak bilinen Brezilya, Rusya Federasyonu, Hindistan, Çin ve Güney Afrika ekonomilerinin birincil enerji tüketimleri (PEC) için 1985'ten 2023'e kadarki toplam nüfus (TP) ve birincil enerji tüketimleri (PEC) bağımsız ve bağımlı değişkenler olarak kullanılarak trend analizi tabanlı tahmin modelleri türetilmiştir. Türetilen modeller daha sonra çeşitli indisler ile istatistiksel olarak doğrulanmıştır. Aynı zamanda, oluşturulan modellerin tahmin doğruluklarının değerlendirilmesi için çeşitli hata göstergeleri de kullanılmıştır. Ek olarak, BRICS ekonomilerinin PEC'leri önerilen modeller kullanılarak 2025'ten 2035'e kadar tahmin edilmiştir. Sonuçlar, ilgili ekonomilerin gelecekteki PEC'lerinin önerilen modellerle başarılı bir şekilde tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, tahmin sonuçları ilgili ekonomilerin gelecekteki PEC'lerinde önemli artışların beklendiğini açıkça göstermiştir.

To Cite: Rogai I., Karakurt İ., Aydın G. Forecast Models Derived by Trend Analysis for the BRICS Economies' Primary Energy Consumption. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 86-104.

1. Introduction

Energy is one of the most important factor in developing and achieving the sustainable economic growth of any country. It can be assessed in many forms and its sources can be classified into three main categories as fossil, renewable and fissile (Gazder, 2016; Wang et al., 2022a). Among these energy sources, the fossil fuels (FFs) account for a sizable portion in the world's overall energy supply. They accounted for more than 80% of the world's primary energy consumption (PEC). In other words; oil, natural gas and coal were responsible for 32%, 24% and 27% of the world's total PECs, while those were 6%, 8% and 4% for the hydroelectric, renewables and nuclear respectively in 2023. China, whose PEC reached to 171 exajoule was the global leader in PEC in 2023. This was almost equal to total PECs of the United States (US), India and the Russian Federation which were ranked as second, third, and fourth in PECs respectively in 2023 worldwide (EI, 2024). Even though the FFs still account for the majority of the world's energy requirements, the renewable energy (RE) has recently gained popularity as a global clean energy investment as well.

Apart from 2009 and 2020, the global PEC increased annually throughout the previous 20 years. It experienced a downward trend in 2009 and 2020 due to the impact of the worldwide economic downturn and the Covid-19 respectively. During the Covid-19 especially, lockdown procedures and a decrease in business activity negatively affected the PEC. As a result, global PEC growth declined by 4.5% in 2020, except in China that recovered quickly from the defined catastrophe. 2.2% was the increase in China's PEC, a substantially slower rate than in prior years (+4% annually from 2008 to 2018 and +3.8% in 2019). Significant declines were seen in the US (-7.7%), the European Union (EU) (nearly 8%, with notable declines in the major markets of Germany, France, Italy, and Spain), Japan (7.5%), roughly Canada (6%), and the Russian Federation (5.5%). There was less of a decline in South Korea by 4%, and even lower (around -1.4%) in Saudi Arabia and 3.6% Brazil. Africa and the Middle East saw contractions for the PEC as well (EI, 2024). Following declining trend in 2020, the world PEC has begun to increase again in 2023 worldwide and it is expected to grow dramatically in the future years (almost 50% towards 2050). Growing economies including Brazil, India, China, Türkiye, Indonesia, Bangladesh and more are expected to experience the biggest growth (IPCC, 2013; BP, 2020; Chiu and Lee, 2020; IEA, 2021; BP, 2023).

Given that the importance of energy for both global and domestic economic growths (especially the FFs), it is possible to say that many scholars and a wide range of organizations have extensively looked into a variety of strategies to improve and correct the PEC models by switching to alternative fuels. Additionally; there is a need to provide reliable forecasting about PEC across its different sources either regionally or nationally. Similarly, given that a precise estimate of total PEC indicates a favorable influence on assessing the future trend, countries can identify environmentally friendly approaches that comprise reducing energy waste as well as boosting energy conservation to promote long-term economic growth (Pao and Tsai, 2021; Wang et al., 2022a). Consequently, as there is broad agreement among academics, researches into creating and enhancing forecasting models' efficacy have never ceased

because the risk of uncertainties in making decisions may be decreased by more forecasting models. This is why; based on total population, this study focuses on the trend analysis (TA)-based forecast models for the PECs of the BRICS economies.

2. Evaluation of the Relevant Literature

Enormous researches can be found in the existing literature, studying and utilizing different modeling and forecasting techniques. Various studies have also tested these techniques for energy production/consumption using a variety of data sets from various countries or regions over various time periods. Some recent examples of these studies concentrating on the PEC are as follows. Gazder (2016) presented comparison on Saudi Arabia and Pakistan regarding their PECs and the variables influencing them and proposed predictive models to forecast their PECs till 2040 using regression analysis. The link between economic growth and the PEC was explored by Pedroni cointegration test, the second-generation panel cointegration test, Westerlund and Edgerton test and FMOLS test for BRICS-T countries (Yildirim and Yildirim, 2019). On the basis of data from the G-7 and the N-11 countries for the period from 1990 to 2016, Zafar et al. (2019) probed the relationship between carbon emissions and disaggregated financial development and REC using second generation unit roots testing. Analyzing the links between economic growth, fossil fuel use, CO_2 emissions and oil prices in 54 African countries according to a PMG panel ARDL methodology was carried out by Mensah et al. (2019). The nexus between PEC and economic growth in Tanzania was empirically analyzed on the basis of Engel and Granger tests (Simba and Oztek, 2020). Karakurt (2020) proposed regression models, derived from the social and economic variables of BRICS-T countries to forecast the PECs in the related countries. In another study, BRICS-T countries' oil consumption was modelled and forecasted through proposed predictive models (Karakurt, 2021). Khan and Osinska (2021) proposed predictive models for forecasting the PECs in BRICS utilizing the annual time series data set from 1992 to 2019 as the foundation for a novel FGM with various order parameters, both at the aggregate and disaggregate levels. Konuk et al. (2021) investigated how the next eleven countries' economies (except for Vietnam) and BEC correlated employing the annual data covering the years 1970–2017 were used to perform panel data analysis. Ehigiamusoe and Dogan (2022) used empirical estimations to examine the effects of real income, renewable energy, and their interaction effect on carbon emissions in low-income countries. Zeeshan et al. (2022) compared the nexus among CO_2 emissions, PEC, trade liberalization and economic growth in Latin American and Southeast Asian nations using structural equation modeling technique. Chang and Fang (2022) investigated empirically the effect of REC on the growth of the economies of the N-11 and BRICS using MMQR and AMG methods. The role of PEC, environmental deterioration in the top five carbon emitting countries from fossil, nuclear and renewable energy sources was empirically investigated through multivariate adaptive regression splines (Kartal, 2022). Evidence from Autoregressive distributed lagged in error correction approach was presented for the determinants of REC in Nigeria (Somoye et al., 2022). An innovative time-delay grey model employing mixed-

frequency data to predict China's PEC was applied by Wang et al. (2022a). Fareed and Pata (2022) employed recently developed Fourier panel cointegration and causality tests to examine the effects of renewable and non-REC on economic growth in the top ten countries that consume renewable energy between 1970 and 2019. Lorente et al. (2022) verified the EKC and PH hypotheses in order to examine the relationship between BRICS countries' economic growth, urbanization, PEC, and carbon emissions between 1990 and 2014. Wang et al. (2022b) developed a conceptual framework using the Dumitrescue-Hurlin test to look at the causal relationship between variables and the Driscolle-Kraay test to estimate the long-term coefficient in order to investigate the moderating role of financial development in the REC-CO_2 emissions linkage for the Next 11 countries from 1990 to 2015. The relationship between foreign direct investment, BEC and air pollution was analyzed by means of a panel data analysis for the BRICS countries from 1992 to 2017 (Tuzemen and Tuzemen, 2022). PEC in Turkiye was analyzed using ANN method and PEC forecast for 2021–2025 was made (Demircioglu and Esiyok, 2022).

2.1. Novelty of the study

There are, of course, many modeling and estimating techniques for developing and/or proposing predictive models in the literature. Several factors, including the number of variables, practicality, and usage purposes, can determine which of these is preferred. While these modeling techniques are advantageous in that they can precisely describe the phenomenon of long-term trends, upon construction and applying the models to actual situations, they can exhibit certain limitations. In this instance, less precise and more straightforward modeling approaches might be valued, particularly if it just serves as a part of a more complex tool for planning (Bianco et al., 2009). In contrast to other methods those require numerous parameters and are far more complex, linear and nonlinear modelling technique, also called as TA technique, presents a notion that readers can infer future events from what has happened in the past. In other words; the TA presents the data's evolution from the past to the present and makes some forecasts for upcoming planning easier (Celiker et al., 2021). In addition, this approach's primary benefit is its simplicity, and projections are made using whatever data is available (Kone and Buke, 2010). Moreover, the followings enumerate the advantages of the TA over alternative forecasting modelling techniques. First, a regression toolbox is available in practically all statistical software, creating models is simple using TA which is inside the regression toolbox. Second, given that the expression of the dependent variable is a function of the independent variables, simpler and more understandable model could be derived. Third, unlike artificial intelligence applications, it doesn't have any black box features that would obscure the structure of the function being approximated when creating a model. Fourth, once the final formula has been established, it can be used for any projection or scenario. Moreover, and the most importantly, no studies to date focused on the relationship between the PECs and total population in the BRICS countries in the relevant literature. Thus, this study aims at filling the aforementioned gap and presents more practical predictive models.

3. BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China and South Africa) economies

Goldman Sachs chief economist Jim O'Neill propounded an acronym as BRIC for the developing nations of Brazil, Russia, India, and China on the basis of their common progress of macroeconomic and demographic indicators in 2001. In 2010, then South Africa joined officially to the group and the acronym became as BRICS. As of January 2024, five additional nations including Egypt, Ethiopia, Iran, the United Arab Emirates, and Saudi Arabia, have formally joined the group known as BRICS since 2010. It is expected that the group will be renamed "BRICS+" with the additional members, though this is not yet known (Ergezer, 2025). On one hand; since Jim O'Neill coined the BRIC acronym in the early 2000s, the number of appealing categories for developing/emerging market nations has skyrocketed. MINT, EAGLE, CIVETS and N–11 or Next – eleven are some of the widely used abbreviations for economies in developing/emerging markets (Cambazoglu, 2021; PwC, 2024). Although they are the world's fastest growing economies, the BRICS countries vary greatly in terms of geographical location and availability of natural resources, rate of development and economic growth as well. Because of these outstanding features, studying on the BRICS countries is crucial to propose policies for achieving sustainable development as the international organizations. Demographically, the BRICS nations have currently over a total population of 3 billion people, representing around 40 percent of global population, 39% of world urbanization rate, representing roughly 26 trillion US dollars GDP, or 26% of the global economy. These nations also occupy a 30% of total surface of Earth. Additionally, the BRICS economies had higher annual growth rate than the world's average, which was 2.72%. India recorded the highest growth at an annual rate of 7.58%, while South Africa was the lowest performing BRICS economies. There was just one country, the Russian Federation that was witnessing economic decline. When it comes to human development, it can be noted that the Russian Federation is ranked fairly high among the group, while India and others are respectively in the medium and the high human development categories. Furthermore, by 2050, it is projected that the GDPs of nearly all BRICS nations will have advanced to a high position, except the Russian Federation. For example, in terms of nominal GDP expressed in US dollars, China is predicted to surpass the US in 2030 and continue to lead the world economy through 2050 (Zakarya et al., 2015; WBI, 2025). Conclusively, recent projections suggest that the BRICS countries will be the world's most powerful economies by 2030 (Azevedo et al., 2018; Gusarove, 2019; Chang and Fang, 2022). Thus, the BRICS countries have recently attracted a lot of attention from researchers due to their socio-economic characteristics and influential in global markets. As the developing economies, the BRICS nations also hold important positions in the global energy balance in terms of their energy resources and consumptions. As seen in Figure 1, this group has significant energy resources. In other words; around 8.5 percent, 25 percent, and 40 percent of the known reserves of oil, natural gas and coal respectively in the world are located in the BRICS countries. In terms of the FF resources, the leader countries among the BRICS countries are China, India and the Russian Federation. Apart from FFs, it is evident from Figure 1 that the BRICS countries possess also substantial nuclear, hydroelectric, and renewable energy resources as well. As it can be followed, these

countries account for over 45% and 35% of the global hydropower, and renewables respectively, and around 25% nuclear resources. Concerning nuclear, hydropower, and renewable energy sources, China holds a substantial share among the BRICS countries. China is accompanied by Brazil in hydropower, India in renewable energy sources, and the Russian Federation in nuclear power.

Besides significant energy resources, growing PECs are another distinguishing feature of the BRICS countries. A sizeable portion of the worldwide PEC results from of these countries. In 2023, the total PECs of the BRICS countries was 260 exajoules, while the world's PEC was 620 exajoule. Put differently, the BRICS countries accounted for almost 42% of the world's total PEC (Figure 2). China, India and the Russian Federation were the top three BRICS countries that contributed most to these rates, placing them at the forefront.

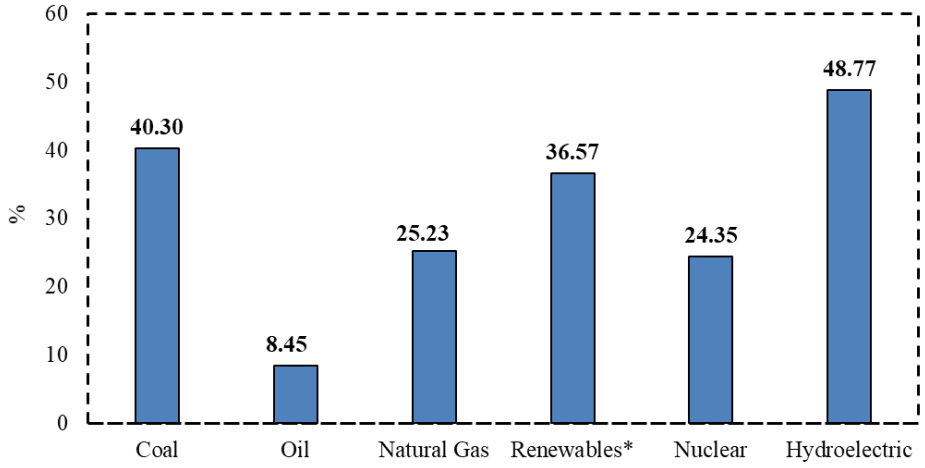


Figure 1. Current status of the energy resources of the BRICS economies (EI, 2024)

4. Modelling approach

4.1. Data

The PEC and total population (TP) data for the years 1985–2023 are used in this study, with the exception of the Russian Federation. Founded after the collapse of the Soviet Union in the 1990s, data for the Russian Federation are available as of 1990. Therefore, the Russian Federation has been excluded from the study. Additionally, the new members of the BRICS have also been not included in the study. The data were collected from the officially and freely available on line sources (EI, 2024; WBI, 2025). Since the TP and energy requirements have a strong correlation, and their time series are readily accessible in a variety of statistical databases, the TP was utilized as the independent variable. Additionally; for variable selection, this research followed the previous research studies of Kavaklıoğlu et al. (2009) and Kankal et al. (2011) since they state that population growth raises the demand for energy resources due to a variety of human activities. Descriptive statistics, performed on raw data which are PEC and TP, are recorded in Table 1. It descriptively reveals that the PEC (exajoule) and TP (million) on average are 60.99 and 1242.913 that are really substantial respectively for China. Although

the largest average value of the TP belongs to China, the SD of the TP for India shows the largest deviation among BRICS nations. It reflects as 162.42 exhibiting variance as determined by the CV, which is obtained by dividing SD by the mean of 15.41. On the other hand; for an observed series to be considered symmetric or normally distributed, the normal values for kurtosis and skewness must be zero (the ideal one).

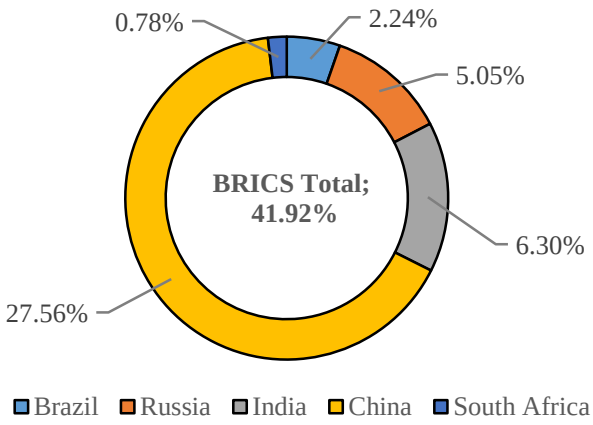


Figure 2. Share of the BRICS economies' PECs in the world (EI, 2024)

Nonetheless, some academics contend that the observed series is also comparable to a normal distribution if both values fall within ±1.5 (Tabachnick and Fidell, 2013; Erba and Beydogan, 2017). Based on the skewness and kurtosis in Table 1, the results suggest that every observed series has a normal distribution. In particular, values based on skewness indicate that the PEC variable is positively skewed, which means that all of the countries' variables are biased to the right. In contrast, the variable TP is skewed negatively.

Table 1. Results for the descriptive statistics

Nations	Series	Min	Max	Mean	SD	CV (%)	Skewness	Kurtosis	JB test
Brazil	**PEC**	4.94	12.83	8.43	2.49	29.54	0.35	-1.07	0.348
	TP	135.274	204.471	172.897	21.24	12.29	-0.21	-1.21	0.347
India	**PEC**	5.70	28.55	14.71	6.77	46.02	0.60	-0.75	0.274
	TP	784.360	1310.152	1053.809	162.42	15.41	-0.05	-1.25	0.362
China	**PEC**	22.14	126.49	60.99	35.44	58.11	0.69	-1.07	0.140
	TP	1051.040	1379.860	1242.913	96.85	7.79	-0.47	-0.90	0.335
South Africa	**PEC**	3.29	5.27	4.35	0.66	15.08	0.05	-1.39	0.285
	TP	32.679	55.386	44.377	6.65	14.98	-0.15	-1.04	0.469

CV: the coefficient of variation (%), SD: the standard deviation; JB: the statistic of the Jarque-Bera (JB) test normality ($p > 0.05$ presents the normality of series).

Additionally, based on the kurtosis results, every variable has a kurtosis value that is lower than the normal value (≤±3) giving evidence that this distribution's kurtosis curve is platykurtic. That is, data are dispersed over a larger area and have a slightly flatter distribution than normal. Conclusively, the results of skewness and kurtosis affirm that every variable follows a normal distribution. This is consistent with the normalcy test conducted by Jarque-Bera (JB) offering compelling proof that every observed series

has a normal distribution because of the JB test's highest p-values ($p>0.05$). Therefore, it may be concluded that the data generally supports linearity, one of the core tenets of the regression model put out by Ostrom (1978).

4.2. Methodology

We utilized the TA to establish and propose the forecasting models for the PECs in the BRICS countries. This technique makes use of the past correlation between a dependent and independent variable to propose predictive models for forecasting the dependent variable's future values. In the analysis, the assumption is that future PEC and TP will be in line with historical trends. The main advantage of this method is that it is straightforward and uses whatever data is available to make projections (Aydin, 2015; Aydin et al., 2015; Kok and Benli, 2017). The equation forms for the TA that were used in the study, are explained as linear, logarithmic, power, exponential, inverse, growth and S functions. The data were split into two sets: one set was used to train the model between 1985 and 2015 (74.2%), and the other set was used to test it between 2016 and 2023 (24.8%). The SPSS software, providing an option for regression, was applied for establishing the forecasting models. Following model development, a variety of statistical tests were used to confirm the generality, plausibility and statistical significance of the estimated variables such as R^2, assessing how well a model fits actual data points, or a metric that indicates the model's degree of prediction, F – and t tests to confirm that the independent and dependent variables having meaningful relationships and to evaluate the strength of each model coefficient individually, and examining the predicted versus actual trends respectively. The R^2 is used as a standard to evaluate the correctness of the model, in addition to providing how much of the variance of one variable may be anticipated from another. Higher R^2 values suggest a more trustworthy model. In other words; since it fluctuates between 0 and 1, the latter of which indicates that the data and the fitted curve points have a perfect linear functional connection, but, the first indicates the opposite as noted by Aydin (2014) and Despotovic et al. (2015). Two important tests that have a direct impact on the models' significance and confidence intervals of the models are the F and t tests respectively in statistical inference and coefficients and finally, the conclusions drawn from testing the hypotheses. When the computed F- and t-values surpass the tabulated F- and t-values, the model's validation is verified Aydin (2014). It implies, in other words, that every independent variable in the model is significant and that there is a substantial link between the dependent and independent variables. Moreover; robustness and/or accuracies of the derived models was measured in order to choose the most effective forecasting model, following the verification of the derived models. The statistical indices that were used to assess the robustness of the established models are displayed in Table 2 with their mathematical illustrations. Whatever the performance criterion, the fitted curve often more closely matches the real data the lower the criterion's value (Uma et al., 2011). Stated differently, the forecasting model's accuracy increases with decreasing values of the statistical indices. On the other hands; a pair of measures of the average magnitude of absolute projected errors are the MAD and MSE (Paiva et al., 2021), while the RMSE

measures the change in the estimated values around the measured data and provides information on the performance over the short period of time. As an another error indicator, The RRMSE serves to measure the overall relative accuracy of a model. Additionally, the U_{95} shows more information about the model deviation as well (Azadeh et al., 2011; Bianco et al., 2014). Furthermore, the research flowchart can be seen in Figure 3.

Table 2. Criteria for evaluating the correctness of the models

Mean absolute deviation	$MAD = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=}^{n}\lvert X_i - Y_i\rvert\right)$
Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}$
Relative root mean square error	$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}}.100$
Uncertainty at 95%	$U_{95} = (1.96).[(SD^2 + RMSE^2)]^{1/2}$
Maximum absolute relative error	$erMAX = max\left(\left\lvert\frac{X_i - Y_i}{Y_i}\right\rvert\right)$
Mean absolute percentage error	$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\lvert X_i - Y_{i)}\rvert}{Y_i}\right).100$

where; n is the total number of data, X_i is the predicted PEC, Y_i is the actual PEC, $\bar{O}$ is the mean value of observed data

5. Results and Discussion

5.1. Derived models and validation

Forecasting models based on the TP are provided in Table 3. Models in all equation forms were firstly derived for all nations and then, the models in Table 3 were selected, based on their mainly lowest MAPE and RRMSE values. As it can be followed from Table 3, the derived models for China and India are explained as the power functions, while those are linear function for Brazil and inverse function for South Africa. Based on the verification results in Table 4, it is evident that a strong degree of association between the TP and PEC is indicated by the proposed models' R^2 values, which are greater than 0.90, apart from the R^2 values of China whose R^2 is 0.89. Additionally, the calculated F and t values for each model are significantly greater than the tabular ones as seen in Table 4. These results confirm that, at a 95% confidence level, all of the equations and individual variables involved in the derived models are statistically significant. Furthermore, looking at predicted versus actual trends as indicated in Figure 4, overall, it may be concluded that at the predicted and actual PECs have a strong correlation, demonstrating the ability of the derived models to provide accurate PEC forecasts for the study's conditions. In summary, these findings demonstrate the statistical significance of the associated models.

Table 3. The best forecast models among those derived

Countries	Functions	Equations
Brazil	Linear	$PEC = (-11.340) + (0.114).TP$
India	Power	$PEC = (1.4x10^{-8}).(TP)^{(2.976)}$
China	Power	$PEC = (4.40x10^{-20}).(TP)^{(6.812)}$
South Africa	Inverse	$PEC = (8.288) - (170.861)/(TP)$

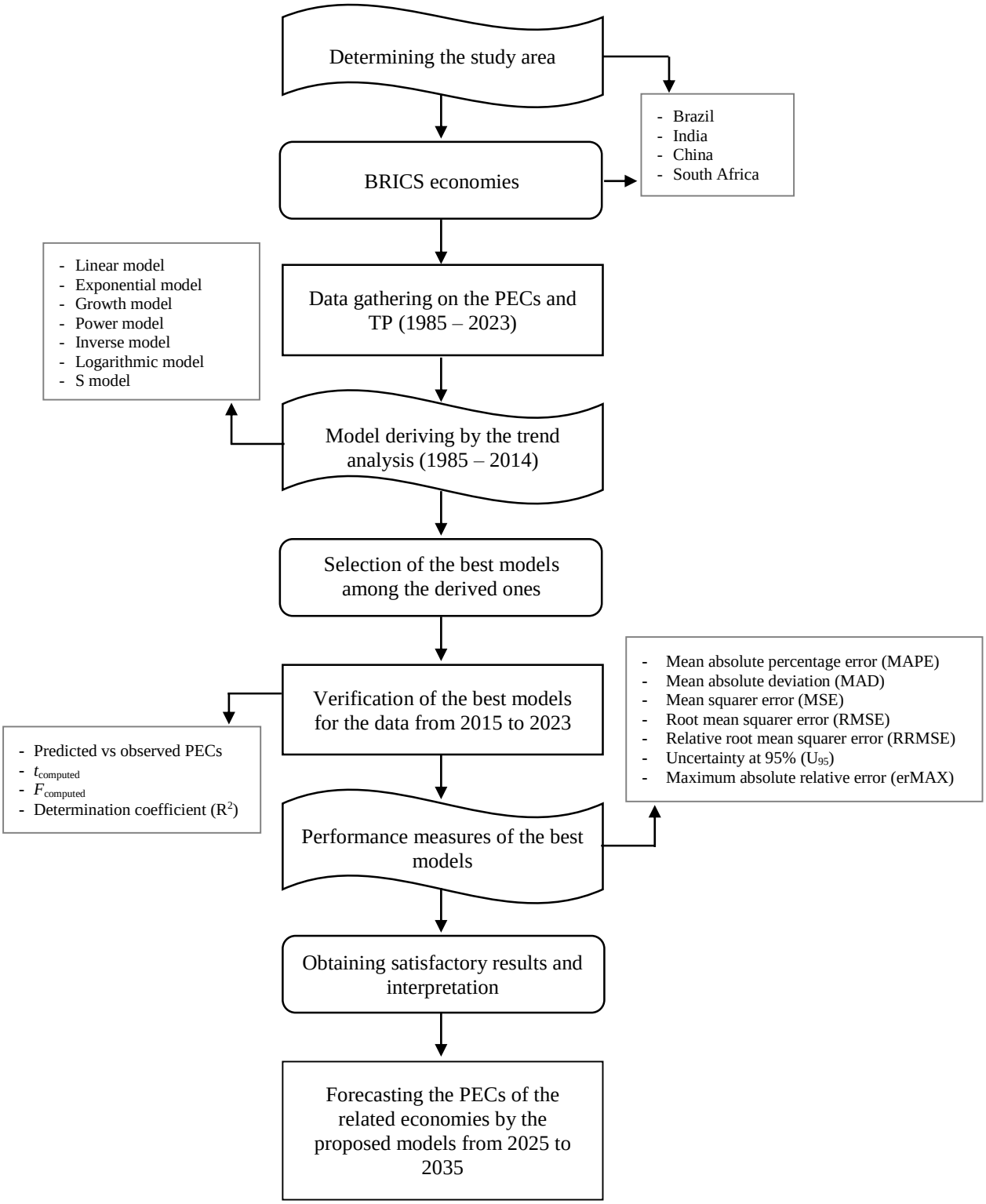


Figure 3. Methodological schema

5.2. Robustness test

In this part, the robustness of the derived models has been highlighted. Among the several performance criteria which were tested in the current study, the MAPE is the most useful tool when estimating relative error since raw data, preprocessed data, and input data used to estimate the model have distinct scales (Azadeh et al., 2011). Kim and Kim (2016) identify the MAPE as one of the most popular statistical metrics for assessing forecast accuracy owing to its benefits of interpretability and scale independence. The MAPE is well-liked by industry practitioners due to its scale independence and ease of interpretation (Byrne, 2012). Because it presents the error as a percentage, this measure is simple to interpret. The usage of absolute percentage errors also solves the issue of positive and negative errors canceling each other out (Bianco et al., 2010; Li et al., 2013). The classifications for the MAPE and RRMSE and the outcomes of the models' performance metrics are provided in Table 5 and Table 6 respectively. Based on the MAPE values, it is obviously noticed that the proposed model for China shows a good forecasting ability, while others have excellent forecasting abilities. Contrary to the MAPE values, it can be clearly seen that the all proposed models indicate the excellent forecasting abilities in terms of the RRMSE values. Additionally, the proposed models indicate high robustness according to other statistical indices as well since their values are close to zero confirming the high predictive capabilities of the proposed models. On the other hand; the current study's robustness results were contrasted with those of a few other studies in the existing literature (Table 7).

Table 4. Statistical results of the proposed models indicating the validation

Countries	Variables	Standard error of estimation	$t_{calculated}$	t_{table}	$F_{calculated}$	F_{table}	R^2
Brazil	Constant TP	0.555	-13.637 23.943	1.690	573.291	4.125	0.95
India	Constant TP	0.050	- 50.834	1.690	2584.129	4.125	0.99
China	Constant TP	0.193	- 15.320	1.690	234.703	4.125	0.89
South Africa	Constant TP	0.213	33.222 -15.979	1.690	255.341	4.125	0.90

Table 5. Reference table for the MAPE and RRMSE (Li et al., 2013)

(%)	(%)	Forecasting capability
MAPE ≤ 10	RRMSE < 10	Excellent
11 ≤ MAPE ≤ 20	10 < RRMSE < 20	Good
21 ≤ MAPE ≤ 51	20 < RRMSE < 30	Reasonable
MAPE > 51	RRMSE ≥ 30	Poor

As can be followed, the relative errors were lower for the proposed models. In other words, the proposed models have lower MAPE values, which is an indication that they have high accuracy in comparison to other models developed in the literature.

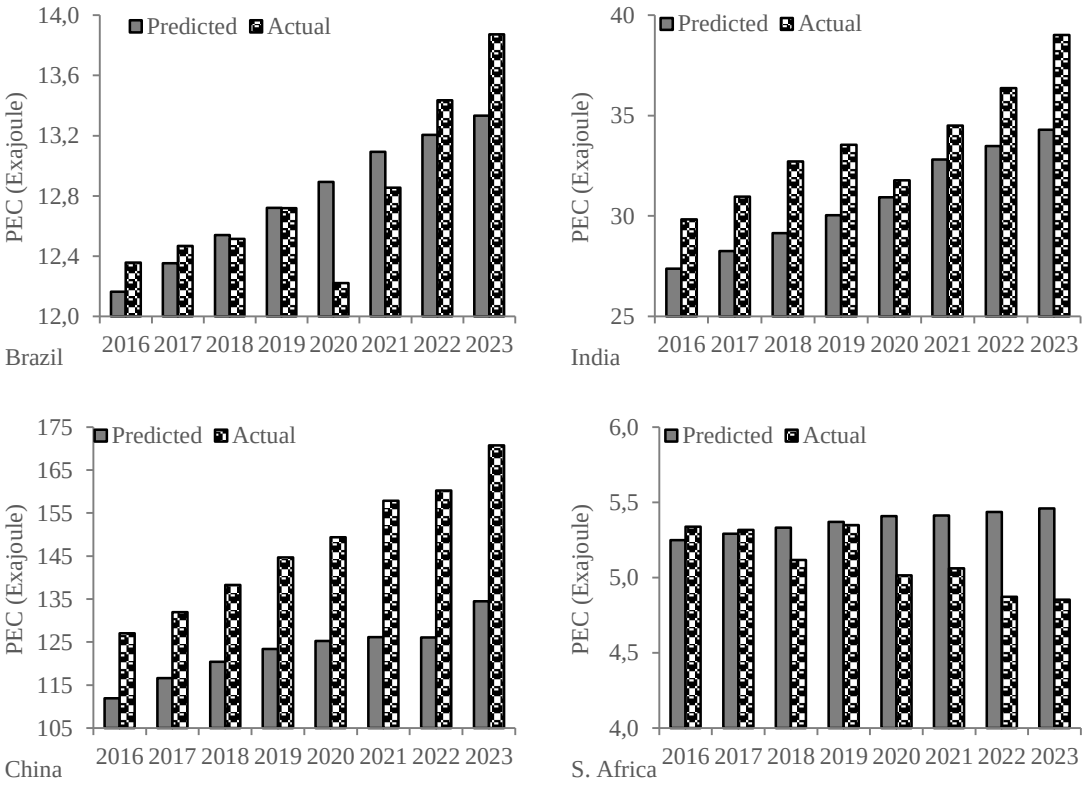


Figure 4. Predicted PECs versus actual PECs for the BRICS economies

Table 6. Error indicators of the proposed models

Countries	Error indicators					
	MAD	RMSE	RRMSE	U_{95}	erMAX	MAPE
Brazil	0.25	0.09	0.73	0.50	0.05	1.96
India	2.80	0.51	1.53	2.55	0.12	8.25
China	22.79	1.95	1.32	15.54	0.21	15.52
South Africa	0.28	0.16	3.14	0.55	0.13	5.70

Table 7. A comparison of the current results with the relevant studies in the literature

Existing literature			This study	
Scholar(s)	Country	MAPE (%)	Country	MAPE (%)
Khan and Osinska (2021)	Brazil	3.43	Brazil	1.96
	South Africa	21.56	South Africa	5.70
Wang et al. (2022b)	China	31.71	China	15.52

5.3. Forecasting results

The future PECs for the BRICS and N-11 nations from 2025 to 2035 are projected by the proposed models. For this purpose, the data of UN (2018) on the TP were utilized. The forecasting results are depicted in Figure 5 together with the historical trend from 1985. Additionally, Figure 6 illustrates that the total PECs of the BRICS countries will amount to 205.05 exajoule in 2035 with a total decrease rate of 10.25% and 0.29% annually, as compared to 2023. Apart from China, the PECs of all the nations are substantially expected to increase towards the year of 2035. As can be followed from Figure 6, a declining trend in the PECs of China is expected for the coming years due to the probably decreasing the TPs of the related nations. Among the BRICS nations, Brazil is projected to see the minimal growth (6.60%). It is noteworthy that a very high increase is expected in the PECs of South Africa.

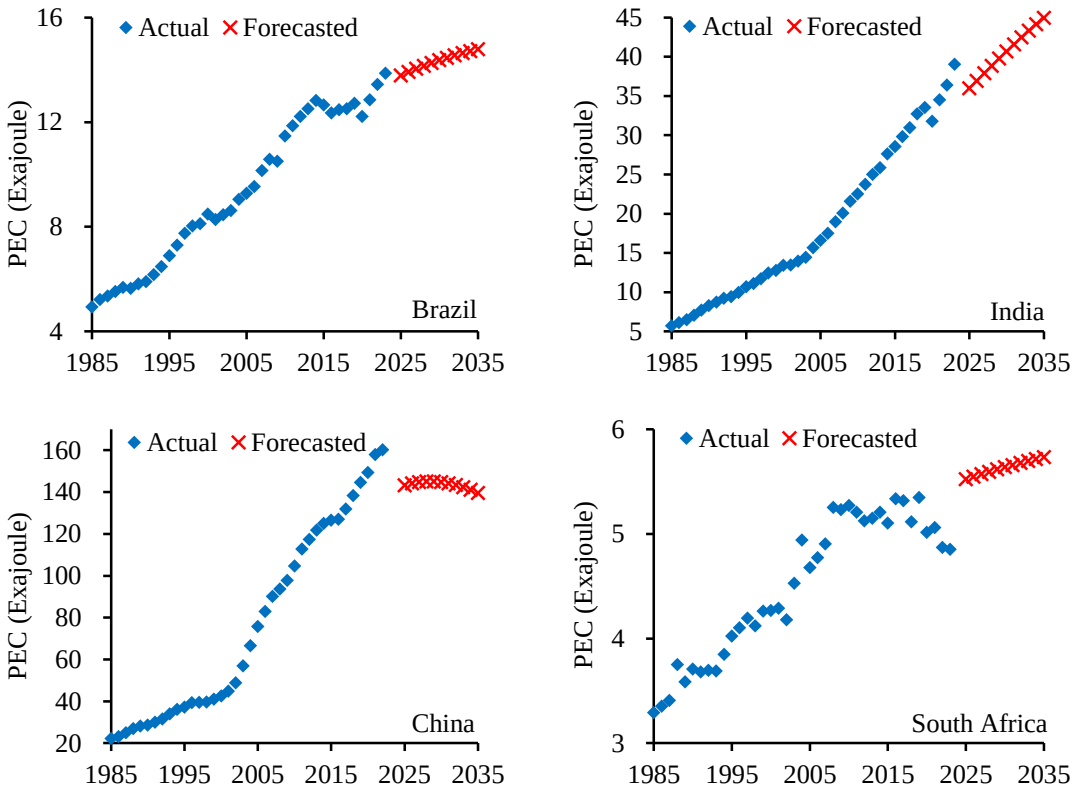


Figure 5. Forecasted PECs for the BRICS economies

That means, South Africa's' PEC will increase from 4.85 exajoule in 2023 to 5.73 exajoule in 2035. In other words, South Africa will experience an increase rate of 18.14% as compared to their total PEC in 2023. The forecasting results regarding the PECs of the BRICS countries, appear to be mostly in line with the associated nations' energy projections. Here are some examples from previous researches and scenarios, including *Accelerated*, *Net Zero* and *New Momentum*, which examine some potential routes for the world energy system. Brazil's PEC will increase to an average of around 14-16 exajoule towards 2050 as similar to the forecast in this study. These scenarios also forecast that China's PEC will rise, albeit in the short term, before falling over the next decade, while a strong increase for India's PEC (BP,

2023a; BP, 2023b; BP, 2023c). In South Africa, coal accounts for most of the PEC on the basis of its recent consumption values. It is possible to say that these figures are an indication which the coal-based total PEC of South Africa may increase in the coming years. This projection is supported by Hartono et al. (2021) since they said that under both pessimistic and optimistic scenarios, total PEC based on coal is anticipated to rise over time. As stated by Islam et al. (2022), the increasing demand for energy is highly associated with the growing population that live in cities. Therefore, it is conceivable that energy usage would rise in the coming years when considering the increases in the total and urban population ratios.

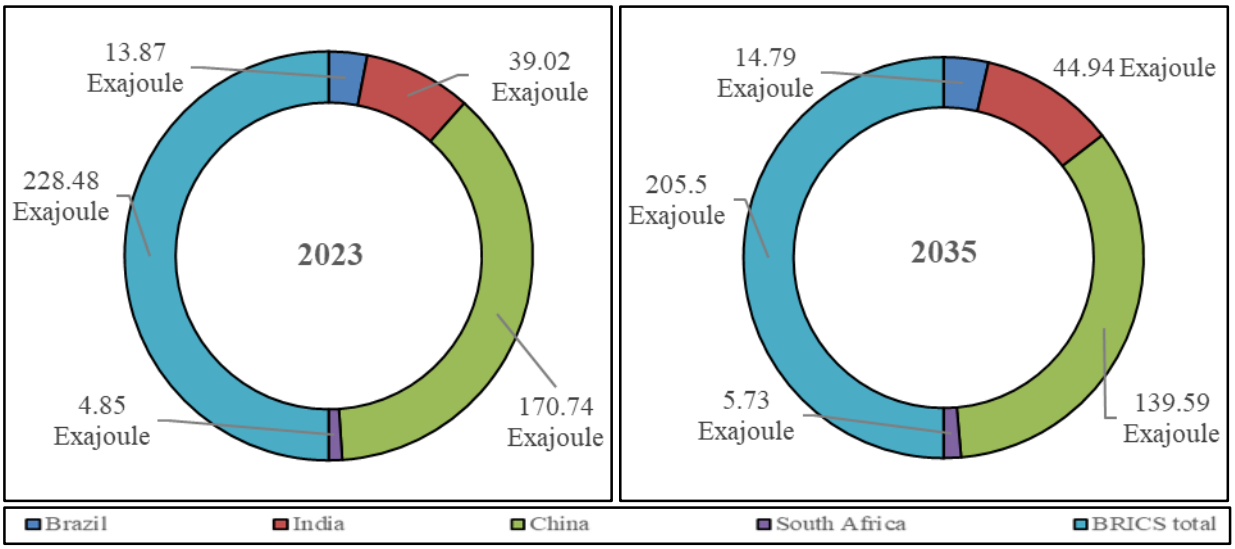


Figure 6. Total PECs of the BRICS economies in 2023 and 2035

6. Conclusions

This paper intends to derive and propose trend analysis-based forecast models for projecting the PECs of the BRICS countries. Basic conclusions are as follows. Firstly, it was found that the proposed models are based on the linear function for Brazil and inverse function for South Africa, while those are explained as power functions for India and China. Secondly, the verification and robustness tests of the proposed models showed that the proposed models have the potential to be useful in projecting future PECs in the associated countries, confirming that the TA is one of the effective useful tools for modelling and forecasting studies. Thirdly, the forecasted results demonstrated that there will be a decrease for the future PECs of the BRICS nations. Among the related emerging economics, it was disclosed that Brazil is projected to see the minimal growth, while South Africa is the only country that will experience the largest increase in PECs towards 2035. Due to their exceptional strong features, it was finally concluded that the BRICS countries will be able to steer the global economy in the near future.

7. Recommendations

This study has adopted only the BRICS countries. In order to generalization the results in future, studies can be conducted for other developed and emerging/developing countries as well. Similarly, the current research has only considered the population as the independent variable. Other relevant variables that affect the PECs such as urban population and gross domestic products, especially, for the BRICS countries, may be adopted and forecast models can be derived by the proposed approach. Additionally, unforeseen occurrences such as the COVID-19 pandemic and the conflict between the Russian Federation and Ukraine could pose serious obstacles to precisely projecting the PECs. This could result in several missing data points and poor data quality in the PEC databases, which would make accurate prediction difficult. Therefore, further study, re-evaluation and re-scenarisation of such events will be required. Conclusively, it is strongly suggested that the improvements in the PECs forecasts method should be carefully pursued for the indispensable contribution to the related nations' growth.

Conflict of Interest

The authors of the article declare that they have no conflict of interest.

Authors' Contribution

All authors planned and designed the study in addition to the data collection and analysis. Additionally, all authors commented on, read and approved the final version of the paper.

References

Aydin G., Kaya S., Karakurt I. Modeling of energy consumption based on population: The case of Turkey. 24th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 14-17 April 2015, Antalya, pp. 88-92.

Aydin G. Production modeling in the oil and natural gas industry: An application of trend analysis. Petroleum Science and Technology 2014; 32(5): 555-564.

Aydin G. Forecasting natural gas production using various regression models. Petroleum Science and Technology 2015; 33: 1486–1492.

Azadeh A., Saberi M., Asadzadeh SM., Khakestani M. A hybrid fuzzy mathematical programming-design of experiment framework for improvement of energy consumption estimation with small data sets and uncertainty: The cases of USA, Canada, Singapore, Pakistan and Iran. Energy 2011; 36(12): 6981-6992.

Azevedo VG., Sartori S., Campos LMS. CO_2 emissions: A quantitative analysis among the BRICS nations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018, 81: 107–115.

Bianco V., Manca O., Nardini S. Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models. Energy 2009; 34(9): 1413-1421.

Bianco V., Manca O., Nardini S., Mine AA. Analysis and forecasting of nonresidential electricity consumption in Romania. Applied Energy 2010; 87(11): 3584–3590.

Bianco V., Scarpa F., Tagliafico LA. Analysis and future outlook of natural gas consumption in the Italian residential sector. Energy Conversion and Management 2014; 87: 754–764.

BP. 2020. Technical report on BP energy outlook 2035. Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy, (accessed on 15 February 2025).

BP. 2023. British Petroleum Energy Outlook – 2022, Insights from the Accelerated, Net Zero and New Momentum scenarios – Brazil. Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022-country-insight-brazil.pdf (2024, accessed on 10 March 2025).

BP. 2023a. Statistical review of world energy 2022. Retrieved from https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html (accessed on 10 February 2025).

BP. 2023b. British Petroleum Energy Outlook – 2022, Insights from the Accelerated, Net Zero and New Momentum scenarios – China. Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022-country-insight-china.pdf (accessed on 5 March 2025).

BP. 2023c. British Petroleum Energy Outlook – 2022, Insights from the Accelerated, Net Zero and New Momentum scenarios – India. Retrieved from https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022-country-insight-india.pdf (accessed on 1 January 2025).

Byrne RF. Beyond traditional time-series: Using demand sensing to improve forecasts in volatile times. Journal of Business Forecasting 2012; 31(2): 13-20.

Cambazogu B. Comparative macroeconomic analysis of CIVETS Countries. Turkish Studies - Social Sciences 2021; 15(2): 77-91.

Celiker M., Yukseler U., Dursun UF. Trend analyses for discharge-recharge of Tacin karstic spring (Kayseri, Türkiye). Journal of African Earth Sciences 2021; 184: 104344.

Chang CL., Fang M. Renewable energy-led growth hypothesis: New insights from BRICS and N-11 economies. Renewable Energy 2022; 188: 788-800.

Chiu YB., Lee CC. Effects of financial development on energy consumption: The role of country risks. Energy Economics 2020; 90: 104833.

Demircioglu M., Esiyok S. Energy consumption forecast of Turkey using artificial neural networks from a sustainability perspective. International Journal of Sustainable Energy 2022; 41(8): 1127–1141.

Despotovic M., Nedic V., Despotovic D., Cvetanovic S. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 52: 1869–1880.

Ehigiamusoe KU., Dogan E. The role of interaction effect between renewable energy consumption and real income in carbon emissions: Evidence from low-income countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2022; 154: 111883.

EI. 2024. Statistical review of world energy 2024. Retrieved from https://www.energyinst.org/statistical-review (accessed on 12 December 2024).

Erba S., Beydoğan HO. Attitudes of educators towards educational research. Kırsehir Journal of the Faculty of Education 2017; 18(3): 246-260.

Ergezer EC. 2025. BRICS expansion and the rising voice of the global south. Turkish Economic Policy Research Foundation, an evaluation note, https://www.tepav.org.tr/upload/files/1705388852BRICS_genislemesi_ve_kuresel_Guney___in_yukselen_sesi.pdf (accessed 10 January 2025).

Fareed Z., Pata UK. Renewable, non-renewable energy consumption and income in top ten renewable energy-consuming countries: Advanced Fourier based panel data approaches. Renewable Energy 2022; 194: 805-821.

Gazder U. Energy consumption trends in energy scarce and rich countries: comparative study for Pakistan and Saudi Arabia. World Renewable Energy Congress-17, 4-8 December 2016, Bahrain, pp. 1 – 8.

Gusarove S. Role of China in the development of trade and FDI cooperation with BRICS countries. China Economic Review 2019; 101271.

Hartono D., Yusuf AA., Hastuti SH., Saputri NK., Syaifudin N. Effect of COVID-19 on energy consumption and carbon dioxide emissions in Indonesia. Sustainable Production and Consumption 2021; 28: 391–404.

IEA. 2021. World energy outlook 2021. Retrieved from https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021 (accessed on 12 December 2024).

IPCC. 2013. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge (UK), NY (USA): Cambridge University Press.

Islam MM., Irfan M., Shahbaz M., Vo XV. Renewable and non-renewable energy consumption in Bangladesh: The relative influencing profiles of economic factors, urbanization, physical infrastructure and institutional quality. Renewable Energy 2022; 84: 1130-1149.

Kankal M., Akpınar A., Komurcu IM., Ozsahin ST. Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables. Applied Energy 2011; 88: 1927–1939.

Karakurt I. Energy consumption modelling using socio-economic indicators: Evidence from the BRICS-T countries. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2020; 120(7): 425-43.

Karakurt I. Modelling and forecasting the oil consumptions of the BRICS-T countries. Energy 2021; 220: 119720.

Kartal MT. The role of consumption of energy, fossil sources, nuclear energy, and renewable energy on environmental degradation in top-five carbon producing countries. Renewable Energy 2022; 184: 871-880.

Kavaklıoğlu K., Ceylan H., Ozturk KH., Canyurt EO. Modeling and prediction of Turkey's electricity consumption using artificial neural networks. Energy Conversion and Management 2009; 50: 2719–2727.

Khan AM., Osinska M. How to predict energy consumption in BRICS countries?. Energies 2021; 14: 2749.

Kim S., Kim H. A new metric of absolute percentage error for intermittent demand forecasts. International Journal of Forecasting 2016, 32(3): 669–679.

Kok B., Benli H. Energy diversity and nuclear energy for sustainable development in Turkey. Renewable Energy 2017; 111: 870-877.

Kone CA., Buke T. Forecasting of CO_2 emissions from fuel combustion using trend analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010; 14: 2906–2915.

Konuk F., Zeren F., Akpınar S., Yıldız S. Biomass energy consumption and economic growth: Further evidence from Next-11 countries. Energy Reports 2021; 7: 4825–4832.

Li MF., Tang XP., Wu W., Liu HB. General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. Energy Conversion and Management 2013; 70: 139–148.

Lorente DB., Driha OM., Halkos G., Mishra S. Influence of growth and urbanization on CO_2 emissions: The moderating effect of foreign direct investment on energy use in BRICS. Sustainable Development 2022; 30: 227–240.

Mensah IA., Sun M., Gao C., Omari-Sasu AY., Zhu D., Ampimah BC., Quarcoo A. Analysis on the nexus of economic growth, fossil fuel energy consumption, CO_2 emissions and oil price in Africa based on a PMG panel ARDL approach. Journal of Cleaner Production 2019; 228: 161-174.

Ostrom CW. Time Series Analysis - Regression Techniques. The USA: Sage Publications, 1978.

Paiva H., Afonso RJM., Caldeira FMSLA., Velasquez EA. A computational tool for trend analysis and forecast of the COVID-19 pandemic. Applied Soft Computing 2021; 105: 107289.

Pao HT., Tsai CM. Multivariate granger causality between CO_2 emissions, energy consumption, FDI and GDP: Evidence from a panel of BRIC (Brazil, Russian Federation, India, and China) countries. Energy 2021; 36(1): 685-693.

PwC. The world in 2050. https://www.pwc.com/gx/en/world-2050/assets/pwc-the-world-in-2050-full-report-feb-2017.pdf. 2024.

Simba AHM., Oztek MF. Empirical analysis of energy consumption and economic growth in Tanzania: based on Engel and Granger test. Journal of Economics, Finance and Accounting 2021; 7(3): 250-262.

Somoye OA., Ozdeser H., Seraj M. Modeling the determinants of renewable energy consumption in Nigeria: Evidence from Autoregressive Distributed Lagged in error correction approach. Renewable Energy 2022; 190: 606-616.

Tabachnick BG., Fidell LS. Using multivariate statistics. Boston: Pearson, 2013.

Tuzemen OB., Tuzemen S. The impact of foreign direct investment and biomass energy consumption on pollution in BRICS countries: A panel data analysis. Global Journal of Emerging Market Economies 2022; 14(1): 76–92.

Uma J., Yun H., Jeong CS., Heo JH. Factor analysis and multiple regression between topography and precipitation on Jeju Island Korea. Journal of Hydrology 2011; 410: 189–203.

UN. 2018. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. https://population.un.org/wup/Download/ (accessed on 20 March 2025).

Wang M., Wang M., Wu L. Application of a new grey multivariate forecasting model in the forecasting of energy consumption in 7 regions of China. Energy 2022a; 243: 123024.

Wang Z., Pham TLH., Sun K., Wang B., Bui O., Hashemizadeh A. The moderating role of financial development in the renewable energy consumption - CO_2 emissions linkage: The case study of Next-11 countries. Energy 2022b; 254: 124386.

WBI. 2025. Worldbank indicators on total population, https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS (accessed on 20 March 2025).

Yildirim DC., Yildirim S., Demirtas I. Investigating energy consumption and economic growth for BRICS-T countries. World Journal of Science, Technology and Sustainable Development 2019; 16(4): 84-195.

Zafar MV., Zaidi AH., Sinha A., Gedikli A., Hou F. The role of stock market and banking sector development, and renewable energy consumption in carbon emissions: Insights from G-7 and N-11 countries. Resources Policy 2019; 62: 427–436.

Zakarya G.Y., Mostefa B., Abbes SM., Seghir GM. Factors affecting CO_2 emissions in the BRICS countries: A panel data analysis. Procedia Economics and Finance 2015; 26: 114 – 125.

Zeeshan M., Han J., Rehman A., Ullah I., Afridi FEA., Fareed Z. Comparative analysis of trade liberalization, CO_2 emissions, energy consumption and economic growth in Southeast Asian and Latin American regions: A structural equation modeling approach. Frontiers in Environmental Science 2022; 10: 854590.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 105-125, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 105-125, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Osmaniye İli'ndeki Betonarme Binaların Hasar Durumlarının İncelenmesi

Ahmet Kubilay AKSAKAL[1], Abdullah GÜNDOĞAY[2*]

[1,2]Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

[1]https://orcid.org/0000-0002-0866-9310
[2]https://orcid.org/0000-0002-5355-9014
*Sorumlu yazar: abdullahgundogay@sdu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.04.2025
Kabul tarihi: 06.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Osmaniye
Deprem
Betonarme binalar
Hasar

ÖZ

6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olan 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki depremler Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elâzığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa illerinde şiddetli olarak hissedilerek çok büyük hasara neden olmuştur. Bu depremler sonucunda 50000'den fazla insan hayatını kaybetmiş ve Türkiye ekonomisi ciddi zarar görmüştür. Bu durum Türkiye'nin bir deprem ülkesi olduğu gerçeğini bir kez daha hatırlatarak depreme dayanıklı bina tasarımının ve inşasının önemini ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremlerin Osmaniye ili özelinde betonarme binalarda oluşturduğu hasar dağılımını saha gözlemleriyle ele alan ilk kapsamlı çalışmalardan biridir. Farklı hasar düzeylerine sahip binalarda yapılan saha gözlemleri sonucunda işçilik hataları, malzeme kalitesinin yetersiz olması, düzensizlikler, yönetmelik kurallarına uyulmaması, vb. eksikliklerden dolayı binaların hasar aldığı görülmüştür. Saha gözlemleri fotoğraflarla desteklenmiş ve her hasar türü için teknik değerlendirmeler yapılmıştır. Mevcut yapı stokunun yapısal ve yapısal olmayan birçok zafiyet içerdiği ortaya çıkmıştır. Bu durum binaların deprem güvenliği için mühendislik hizmetinin alınmasının ve tasarım yönetmeliklerine uyulmasının önemli olduğunu göstermiştir. Tasarım ve uygulama açısından deprem konusunda alınabilecek tedbir ve çözüm önerileri sunulmuştur.

Investigation of Damage Status of Reinforced Concrete Buildings in Osmaniye Province After the 6 February 2023 Earthquakes

Research Article

Article History:
Received: 24.04.2025
Accepted: 06.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Osmaniye
Earthquake
Reinforced concrete buildings
Damage

ABSTRACT

On February 6, 2023, earthquakes of magnitude 7,7 and 7,6 with epicenters in Pazarcık and Elbistan, were felt strongly in Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elazığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye, and Şanlıurfa provinces, causing significant damage. As a result of these earthquakes, more than 50,000 people lost their lives, and the Turkish economy suffered serious damage. This situation once again reminded us that Turkey is an earthquake country and revealed the importance of earthquake-resistant building design and construction. This study, unlike the studies in the literature, is one of the first comprehensive studies to address the damage distribution in reinforced concrete buildings in Osmaniye province, specific to the earthquakes that occurred on February 6, 2023, through field observations. As a result of field observations made in buildings with different damage levels, it was observed that the buildings were damaged due to deficiencies such as workmanship errors, inadequate material quality, irregularities, and non-compliance with the regulations, among others. Field observations were

supported by photographs, and technical assessments were made for each type of damage. It has been revealed that the existing building stock contains many structural and non-structural weaknesses. This situation has shown that it is important to receive engineering services and comply with design regulations for the earthquake safety of buildings. Measures and solutions that can be taken regarding earthquakes in terms of design and implementation have been presented.

To Cite: Aksakal AK., Gündoğay A. 6 Şubat 2023 Depremleri Sonrası Osmaniye İlindeki Betonarme Binaların Hasar Durumlarının İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 105-125.

1. Giriş

Ülkemizin mevcut yapı stokunun büyük bir kısmının deprem performansı yetersizdir. Bu nedenle geçmişte meydana gelen büyük depremler ciddi can ve mal kayıplarına yol açmıştır. Son olarak 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş ilinde saat 04.17'de merkez üssü Pazarcık, 13.24'te ise merkez üssü Elbistan olan 7,7 ve 7,6 büyüklüğündeki yıkıcı depremler meydana gelmiş ve 11 ilde (Adana, Adıyaman, Diyarbakır, Elâzığ, Gaziantep, Hatay, Kahramanmaraş, Kilis, Malatya, Osmaniye ve Şanlıurfa) hissedilerek yüksek sayıda can ve mal kayıplarına neden olmuştur. Her iki depremin aynı gün içinde yaklaşık dokuz saatlik zaman farkı ile meydana gelmesi yıkımların şiddetini arttırmış ve 50000'den fazla vatandaşımızın hayatını kaybetmesine neden olmuştur. Bu durum, binalarının deprem güvenliğinin incelenmesini gerekli kılmaktadır. Ancak bina sayısının çokluğu, detaylı incelemeyi zaman alıcı hale gerektirmektedir. Bunun için de birçok çalışmada riskli binaların hızlı tespiti için sokaktan tarama tekniği kullanılmıştır (Işık, 2013; Bilici ve ark., 2014; Tokgöz ve Bayraktar, 2015; Okuyucu ve ark., 2018; Güler ve Canbaz, 2020; Bilici ve ark., 2022).

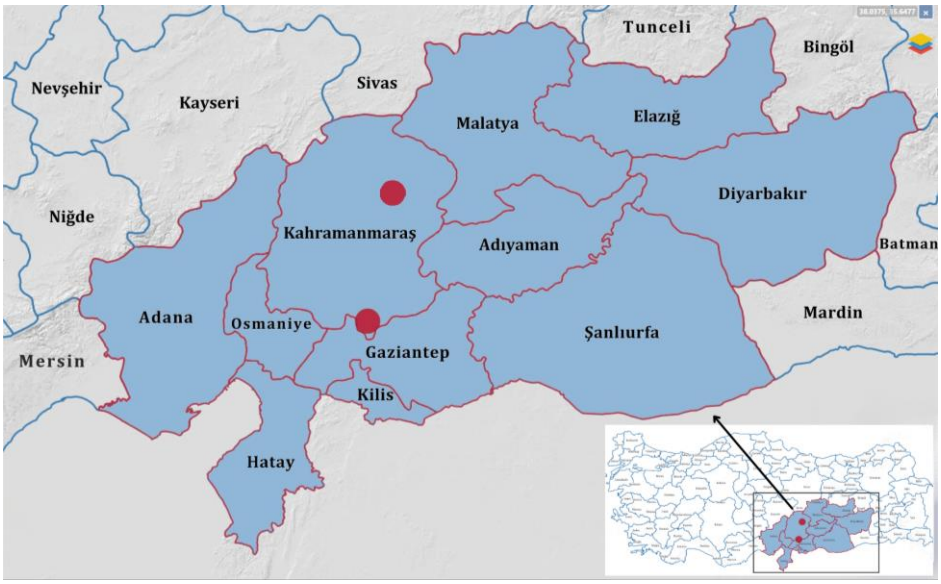
Ülkemiz topraklarında geçmiş yıllarda meydana gelen depremler gelecekte de olacağının en büyük göstergesidir. Son 25 yılda Kocaeli, Düzce, Van ve Kahramanmaraş illerinde büyüklüğü 7.0 ve üzerinde olan beş adet yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerden sonra araştırmacılar tarafından binalarda oluşan hasarlar gözlemlenmiş ve nedenleri araştırılmıştır (Sezen ve ark., 2003; Ergün ve Yurtcu, 2007; İnel ve ark., 2013; Yön ve ark., 2019; Kocaman ve Kazaz, 2021; Yetkin ve ark., 2021; Doğangün ve ark., 2021; Sayın ve ark., 2021; Işık ve ark., 2023; Aksoy ve ark., 2023; Atar ve ark., 2024; Yenidoğan, 2024; Erbaş ve ark., 2025; Vuran ve ark., 2025; Altıok ve ark., 2025).

Deprem yerinin, zamanının ve büyüklüğünün bilinmesi maalesef mümkün olmamaktadır. Ancak deprem esnasında oluşabilecek can ve mal kayıplarının en aza indirmek için yapılabilecekler bellidir. Bunların en başında ise binaların depreme dayanıklı olarak inşa edilmesi gelmektedir. Bunun için de geçmişte meydana gelen depremlerde oluşan hasarların ve yıkımların sebepleri belirlenmelidir. Böylelikle tasarım ve yapım aşamalarındaki hataların/eksikliklerin önüne geçilebilir. Bu çalışmada 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremlerin Osmaniye ilindeki konut, okul, ibadethane, fabrika, depo, vb. yapılar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı hasar düzeylerine sahip binaların yer aldığı üç yerleşim bölgesinde saha gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle konut amaçlı olarak kullanılan ve taşıyıcı sistemi betonarme olan binalarda depremlerin oluşturduğu hasarların dağılımı ve karakteristik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

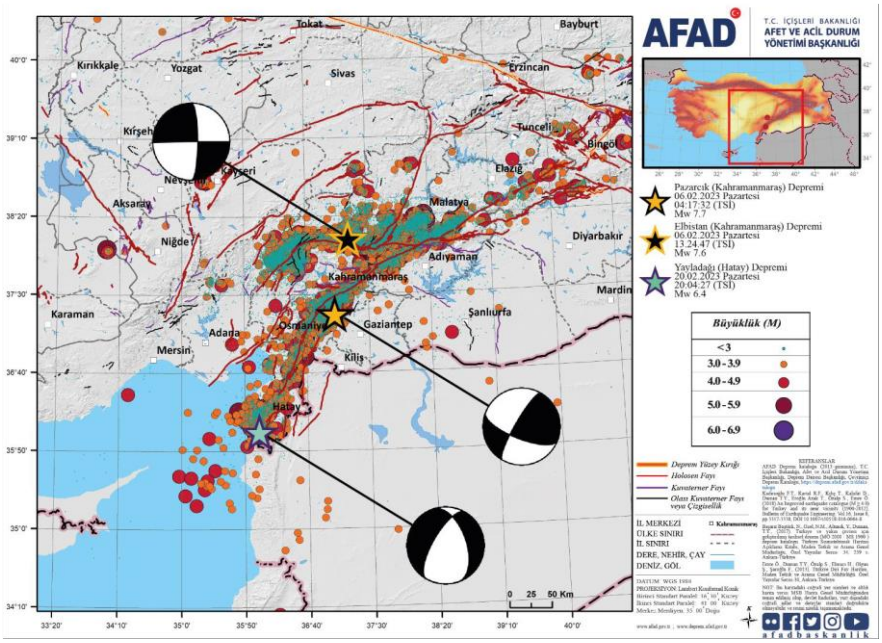
2. Materyal ve Metot

2.1. Bölgesel Tanıtım ve Depremin Özellikleri

Ülkemiz topraklarında 6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olan sırasıyla; 7,7 ve 7,6 büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. İlk deprem saat 04.17'de yerin 8,6 km derinliğinde Pazarcık'ta olmuştur. Depremden saatler sonra aynı gün içinde saat 13.24'te yerin 7,0 km altında Elbistan'da ikinci büyük bir deprem daha meydana gelmiştir. İkinci bir depremin yaşanmasıyla beraber depremin yapılar ve insanlar üzerindeki etkileri daha yıkıcı bir hale gelmiştir. İlk depremde ayakta kalan ve kalıcı plastik deformasyona uğramış olan orta veya ağır hasarlı bazı yapılar ise ikinci depremin ardından tamamen göçmüştür. Bu depremler sonucunda başta Kahramanmaraş olmak üzere Hatay, Adıyaman, Malatya, Gaziantep, Şanlıurfa, Diyarbakır, Elâzığ, Kilis, Adana ve Osmaniye illerimizi etkileyerek geniş bir coğrafyaya yayılmıştır (Şekil 1). Adrese dayalı nüfus kayıt sisteminden alınan resmi rakamlara göre yaklaşık 14 milyon vatandaşımızı etkileyen depremler şehirlerimizde büyük yıkımlara ve can kayıplarına yol açmıştır (SBB, 2024). Bu depremleri takip eden günlerde bölgedeki sismik hareketlilik devam ederek birçok artçı deprem meydana gelmiştir (Şekil 2).

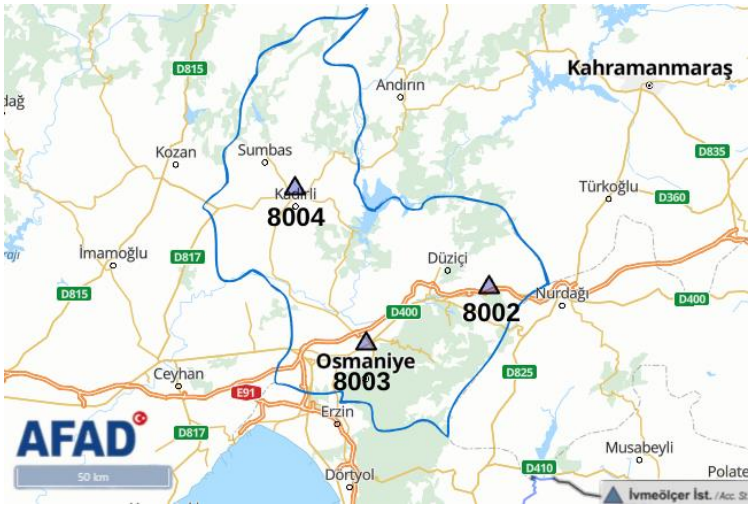


Şekil 1. 6 Şubat 2023 depremlerinden etkilenen iller

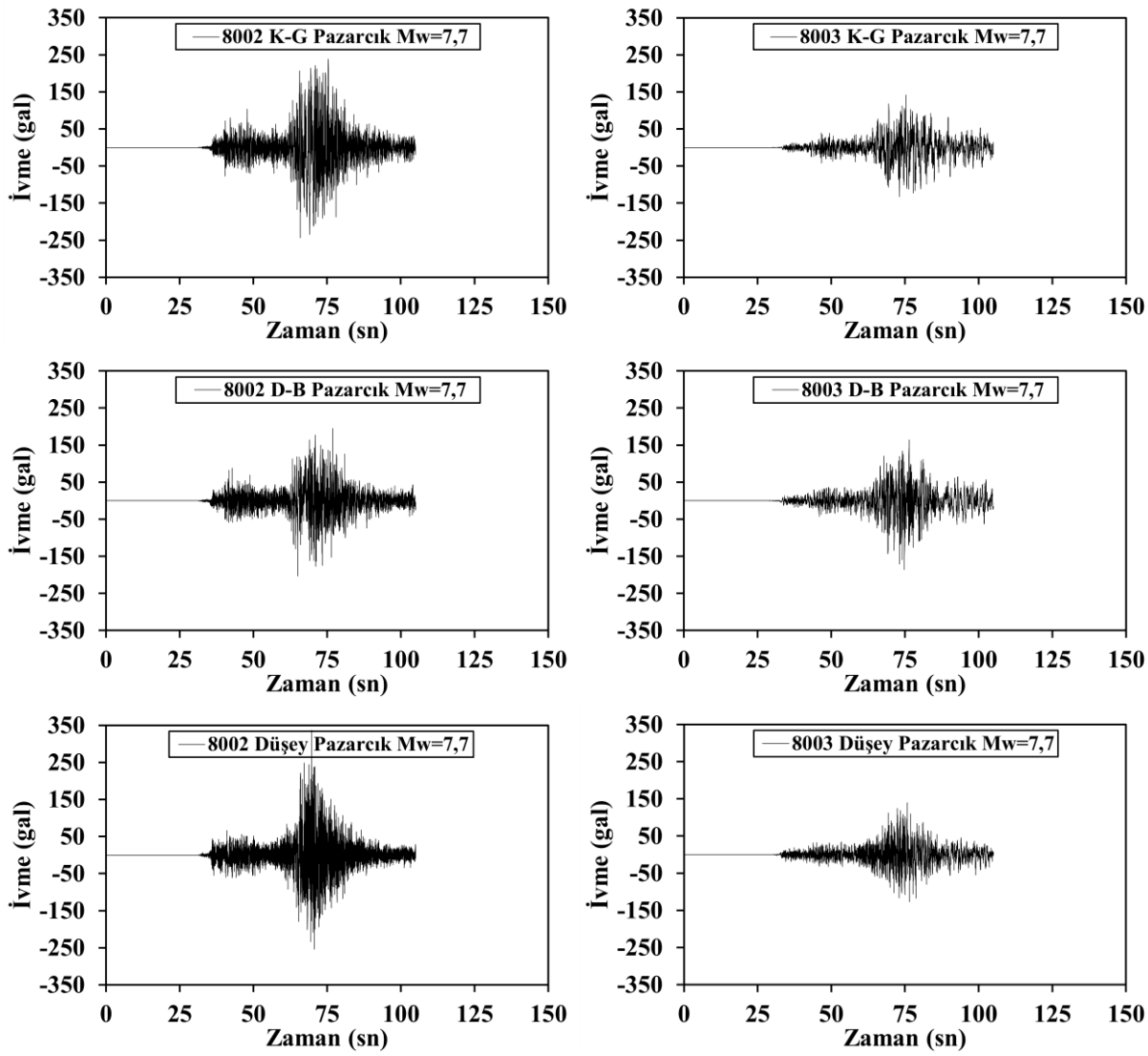


Şekil 2. 6 Şubat 2023 depremlerinin merkez üssü ve artçılarının dağılımı (AFAD, 2023)

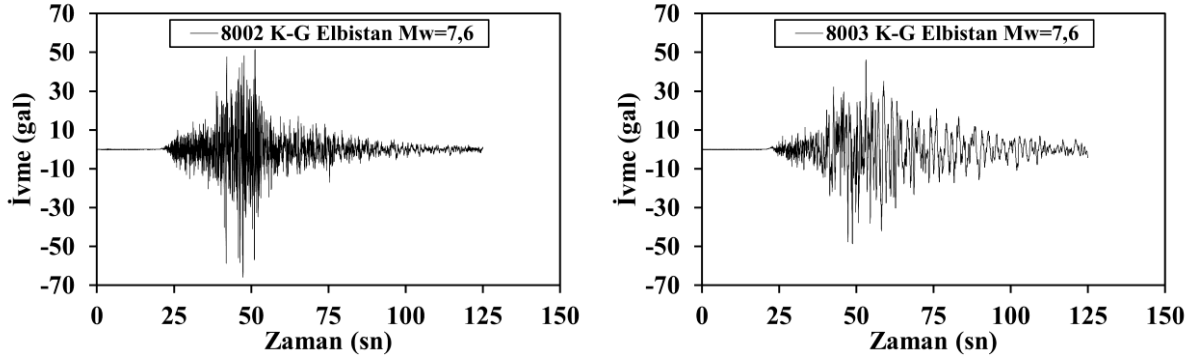
Osmaniye ilinde 6 Şubat 2023 depremlerinin merkez üssüne farklı mesafelerde bulunan üç adet aktif ivmeölçer istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlar Osmaniye'nin Merkez, Bahçe ve Kadirli ilçelerinde konumlandırılmıştır (Şekil 3). Depremlerin Osmaniye ilindeki yıkıcı etkilerini inceleyebilmek için 8002 ve 8003 kodlu istasyonlarda depremin Kuzey-Güney (K-G), Doğu-Batı (D-B) ve düşey bileşenlerine ait ivme kayıtları Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. İstasyonlarda ölçülen en büyük ivme değerleri ise Tablo 1'de sunulmuştur.

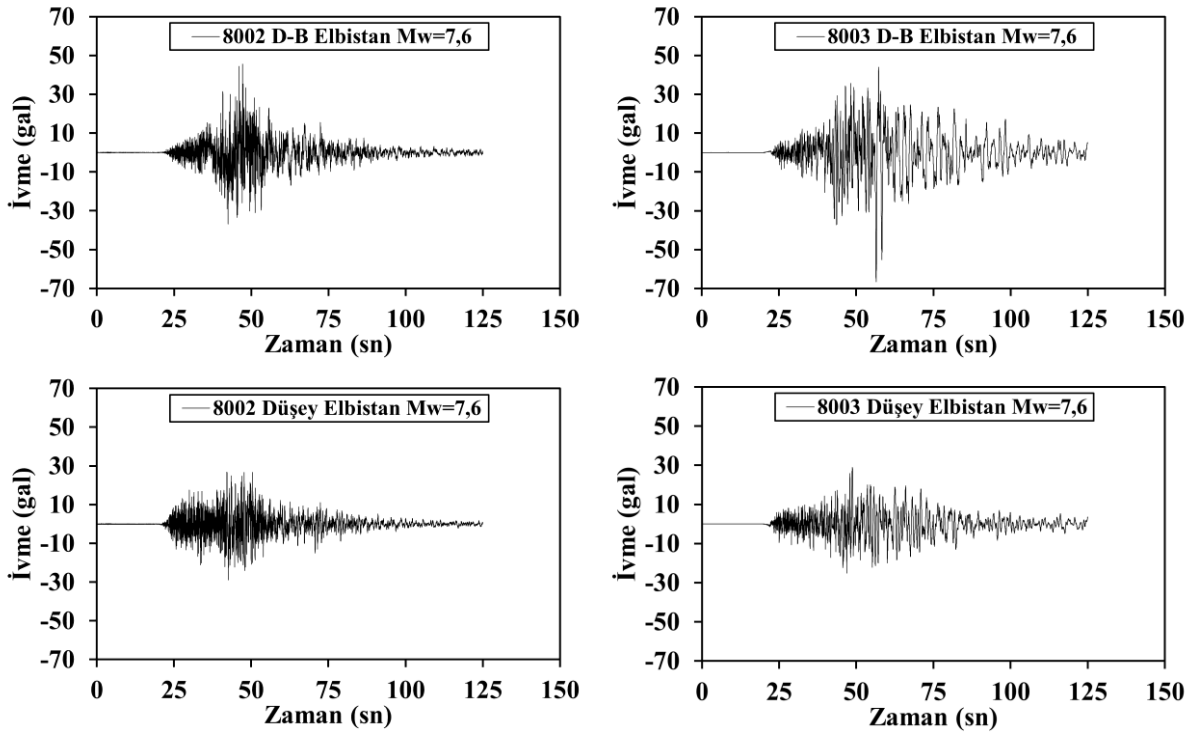


Şekil 3. Osmaniye ilindeki ivmeölçer istasyonlarının yerleşimi (TADAS, 2023)



Şekil 4. Pazarcık depremine ait ivme kayıtları





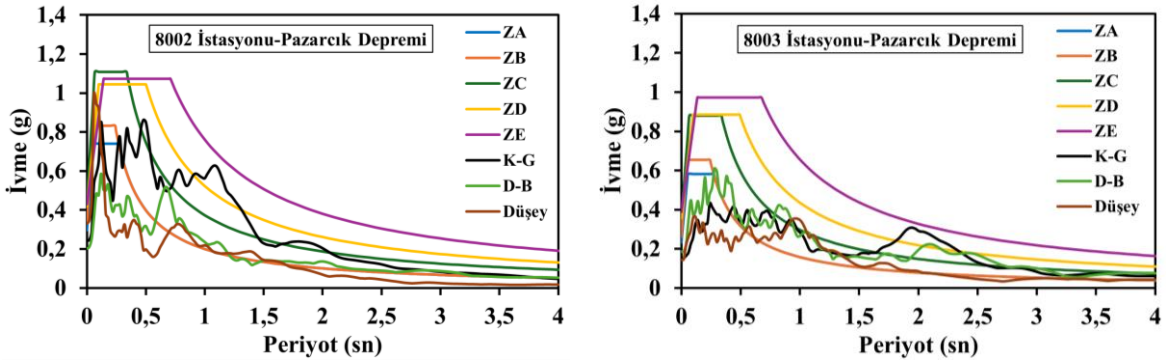
Şekil 5. Elbistan depremine ait ivme kayıtları

Tablo 1. Osmaniye ilindeki istasyonlardan ölçülen en büyük ivme değerleri (TADAS, 2023)

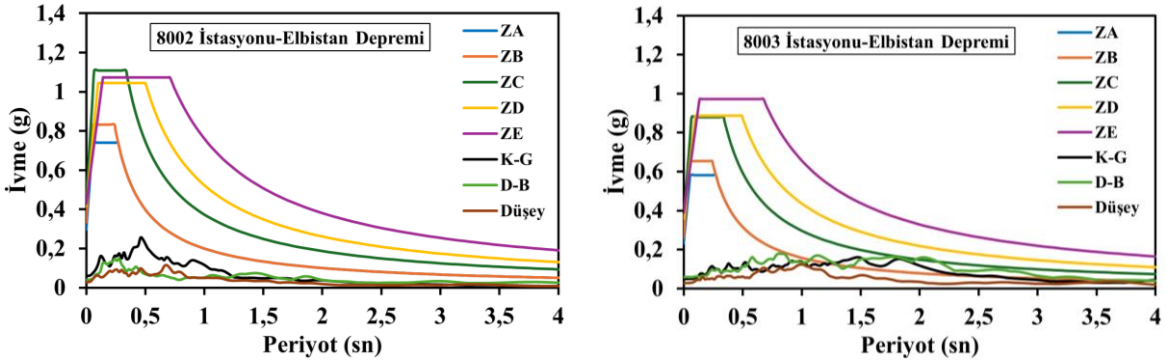
Merkez Üssü	İlçe	İstasyon Kodu	Enlem	Boylam	İvme Değerleri (gal)		
					K-G	D-B	Düşey
Pazarcık	Bahçe	8002	37,1916	36,5620	242,95	202,89	336,56
	Merkez	8003	37,0842	36,2694	141,57	185,74	139,89
	Kadirli	8004	37,3799	36,0976	168,43	181,86	71,80
Elbistan	Bahçe	8002	37,1916	36,5620	65,87	45,51	28,84
	Merkez	8003	37,0842	36,2694	48,70	66,60	28,98
	Kadirli	8004	37,3799	36,0976	-	-	-

Tablo 1'de merkez üssü Pazarcık depreminde istasyonlardan elde edilen kayıtlara göre en büyük ivme değerleri 8002 kodlu istasyonda K-G bileşeninde 242,95 gal, D-B bileşeninde 202,89 gal, düşey bileşeninde ise 336,56 gal olarak ölçülmüştür. Merkez üssü Elbistan depreminde ise en büyük ivme değerleri K-G bileşeninde 65,87 gal olarak 8002 kodlu istasyonda, D-B bileşeninde 66,60 gal, düşey bileşeninde ise 28,98 gal olarak 8003 kodlu istasyonda ölçülmüştür. 8004 kodlu istasyonda merkez üssü Elbistan depreminde herhangi bir ivme kaydına ulaşılamamıştır. En büyük ivme değerlerinin Pazarcık depreminde ortaya çıktığı görülmüştür. Özellikle 8002 kodlu istasyonda kaydedilen ivme büyüklükleri dikkat çekicidir. Bu değerler; yerçekimi ivmesinin yaklaşık üçte biri büyüklüğünde olup, özellikle orta ve yüksek katlı binalar için önemli dinamik zorlamalara neden olabilir. Düşey bileşenlerde ölçülen yüksek ivmeler, özellikle tasarımı yönetmeliğe uygun olarak yapılmamış ve çeşitli düzensizliklere sahip yapılarda erken kapasite aşımına neden olarak gevrek kesme hasarının oluşumuna zemin hazırlayabilir. Pazarcık ve Elbistan depremlerinin etkilerinin değerlendirilebilmesi için 8002 ve 8003 kodlu istasyonlara ait tasarım ve tepki spektrumları oluşturulmuştur (Şekil 6 ve Şekil 7). Tasarım spektrumları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (2018) uygun olarak farklı yerel zemin sınıfları (ZA, ZB, ZC, ZD

ve ZE) için elde edilmiştir. Tepki spektrumları ise %5 sönüm oranı için çizilmiştir.



Şekil 6. Pazarcık depremi için 8002 ve 8003 kodlu istasyonlara ait tasarım ve tepki spektrumları



Şekil 7. Elbistan depremi için 8002 ve 8003 kodlu istasyonlara ait tasarım ve tepki spektrumları

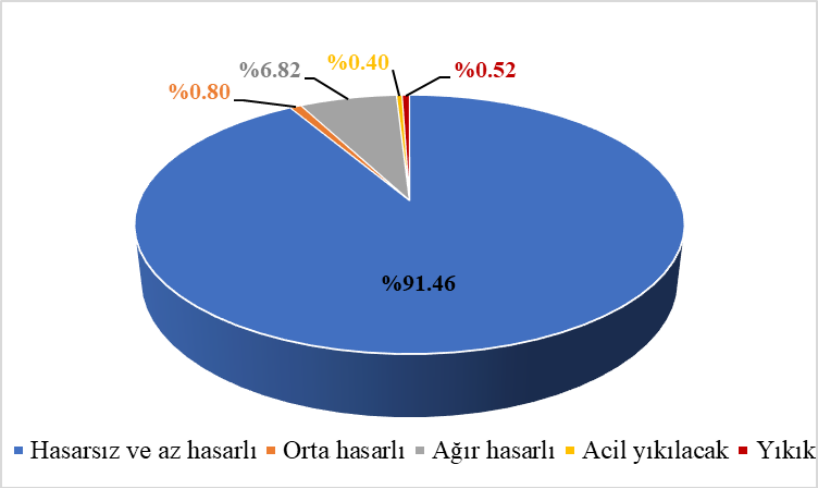
Tasarım ve tepki spektrumları incelendiğinde Pazarcık depreminin Elbistan depremine kıyasla Osmaniye ili üzerinde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra özellikle Pazarcık depreminde 8002 ve 8003 kodlu istasyonlarda bazı yerel zemin sınıfları için TBDY 2018 tasarım spektrum ivme değerlerinin sıklıkla aşıldığı görülmektedir. Bu durum bina hasarlarını arttırıcı yönde önemli bir rol oynamıştır. Elbistan depreminde ise 8002 kodlu istasyonda tasarım spektrum ivme değerleri herhangi bir zemin sınıfı için aşılmaz iken, 8003 kodlu istasyonda ise doğal titreşim periyodu 1 sn üzerinde olan yapılarda ZA ve ZB zemin sınıfları için tasarım spektrum ivme değerlerinin aşıldığı görülmüştür.

2.2. Yapıların Hasar Durumu

6 Şubat 2023 depremleri sonucunda Osmaniye ilinde yaklaşık 560000 vatandaşımız etkilenmiştir (SBB, 2024). Bu depremlerde 2500 vatandaşımız yaralanarak tedavi edilmiş, 1010 vatandaşımız ise hayatını kaybetmiştir (TRT Haber, 2023). Hasar tespit çalışmaları kapsamında betonarme, çelik, yığma ve ahşap yapılar başta olmak üzere toplam 134314 adet yapı incelenmiştir. Bu yapılara ait hasar durumları Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca Şekil 8'de yapıların hasar durumlarının yüzdesel dağılımı da verilmiştir.

Tablo 2. Osmaniye ilindeki binaların hasar durumları (SBB, 2024)

Yapı durumu	Yapı sayısı	Oran (%)
Hasarsız ve az hasarlı	122840	91,46
Orta hasarlı	1074	0,80
Ağır hasarlı	9167	6,82
Acil yıkılacak	531	0,40
Yıkık	702	0,52
Toplam	134314	100



Şekil 8. Yapıların hasar durumlarının dağılımı

Tablo 2 ve Şekil 8 incelendiğinde Osmaniye ilindeki yapıların çok büyük bir kısmının 6 Şubat 2023 depremlerini hasarsız veya az hasarlı olarak atlattığı görülmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında 6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olan depremlerin, Osmaniye ilindeki konut, okul, ibadethane, fabrika, depo gibi betonarme yapılar üzerinde oluşturduğu hasarların dağılımı gözlemlenmiş ve değerlendirilmiştir.

3.1. Malzeme Kaynaklı Hasarlar

Malzeme kalitesinin yetersiz olması nedeniyle beton ve donatı arasındaki aderans sağlanamayarak gevrek davranış meydana gelmiştir. Bu durum hazır betonun kullanılmadığı ve düz yüzeyli donatıların bulunduğu, genellikle 2000 yılı öncesi inşa edilmiş binalarda karşılaşılmıştır (Şekil 9). Hazır beton kullanılmadığı için su/çimento oranı ve agrega granülometrisi doğru bir şekilde belirlenemediği için beton dayanımı düşük olmuştur.

a) Düşük beton dayanımı

b) Düz yüzeyli donatı kullanımı

Şekil 9. Malzeme kalitesinin yetersiz olması

3.2. Donatı Detay Eksiklikleri

Betonarme elemanların kendilerinden beklenen deprem davranışını gösterebilmesi beton ve donatı arasındaki aderansa bağlıdır. Beton ile donatının beraber çalışmasını sağlayarak, donatının betondan sıyrılmasını önlemek için donatının betona kenetlenmesi büyük önem arz etmektedir. Aksi halde betonarme elemanda kapasiteye ulaşılamadan gevrek hasar meydana gelmektedir. Yapılan incelemelerde özellikle eski ve denetimsiz binalarda bu hasar durumu ile karşılaşılmıştır (Şekil 10).

Şekil 10. Kenetlenme yetersizliğinden dolayı beton ve donatı arasındaki aderansın kaybolması

Kolon ve perde elemanlarda enine donatı miktarının yetersiz olması nedeniyle gevrek hasar meydana gelmiştir. Özellikle kolon elemanların sarılma bölgelerinde etriye sıklaştırmasının yapılmaması ve 135^{o} kanca detayının uygulanmaması sonucunda boyuna donatılarda burkulmalar meydana gelmiş ve çekirdek betonu ağır hasar alarak dağılmıştır (Şekil 11). Perde elemanlarda uç bölgelerin oluşturulmaması ve çiroz kullanılmaması sonucunda etriyelerin çekirdek betonunu sargılama etkinliği ortadan kaybolarak kesme hasarı oluşmuştur (Şekil 12).

Şekil 11. Kolon elemanlarda etriye sıklaştırmasının yapılmamasından dolayı boyuna donatıların burkulması

Şekil 12. Perde elemanlarda sargılama etkinliğinin kaybolması sonucunda kesme hasarının oluşumu

Betonarme binaların kolon-kiriş birleşim bölgelerinde herhangi bir hasarın oluşmaması için kolon etriyelerinin birleşim içinde muhakkak devam ettirilmesi gerekmektedir. Yapılan incelemelerde kolon-kiriş birleşim bölgelerinde herhangi bir etriye kullanılmadığından dolayı gevrek hasarların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 13).

Şekil 13. Kolon-kiriş birleşim bölgesinde etriye eksikliği nedeniyle gevrek hasarın gelişimi

3.3. Mimari Düzensizlikler

Giriş katında dükkân bulunan betonarme binalarda dolgu duvar alanının üst katlara göre az olması, etkili kat kesme alanını azaltarak katlar arasında dayanım düzensizliğine neden olarak zayıf kat hasarına yol açabilmektedir. Ayrıca ticari kaygılardan dolayı dükkân kat yüksekliğinin diğer katlara göre yüksek yapılması, katlar arasında rijitlik farkı oluşturarak yumuşak kat hasarına neden olabilmektedir. Hem dayanım hem de rijitlik düzensizliğinin birlikte bulunması halinde ise binalarda ağır hasar meydana gelebilmektedir. Osmaniye ilinde incelenen binalarda kat adedinin az olmasından dolayı bu hasarların boyutu dolgu duvarlar ile sınırlı kalmıştır (Şekil 14).

Şekil 14. Dükkân katında dayanım ve rijitlik düzensizliklerinden dolayı oluşan dolgu duvar hasarları

Binaların bodrum ve zemin katlarında aydınlatma ve havalandırma için dolgu duvarların üst kısmında bant pencereler yapılabilmektedir. Bu durum kolonun serbest boyunu azaltarak rijitliğini artırdığı için deprem esnasında daha yüksek kesme kuvvetinin etkimesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda da kısa kolon davranışı ortaya çıkmaktadır. İncelenen binalarda tasarım aşamasında bu durum dikkate alınmadığı için kolon elemanlarda hasara neden olmuştur (Şekil 15).

Şekil 15. Bant pencereler nedeniyle ortaya çıkan kısa kolon davranışının yol açtığı hasarlar

3.4. Tasarım Hataları

Betonarme binaların birçoğunda, zemin katın üzerindeki katlarda bina metrekaresini artırarak daha fazla alan elde edebilmek için kapalı çıkmalar yapılmaktadır. Kapalı çıkmaların yapıldığı binalarda kolonlar genellikle mimari ve estetik kaygılar nedeniyle birbirlerine kirişler ile bağlanmamıştır. Bu durum özellikle deprem esnasında binanın davranışı olumsuz etkileyerek hasar almasına neden olmuştur (Şekil 16).

Şekil 16. Mimari kaygılardan dolayı kapalı çıkmalarda taşıyıcı sistemin hatalı tasarlanması

Betonarme binaların deprem esnasında ayakta kalabilmesi için sünek davranış göstermesi gerekmektedir. Bu nedenle betonarme elemanların tasarım ve hesap aşamasında, kapasite tasarımı ilkesi benimsenerek hasar mekanizması kontrol edilebilmektedir. Bunun için de kolonlar kirişlere göre daha güçlü tasarlanır ve hasarların öncelikle kirişlerde oluşması sağlanır. Hasarların kiriş elemanlar yerine kolonlarda oluşması durumunda ise binalar ağır hasar alarak yıkılabilir. Osmaniye ilinde bu hasar durumunun görüldüğü binalara ait görseller Şekil 17'de sunulmuştur.

Şekil 17. Kirişlerin kolonlardan daha güçlü olması nedeniyle hasarın kolonlarda yoğunlaşması sonucu binaların ağır hasar alması

Şehir merkezlerinde, özellikle eski yerleşim yerlerinin bulunduğu bölgelerde, bitişik nizam olarak yapılmış binalarla karşılaşılmaktadır. Bu binaların zemin oturmalarının, ötelenmelerin ve deprem davranışlarının farklı olmasından dolayı, binalar arasında derz boşluklarının bırakılması gerekmektedir. Saha çalışmalarında derz boşluklarının bırakılmaması veya yetersiz genişlikte olması nedeniyle deprem esnasında binaların birbirleriyle çarpışması sonucunda çekiçleme hasarı olmuştur (Şekil 18). Özellikle komşu binaların kat döşemelerinin farklı seviyelerde olması, çekiçleme hasarının şiddetini artırarak binaları kullanılamaz hale getirmiştir.

Şekil 18. Yeterli genişlikte deprem derzinin bırakılmaması sonucunda oluşan çekiçleme hasarı

3.5. Yapısal Olmayan Elemanlarda Hasarlar

Betonarme binalarda taşıyıcı sistem hasarlarının yanı sıra yapısal olmayan dolgu duvar hasarları da yaygın olarak gözlemlenmiştir (Şekil 19).

Şekil 19. Dolgu duvarların göçmesi sonucu taşıyıcı sistem performansının zayıflaması

3.6. İmalat Hataları

Betonarme binalarda yapılan incelemelerde bazı imalat hataları ile karşılaşılmıştır. Genel olarak kolonların düşey yönde aks sürekliliğinin sağlanılmaması, kolon boyutlarının kat içerisinde küçültülmesi veya yönünün değiştirilmesi, kolon-kiriş birleşimlerinde kolonların birleşim içerisinde devam ettirilmemesi, binaların üst katlarında kolonların kesit tipinin değişmesi veya devam ettirilmemesi, binalar arasında deprem derzi uygulamasının yapılmamasıdır. Bu imalat hatalarına ait görseller sırasıyla Şekil 20 ile Şekil 25 arasında verilmiştir. Bu imalat hatalarının gözlemlendiği bazı binalarda kat adedinin az olmasından dolayı (bir veya iki katlı) hasarın boyutu sınırlı seviyelerde kalmıştır.

Şekil 20. Kolon düşey aks süreklilik hatası

Şekil 21. Kolon boyutlarının hatalı şekilde küçültülmesi ve yönlerinin değiştirilmesi

Şekil 22. Kolon-kiriş birleşiminde kirişlerin kolona saplanmaması

Şekil 23. Kolon kesit tipinin katlar arasında değişmesi

Şekil 24. Üst katlarda kolonların devam ettirilmemesi

Şekil 25. Yeni yapılan binada deprem derzi için esnek malzeme kullanmak yerine beton dökülmesi

3.7. Bilinçsiz Güçlendirme İşlemleri

Saha incelemeleri esnasında hasarsız veya az hasarlı binaların mülk sahipleri tarafından herhangi bir güçlendirme projesi hazırlatılmadan, mühendislik ve denetim hizmeti alınmadan, alel acele yapılan hatalı güçlendirme işlemleri ile karşılaşılmıştır (Şekil 26).

Şekil 26. Mühendislik ve denetim hizmetinden yoksun hatalı güçlendirme örnekleri

Tüm bu saha gözlemleri değerlendirildiğinde, 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında Osmaniye'de meydana gelen yapısal hasarların genellikle yönetmeliklere uygun olmayan tasarım ve uygulama hatalarından kaynaklandığı görülmüştür. Özellikle hasar alan betonarme binaların büyük bir kısmının yapım aşamasında, mühendislik ve denetim hizmeti almamasından dolayı betonarme elemanların sünek davranış gösterememesine yol açmıştır. Bu durum binaların deprem yükleri altında beklenenden çok daha düşük dayanım göstermesine neden olmuştur.

4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında 6 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olan depremlerin Osmaniye ili özelindeki betonarme yapılardaki etkisi araştırılmıştır. Yapılan saha incelemeleri sonucunda betonarme yapıların hasar durumları ve nedenleri hakkında teknik bilgiler verilmiştir. Gözlemlenen hasarlar ve nedenleri aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Yapı hasarlarının büyük ölçüde yetersiz malzeme kalitesi ve denetimsiz uygulamalardan kaynaklandığını görülmüştür. Bu durum özellikle hazır betonun kullanılmadığı ve düz yüzeyli

donatıların bulunduğu 2000 yılı öncesinde inşa edilen yapılarda daha belirgindir.

- Kolon ve perde elemanlarda donatı detay (etriye sıklaştırması ve 135° kanca) eksikliklerinin bulunması süneklik kaybına neden olarak gevrek hasara yol açmıştır.
- Özellikle zemin katında dükkân bulunan binalarda hatalı bant pencere uygulamaları, üst katlara kıyasla dolgu duvarların az olması ve kat yüksekliğinin fazla olması hasar mekanizmasının tetikleyicisi olarak öne çıkmıştır.
- Binalarda dolgu duvarların hasar alması taşıyıcı sistem performansının zayıflamasına sebebiyet vermiştir.
- Bitişik nizamlı yapılarda deprem derzinin yetersiz genişlikte olması veya bırakılmaması kesme hasarına neden olarak kullanılamaz hale getirmiştir.
- Kiriş elemanların kolonlara göre daha güçlü olması binaların ağır hasar almasına neden olmuştur.
- Mühendislik ve denetim hizmeti alınmamasından dolayı bilinçsizce yapılan imalat hataları ile karşılaşılmıştır.
- Depremlere ait tepki ve tasarım spektrumlarının değerlendirilmesi sonucunda merkez üssü Pazarcık olan ilk deprem bina hasarları üzerinde daha etkili olmuştur. Osmaniye ilindeki istasyonlarda ölçülen en büyük ivme değerlerinin yerçekimi ivmesinin yaklaşık üçte biri büyüklüğünde olup, yapı stokunun kat adedinin az olmasından dolayı yapılar depremi hasarsız veya az hasarlı olarak atlatmıştır.

Saha gözlemleri sonucunda elde edilen teknik bulgular, son dönemde benzer amaçlarla gerçekleştirilen çeşitli saha çalışmaları ile anlamlı bir benzerlik göstermektedir (Ergün ve Yurtcu, 2007; Kocaman ve Kazaz, 2021; Yetkin ve ark., 2021; Işık ve ark., 2023; Kumbasaroğlu ve ark., 2023; Turan ve ark., 2024; Erbaş ve ark., 2025). Özellikle yapıların farklı illerde ve deprem etkilerinde olmasına karşın hasar türlerinin, yapı kusurlarının ve göçme mekanizmalarının önemli ölçüde birbirleriyle örtüşmesi Türkiye'deki mevcut yapı stokunun genel durumu hakkında önemli ipuçları vererek çalışmamızın literatürle teknik bağını güçlendirmektedir.

Osmaniye ilinde yapılmış olan bu saha çalışması, yalnızca mevcut yapı stokunun durumu hakkında bilgi vermekle kalmamaktadır. Aynı zamanda gelecekteki tasarım, denetim ve güçlendirme çalışmalarına ışık tutarak önemli bilgiler sunmaktadır. Hem bölgesel hem de benzer yapı stokuna sahip diğer deprem riski altındaki bölgeler için uyarıcı niteliktedir. Türkiye topraklarının aktif fay hatları üzerinde yer alması Marmara Bölgesi'nde beklenen depremin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir. Ülke nüfusunun yaklaşık üçte birinin yaşadığı bu bölgede, başta İstanbul olmak üzere birçok ilimiz etkilenecektir. Bölgedeki nüfus yoğunluğu nedeniyle gerekli önlemlerin alınmaması durumunda, deprem sonrası afet müdahalelerinin aksayacağı ve hatta telafisinin mümkün olmayacağı açıktır. Bu hasarların önüne geçerek depremlerde meydana gelebilecek can ve mal kayıplarının önleyerek en az seviyeye indirebilmek için deprem güvenliği bulunmayan mevcut binaları güçlendirme çalışmaları ve kentsel

dönüşüm kapsamında değerlendirilmesi, benzer felaketlerin etkisini azaltmak adına öncelikli adımlardan biri olmalıdır.

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

AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Resmî Gazete, Ankara, 2018

AFAD, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan (Kahramanmaraş) Mw: 7.7 – Mw: 7.6 depremleri raporu. Deprem ve Risk Azaltma Genel Müdürlüğü Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2023.

Aksoy E., Akgün E., Softa M., Koçbulut F., Sözbilir H., Tatar O., Erol SÇ. 6 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) depreminin Doğu Anadolu fay zonu Erkenek ve Pazarcık segmentleri üzerindeki etkisi: Çelikhan-Gölbaşı (Adıyaman) arasından gözlemler. Türk Deprem Araştırma Dergisi 2023; 5(1): 85-104.

Altıok TY., Şevik M., Demir A. Seismic performance of retrofitted and non-retrofitted RC school buildings after the February 6th, 2023, Kahramanmaraş earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering 2025; 23: 1017-1052.

Atar M., İnce O., Taş ÖF., Özmen A., Sayın E. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası Malatya ilinde bulunan betonarme binaların ve çelik yapıların hasar durumlarının incelenmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi 2024; 6(1): 60-80.

Bilici H., Işık E., Özlük MH. Adilcevaz kentsel yapı stoğunun değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2014; 3(1): 1-12.

Bilici H., Gökdemir H., Künkcü H. Erciş ilçesi hasarlı yapı stoğunun sokaktan tarama yöntemi ile değerlendirilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 2022; 30(1): 61-67.

Doğangün A., Yön B., Onat O., Öncü ME., Sağıroğlu S. Seismicity of east anatolian of Turkey and failures of infill walls induced by major earthquakes. Journal of Earthquake and Tsunami 2021; 15(04): 2150017.

Erbaş Y., Mercimek Ö., Anıl Ö., Çelik A., Akkaya ST., Kocaman İ., Gürbüz M. Design deficiencies, failure modes and recommendations for strengthening in reinforced concrete structures exposed to the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). Natural Hazards 2025; 121: 3153-3194.

Ergün A., Yurtcu Ş. Yığma ve betonarme yapılarda deprem sonrası oluşan hasarların teknik analizi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2007; 3(1): 65-76.

Güler E., Canbaz M. Yapıların deprem riskinin sokak tarama yöntemi ile belirlenmesi: Sivrihisar örneği. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 2020; 28(3): 227-234.

Işık E. Bitlis ili yapı stoğunun birinci kademe (sokak tarama yöntemi ile) değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2013; 17(1): 173-178.

Işık E., Avcil F., Büyüksaraç A. 06 Şubat 2023 depremleri sonrası Antakya'daki betonarme yapılarda meydana gelen yapısal hasarlar. 1. International Trakya Scientific Research Congress, 27-28 Mayıs 2023, sayfa no:230-240, Edirne.

İnel M., Özmen HB., Çaycı, BT. Simav ve Van depremleri (2011) yapı hasar nedenlerinin değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2013; 19(6): 256-265.

Kocaman İ., Kazaz İ. 14 Haziran 2020 Bingöl-Karlıova depreminin yığma yapılara etkisinin değerlendirilmesi. International Journal of Engineering Research and Development 2021; 13(1): 152-160.

Kumbasaroğlu A., Yalçıner H., Çelik A., Turan Aİ. Kahramanmaraş Pazarcık (Mw=7.7) ve Elbistan (Mw=7.6) depremlerinin betonarme yapılarda meydana getirdiği hasarların tasarım ve malzeme/işçilik kusurları açısından değerlendirilmesi (Malatya ili örneği). Deprem Araştırmaları Sanal Konferansı, 30 Mart 2023, sayfa no:126-127, Ankara.

Okuyucu D., Savaş GK., Gedik B., Şuşarlıoğlu MF., Kara T. Sokaktan tarama yöntemiyle binaların bölgesel deprem risk dağılımının belirlenmesi: Erzurum–Yenişehir örneği. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 30(1): 219-231.

Sayın E., Yön B., Onat O., Gör M., Öncü ME., Tunç ET., Bakır D., Karaton M., Calayır Y. 24 January 2020 Sivrice-Elazığ, Turkey earthquake: geotechnical evaluation and performance of structures. Bulletin of Earthquake Engineering 2021; 19: 657-684.

SBB, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. Kahramanmaraş ve Hatay depremleri yeniden imar ve gelişme raporu. Ankara, 2024.

Sezen H., Whittaker AS., Elwood KJ., Mosalam KM. Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey. Engineering Structures 2003; 25(1): 103-114.

TADAS, Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi. 2023. https://deprem.afad.gov.tr/stations Erişim Tarihi: 15.02.2025.

Tokgöz H., Bayraktar H. Düzce ili Kaynaşlı ilçesinde riskli binaların tespitinde sokak taraması yönteminin uygulanması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 2015; 3(1): 107-116.

TRT Haber, Türkiye Radyo Televizyon Kurumu. 2023. Asrın felaketinde Osmaniye'de 1010 kişi hayatını kaybetti, 2 bin 500 kişi yaralandı. https://www.trthaber.com/haber/gundem/asrin-

felaketinde-osmaniyede-1010-kisi-hayatini-kaybetti-2-bin-500-kisi-yaralandi-786594.html Erişim Tarihi: 18.02.2025.

Turan AI., Celik A., Kumbasaroglu A., Yalciner H. Assessment of reinforced concrete building damages following the Kahramanmaraş earthquakes in Malatya, Turkey (February 6, 2023). Engineering Science and Technology, an International Journal 2024; 54: 101718.

Vuran E., Serhatoğlu C., Timurağaoğlu MÖ., Smyrou E., Bal İE., Livaoğlu R. Damage observations of RC buildings from 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence and discussion on the seismic code regulations. Bulletin of Earthquake Engineering 2025; 23: 1153-1182.

Yenidoğan C. 6 Şubat 2023 depremleri ve saha gözlemlerine dayalı bina hasarları hakkında ön değerlendirme. Turkish Journal of Civil Engineering 2024; 35(5): 75-113.

Yetkin M., Dedeoğlu İÖ., Calayır Y. 24 Ocak 2020 Sivrice depremi sonrasında Elazığ ilinde bulunan minarelerde meydana gelen hasarların araştırılması ve değerlendirilmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 33(2): 379-389.

Yön B., Onat O., Öncü ME. Earthquake damage to nonstructural elements of reinforced concrete buildings during 2011 Van seismic sequence. Journal of Performance of Constructed Facilities 2019; 33(6): 04019075.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 126-143, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 126-143, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Radiological and Environmental Risk Assessment of Fish Samples from the Mediterranean Waters of Türkiye

Muhammet KARATAŞLI[1*], Firdevs Banu ÖZDEMİR[2]

[1]Kahramanmaraş İstiklal University, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Department of Basic Sciences, 46100 Kahramanmaraş, Türkiye
[2]Kütahya Health SciencesUniversity, Simav Health Services Vocational School, Department of Medical Services and Techniques, Simav-Kütahya, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-5893-6800
[2]https://orcid.org/0000-0002-7935-2062
*Corresponding author: muhammet.karatasli@istiklal.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 27.04.2025
Accepted: 06.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Fish samples
Mediterranean sea
Natural radioactivity
Radiological risk assessment
Lifetime cancer risk

ABSTRACT

In this study, the concentrations of radionuclides ^{7}Be, ^{40}K, ^{134,137}Cs, ^{226}Ra, ^{235,238}U, were measured in fish samples collected from the Mediterranean Region of Türkiye. The results revealed the presence of various radionuclides in different fish species ^{235,238}U and ^{226}Ra in Pagrus pagrus; ^{238}U and ^{226}Ra in Scomber scombrus; ^{235}U and ^{226}Ra in Sarda sarda; ^{238}U in Spicara smaris and Sardina pilchardus; ^{226}Ra in Mullus barbatus; ^{232}Th in Mugil cephalus; and ^{7}Be in Dicentrarchus labrax. The calculated annual effective dose (AED) values for all species were substantially below the 1000 µSv/year safety threshold recommended by the International Commission on Radiological Protection (ICRP). Therefore, it can be concluded that the consumption of these fish species from the Mediterranean Region of Türkiye does not pose any significant radiological, environmental, or health risks.

Türkiye'nin Akdeniz Sularından Elde Edilen Balık Örneklerinde Radyolojik ve Çevresel Risk Değerlendirmesi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 27.04.2025
Kabul tarihi:06.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahta Kelimeler:
Balık örnekleri
Akdeniz
Doğal radyoaktivite
Radyolojik risk değerlendirmesi
Yaşam boyu kanser riski

ÖZ

Çalışmada, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nden toplanan balık örneklerinde ^{7}Be, ^{40}K, ^{134,137}Cs, ^{226}Ra, ^{235}U ve ^{238}U radyonüklidlerinin konsantrasyonları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, farklı balık türlerinde çeşitli radyonüklidlerin varlığını ortaya koymuştur: Pagrus pagrus türünde ^{235}U, ^{238}U ve ^{226}Ra; Scomber scombrus türünde ^{238}U ve ^{226}Ra; Sarda sarda türünde ^{235}U ve ^{226}Ra; Spicara smaris ve Sardina pilchardus türlerinde ^{238}U; Mullus barbatus türünde ^{226}Ra; Mugil cephalus türünde ^{232}Th ve Dicentrarchus labrax türünde ise ^{7}Be tespit edilmiştir. Tüm türler için hesaplanan yıllık etkin doz (AED) değerleri, Uluslararası Radyolojik Koruma Komisyonu (ICRP) tarafından önerilen 1000 µSv/yıl güvenlik eşiğinin oldukça altında kalmıştır. Bu nedenle, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nden elde edilen bu balık türlerinin tüketiminin, önemli bir radyolojik, çevresel veya sağlık riski oluşturmadığı sonucuna varılabilir.

To Cite: Karataşlı M., Özdemir FB. Radiological and Environmental Risk Assessment of Fish Samples from the Mediterranean Waters of Türkiye. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 126-143.

1. Introduction

All living organisms are subjected to continuous exposure to environmental radiation throughout their lifespans. This radiation originates from both natural sources such as air, water, soil, and even the human

body itself and anthropogenic sources resulting from various human activities (Çetin et al., 2016). External exposure primarily occurs through cosmic and terrestrial radiation, whereas internal exposure is mainly due to the inhalation and ingestion of naturally occurring radionuclides, particularly those from the uranium and thorium decay series. It is well established that approximately 85% of the total radiation dose received by humans derives from natural sources, while the remaining 15% is attributed to artificial sources (UNSCEAR, 2008). Terrestrial radionuclides, including those from the thorium and uranium series as well as ^{40}K, enter the human body predominantly via the consumption of food and the inhalation of airborne particles (UNSCEAR, 2000). The ingestion of contaminated food introduces various radionuclides into the body, comprising both essential elements and trace amounts of radioactive decay products. Among these, ^{40}K is recognized as a major contributor to internal radiation exposure (Taşkın, 2006). Given the increasing global demand for nutritious food sources, aquatic ecosystems have become crucial for sustaining human dietary needs. Fishery products, in particular, provide a significant source of high-quality protein, essential vitamins, and a complete profile of amino acids, while also being easily digestible (Şen et al., 2008; MEGEP, 2011). Water resources play a crucial role in addressing the increasing global demand for nutritious food. Fisheries, with their high protein content, biological value, easy digestibility, rich vitamin content, and the presence of nearly all essential amino acids found in nature, are valuable sources of nutrition for maintaining a balanced and healthy diet. As a result, it is essential for individuals to fulfill part of their nutritional requirements through fishery products (Şen et al., 2008; MEGEP 2011). Fish, in particular, serves as a key component of the fisheries sector. The identification of radionuclides, along with the radiological and lifetime cancer risk assessments for the fish species most commonly consumed by humans, is critical for both environmental and public health considerations. Numerous studies have been conducted globally, including in Türkiye, to assess the radioactivity concentrations in fish, calculate the annual effective dose, internal hazard indices, and lifetime cancer risk associated with fish consumption. A summary of these studies is provided in Table 1.

Table 1. Analysis of studies on fish done in world and Türkiye

Study Reference	Location	Radioactivity Measurements done	Calculations
Alam et al., 1995	Bay of Bengal, Bangladesh	^{238}U,^{232}Th, ^{40}K, ^{134}Cs, ^{137}Cs	-
Radhakrishna et al., 1996	Mangalore Environment of South India	^{40}K,^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{228}Ra,^{210}Pb, ^{210}Po, ^{90}Sr	-
Yu et al., 1997	Hong Kong	^{40}K,^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{228}Ra,^{238}U, ^{210}Pb, ^{60}Co	Annual radionuclide Ingestion, Committed Effective Dose
Ghose et al., 2000	Bay of Bengal, Bangladesh	^{40}K,^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{228}Ra	Committed Effective Dose
Goddard et al., 2003	Barka (Batinah), Omani	^{238}U, ^{232}Th,^{40}K, ^{131}I, ^{7}Be	-
Salih et al., 2006	Oman	^{137}Cs	-
Hassona et al., 2008	Sudan	^{137}Cs, ^{210}Po	Committed Effective Dose
Jalili et al., 2009	Tenerife Island, Spain	^{228}Ac,^{214}Bi, ^{40}K, ^{137}Cs, ^{235}U, ^{234m}Pa,	Effective Dose
Ademola and Ehideu, 2010	River Igbokoda, coastal areas of Ondo State, Nigeria	^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K	Annual Effective Ingestion Dose
Antovic et al., 2010	South Adriatic Sea, Montenegro	^{232}Th	-
Tahir et al., 2010	Manawan, Lahore, Pakistan	^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{40}K	Annual Effective Dose
Antovic et al., 2011	Lustica Coast, Montenegro	^{226}Ra,^{232}Th,^{40}K, ^{137}Cs	-
Çatal et al., 2012	Çanakkale, Dikili, Foça, Çesme, Didim and Bodrum, Aegean Sea, Türkiye	^{210}Pb,^{210}Po	Effective Dose
Görür et al., 2012	Rize, Sinop, Samsun, Trabzon, Sinop, Giresun, Black Sea Region of Türkiye	^{40}K,^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th	Ingested Dose
Aközcan, 2013	Aegean Coasts of Türkiye	^{210}Po	Effective Dose Rate
Erentürk et al., 2014	Lake Van, Türkiye	^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K	Annual Committed Effective Dose

Babatunde et al., 2015	Bonny estuary, Nigeria	^{40}K,^{137}Cs,^{226}Ra,^{232}Th,^{238}U	Effective Dose
Kitto et al., 2015	Lake Ontario, New York, USA	^{137}Cs, ^{90}Sr	Annual Radiation Dose
Fatabadi et al., 2017	Ramsar, Iran	^{226}Ra	-
Baltas et al., 2017	Rize, Black Sea Region, Türkiye	^{40}K,^{137}Cs,^{226}Ra,^{232}Th	Annual Effective Dose
Domingo et al., 2018	British Colombia, Canada	^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{40}K	-
Lerebours et al., 2018	Chernobyl	^{241}Am, ^{239,240}Pu, ^{238}Pu, ^{137}Cs, ^{90}Sr	-
Wilson et al., 2019	Gulf of Mexico	^{40}K, ^{226}Ra, ^{228}Ra	-
Şirin, 2020	The coasts of Rize in the eastern Black Sea region of Türkiye	^{40}K, ^{137}Cs,^{226}Ra, ^{232}Th	Daily Intake of Radionuclides, Annual Committed Effective Dose, Lifetime Cancer Risk
Yılmaz, 2020	Ildır, Güllük, Finike, Taşucu,	^{226}Ra,^{232}Th,^{40}K	-
Biswas et al., 2021	Bay of Bengal, Bangladesh	^{226}Ra,^{232}Th,^{40}K	Annual Effective Dose, Internal Hazardous Index
Cooke et al., 2022	West Coast of Canada	^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{40}K	Annual Ingestion dose
Fakhri et al., 2022	Iran	^{137}Cs, ^{226}Ra,^{210}Pb, ^{210}Po, ^{40}K	Annual Effective dose
Joseph et al., 2022	Qua-Iboe River, South-South Nigeria	^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K	-
Kintsu et al., 2023	Fukishima coastal region	^{90}Sr	-

These investigations have measured the activity concentrations of radionuclides such as $^{234, 235,238}U$, $^{230, 232, 234}Th$, $^{226, 228}Ra$, ^{40}K, ^{7}Be, ^{90}Sr, ^{131}I,$^{210,214}Bi$,^{210}Po, $^{210,212,214}Pb$, ^{234m}Pa,^{228}Ac, $^{238+239}Pu$, $^{238,239,240}Pu$, ^{241}Am, and have performed risk calculations including Annual Effective Dose Rate, Annual Radionuclide Ingestion, Committed Effective Dose, Annual Effective Ingestion Dose, Absorbed Dose Rate, Radium Equivalent Dose, External and Internal Hazardous Index, and Lifetime Cancer Risk. From these analyses, it is evident that determining the radiation dose in commonly consumed fish species and evaluating the associated radiological and environmental risks from fish consumption is of paramount importance. Building on this premise, the objective of the current study is to measure the radioactivity levels in 13 commonly consumed fish species from the Mediterranean Region of Türkiye (listed in Table 2) and to address the key research question: does the consumption of these 13 fish species pose radiological, environmental, and health risks? To achieve this, the activity concentrations of $^{235,238}U$, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{40}K, $^{134,137}Cs$, and ^{7}Be radionuclides were measured, and values for Annual Effective Dose and Lifetime Cancer Risk were calculated in the present study.

Table 2. Fish species used in this study

Sample No	Fish Species	English Name
1	Pagruspagrus	Common Seabream
2	Sardinapilchardus	Sardine
3	Big Sparusaurata	Large Gilt-Head Seabream
4	Scomberscombrus	Mackerel
5	Engraulisencrasicolus	Anchovy
6	Spicarasmaris	Picharel
7	Mugilcephalus	Flathead Mullet
8	Dicentrarchuslabrax	Seabass
9	Sardasarda	Bonito
10	Mullus barbatus	Red Mullet
11	Trachurustrachurus	Horse Mackerel
12	Little Sparusaurata	Little Gilt-Head Seabream
13	Boopsboops	Bogue

Additionally, the Annual Effective Dose (AED) and Lifetime Cancer Risk (LCR) were calculated to evaluate the potential radiological, environmental, and health risks associated with their consumption.

2. Experimental Details

2.1. Sample Collection

In the Mediterranean region, thirteen different fish species were collected from fishermen operating in offshore waters. The specific collection sites are illustrated in Figure 1.

Figure 1. Fish Sampling Map: Mediterranean Region, Türkiye

Immediately after collection, the fish were labeled, stored on ice, and promptly transported to the laboratory for subsequent processing. Upon arrival, the samples were cleaned to remove any external contaminants, prepared as consumable portions, and thoroughly rinsed with distilled water. The cleaned samples were then subjected to a drying process to eliminate moisture content a critical step for accurate radioactivity analysis. Among various available methods, freeze-drying was selected for its ability to preserve biological integrity. Freeze-drying is a dehydration technique performed under vacuum and at low temperatures, enabling the removal of water from biological materials including plants, microorganisms, and animal tissues without causing thermal degradation. For sample preparation, the fish were dissected to remove internal organs, bones, and heads, retaining only the edible muscle tissue. These tissue samples were then stored at low temperatures until further processing. Drying was carried out using a freeze dryer operated under a vacuum pressure of 5 mTorr at a temperature of -85 °C for five days at the Analytical Chemistry Unit of the Çekmece Nuclear Research and Training Center (ÇNAEM), as depicted in Figure 2. Following the completion of the freeze-drying process, the prepared samples were subjected to radioactivity measurements at ÇNAEM.

Figure 2. Freeze Dryer Device used in freezing fish samples

2.2. Radioactivity Measurements

Radioactivity measurements of the fish samples collected from the Mediterranean Sea were carried out at the Analytical Chemistry Unit of the Çekmece Nuclear Research and Training Center (ÇNAEM) using a high-resolution gamma-ray spectrometer equipped with a coaxial horizontal p-type HPGe detector (Canberra GX 3018). The detector system was housed within a 100 mm thick lead shielding, reinforced with a 9.5 mm thick steel frame, to minimize background radiation. Cooling was maintained by a vacuum-sealed, double-walled liquid nitrogen container with a capacity of 30 liters. The HPGe detector provided an energy resolution of 1.8 keV at 1332.5 keV for the ^{60}Co gamma line and exhibited a relative efficiency of 30%. Energy-dependent efficiency calibration was performed using a multi-nuclide standard source provided by Isotope Products Laboratories (Varinlioğlu et al., 2015; Turhan et al., 2018). The activity concentrations of the samples were determined using two distinct methods. In the first approach, the gamma spectra of the fish samples were directly recorded following efficiency calibration using plastic sample containers, with each measurement lasting at least 86,000 seconds. The recorded spectra were processed using a multichannel analyzer, and the radionuclide activities were calculated through spectral analysis on a computer system. The second method involved the comparative standardization technique. Standard reference materials with known activities, specifically uranium, thorium, potassium, and Soil-375, were prepared and measured under identical geometric conditions as the samples. Gamma spectra were obtained for these standards, and their counting rates were determined. Subsequently, the fish samples, prepared under the same geometry, were measured for a minimum of 86,000 seconds. The activities were calculated by comparing the sample counts with those of the standards. This comparative method has the advantage of minimizing efficiency-related uncertainties, as the efficiency factor cancels out when comparing counting rates, thereby enhancing measurement accuracy. To determine the activity concentration of ^{238}U, secular equilibrium between ^{238}U–^{226}Ra and ^{226}Ra–^{222}Rn was assumed. Under these equilibrium conditions, the activity concentration of ^{238}U is considered equivalent to that of ^{226}Ra and its long-lived progeny. While ^{226}Ra activity is typically measured using the 186.2 keV gamma photopeak, this peak overlaps with the 185.7 keV peak of ^{235}U, necessitating correction for interference. Alternatively, when secular equilibrium between ^{226}Ra and ^{222}Rn is established, the activity concentration can be determined based on the gamma emissions from its daughter radionuclides—^{214}Pb (295.2 keV and 351.9 keV) and ^{214}Bi (609.3 keV, 1120.3 keV, and 1764.5 keV). The final activity concentration of ^{226}Ra was obtained by calculating the weighted arithmetic mean of the selected peaks at 295.2 keV, 351.9 keV, 609.3 keV, and 1764.5 keV (IAEA, 1989; ICRP, 1990; Cengiz, 2017). Similarly, the activity concentration of ^{232}Th was determined by assuming secular equilibrium between ^{232}Th–^{228}Ac and ^{224}Ra–^{220}Rn. Under equilibrium conditions, the activity of ^{232}Th is equivalent to that of ^{228}Ac and its progeny. Analytical photopeaks at 583.2 keV (^{208}Tl), 338.4 keV, and 911.2 keV (^{228}Ac) were used for determining the ^{232}Th activity. The final value was calculated as the arithmetic mean of the activity concentrations obtained from the 583.2 keV and 911.2 keV peaks. Additionally, the activity concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K were evaluated using their

characteristic gamma emissions at 661.6 keV and 1460.8 keV, respectively (Turhan et al., 2015). The net peak areas were determined by subtracting background contributions and Compton scattering from the total counts, ensuring accurate quantification. Moreover, the following equation was employed for calculating the activity concentrations of the samples (Görür et al., 2012):

$$C(Bqkg^{-1}) = \frac{C_n}{\varepsilon P_\gamma M_s} \qquad (1)$$

The variable C represents the activity concentration of the radionuclide in the sample, expressed in Bq kg^{-1}; C_n refers to the net count rate under the corresponding gamma peak; M_s denotes the mass of the sample (in kilograms); P_γ is the absolute gamma emission probability for the specific transition; and ε signifies the detector efficiency at the corresponding gamma-ray energy. The minimum detectable activity (MDA) of the measurement system was calculated using the following equation (Currie, 1968):

$$MDA = \frac{1.64\sigma_{NB}}{\varepsilon \cdot P.t.w} \qquad (2)$$

The minimum detectable activity (MDA) is expressed in Bq/kg at a 95% confidence level. In this context, **ε** denotes the absolute efficiency of the detector, P represents the absolute emission probability of the gamma transition, t is the measurement time (in seconds), and **w** refers to the mass of the dried sample (in kilograms). The MDA values for ^{40}K, ^{134,137}Cs, ^{235,238}U, ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{7}Be in each fish sample collected from the Mediterranean region are summarized in Table 3.

Table 3. The MDA values for the ^{40}K, $^{134,137}Cs$, $^{235,238}U$, ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{7}Be radionuclides in fish samples in Mediterranean Region

Fish	K-40 Bq/kg	Cs-134 Bq/kg	Cs-137 Bq/ kg	U-235 Bq/kg	U-238 Bq/ kg	Ra-226 Bq/ kg	Th-232 Bq/kg	Be-7 Bq/kg
Pagruspagrus	562	1.9	2.3	2.9	3.4	2.9	1.4	
Sardinapilchardus	380	1.1	0.9	1.4	2.9	1.4	1.1	
Big Sparusaurata	1330	3.7	4.5	5.1	9.0	5.1	4.2	
Scomberscombrus	520	2.4	1.9	3.2	3.9	3.2	2.6	
Engraulisencrasicolus	966	1.8	1.6)	2.4	5.3	2.4	2.0	
Spicarasmaris	434	1.5	1.2	2.0	3.6	2.0	1.6	
Mugilcephalus	508	1.6	1.8	2.0	3.9	2.0	1.7	
Dicentrarchuslabrax	429	1.2	1.0	1.5	3.0	1.5	1.2	1.4
Sardasarda	433	1.4	1.2	1.9	3.5	1.9	1.5	
Mullus barbatus	402	1.4	1.7	1.9	3.3	1.9	1.5	
Trachurustrachurus	579	1.9	1.6	2.5	4.5	2.5	2.0	
Little Sparusaurata	466	1.6	1.3	2.0	3.7	2.0	1.6	
Boopsboops	473	1.5	1.8	2.0	3.7	2.0	1.6	

2.3. Estimation Of Annual Effective Dose And Lifetime Cancer Risk

The annual effective dose (AED, in μSv y^{-1}) resulting from the ingestion of radionuclides in the fish samples was calculated using the following equation (ICRP, 1996):

$$AED = Cr \sum A_i \, DCF_i \qquad (3)$$

In this formula, **C** represents the average annual fish consumption (6.8 kg y^{-1}); r is the average ratio between the dry weight and fresh weight of the fish samples (0.03 kg dw kg^{-1} fw); A_i denotes the activity concentration of radionuclide *i* in the fish samples; and DCF_i is the dose conversion factor for radionuclide *i*. For adults, the dose conversion factors (DCF_i) were taken as 0.28, 0.23, 0.0062, and 0.013 μSv Bq^{-1} for ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{40}K, respectively (ICRP, 1996). In Türkiye, the average annual fish consumption per capita is reported to be 6.8 kg, although regional variations exist (TEPGE, 2021).

The lifetime cancer risk (LCR) was estimated using Equation (4) (UNSCEAR, 2008):

$$LCR = AED * DL * RF \qquad (4)$$

Here, AED refers to the annual effective dose, DL is the average life expectancy (78.5 years for the Mediterranean Region between 2015 and 2017 (TUIK, 2018)), and RF denotes the fatal cancer risk factor expressed in Sv^{-1}. For the general public, RF values recommended by ICRP 103, BEIR VII (NRC, 2006) and ICRP 60 (ICRP, 2007) were adopted, corresponding to 0.057, 0.064, and 0.072, respectively.

3. Result and Discussion

In the present investigation, the activity concentrations of naturally occurring radionuclides (^{40}K, $^{134,137}Cs$, $^{235,238}U$, ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{7}Be were quantified in thirteen commercially significant fish species harvested from diverse locations along the Mediterranean coast of Türkiye. Gamma spectrometric analyses were conducted utilizing a high-purity germanium (HPGe) coaxial p-type detector (Canberra GX 3018) at the Radioactivity Measurement and Analysis Laboratory of the Çekmece Nuclear Research and Training Center (ÇNAEM). The findings, expressed in Bq/kg dry weight, are summarized in Table 4.

Table 4. The radioactivity concentrations of ^{40}K, $^{134,137}Cs$,$^{235,238}U$, ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{7}Be radionuclides in fish samples in Mediterranean Region. ND means non-detectable.

Fish	K-40 Bq/kg	Cs-134 Bq/kg	Cs-137 Bq/kg	U-235 Bq/kg	U-238 Bq/ kg	Ra-226 Bq/kg	Th-232 Bq/kg	Be-7 Bq/kg
Pagruspagrus	ND	ND	ND	3.2±1.9	29.3±4.3	52.2±31.9	ND	
Sardinapilchardus	ND	ND	ND	ND	20.8±1.9	ND	ND	
Big Sparusaurata	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Scomberscombrus	ND	ND	ND	ND	29.4±3.2	47.1±32.2	ND	
Engraulisencrasicolus	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Spicarasmaris	ND	ND	ND	ND	5.1±2.1	ND	ND	
Mugilcephalus	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.4±1.1	
Dicentrarchuslabrax	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.1±2.3
Sardasarda	ND	ND	ND	2.0±1.4	ND	32.5±23.7	ND	
Mullus barbatus	ND	ND	ND	ND	ND	18.8±11.5	ND	
Trachurustrachurus	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Little Sparusaurata	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Boopsboops	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	

As delineated in Table 4, Pagrus pagrus exhibited notable activity concentrations of ^{226}Ra (52.2 ± 31.9 Bq/kg), ^{235}U (3.2 ± 1.9 Bq/kg), and ^{238}U (29.3 ± 4.3 Bq/kg). This suggests a pronounced bioaccumulation potential for uranium isotopes in this species, indicative of localized uranium enrichment in the marine environment. The concurrent detection of ^{226}Ra further implies the mobilization of radium-bearing materials within the study area, potentially originating from uranium-associated geological structures transported into the Mediterranean basin.

In contrast, Sardina pilchardus samples revealed only the presence of ^{238}U (20.8 ± 1.9 Bq/kg), likely attributable to their affinity for particulate matter and saline environments conducive to uranium uptake. Sparus aurata demonstrated non-detectable radionuclide levels, plausibly due to dietary habits or ecological niches that minimize radionuclide bioaccumulation.

Scomber scombrus specimens displayed activity concentrations of ^{238}U (29.4 ± 3.2 Bq/kg) and ^{226}Ra (47.1 ± 32.2 Bq/kg). Given its migratory behavior, attributing contamination solely to the sampling sites is problematic; however, the data imply environmental and trophic exposure to uranium-bearing substrates.

Spicara smaris, an algae-consuming species inhabiting rocky, mossy, and muddy substrates, registered only ^{238}U (5.1 ± 2.1 Bq/kg), reinforcing its suitability as a sentinel species for deep-sea radiological assessments.

Mugil cephalus, a euryhaline species distributed throughout Turkish coastal waters, exhibited only ^{232}Th activity (2.4 ± 1.1 Bq/kg), potentially reflecting thorium-enriched lithological sources within its preferred shallow, vegetated habitats. Its ecological plasticity renders it an effective bioindicator for environmental radiological monitoring.

Dicentrarchus labrax samples contained ^{7}Be (4.1±2.3 Bq/kg), a short-lived cosmogenic radionuclide, suggesting residence in dynamic, relatively uncontaminated marine environments.

Sarda sarda showed activity concentrations of ^{226}Ra (32.5 ± 23.7 Bq/kg) and ^{235}U (2.0±1.4 Bq/kg), while Mullus barbatus exhibited only ^{226}Ra (18.8±11.5 Bq/kg), consistent with their association with sediment-rich deep-water habitats known to favor radium accumulation.

Spatial and interspecies variability in radionuclide concentrations are visually depicted in Figure 3, illustrating distinctive patterns of radionuclide bioaccumulation among species.

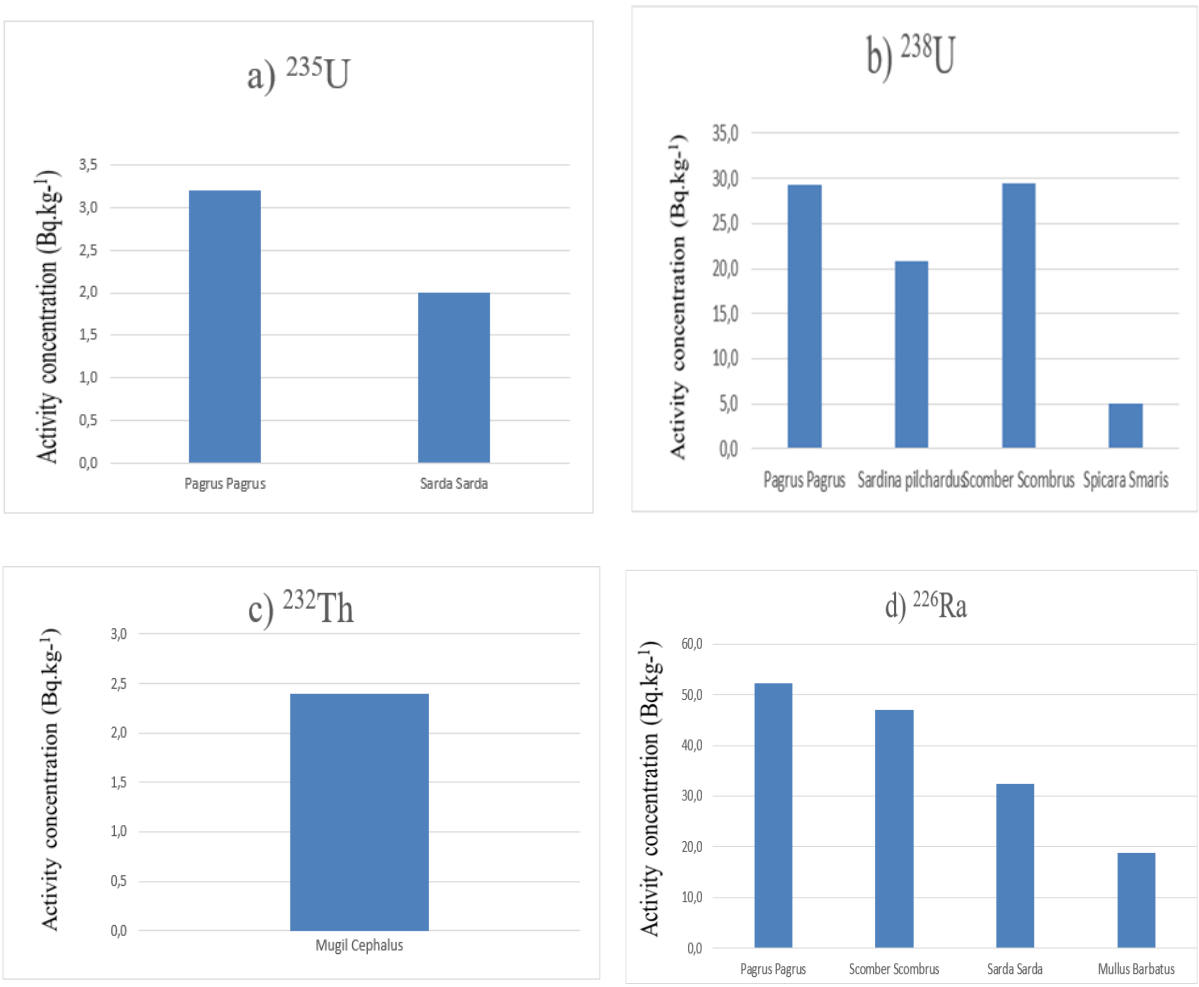


Figure 3. Activity concentration variations of a) ^{235}U b) ^{238}U c) ^{232}Th d) ^{226}Ra radionuclides with respect to fish species studied.

In the second stage of this study, calculations for the annual effective dose (AED) and lifetime cancer risk (LCR) were conducted, and the corresponding results are presented in Table 5.

Table 5. The annual effective dose and lifetime cancer risk values

		Lifetime cancer risk %		
	AED (µSv/y)	ICRP 103	BEIR VII	ICRP 60
Pagruspagrus	2.98	13.34	14.98	16.86
Scomberscombrus	2.69	12.04	13.52	15.22
Mugilcephalus	0.11	0.50	0.57	0.64
Sardasarda	1.86	8.31	9.33	10.50
Mullus barbatus	1.07	4.80	5.40	6.07

The estimated AEDs were 2.98 μSv y^{-1} for Pagrus pagrus, 2.64 μSv y^{-1} for Scomber scombrus, 0.11 μSv y^{-1} for Mugil cephalus, 1.86 μSv y^{-1} for Sarda sarda, and 1.07 μSv y^{-1} for Mullus barbatus, all of which were considerably below the recommended annual dose limit of 1000 μSv for the general public, as stipulated by the International Commission on Radiological Protection (ICRP, 2007). In terms of LCR, Mugil cephalus exhibited the lowest estimated risk (0.50–0.64%), whereas Pagrus pagrus presented the highest (13.34–16.86%). Overall, lifetime cancer risk values ranged from 0.50% to 16.86% among the evaluated species. These findings underscore the necessity for sustained radiological surveillance of marine biota, particularly in ecosystems vulnerable to both natural and anthropogenic radionuclide inputs. While current exposure levels do not pose a discernible health risk to consumers, the observed interspecies variability highlights the importance of species-specific ecological traits in environmental radiological assessments. Continued monitoring is thus imperative to ensure the long-term protection of both marine biodiversity and public health.

4. Conclusions

This study comprehensively evaluated the activity concentrations of naturally occurring radionuclides in thirteen commercially important fish species sampled from various locations along the Mediterranean coast of Türkiye, using high-resolution gamma-ray spectrometry. The identified radionuclides varied among species and are summarized as follows:

- Pagrus pagrus: ^{235}U, ^{238}U, and ^{226}Ra
- Scomber scombrus: ^{238}U and ^{226}Ra
- Sarda sarda: ^{235}U and ^{226}Ra
- Spicara smaris and Sardina pilchardus: ^{238}U
- Mullus barbatus: ^{226}Ra
- Mugil cephalus: ^{232}Th
- Dicentrarchus labrax: ^{7}Be

The estimated annual effective dose (AED) values for all species were significantly lower than the internationally recommended limit of 1000 μSv/year set by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) (ICRP, 2007), suggesting minimal radiological exposure risk through dietary intake. Furthermore, the calculated lifetime cancer risk (LCR) values ranged from 0.57% to 16.98%, indicating variation associated with species-specific accumulation patterns and ecological behaviors. The results also emphasize the influence of biological and ecological factors such as feeding habits, habitat preferences, and migratory patterns on radionuclide bioaccumulation, underlining the need for species-specific risk assessments in future monitoring programs. Particularly, species like Pagrus pagrus and Scomber scombrus, which exhibited higher radionuclide concentrations, could serve as sensitive bioindicators for localized radiological contamination in marine environments. Overall, the findings confirm that the current levels of natural radionuclides in the examined fish species do not

constitute a significant environmental or public health concern for the Mediterranean coastal population. Nonetheless, continued radiological surveillance is strongly recommended, especially in light of potential future environmental changes and anthropogenic activities that may alter marine radioactivity profiles.

Conflict of Interest

The authors affirm that there are no conflicts of interest associated with this study.

Authors Contribution Statements

Muhammet Karataşlı was responsible for sample collection, sample preparation, analytical procedures, and manuscript writing. Firdevs Banu Özdemir contributed to the study's design, interpretation of the results, and manuscript preparation.

References

Ademola JA., Ehiedu SI. Radiological analysis of ^{40}K, ^{226}Ra and ^{232}Th in fish, crustacean and sediment samples from fresh and marine water in oil exploration area of Ondo State, Nigeria. African Journal of Biomedical Research 2010; 13(2): 99-106.

Aközcan S. Levels of ^{210}Po in some commercial fish species consumed in the Aegean Sea coast of Turkey and the related dose assessment to the coastal population. Journal of Environmental Radioactivity 2013; 118: 93-95.

Alam MN., Chowdhury MI., Kamal M., Ghose S. Radioactivity in marine fish of the Bay of Bengal. Applied Radiation and Isotopes 1995; 46(5): 363-364.

Antovic N., Antovic I., Svrkota N. Levels of ^{232}Th activity in the South Adriatic Sea marine environment of Montenegro. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2010; 284(3): 605-614.

Antovic N., Popovic V., Antovic I., Svrkota N., Vukotic P. Measuring ^{137}Cs, ^{40}K and decay products of ^{226}Ra and ^{232}Th in samples of different nature by a multidetector spectrometer. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2011; 290(1): 81-88.

Babatunde BB., Sikoki FD., Hart I. Human health impact of natural and artificial radioactivity levels in the sediments and fish of Bonny Estuary, Niger Delta, Nigeria. Challenges 2015; 6(2): 244-257.

Baltas H., Kiris E., Sirin M. Determination of radioactivity levels and heavy metal concentrations in seawater, sediment and anchovy (Engraulis encrasicolus) from the Black Sea in Rize, Turkey. Marine Pollution Bulletin 2017; 116(1-2): 528-533.

Bilgici Cengiz G. Assessment of natural radioactivity levels and radiological effects in soil samples of Selim District. Kafkas University Institute of Natural and Applied Science Journal 2017; 10(1): 37-47.

Biswas KP., Hossain S., Deb N., Bhuian ASI., Gonçalves SC., Hossain S., Hossen MB. Assessment of the levels of pollution and of their risks by radioactivity and trace metals on marine edible fish and crustaceans at the bay of Bengal (Chattogram, Bangladesh). Environments 2021; 8(2): 13.

Cooke MW., Trudel M., Gurney-Smith HJ., Kellogg JP., Cullen JT., Francisco BBA., Chen J. Radioactivity concentration measurements in fish and shellfish samples from the west coast of Canada after the Fukushima nuclear accident (2011–2018). Journal of Environmental Radioactivity 2022; 251: 106934.

Currie L. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to Radiochemistry Analytical Chemistry 1968; 40(3): 586-593.

Çatal EM., Uğur A., Özden B., Filizok I. ^{210}Po and ^{210}Pb variations in fish species from the Aegean Sea and the contribution of ^{210}Po to the radiation dose. Marine Pollution Bulletin 2012; 64(4): 801-806.

Çetin B., Öner F., Akkurt İ. Determination of natural radioactivity and associated radiological hazard in excavation field in Turkey (Oluz Höyük). Acta Physica Polonica A 2016; 130(1): 475-478.

Domingo T., Starosta K., Chester A., Williams J., Lehnert SJ., Gantner N., Alava JJ. Fukushima-derived radioactivity measurements in Pacific salmon and soil samples collected in British Columbia, Canada. Canadian Journal of Chemistry 2019; 96(2): 124-131.

Erenturk S., Yusan S., Turkozu DA., Camtakan Z., Olgen MK., Aslani MA., Isik MA. Spatial distribution and risk assessment of radioactivity and heavy metal levels of sediment, surface water and fish samples from Lake Van, Turkey. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2014; 300: 919-931.

Fakhri Y., Sarafraz M., Pilevar Z., Daraei H., Rahimizadeh A., Kazemi S., Khaneghah AM.The concentration and health risk assessment of radionuclides in the muscle of tuna fish: A worldwide systematic review and meta-analysis. Chemosphere 2022; 289: 133149.

Fathabadi N., Salehi AA., Naddafi K., Kardan MR., Yunesian M., Nodehi RN., Karimi M. Radioactivity levels in the mostly local foodstuff consumed by residents of the high level natural radiation areas of Ramsar, Iran. Journal of Environmental Radioactivity 2017; 169: 209-213.

Ghose S., Alam MN., Islam MN. Radiation dose estimation from the analysis of radionuclides in marine fish of the Bay of Bengal.Radiation Protection Dosimetry 2000; 87(4): 287-291.

Goddard CC., Mathews CP., Al Mamry J. Baseline radionuclide concentrations in Omani Fish. Marine Pollution Bulletin 2003; 46(7): 914-917.

Görür FK., Keser R., Akçay N., Dizman S. Radioactivity and heavy metal concentrations of some commercial fish species consumed in the Black Sea Region of Turkey. Chemosphere 2015; 87(4): 356–361.

Hassona RK., Sam AK., Osman OI., Sirelkhatim DA., LaRosa J. Assessment of committed effective dose due to consumption of Red Sea coral reef fishes collected from the local market (Sudan). Science of the Total Environment 2008; 393(2-3): 214-218.

IAEA. International Atomic Energy Agency Technical Report Series-295, Vienna, Austria 1989.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60. 1990; 21(1–3).

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 5: Compilations of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. 1996; 72.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the ICRP. Ann. ICRP 2007; 37(2–4).

Jalili A., Lopez-Perez M., Karlsson L., Hernandez F., Rubio C., Hernandez-Armas J., Hardisson A. Radiometric analysis of farmed fish (sea bass, gilthead bream, and rainbow trout) from Tenerife Island, Spain. Journal of Food Protection 2009; 72(9): 1941-1947.

Joseph A., Edet U., Etinosa-Okankan O., Ekanem S. Health risk assessment of heavy metals and radionuclides in Cynoglossus senegalensis (Sole fish) from Qua Iboe River, South-South Nigeria. Journal of Food Composition and Analysis 2022; 114: 104854.

Kintsu H., Kodama K., Horiguchi T. Spatial distributions of and species differences in ^{90}Sr accumulation in marine fishes from the Fukushima coastal region. Journal of Environmental Radioactivity 2023; 256: 107055.

Kitto ME., Marrantino JC., Fielman EM., Haines DK., Semkow TM., Bari A. Long-term monitoring of radioactivity in fish from New York waters. Journal of Environmental Radioactivity 2015; 146: 44-50.

Lerebours A., Gudkov D., Nagorskaya L., Kaglyan A., Rizewski V., Leshchenko A., Smith JT. Impact of environmental radiation on the health and reproductive status of fish from Chernobyl. Environmental Science & Technology 2018; 52(16): 9442-9450.

Louw I. The measurement of natural radioactivity in fish and the impact on humans. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2001; 249(1): 227-232.

MEGEP. Enhancement project of vocational training and education system. Environmental health. Fisheries and their managements 850CK0020. Ankara: MEGEP; 2011. 73 pages.

NRC. National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: National Academies Press; 2006.

Radhakrishna AP., Somashekarappa HM., Narayana Y., Siddappa K. Distribution of some natural and artificial radionuclides in Mangalore environment of South India. Journal of Environmental Radioactivity 1996; 30(1): 31-54.

Salih FM., Pillay AE., Jayasekara K. Measurement of cesium-137 in foodstuffs. Journal of Food Quality 2006; 29(4): 295-304.

Şen B., Canpolat Ö., Sevim AF., Sönmez F. The evaluation of fish consumption in Elazığ. Firat University Journal of Science and Engineering 2008; 20(3): 433-437.

Sirin M. Investigation of accumulation of radionuclides in different tissues of Whiting fish (Merlangius merlangus euxinus Nordmann, 1840) caught on the coasts of Rize in the eastern Black Sea region of Turkey. Microchemical Journal 2020; 152: 104349.

Tahir SNA., Alaamer AS., Ayub M., Khan MZ. Radiometric analysis of samples of domestic fish species and radiological implications. Health Physics 2010; 98(5): 741-744.

Taşkın H. The determination and mapping of the background radiation in Kırklareli in terms of human health and environmental pollution. Marmara University Institute of Health Sciences, M.Sc. Thesis, p.:14, İstanbul, Türkiye, 2006.

TUIK. Life tables 2015–2017. Turkish Statistical Institute 2018. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=30712&dil=2, (Access date: 07.03.2025)

TEPGE. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü. Ürün Raporu: Su ürünleri 2021. https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Belgeler/PDF%20%C3%9Cr%C3%BCn%20Raporlar%C4%B1/2021%20%C3%9Cr%C3%BCn%20Raporlar%C4%B1/Su%20%C3%9Cr%C3%BCnleri%20%C3%9Cr%C3%BCn%20Raporu%202021-338%20TEPGE.pdf, (Access date: 08.04.2025).

Turhan Ş., Atıcı E., Varinlioğlu A. Radiometric analysis of volcanic tuff stones used as ornamental and structural building materials in Turkey and evaluation of radiological risk. Radioprotection 2015; 50(4): 273-280.

Turhan Ş., Demir K., Karataşlı M. Radiological evaluation of the use of clay brick and pumice brick as a structural building material. Applied Radiation and Isotopes 2018; 141: 95-100.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the general assembly, with scientific annexes, United Nations, New York, 2000.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Report to general assembly. Annex B, New York, 2008.

Varinlioğlu A., Turhan S., Karataşlı M. An experimental study of the uptake and loss of radioactive cesium by mussel (Mytilus galloprovincialis). Journal of Environmental & Analytical Toxicology 2015; 5(5): 1.

Wilson IV CA., Hamideh AM., Wang WH. Establishment of a NORM baseline for selected seafood in the Gulf of Mexico. Marine Pollution Bulletin 2019; 145: 448-454.

Yilmaz M. Natural radioactivity concentrations and radiological risk assessment of farmed gilthead seabream (Sparus aurata L., 1758) from the Turkish coast of the Mediterranean Sea. Regional Studies in Marine Science 2020; 39: 101448.

Yu KN., Mao SY., Young ECM., Stokes MJ. A study of radioactivities in six types of fish consumed in Hong Kong. Applied Radiation and Isotopes 1997; 48(4): 515-519.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 144-166, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 144-166, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Tek ve Çift Yüzeyli Fotovoltaik Sistemlerde Yüzey Temizliğinin ve Panel Yerleşim Açılarının Enerji Üretim Performansına Etkisi

Nihat PAMUK[1*]

[1]Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak

[1]https://orcid.org/0000-0001-8980-6913
*Sorumlu yazar: nihatpamuk@beun.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 28.03.2025
Kabul tarihi:11.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Tek ve çift yüzeyli paneller
Eğim açısı
Yüzey temizliği
PV*SOL
PVSyst
Verimlilik

ÖZ

Son yıllarda fotovoltaik (FV) enerji üretiminde teknolojik gelişmeler hızla ilerlemektedir. Bu gelişmeler, modül hücre sayısının artırılması, gelişmiş cam teknolojilerinin uygulanması ve çift yüzeyli cam kullanılarak üretilen FV modüllerinin geliştirilmesi gibi önemli yenilikleri içermektedir. Ayrıca, bu ilerlemeler, FV modüllerinin enerji üretim verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli saha uygulamalarının önünü açmıştır. Bu tür uygulamalar, kurulum maliyetinin amortisman süresini kısaltmanın yanı sıra FV modüllerinin verimliliğini de artırmaktadır. Özellikle çift yüzeyli modüller, her iki yüzeyden de güneş ışığını absorbe ederek enerji üretiminde önemli bir artış sağlamaktadır. Bu çalışmada, Ankara ili Polatlı ilçesinde belirlenen koordinatlarda, PVSyst ve PV*SOL benzetim programları kullanılarak tasarlanan 9.639,630 kWp üretim kapasiteli bir güneş enerjisi santrali analiz edilmektedir. Bu araştırmanın temel amacı, tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV panellerin eğim açılarındaki değişimlerin enerji üretimine etkilerini incelemek ve tespit edilen optimum açı değerleri ile temizlik stratejilerini belirlemektir. Böylece, santralin enerji üretim kapasitesini en üst düzeye çıkarırken aynı zamanda işletme maliyetlerini düşürmek hedeflenmektedir. Bu araştırmanın bulguları, güneş enerjisi yatırımlarının hem yerel hem de ulusal düzeyde daha verimli hale getirilmesine önemli bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca, güneş enerjisi sektörüne optimal sistem konfigürasyonları ve bakım uygulamaları konusunda kritik bilgiler sunarak sektöre önemli bir kaynak oluşturacaktır.

The Impact of Surface Cleaning and Panel Placement Angles on Energy Production Performance in Monofacial and Bifacial Photovoltaic Systems

Research Article

Article History:
Received: 28.03.2025
Accepted: 11.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Monofacial and bifacial panels
Tilt angle
Surface cleaning
PV*SOL
PVSyst
Efficiency

ABSTRACT

In recent years, technological advancements in photovoltaic (PV) energy production have progressed rapidly. These developments include significant innovations such as increasing the number of module cells, implementing advanced glass technologies, and producing PV modules with double-sided glass. Furthermore, these advancements have facilitated various field applications aimed at enhancing the energy production efficiency of PV modules. Such applications not only shorten the amortization period of installation costs but also improve PV module efficiency. Bifacial modules, in particular, offer a notable increase in energy generation by capturing sunlight from both surfaces. In this study, a solar power plant with a production capacity of 9.639.630 kWp, designed using PVSyst and PV*SOL simulation programs at specified coordinates in the Polatlı district of Ankara Province, is analyzed. The primary objective of this research is to investigate the effects of variations in the tilt angles of unidirectional and bidirectional PV panels on energy production and to determine the optimal angles and cleaning strategies.

By doing so, the study aims to maximize the power plant's energy generation capacity while simultaneously reducing operational costs. The findings of this research will serve as a valuable resource for improving the efficiency of solar energy investments both locally and nationally. Moreover, they will contribute significantly to the solar energy sector by providing insights into optimal system configurations and maintenance practices.

To Cite: Pamuk N. Tek ve Çift Yüzeyli Fotovoltaik Sistemlerde Yüzey Temizliğinin ve Panel Yerleşim Açılarının Enerji Üretim Performansına Etkisi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 144-166.

1.Giriş

Güneş enerjisi, dünya genelindeki artan enerji talebine ve çevresel sürdürülebilirlik endişelerine karşılık olarak, en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, fotovoltaik (FV) sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme potansiyeli sunarak büyük bir önem kazanmıştır. Fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri, güneş panelleri, inverterler, montaj yapıları ve enerji depolama ünitelerinden oluşmaktadır (Hernández-Callejo ve ark., 2019). Geleneksel fotovoltaik paneller, yalnızca panelin ön yüzeyinde yer alan hücreler aracılığıyla enerji üretirken, çift yüzeyli fotovoltaik panellerin her iki yüzeyinde de fotovoltaik hücreler bulunmaktadır (Rajesh ve Mabel, 2015). Bu yapı, çift yüzeyli panellerin, yalnızca doğrudan güneş ışığını değil, aynı zamanda zemin yüzeyinden yansıyan ışığı da kullanarak, tek yüzeyli fotovoltaik modüllere kıyasla daha yüksek enerji üretim kapasitesine ulaşmasını sağlamaktadır.

Çift yüzeyli panellerin enerji verimliliği, kullanılan yüzey malzemeleri, çevresel faktörler ve coğrafi koşullar gibi değişkenlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Özellikle, fotovoltaik modülün arka yüzeyine yansıyan ışığın yansıma katsayısı, sistemin toplam enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir (Venkateswari ve Sreejith, 2019). Dolayısıyla, çift yüzeyli panellerin performansını maksimize etmek için çevresel etkenler, panelin yerleştirilme açısı ve yüzey özellikleri gibi bileşenler kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. Bu tür çok boyutlu analizler, fotovoltaik sistemlerin verimliliğini artırarak, güneş enerjisinden elde edilen elektrik üretiminin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Lupangu ve Bansal, 2017). Güneş enerji santralleri, hızlı bir teknolojik gelişim süreci geçirmiştir. 50W üretim potansiyeline sahip fotovoltaik (FV) modüller, günümüzde 680W üretim potansiyeline sahip modüllere dönüşmüş ve tek yüzeyli üretim yapan fotovoltaik modüllerden, çift yüzeyli üretim gerçekleştirebilen modüllere geçiş yapılmıştır (Obi ve Bass, 2016).

Santral tasarımında kullanılan fotovoltaik modül tipi, sistemin genel üretim verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür (Karakaya ve Sriwannawit, 2015). Özellikle, tek yüzeyli ve çift yüzeyli panellerin üretim verileri incelendiğinde, çift yüzeyli panellerin güneş ışığının hem panelin ön yüzeyine hem de arka yüzeyine düşen ışınım miktarını daha verimli bir şekilde kullanabildiği görülmektedir. Bu özellik, çift yüzeyli panellerin enerji üretiminde belirgin farklar yaratmasına neden olmaktadır. Tek yüzeyli paneller, genellikle sabit bir yerleşim açısı ile güneş ışığını toplarken, çift yüzeyli paneller ise güneşin günlük hareketlerine daha uyumlu bir şekilde tepki verebilmekte ve her iki yüzeyde de ışınımı absorbe edebilme kapasitesine sahiptir (Pearsall, 2017). Güneş enerji santralinin kurulum aşamasında,

santral tasarımının doğruluğu yüksek benzetim programlarıyla test edilmesi oldukça önemlidir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre santral tasarımı optimize edilerek, maliyet analizleri gerçekleştirilmelidir. Gerçek santral verilerine en yakın sonuçların elde edilmesi için farklı benzetim yazılımları kullanılabilmektedir. PVSyst ve PV*SOL gibi benzetim programları sayesinde, ekonomik analizler, yıllık enerji üretim kapasiteleri ve kablo metrajları gibi teknik veriler hesaplanarak saha uygulamalarına yönelik detaylı analizler gerçekleştirilmektedir (Baqir ve Channi, 2022).

PV*SOL ve PVSyst simülasyon programlarının kullanılması farklı coğrafi bölgelerdeki enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla güneş enerjisi sistemlerindeki bileşenlerin seçiminde ve boyutlandırılmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, Ghafiri ve arkadaşları, Kanada'da bulunan Sherbrooke Üniversitesi kampüsünün elektrik ihtiyacını karşılamak üzere fotovoltaik (FV) temelli bir enerji üretim sistemi tasarlamışlardır (Ghafiri ve ark., 2020). Bu çalışmada, deneysel olarak albedo faktörünün 0,6 alındığı ağırlıklı kış koşulları altında ve yükseltinin 1 metrenin üzerinde olduğu güneş enerjisi potansiyeli, güneş ışınımı verileri ve farklı yük koşullarına yönelik hassasiyet analizleri PVSyst simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kazanç değerinin % 10 – % 15 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Juaidi ve arkadaşları, Filistin'nin Nablus kentindeki An-Najah National Üniversitesindeki kampüsün elektrik ihtiyacını karşılamak üzere tek yüzeyli FV sistem tasarımı gerçekleştirmişlerdir. (Juaidi ve ark., 2019). Tasarlanan sistem PVSyst yazılımı ile analiz edilmiş olup, sistemde albedo faktörünün ~0,25 ve yükseklik etkisinin 1 m olduğu durumlardaki analizler gerçekleştirilmiş ve sistemin kazanç değeri % 6,8 olarak belirlenmiştir.

Türkdoğru ve arkadaşları Manisa ili, Salihli ilçesinde güneş enerjisi kaynaklarına dayalı sistemler kurarak elektrik ihtiyacını karşılamayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda, sistem bileşenlerinin seçimi ve boyutlandırılması için PVSyst yazılımından yararlanmışlardır (Turkdoğru ve Kutay, 2022). Yapılan analizlerde, albedo faktörünün 0,5 alındığı, yükseltinin 1,2 metre olduğu ve çalışma sonucunda kazanç değerinin % 10 – % 12 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Çoban tarafından Ardahan bölgesinde yürütülen çalışmada ise, karlı zemin koşullarında çift yüzeyli FV panellerin performansları analiz edilmiştir. Arazinin 1,5 metreden fazla kar kalınlığına sahip olup, yüksek kar yansıtması ve uygun panel yerleşimi sayesinde çift yüzeyli FV sistemlerde % 30'a kadar üretim artışı gözlemlenmiştir (Çoban, 2023). Garrod ve ekibi ise, Çin'de gerçekleştirilen geniş ölçekli saha çalışmalarında çift yüzeyli güneş panellerinin performansını yüksek yansıtıcılığa sahip zemin koşullarında incelemişlerdir. Arazi yüksekliğine bağlı albedo faktörünün 0,35 ile 0,45 aralığında değiştiği ve kar kalınlığının 1,2 metrenin üzerinde olduğu bölgelerde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel gözlemler, bu çevresel koşullarda çift yüzeyli panellerin tek yüzeyli sistemlerle karşılaştırıldığında % 9 ile % 11 oranında daha yüksek enerji üretimi sağlandığını ortaya koymuştur (Garrod ve Ghosh, 2023).

Alzahrani ve ekibi tarafından 2025 yılında yayımlanan bir çalışmada, Suudi Arabistan'ın Cidde kentinde yoğun toz birikiminin yaşandığı koşullarda farklı eğim açılarına sahip FV panellerin performansları incelenmiştir. Sonuçlara göre, 25° eğim açısı yıl genelinde en yüksek enerji üretimini sağlamış; 45° eğim ise yağışlı dönemlerde panel yüzeyinin doğal temizlenmesini kolaylaştırarak verimi artırmıştır. Bu

bulgular, tozlu bölgelerde eğim açısının hem enerji verimi hem de kirlilik etkisini azaltma açısından kritik olduğunu göstermektedir (Alzahrani ve ark., 2025). 2024 yılında Mısır'da yapılan bir çalışmada, FV panellere uygulanan nano kaplamalar sayesinde, kurak iklim koşullarında kısa devre akımı % 64,7 oranında artmıştır. Bu artış, toz birikimini azaltarak panel yüzeyini temiz tutma etkisinden kaynaklanmıştır. Çalışma, kurak bölgelerde kaplama teknolojilerinin FV verimini ciddi şekilde iyileştirebileceğini göstermektedir (Ahmed ve ark., 2024). 2024 yılında yapılan deneysel bir çalışmada, FV panellerin farklı eğim ve yönlerdeki performansı incelenmiş; güney yönü ve 30° eğim ile en yüksek verim elde edilmiştir. Mevsimsel eğim ayarlamalarıyla üretimin % 3 ile % 4 oranında artabileceği gösterilmiştir. Çalışma, yerel koşullara uygun açısal optimizasyonun önemini vurgulamaktadır (Kara ve ark., 2024). Türkiye'nin Adana, Ankara, Erzurum ve İstanbul gibi dört şehrinde yapılan deneysel bir çalışmada, FV paneller için yıllık optimum eğim açısı 36°–39° arasında bulunmuştur. Özellikle yaz ayları için önerilen eğim açıları, enlem değerlerinden yaklaşık 5° düşük (~enlem −5°), kış ayları için ise yaklaşık 5° yüksek (~enlem +5°) olarak ayarlanmıştır. Bu sonuçlar, sabit açılı sistemlere kıyasla daha verimli ve etkili bir FV konfigürasyonu sağlamıştır (Çağlar, 2018).

Bu çalışma ise, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli yüksek bölgelerinden biri olan Ankara'nın Polatlı ilçesinde tek ve çift yüzeyli fotovoltaik sistemlerin performansını hem PV*SOL hem de PVsyst gibi iki farklı simülasyon yazılımı ile karşılaştırmalı olarak analiz etmesi bakımından literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, iki farklı yazılımın çıktılarının eğim açısına bağlı olarak sistematik biçimde karşılaştırılması, çift yüzeyli panel kazancının düşük albedo faktöründe (~0,20) ve sınırlı panel-zemin yüksekliği durumunda (<1 m) sahaya özgü koşullar altında değerlendirilmesi ve panel tozlanma etkisinin detaylı şekilde simülasyona dahil edilmesidir. Ayrıca, çalışmada hem tek yüzeyli hem de çift yüzeyli paneller için optimum eğim analizlerine yer verilmiş; bu analiz özellikle düşük albedo değerli panel yüzeylerinde çift yüzeyli panel performansının sınırlarını belirlemektedir. Literatürde sıklıkla idealize edilmiş koşullara dayalı yüksek kazançlar ortaya konurken, bu çalışma daha gerçekçi saha varsayımlarıyla elde edilen ölçülü sonuçları sunmaktadır. Bu nedenle Türkiye'deki yatırımcılar ve saha tasarımcıları için daha uygulanabilir referanslar sağlaması açısından önemlidir. Sonuçların detaylı kayıp analizleriyle desteklenmesi ve kirlilik gibi genellikle ihmal edilen verim düşürücü etkilerin vurgulanması, çalışmanın pratik yönünü güçlendirmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada tek ve çift yüzeyli fotovoltaik modüllerin, eğim açısı değişimi ve yüzey kirlilik oranlarına bağlı olarak üretebildiği enerji miktarları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, FV sistem performans analizinde yaygın olarak kullanılan PVSyst ve PV*SOL benzetim programları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, toplam kurulu gücü 9.639,630 kWp olan güneş enerjisi santralinin bulunduğu coğrafi bölgenin detaylı bir ön değerlendirilmesi yapılmıştır. İlk aşamada, santralin yer aldığı konumun coğrafi ve iklimsel koşulları belirlenmiş, bölgeye ait güneşlenme süresi, sıcaklık değişimleri ve rakım gibi temel parametreler ele alınmıştır. Şekil 1'de verilen Google Earth

uydu görüntüsünde, kırmızı dikdörtgen içerisine alınan 47,783 m²'lik alanda 39,38°K ve 32,12°D koordinatlarına ait iklim verileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, söz konusu bölgede yıllık ortalama en yüksek sıcaklık 30,5 °C, en düşük sıcaklık ise -3,2 °C olarak kaydedilmiştir. Bölgenin ortalama günlük güneşlenme süresi 2506 Wh/m² olarak belirlenmiş olup, santralin konumlandığı alanın deniz seviyesinden yüksekliği (rakımı) 900 metre olarak tespit edilmiştir. Bu parametreler, güneş enerjisi santralinin enerji üretim verimliliği açısından kritik öneme sahip olup, benzetim süreçlerinde temel girdiler olarak kullanılmıştır.

Şekil 1. Güneş enerji santralinin kurulacağı alanın google earth görüntüsü

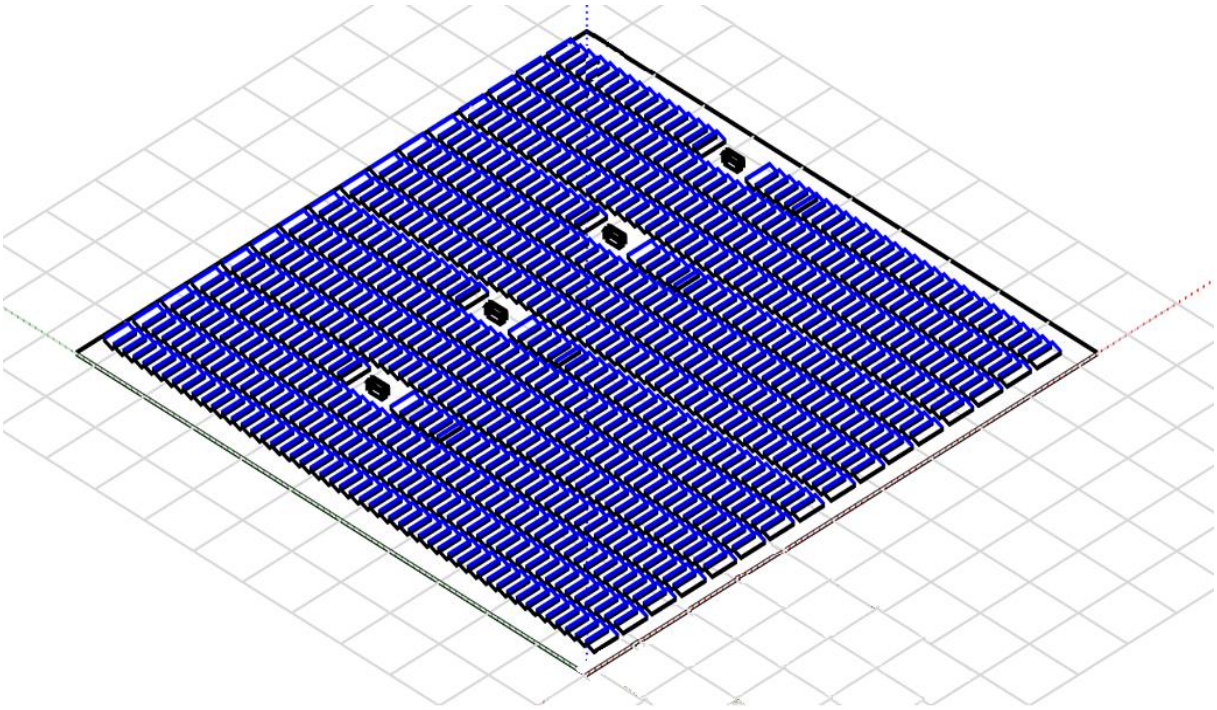
2.1. PVSyst tabanlı enerji üretim analizi

Santral tasarım sürecine, güneş enerjisi sistemlerinin simülasyonu ve performans analizi için yaygın olarak kullanılan PVSyst yazılımı aracılığıyla başlanmıştır. Bu yazılım, fotovoltaik sistemlerin tasarımı, analizi ve optimizasyonu için kapsamlı araçlar sunarak, gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Çalışmanın başlangıç aşamasında, santral kurulumu için belirlenen 39,38 °K ve 32,12 °D koordinatları sisteme tanımlanmış, ardından bu koordinatlara ait iklimsel veriler, PVSyst yazılımının entegre veri tabanlarından biri olan Meteonorm üzerinden temin edilmiştir (Mermoud ve Wittmer, 2014). Söz konusu iklimsel veriler, sıcaklık, rüzgâr hızı, güneşlenme süresi ve ışınım değerleri gibi önemli meteorolojik parametreleri içermekte olup, santral performans analizinin doğruluğunu artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Tasarım sürecinde, seçilen inverter ve FV modüllere uygun olarak santralin genel yerleşim planı oluşturulmuştur. Ardından, PVSyst yazılımının kritik analiz araçlarından biri olan "Gölgelendirme Sahnesi" fonksiyonu kullanılarak santralin üç boyutlu (3B) modeli kurulmuştur. Bu aşamada, panel yerleşimleri, paneller arası mesafeler, string konfigürasyonları ve montaj açısı gibi parametreler sisteme girilerek, çalışma sahasının fiziksel düzeni detaylı bir şekilde modellenmiştir. Üç boyutlu modelleme süreci, santral sahasında oluşabilecek gölgelendirme etkilerini tespit etmek ve bu etkileri minimize edecek düzenlemeler yapmak açısından büyük önem taşımaktadır (Irwan ve ark., 2015). Gölgeleme

kayıpları detaylı olarak hesaplanmış ve minimum seviyeye indirgenmesi amacıyla yerleşim planında gerekli optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen analizler kapsamında, farklı eğim açılarında ve iki farklı FV modül seçeneği ile enerji üretim potansiyeli değerlendirilmiş, gölgelenme kayıplarının sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2'de PVSyst yazılımındaki güneş enerjisi santralinin üç boyutlu tasarımı gösterilmiştir. Üç boyutlu modelleme çıktısı, santralin fiziksel tasarımını görselleştirerek, panel konfigürasyonlarının ve gölgelendirme analizlerinin daha etkin bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece, santral tasarımının optimize edilmesi ve enerji üretim verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 2. PVSyst yazılımındaki güneş enerji santralinin üç boyutlu tasarımı

2.2. FV panel tasarımı ve seçim kriterleri

PVSyst yazılımı kullanılarak tasarlanan güneş enerji santralinde, enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak amacıyla üç farklı eğim açısı değerlendirilmiştir. FV sistemlerde panel eğim açısı, güneş ışığının modül yüzeyine düşme açısını doğrudan etkileyerek enerji üretim miktarında önemli farklılıklara yol açmaktadır (Muñoz ve ark., 2017). Bu çalışma kapsamında, farklı eğim açılarının enerji üretimi üzerindeki etkilerini analiz edebilmek için, aynı tip FV modülleri kullanılarak detaylı bir performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tercih edilen FV modüller, JA Solar firmasına ait JAM66D42 ve JAM78-S30 kodlu modüllerdir. Bu modüller, aynı tür FV hücre yapısına sahip olup, her biri 585 W gücünde enerji üretim kapasitesine sahiptir (Ait Omar ve ark., 2024). Aynı teknik özelliklere sahip modüllerin kullanılması, elde edilen verilerin güvenilirliğini ve karşılaştırılabilirliğini artırarak,

eğim açısına bağlı olarak enerji üretimindeki değişimlerin daha sağlıklı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Araştırmada ele alınan üç farklı açı değeri, güneş ışınlarının yıl içerisindeki değişken konumları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Eğim açısındaki değişimler, FV modüllerin gün içindeki ışınım alma süresini ve yoğunluğunu etkileyerek, toplam enerji üretimini doğrudan şekillendirmektedir. Bu nedenle, her bir açı için ayrı ayrı gerçekleştirilen performans analizleri, FV santralinin en yüksek verimlilikle çalışabileceği optimum açının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 1'de, çalışmada kullanılan FV modüllerin teknik özellikleri detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Bu tabloda, modüllerin maksimum güç çıkışı (W), verimlilik oranı (%), açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktası gerilimi (V_{mpp}) ve maksimum güç noktası akımı (I_{mpp}) gibi temel elektriksel parametreler yer almaktadır. Söz konusu teknik veriler, FV modüllerinin performans karakteristiklerini belirlemek açısından kritik bir öneme sahiptir ve FV santrallerin tasarım aşamasında önemli bir basamak olarak kabul edilmektedir.

Modüllerin bu temel elektriksel parametreleri, farklı eğim açılarındaki enerji üretim analizlerinde kullanılarak, sistemin genel verimliliği üzerindeki etkileri belirlenmektedir. Özellikle, maksimum güç çıkışı ve verimlilik oranı, FV modüllerinin belirli bir ışınım seviyesinde ne kadar enerji üretebileceğini belirleyen en önemli faktörler arasında yer almaktadır (Kasim ve ark., 2019). Açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) gibi parametreler ise, modülün karakteristik eğrisini oluşturarak farklı çalışma koşullarındaki performansını anlamaya yardımcı olmaktadır.

Tablo 1. Santral tasarımı yapılırken kullanılan FV modüllerin teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Tek Yüzeyli Modül	Çift Yüzeyli Modül
Üretici	JA Solar	JA Solar
Model	JAM72-S30-560-585-LR	JAM66D42-565-590- MB
Maksimum Güç Çıkışı (W)	585Wp	585Wp
Hücre Sayısı	144 (72x2)	132 (6x22)
Uzunluk	2333 ± 2 mm	2278 ± 2 mm
Genişlik	1134 ± 2 mm	1134 ± 2 mm
Ağırlık	28 kg	31,8 kg
Kısa devre akımı (I_{sc})	14,56 A	15,26 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	50,49 V	48,38 V
Maksimum güç noktası akımı (I_{mpp})	13,79 A	14,40 A
Maksimum güç noktası gerilimi (V_{mpp})	42,42 V	40,63 V
Güç Toleransı	0~+5 W	0~+5 W
Modül Verimliliği (%)	22,1	22,6

Bu teknik özelliklerin incelenmesi, FV sistemlerin tasarım ve optimizasyon süreçlerinde büyük önem taşımaktadır. Özellikle, panel eğim açısının değiştirilmesi ile modül üzerine düşen ışınım miktarı farklılık göstereceğinden, bu parametrelerin performans analizlerinde dikkate alınması, en uygun eğim açısının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar için güvenilir bir temel sağlamaktadır. Elde edilen teknik veriler ışığında yapılan analizler, güneş enerji santralinin verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sağlayarak, sistemin uzun vadeli performans optimizasyonuna yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

2.3. İnverter seçim kriterleri

Günümüzde, farklı markalara ait ve çeşitli teknik özelliklere sahip inverter modelleri bulunmaktadır. Bu inverterler, kullanım alanlarına bağlı olarak hem arazi tipi hem de çatı tipi güneş enerjisi santrallerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, inverterlerin teknik özellikleri, soğutma sistemleri, maksimum güç çıkışı, verimlilik oranları ve çalışma sıcaklık aralıkları gibi parametreler açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Özellikle büyük ölçekli arazi tipi güneş enerjisi santrallerinde, yüksek güç kapasiteli ve verimli inverterlerin kullanılması, sistem performansı ve enerji üretim kapasitesini doğrudan etkileyen kritik faktörlerden birisidir (Usah ve ark., 2020).

Verimli inverter modelinin kullanılmak istenmesi nedeniyle, arazi tipi güneş enerjisi santrallerinde en yaygın tercih edilen inverter markalarından biri olan Sungrow markası tercih edilmiştir. Sungrow inverterler ileri düzey teknik özellikleri ve güçlü servis desteği ile sektörde önemli bir yer elde etmiştir. Sungrow'un üretmiş olduğu inverterler, geniş çalışma gerilimi aralığı ve gelişmiş soğutma sistemleri ile ön plana çıkmaktadır (Dirlik ve ark., 2023). Bu nedenle tasarımı gerçekleştirilen 9.639,630 kWp kurulu güce sahip güneş enerjisi santralinde, Sungrow markasına ait SG350-HX modeli tercih edilmiştir. SG350-HX modeli, her biri 350 kW nominal güç kapasitesine sahip olup, yüksek verimlilik oranı ile enerji üretim sürecinde maksimum performans sağlamaktadır.

Santralin tasarımında inverterlerin 320 kW güç sınırında çalışması planlanmış olup, bu sayede sistemin daha dengeli ve uzun ömürlü bir şekilde işletilmesi amaçlanmıştır. Güç sınırlandırılması, inverterlerin aşırı yüklenmesini önleyerek hem güvenilirliklerini arttırmakta hem de uzun vadede bakım ve işletme maliyetlerini optimize etmektedir (Sancar ve Bayram, 2023). Sungrow SG350-HX inverter modeline ait detaylı teknik özellikler Tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Sungrow SG350-HX inverterin teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Değerler
Maksimum FV giriş gerilimi	1500 V
Minimum FV giriş gerilimi / Başlangıç giriş gerilimi	500 V / 550 V
Nominal FV giriş gerilimi	1080 V
MPP Gerilim aralığı	500 V – 1500 V
MPP Nominal güçteki gerilim aralığı	860 V – 1300 V
Bağımsız MPP giriş sayısı	12
MPPT başına maksimum konnektör giriş adedi	2
Maksimum FV giriş akımı	12 * 40 A
Her bir MPPT için maksimum DC kısa-devre akımı	60 A
Nominal şebeke frekansı / Şebeke frekans aralığı	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
Maksimum verimlilik	% 99,01
AC çıkış gücü	352 kVA @ 30 °C / 320 kVA @40 °C 295 kVA @50 °C

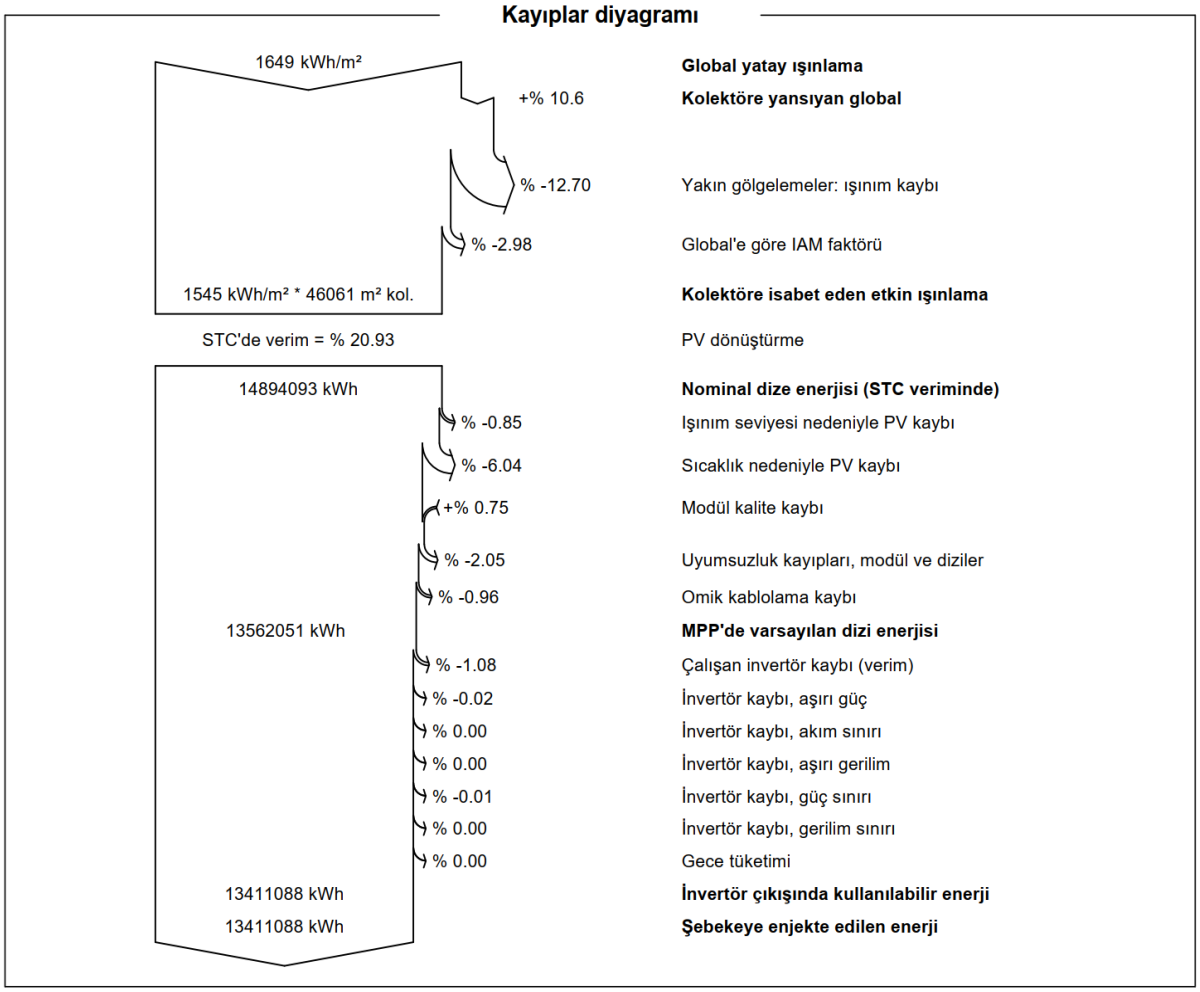
Bu teknik veriler, inverterlerin çalışma koşullarını, performansını ve enerji üretimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemli bir referans sağlamaktadır. İnverter seçiminde dikkate alınan bu teknik özellikler, güneş enerji santralinin toplam verimliliğini ve uzun vadeli işletme maliyetlerini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almakta olup, bu çalışmada gerçekleştirilen tasarım sürecinde kritik bir rol oynamaktadır.

2.4. PVSyst simülasyon sonuçları

Çalışmanın ilk aşamasında, güneş enerji santralinin performansını değerlendirmek amacıyla eğim açısının 20° olarak belirlendiği bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, JA Solar markasına ait 585 W gücündeki tek yüzeyli toplam 16478 adet FV modül kullanılmıştır. Seçilen FV modüller, yüksek verimlilik oranları, uzun ömürlü performansları ve zorlu çevresel koşullara karşı dayanıklılıkları ile bilinen ileri teknolojiye sahip ürünlerdir (Kayri, 2024).

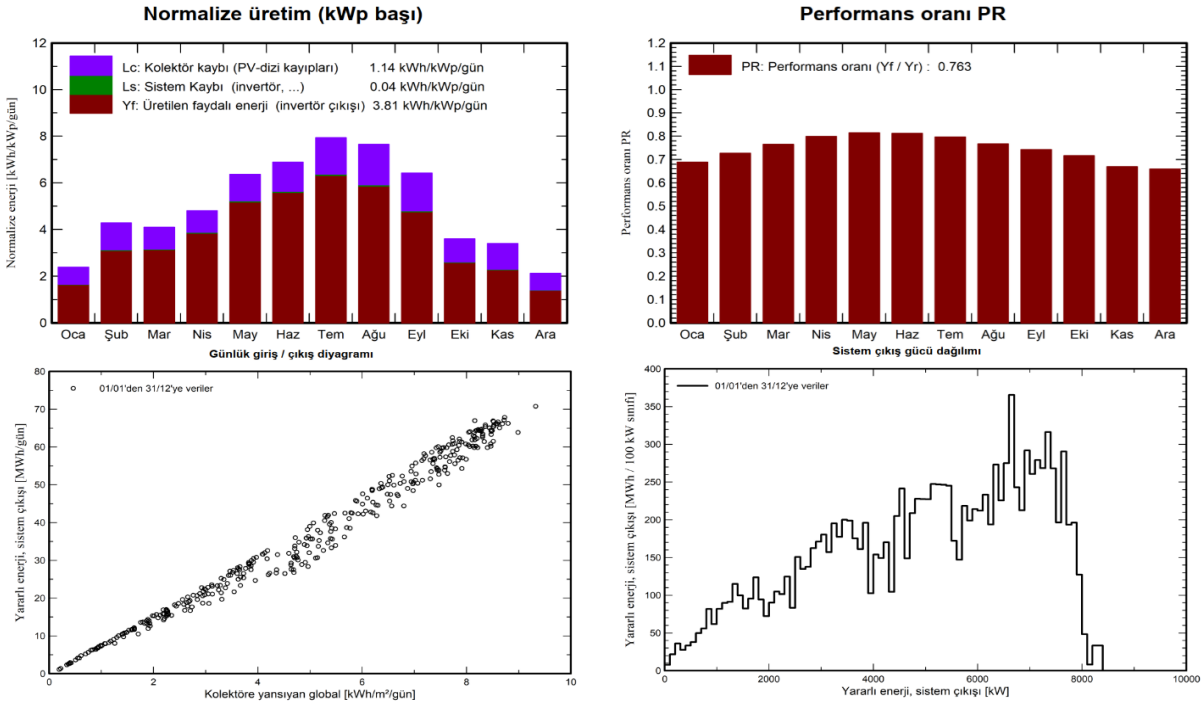
Modüller 20°'lik eğim açısı altında güneş ışığını en verimli şekilde yakalayarak, gelen ışınımı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Eğim açısının doğru belirlenmesi, FV modüllerin gün içinde maksimum ışınım almasını sağlamakta ve böylece enerji üretimini artırmaktadır. Ayrıca, modüllerin açısal konumlandırması, yıllık enerji üretim kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye neden olmaktadır (Faiz ve ark., 2021). Bu nedenle, simülasyon sürecinde belirlenen eğim açısının enerji üretimine olan katkısı detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Şekil 3'te 20°'lik eğim açısına sahip FV panellerin simülasyon sonuçlarına ait üretim verisinin kayıp diyagramı gösterilmiştir. Bu veriler, belirlenen açı ve zaman dilimi boyunca üretilen toplam enerji miktarını, FV modüllerin ortalama verimliliğini ve kurulması planlanan santralin yıllık enerji üretimini içermektedir. Elde edilen simülasyon sonuçları, FV santralinin gerçek çalışma koşullarında nasıl bir performans sergileyebileceğini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, bu analizler, sistemin uzun vadeli enerji üretim kapasitesini optimize ederek en uygun panel eğim açısını belirlemektedir.



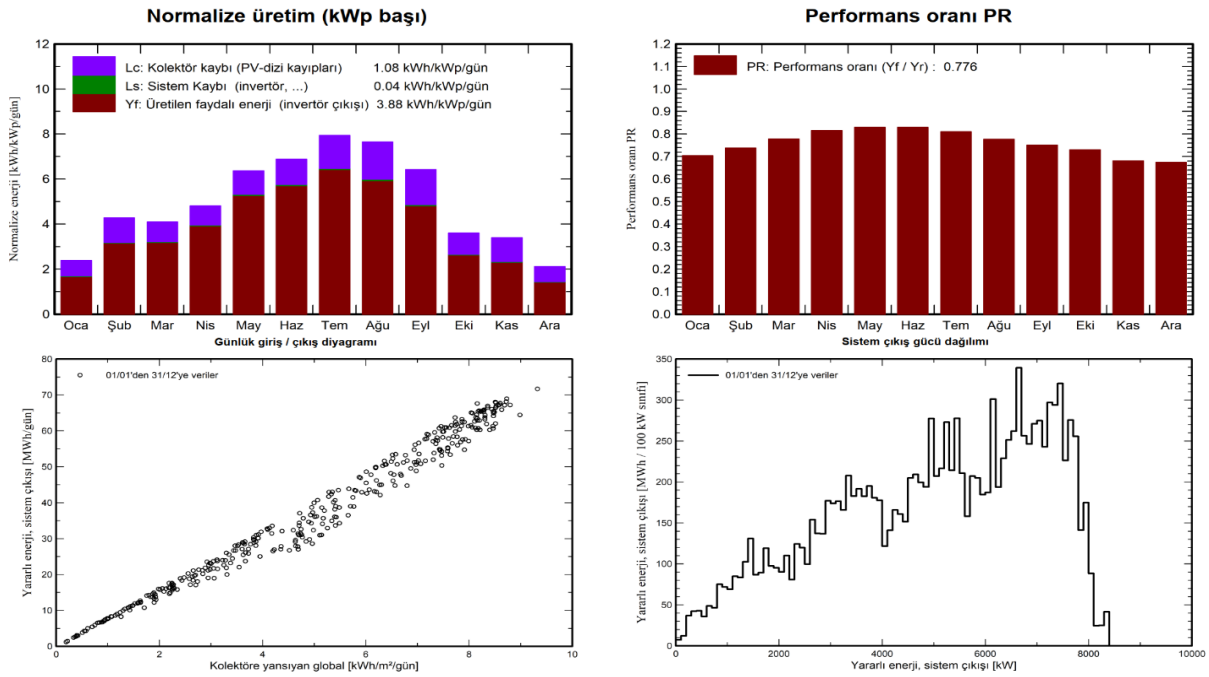
Şekil 3. 585W tek yüzeyli FV modülün 20°'lik eğim açısı altındaki üretim verisinin kayıp diyagramı

20°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı (PR), fotovoltaik sistemin gerçek enerji çıktısı (Yf), sistem kaybı (Ls) ve kolektör kaybı (Lc) değerlerinin referans enerji çıktısına oranlayarak sistemin genel verimliliği değerlendirilmektedir. Şekil 4'te FV sisteme ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4. 20°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

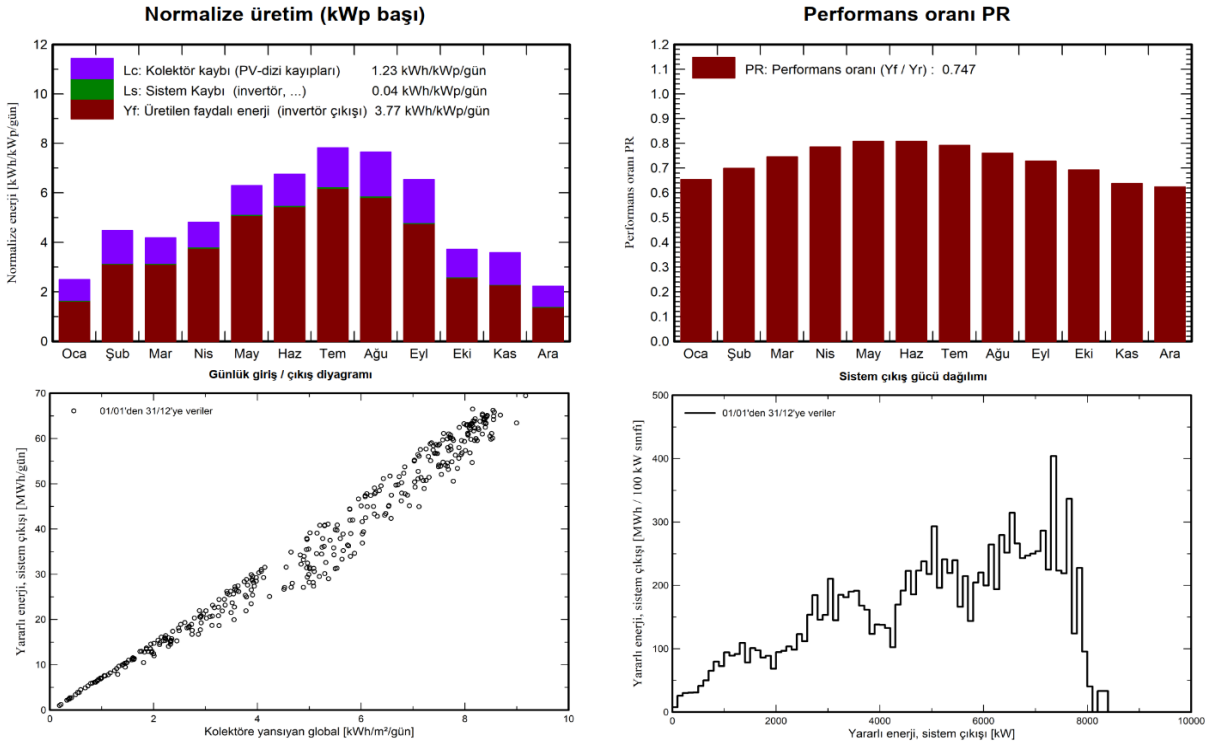
Şekil 5'te 20°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir. Sistemimizde ölçülen performans oranı değerlerinin yüksekliği, özellikle çift yüzeyli FV modüller aracılığıyla elde edilen arka yüzey kazançlarının etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 5. 20°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

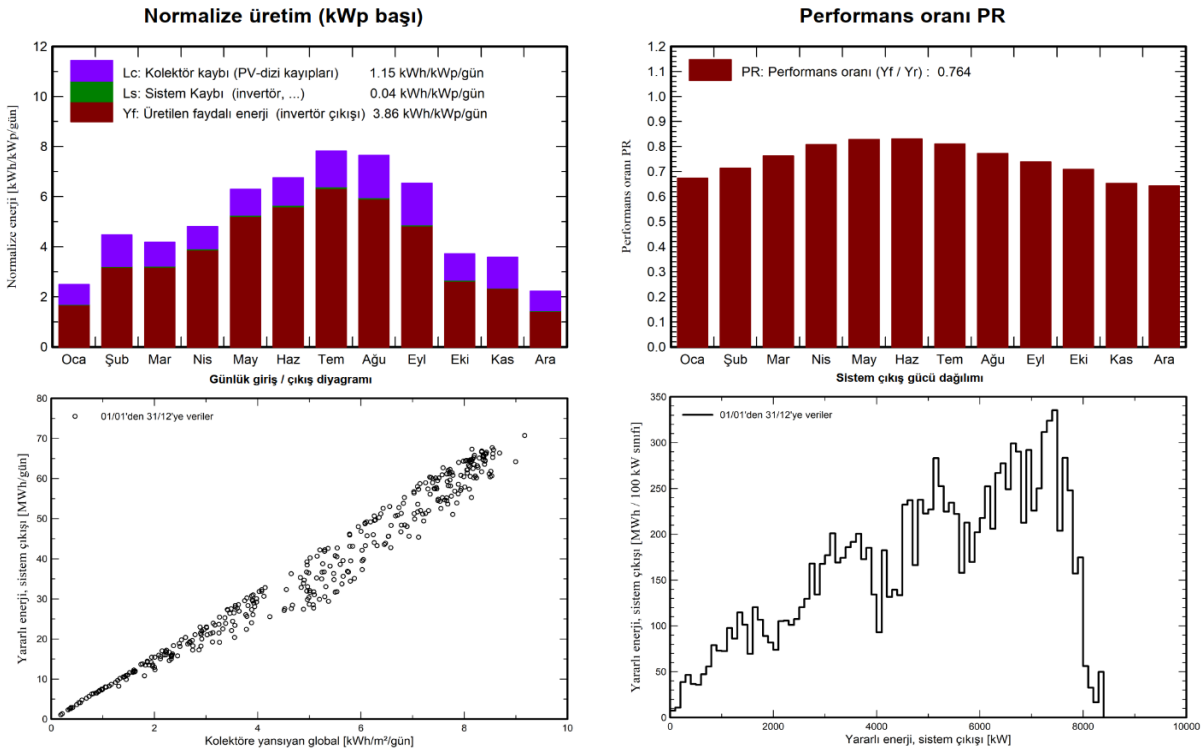
Başlangıç aşamasında, santral sahasında yapılan ölçümler sonucunda global yatay ışınım değeri 1649 kWh/m² olarak belirlenmiştir. Ancak, güneş ışığının atmosferden geçişi ve yüzeyle etkileşimi sırasında çeşitli faktörlere bağlı olarak kayıplar meydana gelmiştir. Bu ışınımın değerlerinin % 10,6'sı doğrudan FV modüllerin kolektör yüzeyine yansımış ve modüller tarafından enerji üretimi için kullanılabilir hale gelmiştir. Ancak, santral sahasında bulunan çevresel unsurlar ve sistem bileşenlerinden kaynaklanan kayıplar nedeniyle, FV modüllerin aldığı toplam ışınım miktarlarında azalmalar görülmüştür.

Şekil 6'da 25°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 6. 25°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

Şekil 7'de 25°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir. Sistemimizde ölçülen performans oranı değerlerinin yüksekliği, özellikle çift yüzeyli FV modüller aracılığıyla elde edilen arka yüzey kazançlarının etkisiyle oluşmaktadır.

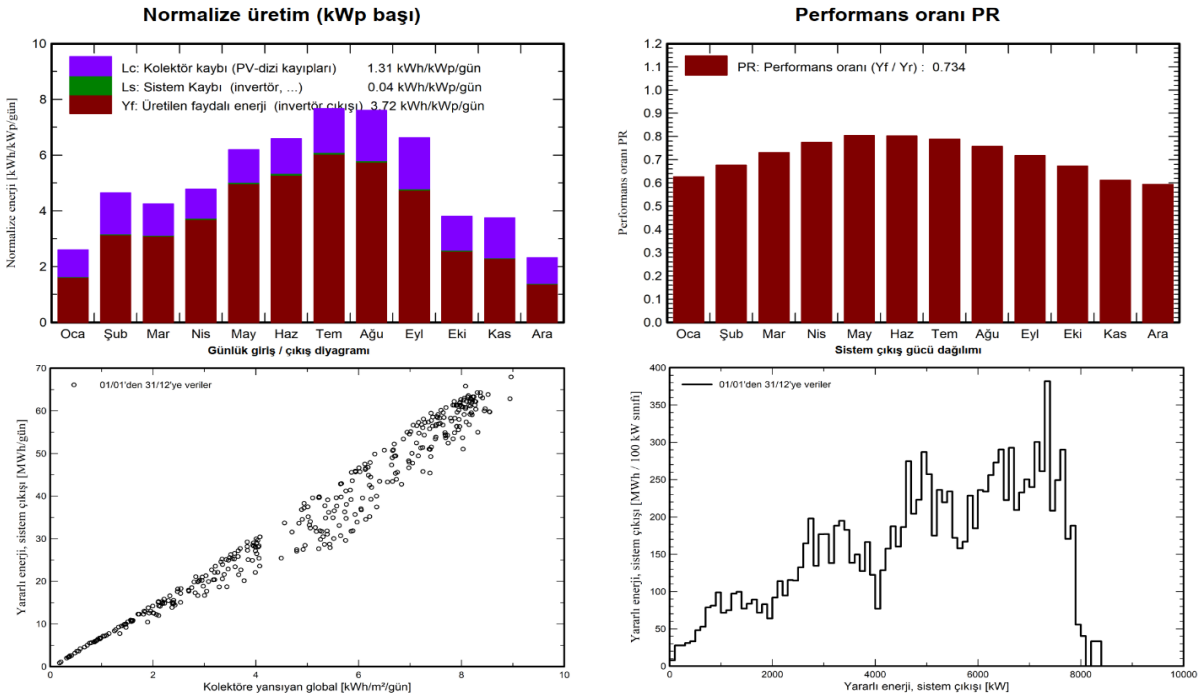


Şekil 7. 25°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

Kayıplar arasında en belirgin faktörlerden biri, santral çevresinde yer alan nesnelerden kaynaklanan yakın gölgelenme etkisidir (Endiz ve Coşgun, 2023). Yapılan hesaplamalara göre, yakın gölgelenmeler toplam ışınımın % 12,7'sine karşılık gelen bir kayba neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, IAM (Incidence Angle Modifier – ışınım geliş açısının değişme faktörü) etkisi nedeniyle, gelen ışınımın miktarının % 2,98'lik bir kısmı kaybedilmektedir. Bu kayıpların bir sonucu olarak, başlangıçta ölçülen 1649 kWh/m²'lik global yatay ışınım değeri, FV modüllere ulaşan etkin ışınım açısından değerlendirildiğinde 1545 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.

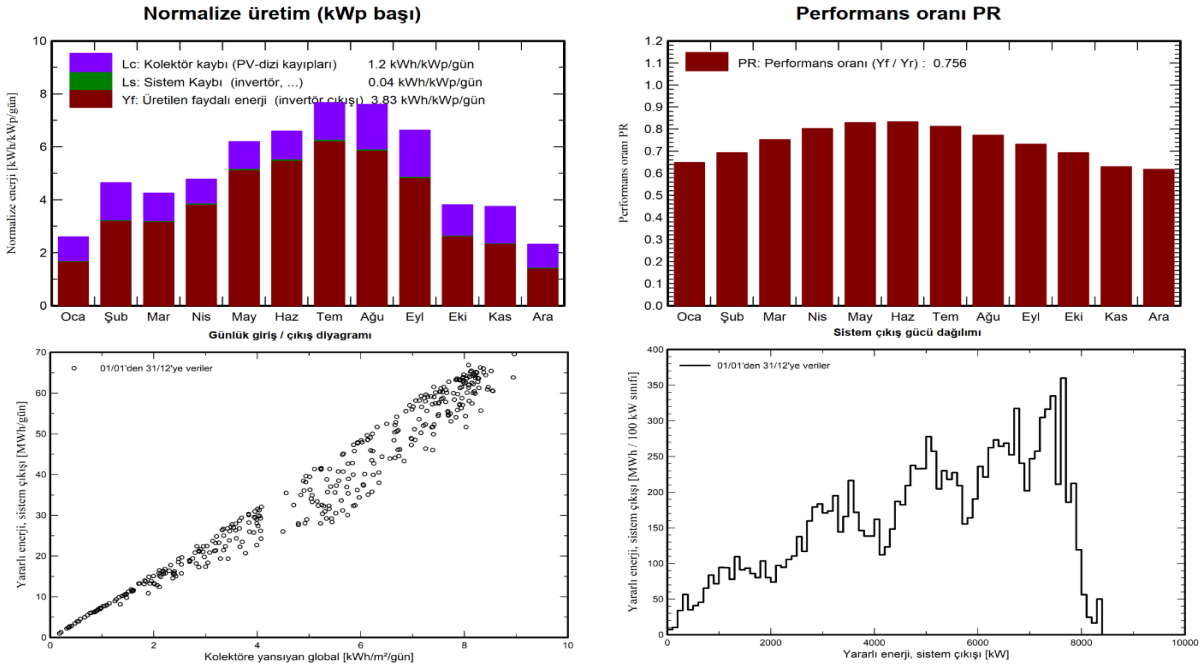
Bu etkin ışınım, FV modüller tarafından elektrik enerjisine dönüştürülerek başlangıç aşamasında 14.894,093 kWh nominal dize enerjisi elde edilmiştir. Ancak, elektrik üretim sürecinde farklı fiziksel ve teknik faktörler nedeniyle çeşitli kayıplar meydana gelmiştir. Bunlar arasında en dikkat çekici olanlardan birisi, FV modüllerin sıcaklık değişimlerinden etkilenmesi sonucunda ortaya çıkan performans kaybıdır. Modüllerin çalışma sıcaklığına bağlı olarak % 6,04 oranında bir performans kaybı gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, FV hücreler arasındaki üretim farklılıkları ve elektriksel karakteristiklerin tam olarak örtüşmemesinden kaynaklanan uyumsuzluk kayıpları % 2,05 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, elektrik enerjisinin taşınması esnasında kablolama sisteminde meydana gelen direnç kayıpları % 0,96 oranında bir azalmaya neden olmuştur.

Şekil 8'de 30°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir.



Şekil 8. 30°'lik eğim açısındaki tek yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

Şekil 9'da 30°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait performans oranı verileri, yıllık bazda elde edilen normalize edilmiş enerji üretim değerleri ile sistem kayıp bileşenleri, sistemdeki günlük giriş/çıkış enerjisinin aylara göre şebekeye aktarılan enerji değişim değerleri ile kolektör düzlemlerine gelen radyasyonun yıl içerisindeki dağılım grafiği gösterilmiştir. Sistemimizde ölçülen performans oranı değerlerinin yüksekliği, özellikle çift yüzeyli FV modüller aracılığıyla elde edilen arka yüzey kazançlarının etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 9. 30°'lik eğim açısındaki çift yüzeyli fotovoltaik modüle ait sistem grafikleri

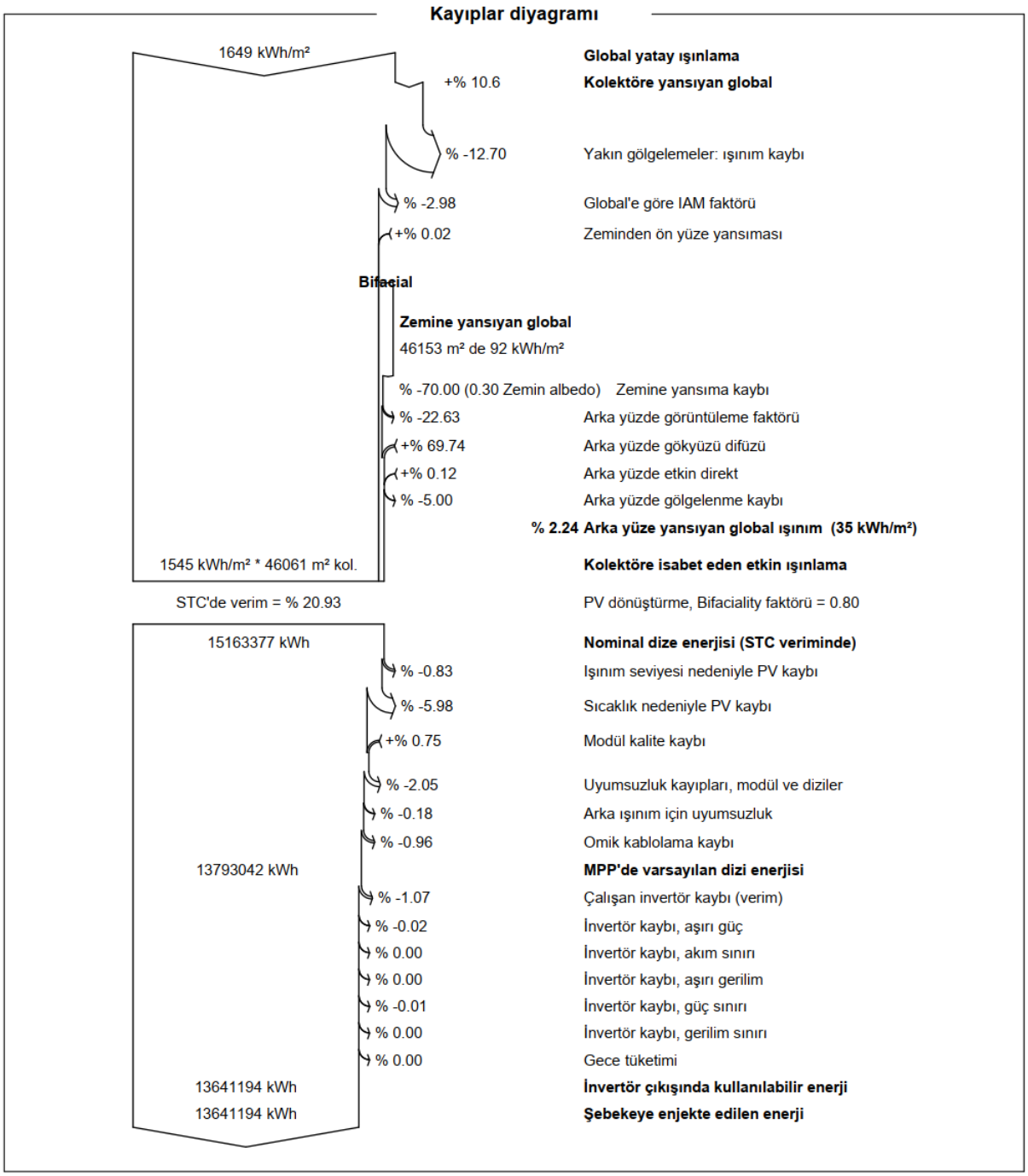
Tüm bu kayıpların etkisiyle birlikte, başlangıçta hesaplanan 14.894,093 kWh'lik nominal panel enerjisi, 13.562,051 kWh seviyesine azalmıştır. Ayrıca, invertör sistemlerinde meydana gelen verimlilik kayıpları ve santralin gece tüketimi gibi küçük ölçekli enerji kayıpları da değerlendirilmiş ve invertör çıkışlarında toplam 13.411,088 kWh gücünde enerji üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu enerji, herhangi bir ek kayıp olmadan tamamen şebekeye iletilerek santralin toplam üretim kapasitesine katkı sağlanmıştır. Geleneksel tek yüzeyli FV modüller yalnızca ön yüzeyleri aracılığıyla güneş ışığını absorbe ederek elektrik üretirken, çift yüzeyli FV modüller hem ön hem de arka yüzeylerinden ışınım alarak daha yüksek verimlilik sağlayabilmektedir. Bu nedenle, aynı eğim açısı değerinde tek yüzeyli FV modül yerine çift yüzeyli FV modül kullanıldığında, toplam enerji üretim miktarının daha yüksek olması beklenmektedir.

Çift yüzeyli FV modüllerin sağladığı en büyük enerji üretim avantajlarından birisi de zeminden yansıyan ışınım miktarının değerlendirilebilme kapasitesidir. Gelen ışınımın miktarının bir kısmı doğrudan FV modül yüzeyine düşerken, kalan kısmı zemin tarafından yansıtılarak modülün arka yüzeyi tarafından absorbe edilmektedir. Bu yansıma oranı, zeminin reflektans özelliğine (albedo faktörüne) bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Chine ve ark., 2016). Açık renkli ve yüksek yansıtıcılığa sahip yüzeyler (örneğin beyaz çakıl taşları veya kar örtüsü), çift yüzeyli modüllerin arka yüzeyine daha fazla ışınım yönlendirebilir ve böylece enerji üretimine katkı sağlayabilirler.

Şekil 10'da enerji santrallerinde çift yüzeyli FV modüllerin kullanılması durumundaki zemine yansıyan global ışınım miktarındaki üretim verisinin kayıp diyagramı gösterilmiştir. Bu veriler, yansıyan ışınımın enerji üretimi üzerindeki katkısını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Çift yüzeyli FV modüller, bu ek ışınımı kullanarak enerji üretim kapasitelerini artırmakta ve belirli bir alan için daha yüksek verimlilik elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, çift yüzeyli FV modüllerin sağladığı ek kazanç, kurulum sahasının yüzey özellikleri, modül yüksekliği, panel aralıkları ve sistem bileşenlerinin optimizasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, yapılan simülasyon çalışmaları, çift yüzeyli FV modül kullanımının gerçek saha koşullarında sağladığı avantajları anlamak ve en uygun kurulum parametrelerini belirlemek açısından kritik bir rol oynamaktadır (Makki ve ark., 2015). Sistemdeki etkin ışınım seviyesi 1545 kWh/m² olarak belirlenmiş ve çift yüzeyli faktör 0,80 olarak hesaplanmıştır. FV dönüşüm süreci sonucunda elde edilen nominal dizi enerjisi 15.163,377 kWh olarak tespit edilmiştir.

Işınım seviyesi (% 0,83) ve sıcaklık değişimi (% 5,98) gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan kayıplar ile, modül kalitesi (% 0,75) ve uyumsuzluk kayıpları (% 2,05) gibi unsurların etkisiyle yıllık üretilen enerji miktarı 13.793,042 kWh seviyesine düşmüştür. Buna ek olarak, arka yüzey uyumsuzluğu (% 0,18) ve omik kayıplar (% 0,96) gibi faktörler de dikkate alınmıştır. MPPT sürecinde meydana gelen invertör kaybı (% 1,07) ve gece tüketimi (% 0,01) gibi ek kayıplarda göz önünde bulundurulduğunda, invertör çıkışında elde edilen kullanılabilir enerji miktarı 13.641,194 kWh olarak hesaplanmıştır ve bu enerji miktarının tamamı şebekeye iletilmiştir. 20° eğim açısında kurulu tek yüzeyli ve çift yüzeyli FV modüllerin üretim verileri simülasyon yoluyla incelenmiştir. Çevresel etkenler (ortam sıcaklığı, DC/AC

dönüşümündeki enerji kayıpları vb.) göz önüne alınarak yapılan değerlendirmede, çift yüzeyli FV modülün 20° eğim açısında tek yüzeyli FV modüle kıyasla yıllık 230,076 kWh daha fazla enerji ürettiği belirlenmiştir. Tablo 3'te, 20°, 25° ve 30° eğim açıları için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ve üretilen enerji miktarlarındaki farklılıklar gösterilmiştir.



Şekil 10. 585W çift yüzeyli FV modülün 20°'lik eğim açısı altındaki üretim verisinin kayıp diyagramı

Tablo 3. PVSyst simülasyon programı ile alınan üretim verileri

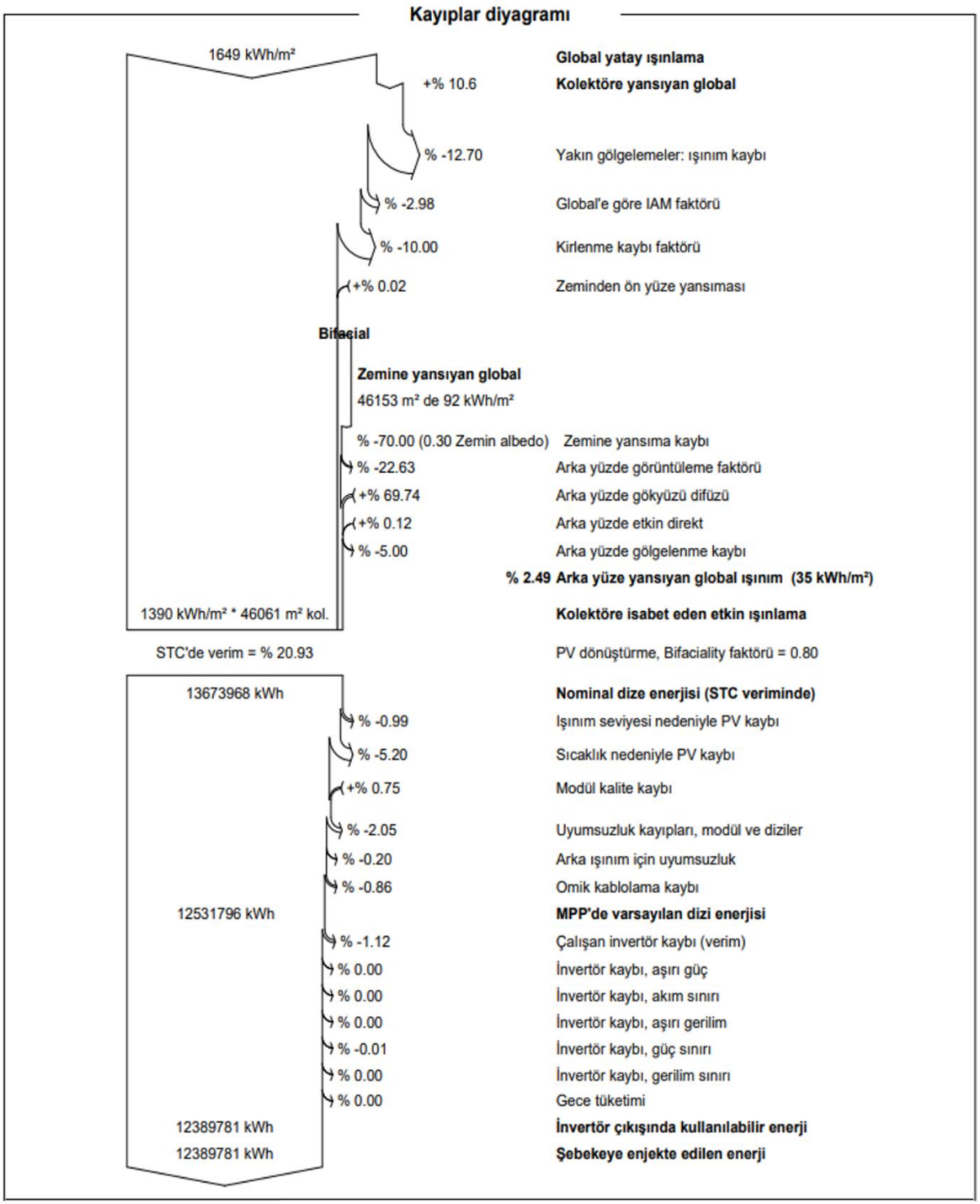
Eğim Açısı	Çift Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Tek Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Farkı (kWh/Yıl)
20°	13.641,194	13.411,880	230,076
25°	13.569,483	13.266,840	302,643
30°	13.471,269	13.086,034	385,235

Simülasyon sonuçları, çift yüzeyli ile tek yüzeyli fotovoltaik (FV) modüllerin enerji üretim verimliliğinin, panel eğim açısına bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tek yüzeyli paneller, yalnızca ön yüzeylerinden gelen güneş ışınımını alabilmekte iken, çift yüzeyli paneller her iki yüzeyleri aracılığıyla ışınımı emebilme kapasitesi sayesinde, özellikle düşük ışınım koşullarında arka yüzeyden yansıyan ışığın katkısıyla toplam enerji üretiminde anlamlı artış sağlamaktadır. Bu bağlamda, her iki panel türü için optimum eğim açısının farklılık göstermesi, enerji verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Yapılan çalışma ile, tek yüzeyli panellerin genellikle 30-35° arası daha dik açılarla maksimum verimlilik sağlanırken, çift yüzeyli panellerin daha geniş bir açı aralığında üstün performans göstererek 20-25° eğim açılarında daha avantajlı sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca, çift yüzeyli panellerin verimliliğinin çevresel faktörlere bağlı olarak geniş bir ışınım spektrumunda iyileşme göstermesi, zemin özellikleri ve temizlik işlemleri gibi etmenlerin de üretim performansında önemli rol oynadığını göstermektedir (Pamuk, 2023).

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, en yüksek enerji üretim veriminin 20° eğim açısında ve 585 W gücündeki çift yüzeyli FV modülü ile elde edildiği tespit edilmiştir. Tablo 3'te sunulan simülasyon verileri, 20° açıda gerçekleştirilen üretimin diğer açılara göre daha verimli olduğunu göstermektedir. Şekil 11'de, yıllık %10 kirlilik oranı altında 20° eğim ve 585 W gücündeki çift yüzeyli modül ile elde edilen üretim verisinin kayıp diyagramı gösterilmiştir. Ayrıca, yıllık %20 ve %30 kirlilik oranlarının FV modüllerinin enerji üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tablo 4'te kirlilik oranlarına bağlı üretim kayıpları verilmiştir.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, kirlilik oranındaki artışlar nedeniyle FV modüllerin enerji üretiminde belirgin düşüşlere yol açmaktadır. Özellikle, % 10 ile % 30 kirlilik oranlarındaki elde edilen enerji üretim değerleri arasında önemli bir farklılaşma görülmektedir. FV modüllerin kurulumu aşamasında optimum eğim açısının belirlenmesinin yanı sıra, yüzey temizliğinin düzenli olarak sağlanması da enerji üretimi açısından büyük önem arz etmektedir. Artan kirlilik, modül yüzeyine ulaşan güneş ışınımını azaltarak üretim kayıplarına neden olmakta; bu nedenle, güneş enerji santrallerinde verimli bir üretim sürdürülebilirliği için periyodik modül temizliği ve düzenli bakım uygulamalarının titizlikle uygulanması gerekmektedir.



Şekil 11. 585W FV çift yüzeyli modülün 20° eğim açısında yıllık %10 kirlilik oranındaki üretim verisinin kayıp diyagramı

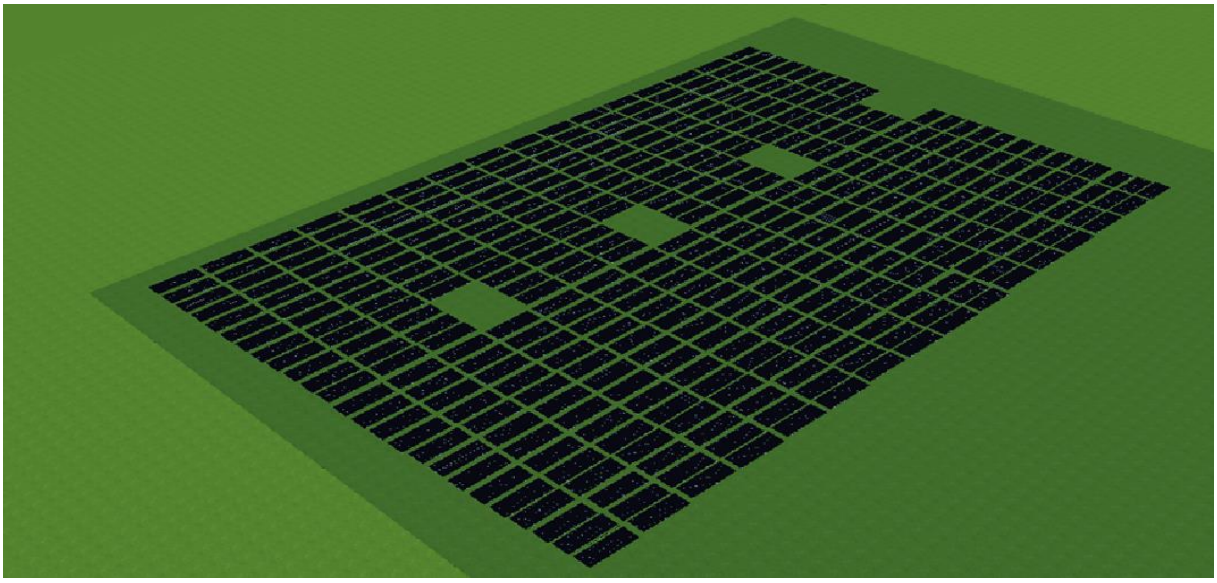
Tablo 4. Yıllık kirlilik oranında yapılan üretim ve üretim kayıpları

Yıllık Kirlilik Oranı	Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretilmesi Beklenen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Kaybı (kWh/Yıl)
%10	12.389,781	13.641,194	1.251,413
%20	11.106,393	13.641,194	2.534,801
%30	9.794,812	13.641,194	3.846,382

Artan kirlilik seviyesi modüllerin arka yüzeyine ulaşan ışınım miktarını belirgin şekilde azaltarak, bu yüzeyden elde edilen enerji katkısının düşmesine ve dolayısıyla toplam enerji üretiminin azalmasına neden olmaktadır. Simülasyon sonuçları, yıllık % 10 kirlilik oranı altında santralin 12.389,781 kWh/Yıl enerji üretebildiğini, ancak kirlilik oranının % 30'a çıkması durumunda bu değerin 9.794,812 kWh/Yıl'a kadar düştüğünü ortaya koymaktadır. Bu veriler, yüksek kirlilik oranına sahip bölgelerde FV modül yüzeylerinin düzenli temizliğinin, santralin uzun vadeli enerji üretimini artırmak ve sistem verimliliğini korumak açısından kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, santralin kurulum ve işletme süreçlerinde FV modül temizliğine yönelik etkin bir bakım programının uygulanması gerekmektedir.

3. PV*SOL Tabanlı Enerji Üretim Analizi

PV*SOL simülasyon programı, özellikle çatı uygulamaları için tercih edilen ve gölgelendirme ile ekonomik analiz gibi kritik özellikler sunan etkili bir güneş enerjisi simülasyon aracıdır (Islam ve ark., 2025). Santral tasarımı sürecinde, PVSyst programında kullanılan FV modül ve inverterlerden oluşan sistem, PV*SOL ortamında da incelenmiş olup, elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 12'de PV*SOL programında gerçekleştirilen gölgelendirme analizine dayalı santralin üç boyutlu modellemesi gösterilmiştir.



Şekil 12. PV*SOL ortamında santralin üç boyutlu tasarımı

Bölüm 2'de belirtilen yöntem doğrultusunda hem çift yüzeyli hem de tek yüzeyli FV modüller kullanılarak farklı eğim açılarında (20°, 25° ve 30°) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar kapsamında, modüllerin performansı detaylı biçimde analiz edilmiş ve santralin maksimum verimlilikle çalışabilmesi için en uygun yerleşim düzeni ile eğim açılarının belirlenmesi sağlanmıştır. Tablo 5'de PV*SOL programından elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Sistemin, farklı eğim açılarında

ortaya çıkan gölgelendirme etkileri ve bu etkiler sonucunda meydana gelen üretim kayıpları gösterilmiştir.

Tablo 5. 585W çift yüzeyli ve tek yüzeyli FV modülün 20° eğim açısındaki üretim verileri (şebekeye bağlı FV sistem)

Teknik Özellikler	FV sistemi 585W Çift Yüzeyli	FV sistemi 585W Tek Yüzeyli
İklim verileri	Ankara, TUR (2001-2020)	Ankara, TUR (2001-2020)
Değerlerin kaynağı	Meteonorm 8.2	Meteonorm 8.2
FV jeneratör çıkışı	9639,63 kWp	9639,63 kWp
Sayı FV modülleri	16478-585W Çift Yüzeyli	16478-585W Tek Yüzeyli
Yıllık Özgül Kazanç	1.416,74 kWh/kWp	1.416,74 kWh/kWp
Izgara Dışa Aktarma	13.657,711 kWh/Yıl	13.335,193 kWh/Yıl
İlk yıl içindeki şebeke beslemesi	13.657,711 kWh/Yıl	13.335,193 kWh/Yıl
Önlenen CO_2 emisyonu	6.418,697 kg/yıl	6.267,114 kg/Yıl

Simülasyon sonuçlarına göre, çift yüzeyli modüllerin şebekeye sağladığı yıllık enerji üretimi 13.657,711 kWh/Yıl, tek yüzeyli modüller için ise 13.335,193 kWh/Yıl olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, PVSyst programı çıktıları ile genel olarak uyumlu olmakla birlikte, iki program arasındaki yazılım farklılıklarından kaynaklanan belirli üretim sapmalarının olduğunu göstermiştir. Her iki simülasyon programı kapsamında elde edilen bulgular, 20° eğim açısında çift yüzeyli FV modülün üretim verisinin diğer açılara kıyasla daha üstün olduğunu göstermektedir. Tablo 6'da üç farklı eğim açısı altında gerçekleştirilen enerji üretim değerleri ve her iki tip FV modül arasındaki üretim farkları gösterilmiştir.

Tablo 6. PV*SOL simülasyon programı ile alınan üretim verileri

Eğim Açısı	Çift Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Tek Yüzeyli Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Farkı (kWh/Yıl)
20°	13.657,711	13.335,193	322,518
25°	13.527,144	13.260,878	266,266
30°	13.326,858	13.115,103	211,775

Tablo 7'de 585W FV çift yüzeyli modülün 20° eğim açısında yıllık % 10 kirlilik oranındaki üretim değerleri gösterilmiştir. Tablo 8'de FV modüllerindeki kirlilik oranının yıllık enerji üretimine etkisi, yıllık %10, %20 ve %30 kirlilik oranlarında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda incelenmiş ve her bir durumda meydana gelen üretim kayıpları sunulmuştur. Kirlilik oranındaki artış, FV modüllerinin yüzeyine ulaşan güneş ışığının azalmasına yol açarak, üretim miktarında belirgin kayıplara sebep olmuştur. Özellikle, % 30 kirlilik oranı altında enerji üretiminin belirgin ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Tablo 7. 585W FV çift yüzeyli modülün 20° eğim açısında yıllık % 10 kirlilik oranındaki üretim verileri

Teknik Özellikler	Üretim Tahmini
FV jeneratör çıkışı	9.639,63 kWp
Yıllık FV Modül Kirlenme Oranı	% 10
Izgara Dışa Aktarma	12.313,190 kWh/Yıl
İlk yıl içindeki şebeke beslemesi (Modülün performans düşüsü dahil)	12.313,190 kWh/Yıl
Önlenen CO_2 emisyonu	5.910,572 kg/Yıl

Tablo 8. Yıllık kirlilik oranında yapılan üretim ve üretim kayıpları

Yıllık Kirlilik Oranı	Üretilen Enerji (kWh/Yıl)	Üretilmesi Beklenen Enerji (kWh/Yıl)	Üretim Kaybı (kWh/Yıl)
%10	12.313,190	13.335,193	1.022,003
%20	10.231,683	13.335,193	3.103,510
%30	9.531,145	13.335,193	3.804,048

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, 9.639,630 kWp kurulu gücünde bir güneş enerjisi santrali tasarlanarak, tek yüzeyli ve çift yüzeyli fotovoltaik (FV) modüllerin performansları karşılaştırılmıştır. Santral tasarımında JA Solar markasının JAM78_585W modeline ait hem tek yüzeyli hem de çift yüzeyli modülleri tercih edilmiştir. Analizlerde PVSyst ve PV*SOL simülasyon programları kullanılmış, farklı eğim açılarına (20°, 25°, 30°) ve kirlenme oranlarına ait (% 10, % 20, % 30) senaryolar incelenmiştir. Analizler sonucunda PVSyst ve PV*SOL programları arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, her iki simülasyon programında da 20° eğime sahip çift yüzeyli modüllerin en yüksek enerji üretimini sağladığını ortaya koymuştur. 30° eğimde ise üretim kaybı belirginleşmiştir. Bu sonuçlar, eğim açısının optimize edilmesinin ve modül tipinin doğru seçilmesinin enerji üretim verimliliği açısından kritik rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, güneş ışınlarının panel yüzeyine düşme açısını doğrudan etkileyen eğim faktörü, sistem tasarımında göz ardı edilmemesi gereken önemli bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Kirlenme analizlerinde, panel yüzeyinde biriken toz ve partiküllerin özellikle optik performans üzerinde olumsuz etkiler yarattığı belirlenmiştir. Ön yüzeydeki kirlenme, gelen güneş ışığını engelleyerek modülün verimini düşürmekte; bu da çift yüzeyli panellerde arka yüzeyden sağlanan katkının da azalmasına yol açmaktadır. Kirlenme oranı arttıkça bu kayıplar daha belirgin hale gelmekte, sistem genelinde performans düşüşlerine neden olmaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, fotovoltaik sistemlerin sadece teknik tasarım aşamasında değil, aynı zamanda işletme sürecinde de düzenli bakım ve temizlik uygulamalarıyla desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Kurulum öncesinde gerçekleştirilecek lokasyon bazlı simülasyon analizleri, sistemin iklimsel ve çevresel koşullara en uygun şekilde yapılandırılmasına olanak sağlayarak, uzun vadeli enerji verimliliği ve operasyonel sürdürülebilirliğin temin edilmesinde önemli bir katkı sağlayacaktır.

Kaynakça

Ahmed A., Elsakka M., Elhenawy Y., Amer A., Mansi A., Bassyouni M., Gadalla M., Refaat A. Experimental investigation of a nano coating efficiency for dust mitigation on photovoltaic panels in harsh climatic conditions. Scientific Reports 2024; 14(1): 23013.

Ait Omar O., EL Fadil H., El Fezazi NE., Oumimoun Z., Ait Errouhi A., Choukai O. Real yields and PVSYST simulations: comparative analysis based on four photovoltaic installations at Ibn Tofail University. Energy Harvesting and Systems 2024; 11(1): 20230064.

Alzahrani M., Rahman T., Rawa M., Weddell A. Impact of dust and tilt angle on the photovoltaic performance in a desert environment. Solar Energy 2025; 288: 113239.

Baqir M., Channi HK. Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. Materials Today: Proceedings 2022; 48: 1332-1338.

Chine W., Mellit A., Lughi V., Malek A., Sulligoi G., Pavan AM. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks. Renewable Energy 2016; 90: 501-512.

Çağlar A. Farklı derece-gün bölgelerindeki şehirler için optimum eğim açısının belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2018; 22(2): 849-854.

Çoban HH. Experimental study of bifacial solar photovoltaic systems in snowy envıronments. 2nd International Congress on Innovation Technologies & Engineering, October 2023; 189-201.

Dirlik EE., Gezegin C., Mohammadi SA. Comparison of pvsyst, pvsol and homer simulation software results with real production data of solar power plants in different provinces of Turkey. Journal of Engineering Research and Applied Science 2023; 12(2): 2357-2364.

Endiz MS., Coşgun AE. Assessing the potential of solar power generation in Turkey: A PESTLE analysis and comparative study of promising regions using PVsyst software. Solar Energy 2023; 266: 112153.

Faiz FU., Shakoor R., Raheem A., Umer F., Rasheed N., Farhan M. Modeling and analysis of 3 MW solar photovoltaic plant using PVSyst at Islamia University of Bahawalpur, Pakistan. International journal of Photoenergy 2021; 2021(1): 6673448.

Garrod A., Ghosh A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. Frontiers in Energy 2023; 17(6): 704-726.

Ghafiri S., Darnon M., Davigny A., Trovão JPF., Abbes D. A comprehensive performance evaluation of bifacial photovoltaic modules: insights from a year-long experimental study conducted in the Canadian climate. EPJ Photovoltaics 2024; 15(28): 1-14.

Hernández-Callejo L., Gallardo-Saavedra S., Alonso-Gómez V. A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. Solar Energy 2019; 188: 426-440.

Irwan YM., Amelia AR., Irwanto M., Leow WZ., Gomesh N., Safwati I. Stand-alone photovoltaic (SAPV) system assessment using PVSYST software. Energy Procedia 2015; 79: 596-603.

Islam MA., Ali MN., Benitez IB., Habib SS., Jamal T., Flah A., Blazek V., El-Bayeh CZ. A comprehensive evaluation of photovoltaic simulation software: A decision-making approach using Analytic Hierarchy Process and performance analysis. Energy Strategy Reviews 2025; 58: 101663.

Juaidi A., Kobari M., Mallak A., Titi A., Abdallah R., Nassar M., Albatayneh A. A comparative simulation between monofacial and bifacial PV modules under palestine conditions. Solar Compass 2023; 8: 100059.

Kara R., Ekici M., Yıldırım G. Fotovoltaik hücrelerin panel açılarına göre enerji verimliliği. International Journal of Engineering Research and Development 2024; 16(2): 573-584.

Karakaya E., Sriwannawit P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 49: 60-66.

Kasim NK., Hussain HH., Abed AN. Performance analysis of grid-connected CIGS PV solar system and comparison with PVsyst simulation program. International Journal of Smart Grid 2019; 3(4): 172-179.

Kayri İ. Investigation of near shading losses in photovoltaic systems with PVsyst software. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering 2024; 12(1): 10-19.

Lupangu C., Bansal RC. A review of technical issues on the development of solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017; 73: 950-965.

Makki A., Omer S., Sabir H. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 41: 658-684.

Mermoud A., Wittmer B. PVSYST user's manual. Switzerland, 2014.

Muñoz Y., Vargas O., Pinilla G., Vásquez J. Sizing and study of the energy production of a grid-tied photovoltaic system using PVsyst software. Tecciencia 2017; 12(22): 27-32.

Obi M., Bass R. Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016; 58: 1082-1094.

Pamuk N. Performance analysis of different optimization algorithms for MPPT control techniques under complex partial shading conditions in PV systems. Energies 2023;16(8): 3358.

Pearsall NM. Introduction to photovoltaic system performance. InThe performance of photovoltaic (PV) systems, Woodhead Publishing 2017; 1-19.

Rajesh R., Mabel MC. A comprehensive review of photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015; 51: 231-248.

Sancar MR., Bayram AB. Modeling and economic analysis of greenhouse top solar power plant with Pvsyst Software. International Journal of Engineering and Innovative Research 2023; 5(1): 48-59.

Türkdoğru E., Kutay M. Analysis of albedo effect in a 30-kW bifacial PV system with different ground surfaces using PVSYST software. Journal of Energy Systems 2022; 6(4): 543-559.

Usah EO., Ozuomba S., Oduobuk EJ., Ekott EE. Pvsyst software-based comparative techno-economic analysis of PV power plant for two ınstallation sites with different climatic conditions. International Multilingual Journal of Science and Technology 2020; 5(7): 2819-2829.

Venkateswari R., Sreejith S. Factors influencing the efficiency of photovoltaic system. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019; 101: 376-394.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 167-182, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 167-182, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

PLC Kontrollü ve Operatör Panelli Split Klima Arıza Eğitim Simülatörü ve Kullanımı

Ganime Tuğba ÖNDER[1*]

[1]Çukurova Üniversitesi, Adana Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojileri Programı, 010160, Adana

[1]https://orcid.org/0000-0002-7504-7394
*Sorumlu yazar: gercoskun@cu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 14.05.2025
Kabul tarihi:20.07.2025
Online Yayınlanma: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Operatör Paneli
PLC
Split klima
Eğitim simülatörü

ÖZ

İklimlendirme sektöründe arıza tespiti stratejik bir öneme sahiptir. Arızaların giderilmesi ve sistem sorunlarının çözülmesinde, sektörün deneyimli ve yetkin teknik personele ihtiyacı oldukça fazladır. Bu çalışmada, split klimaların kontrol sistemlerinde kullanılan mikro denetleyici tabanlı elektronik kart (PCB) yerine, operatör panelli programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) kullanılan bir split klima eğitim simülatörü geliştirilmiştir. Sistemdeki sıcaklık değişimlerini izlemek için sıcaklık sensörü ve sistem ısıtma modunda iken dış ünite fanını belirlenen basınç aralığında çalıştırabilmek için basınç sensörü kullanılmıştır. Bu algılayıcılar vasıtasıyla, sistem çalışırken basınç ve sıcaklıklar PLC ekranından takip edilerek kayıt altına alınabilmektedir. Ayrıca sisteme ilave edilen datalogger vasıtasıyla tüm sistem sıcaklıkları ve elektrik değerleri gözlemlenebilmektedir. Operatör paneli ya da sistem üzerindeki harici butonlar kullanılarak, sistem çalışır durumda iken ana elemanların enerjileri kesilerek, yapay arızalar oluşturulabilir, böylece sistemin olası bir arıza durumundaki tepkisi gözlemlenebilir. Bu eğitim simülatörünün kullanımı, split klima arıza eğitiminin yanında PLC eğitim ve programlama yöntemlerini de birlikte sunmaktadır. İklimlendirme sektöründe büyük öneme sahip olan, split klima arızalarının çözümünde rehber olması amaçlanmaktadır.

Split Air Conditioner Malfunction Training Simulator with PLC Control and Operator Panel and Its Use

Research Article

Article History:
Received: 14.05.2025
Accepted: 20.07.2025
Published online: 13.01.2026

Keywords:
Operator panel
PLC
Split air conditioner
Training simulator

ABSTRACT

Fault detection has a strategic importance in the air conditioning sector. The sector needs experienced and competent technical personnel in troubleshooting and solving system problems. In this study, a split air conditioning training simulator using a programmable logic controller (PLC) with an operator panel was developed instead of the microcontroller-based electronic card (PCB) used in the control systems of split air conditioners. A temperature sensor was used to monitor temperature changes in the system and a pressure sensor was used to operate the outdoor unit fan in the specified pressure range when the system is in heating mode. With these sensors, pressures and temperatures can be monitored and recorded from the PLC screen while the system is running. In addition, all system temperatures and electrical values can be observed through the datalogger added to the system. Artificial faults can be created by using the operator panel or external buttons on the system by cutting off the energy of the main elements while the system is running, so that the system's response in the event of a possible fault can be observed. The use of this training simulator offers PLC training and programming methods together with split air conditioning fault training. It is

intended to be a guide in solving split air conditioning faults, which are of great importance in the air conditioning sector.

To Cite: Önder GT. PLC Kontrollü ve Operatör Panelli Split Klima Arıza Eğitim Simülatörü ve Kullanımı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 167-182.

1. Giriş

Günlük hayatta, kapalı ortamlardaki havanın şartlandırılmasını sağlamak amacıyla, duvar tipi split (ayrık) klimalar, hem yaz hem de kış mevsimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu cihazlar, tanımlanan sıcaklıkta çalışmak üzere tasarlanmışlardır. Soğutma konumunda çalıştırıldıklarında, ortamın sıcaklığını düşürmenin yanında, ortamdaki nemi yoğuşturarak soğutulan ortam dışına transfer eder ve ortamın nemini düşürürler. Duvar tipi split klimalarda iç ortam havası, fanın farklı devirleriyle ayarlanabilir ve hava yönlendirme kanatçıkları vasıtasıyla sabit ya da farklı yönlerde hareket ettirilebilir. İç ünite serpantinleri, hava girişine monte edilen farklı filtreler vasıtasıyla iklimlendirilen ortama üflenen havanın kalitesini artırır ve iç hava kalitesi yüksek bir ortam sağlanır. Bazı yeni modellerde, dış ortamdan iç ortama taze hava girişi farklı oranlarda sağlanarak, tam iklimlendirme cihazına yaklaşım gerçekleştirilmiştir. Yeni geliştirilen soğutucu akışkanlar, düşük sıcaklıklarda da verimli bir şekilde ısıtma yapabilme özelliğine sahiptir. Yeni nesil soğutucu akışkanlarla çalışan split klimaların kullanımı, gün geçtikçe artmaktadır (Şimşek ve ark., 2012). En çok kullanılan split tip klima sistemi, duvar tipi split klimalardır (Arçelik, 1993). Sistem ana parçaları, iç ortam ve dış ortam arasında ısı transferi yapan bir iç ünite ve dış ortamdan ısı alışverişi yapan bir dış ünitedir. Soğutucu akışkan sirkülâsyonunu, iç ve dış ünite, sinyal alışverişini ve yoğuşan suyun dışarıya atılmasını sağlayan plastik boru, elektrik kabloları, soğutkan besleme ve dönüş boruları beraber sağlar. Mekanik buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimine göre çalışan duvar tipi split klimaların, dış ünitesinde kompresör, kondenser (yoğuşturucu), dört yollu vana ve akışkan kontrol cihazı (kılcal borular), iç ünitesinde ise evaporatör (buharlaştırıcı) bulunur. Split klima sistemi, ısıtma modunda çalışırken dört yollu vana soğutkanı evaporatöre (iç üniteye) yönlendirir. Kızgın buhar halinde yüksek basınç ve sıcaklıkta iç üniteye giren soğutkan, burada yoğuşarak dış ortama ısıyı verir ve ortamın sıcaklığının artmasını sağlar. Soğutkan, iç-dış ünite arasındaki borularda bir miktar basınç düşümüne uğrar. Kılcal borudan geçerken tekrar bir basınç düşümüne uğrar ve dış ünitede buharlaşırken ortamın ısısını çeker, buharlaşır. Dönüşte dört yollu vanadan geçen soğutkan, kompresöre gelir. Kompresör sargılarının ısısını alan soğutkan, burada tamamen buharlaşarak kızgın buhar haline gelir ve kompresör silindirine emilir. Bu şekilde bir çevrim tamamlanmış olur. Dış ünitede buharlaşırken ortamın ısısını üzerine alan soğutkan, iç ünitede yoğuşurken, dış ortamdan aldığı ısıyı ısıtılacak ortama verir. Split klima sistemi, soğutma modunda çalışırken dört yollu vana vasıtasıyla soğutkanı yüksek basınç ve sıcaklıkta kızgın buhar halinde dış ünite serpantinine (kondenser) basar. Kondenserde yoğuşarak dış ortama ısı veren soğutkan, kılcal borudan ve çek valften geçerek basınç düşümüne uğrar. Bir miktar basınç düşümü de iç-dış ünite bağlantı borularında gerçekleşir. İç ünite içerisindeki dağıtıcı vasıtasıyla alt ve üst evaporatöre dağıtılan soğutkan, buharlaşırken ortamın ısısını çeker ve dört yollu vanadan geçerek kompresör tarafından emilir. Sargıların ısısını da alan soğutkan, kızgın buhar fazında olup yeni bir çevrim için hazırdır. İç ünitede

buharlaşırken ortamın ısısını alan soğutkan, dış ünitede yoğuşurken iç ortamdan aldığı ısıyı dış ortama (çevreye) verir. Böylece ortamın soğutulması sağlanır. Montaj yeri ve iklim şartları değiştikçe, klimalar farklı şekilde hizmet vermeye başlarlar. Bu durum, beraberinde performans sorunları ve arızaların da oluşmasına neden olabilir.

Bu çalışmada kullanılan deney seti, Şimşek ve ark. (2016b) tarafından yapılan, split klima eğitim simülatörü temel alınarak geliştirilmiş bir sistemdir. Şimşek ve ark. (2016b) tarafından imalatı yapılan sistemde; var olan ortam sıcaklık, iç ünite gaz giriş sıcaklığı, iç ünite hava üfleme sıcaklığı ve iç ünite serpantin yüzey sıcaklığı tespiti yapılabilmektedir. Bu sisteme, yeni bir datalogger, yeni bir PLC programı ve daha fazla ölçme-kontrol noktası eklenmiştir. Farklı noktalardan sıcaklık ölçme işlemi ve yeni bir program ile verilerin analiz edilebilme imkânı elde edilmiştir. Evaporatör gaz giriş, evaporatör gaz çıkış, kondenser gaz giriş, kondenser gaz çıkış, kondenser hava giriş, kondenser hava çıkış sıcaklıklarının da ölçülmesi sağlanmıştır. Sisteme ampermetre eklenerek kompresörden çekilen akım, voltmetre eklenerek gerilim değerlerinin ölçme ve kontrolü sağlanmıştır. Deney setinde kullanılan split klima, on/off (aç-kapa) kontrollü yapıdadır. Split klimanın elektriksel ekipman kontrolü, sistemin beyni olarak adlandırılan mikro denetleme tabanlı elektronik kartlar ile sağlanmaktadır. Mikro denetleyicide yüklü olan yazılım, tüm sistemin çalışma prensibini belirlemektedir (Şimşek ve ark., 2008; Şimşek ve ark., 2012). Bu çalışmada, split klimalardaki elektronik baskı devre kartı yerine, tüm kontroller PLC' ye önceden yüklenilen senaryoya göre yapılmaktadır. PLC, zamanlayıcı, sayıcı ve hafıza birimlerinin tamamını bir arada gerçekleştirerek otomasyon sistemini sayısal olarak yönetir (Şimşek ve ark., 2016b). Boru, eleman giriş çıkışları ve ortam sensörlerinden algılanan değerler, yazılım üzerinden girilen değerler ile karşılaştırılmakta, bu sonuçlar görsel ekrandan ve sistem değerlerinden takip edilebilmektedir. Sonuçlara göre, klima elektrikli parçalarına sırayla komut gönderilebilir. Bu sayede hem sistem arızları ve sonuçları takip edilebilir, hem de sistemin verimli çalışması için elemanlar kumanda edilebilir.

Türkiye iklimlendirme sektörünün ihracatı günden güne artmaktadır ve sektör oldukça hızlı büyümektedir (Kabasakal, 2025). Bu büyüme ile beraber sektörün arıza teşhisi gerçekleştirebilen ve onarım yapabilecek iyi yetişmiş eleman ihtiyacı da artmaktadır. Bu çalışmada Adana Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı laboratuvarlarında imalatı yapılan "PLC Kontrollü ve Operatör Panelli Split Klima Arıza Eğitim Simülatörü" nün eğitim amaçlı kullanımı ve teknik yapısı açıklanmıştır.

2. Eğitim Simülatörü

Monte edilmiş hali Şekil 1' de yer alan, PLC kontrollü ve operatör panelli split klima arıza eğitim simülatöründe, 18000 BTU' lük duvar tipi bir split klima bulunmaktadır. Simülatörde röle çıkışlarının bağlantısı, PLC' ye yapılmıştır. Sistemdeki soğutucu akışkanın basınç düzeylerini izlemek amacıyla, emme ve basma hatlarının üzerinde, vana çıkışlarının olduğu yerlerde birer adet alçak ve yüksek basınç sensörü kullanılmıştır. Basınç sensörü, 30 bar basınca kadar ölçüm yapabilen, 1/4" dıştan dişli bağlantılı,

2 telli 4-20 mA çıkışlı, 24 VDC beslemeli, akım çıkışı maksimum 25 mA olan, -20/+80°C sıcaklık aralığında ± 0,2% doğrulukla ölçüm yapabilmektedir.

Şekil 1. PLC kontrollü ve operatör panelli split klima arıza eğitim simülatörü

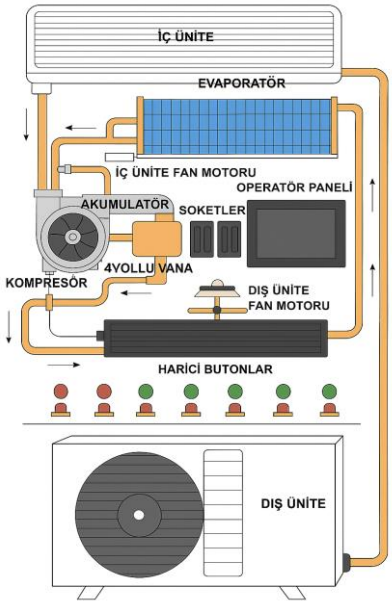
Eğitim simülatörü üzerinde sekiz adet sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık sensörlerinden T1 kondenser gaz giriş, T2 kondenser gaz çıkış, T3 kondenser hava giriş, T4 kondenser hava çıkış, T5 evaporatör gaz giriş, T6 evaporatör gaz çıkış, T7 evaporatör hava giriş, T8 evaporatör hava çıkış sıcaklığını göstermektedir. Sistemin şebeke elektriğine bağlandığı noktada, wattmetre bağlantısı yapılmış ve sistemin çektiği güç bu noktadan takip edilmiştir. Ayrıca, sistemin farklı noktalarından sıcaklıkları okumak, elektrik değerlerini görebilmek ve değişimlerini kaydedebilmek için bir datalogger eklenerek, sistemin sıcaklığı ve çektiği akımın sürekli gözlemlenmesi sağlanmıştır. Sistemdeki basınçları ve değişim değerlerini okuyabilmek için tesisatta yüksek basınç (P1) ve alçak basınç (P2) manometresi bulunmaktadır. Gövde üzerine, operatör paneli, soket, butonlar ve anahtarlar yerleştirilmiştir. Datalogger ise dış ünite üzerinde bulunmaktadır. Sistemde yer alan algılayıcılar ile

- Kompresörün emme-basma basınçları,
- Ortam sıcaklığı,
- Üfleme sıcaklığı,
- Evaporatör giriş ve çıkış sıcaklıkları

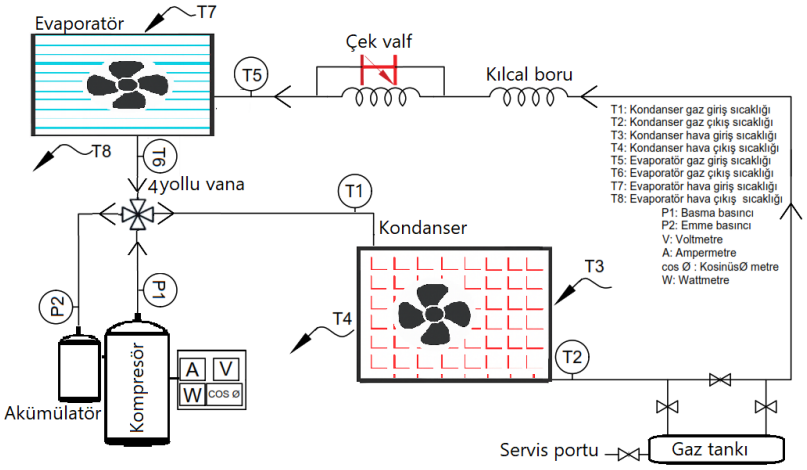
ölçülerek, kayıt altına alınabilmektedir. Bu değerler, PLC ekranından da takip edilebilmektedir. Sistem üzerinde yer alan harici tip butonlar ve ikaz lambalarının kumanda ettiği sistem bileşenleri, Tablo 1'de listelenmiştir. Harici tip butonlar ya da operatör paneli aracılığı ile sistemin herhangi bir arızaya olan tepkisi gözlemlenerek, kullanıcıların teknik arıza tecrübelerinin arttırılması sağlanır. Sistemin şeması, sıcaklık, basınç gösterge ve sensörleri Şekil 2' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Eğitim simülatörünün teknik özellikleri (Şimşek ve ark., 2016b).

Buton No	Buton İşlevi	Buton No	Lamba İşlevi
1	Flap Motor	10	İç Ünite Fan Motoru Devri 3
2	İç Ünite Fan Motoru 1	11	İç Ünite Fan Motoru Devri 2
3	4 Yollu Vana	12	İç Ünite Fan Motoru Devri 1
4	İç Ünite Fan Motoru 2	13	Flap Motor
5	Dış Ünite Fan Motoru	14	4 Yollu Vana
6	Kompresör	15	Dış Ünite Fan Motoru
7	Sıcak	16	Kompresör
8	Soğuk	17	Soğuk
9	Stop	18	Sıcak



Şekil 2. PLC kontrollü ve operatör panelli split klima arıza eğitim simülatörü şematik resmi



Şekil 3. Simülatör bağlantı şeması

PLC' nin üzerine en fazla 8 adet yüksek hızlı modül takılabilmektedir. Bunlardan "ethernet" bir ağa bağlanmak için, "deviceNet" endüstriyel cihazlarla haberleşme imkânı için, "profibus" farklı otomasyon sistemleriyle iletişim kurmak için kullanılan önemli ünitelerdir. Yüksek hız gerektiren uygulamalar için yüksek hızlı analog ve sıcaklık üniteleri yer almaktadır. MPU sensör kartının sağına ve soluna yapılabilecek 16 adet bağlantı, 200 Khz dört eksen bağımsız pulse çıkışı ve iki grup lineer/arc

interpolasyon dahili özellikleri ile özellikle eğitim amaçlı kullanımlarda önemli avantajlar sunmaktadır. Ethernet, deviceNet ve profibus donanım yapısı, bu eğitim setine geniş hizmet olanakları sağlamakta ve özelliklerinin genişletilebilir olmasına imkân tanımaktadır. Şekil 3 üzerinde, eğitim simülatörü bağlantı şeması yer almakta, burada algılayıcıların hizmet noktaları görülebilmektedir. Devreye eklenen gaz toplama tankı sayesinde, sistemde fazla gaz şarjı ve gaz eksikliğine bağlı servis işlemleri eğitimi verilebilmektedir. Eğitim simülatörü operatör paneli, toz, nem, ısı gibi dış ortam şartlarından etkilenmemesi için kapalı alanda kullanılmalıdır. Devreye elektrik verildikten sonra "Power LED" ışığının yanması gözlemlenmelidir. Bu, sistemin haberleşme noktalarının çalıştığını gösterir. "USB Host" fonksiyonu ve "USB Flash memory" foksiyonları, operatör panelinin bir bilgisayar gibi kullanılabilmesini ve diğer cihazlar ile iletişim kurmasını, verilerin USB bellek (flash disk) ile aktarılabilmesini sağlar. Bir otomasyon kontrol cihazı olan PLC ile sistemin elektrik devresinin kontrolü yapılmaktadır. Burada giriş komutu olan değerler veya manuel butonlar (16 adet) kullanılarak giriş bilgisi alınması, alınan bilgiye göre de fan motoru gibi elektriksel bir elamanın devreye girmesi veya devreden çıkarılması sağlanabilir. PLC çıkışları doğrudan bir cihazı çalıştıramadığı için, çıkışa uygun röle grupları kullanılarak elektrikli sistem elemanlarına enerji verilmesi sağlanmıştır. Sistemin ayarlanan set değerine göre açılması, kapatılması veya sıcak - soğuk çalışma modlarının seçilmesi gibi temel komutlar, simülatör üzerinde bulunan butonlar ya da operatör paneli ile gerçekleştirilebilir. Tablo 2, kullanılan PLC' ye ait teknik özellikleri göstermektedir. PLC sistemi, otomatik ve güvenli kumanda işlemi yapabilmenin yanı sıra, arızalara simülatör üzerinden müdahale edebilmeyi, yapılan müdahalelerin etkilerini görebilmeyi sağlamaktadır. Yapılan her bir işlemin karşılığında oluşan tepkiler anlık olarak takip edilebilmektedir. Bu çalışmada, sistemin her bir elemanı için meydana gelen tepkiler gözlemlenebilmiştir.

Tablo 2. PLC teknik özellikleri (Delta, 2025).

1-32 istasyon PLC link haberleşme ve 4 adet çift faz encoder bağlanabilme
2- Gerçek zaman saati ve 2 eksen interpolasyon ile dairesel hareketler
3- CPU üzerinde 8 bit 2 adet analog potansiyometre
4- RS-232, RS-485 haberleşme portları
5- Dahili gerçek zaman saati ve RTC işleme komutları
6- NPN-PNP giriş ve mikro modüler tasarım
7- Röle ve transistör çıkışlı modeller
8- CPU için password koruma fonksiyonu

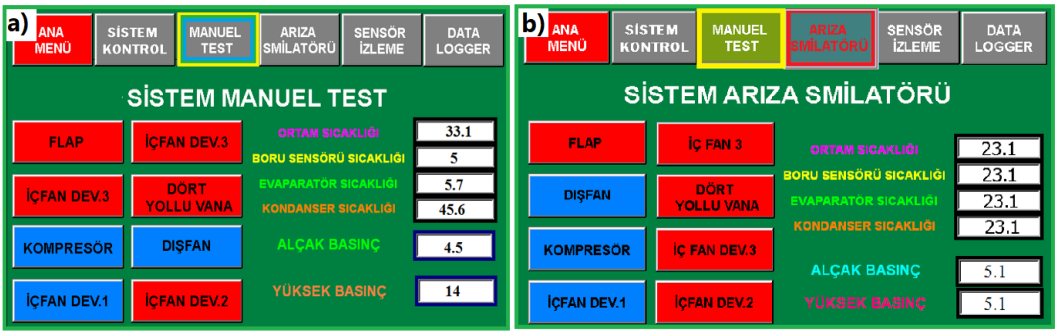
2.1. Kontrol Paneli ve Çalıştırılması

Şekil 4a'da gösterilen ekran, operatör paneline ait sistemin kullanıcıyı karşılama ekranıdır. Ekrandaki "Start" butonu ile seçim menüsüne giriş yapılır. Şekil 4b'deki sistemin kumanda ekranı olan "sistem ayarları", "sıcaklık set değeri" bölümünde, istenilen ortam sıcaklık değeri tanımlanabilir. Sistem çalışmaya başladıktan sonra, tüm basınç ve sıcaklık sensörlerinden gelen veriler, sürekli olarak takip edilebilir. Isıtma konumunda, veri elde edebilmek için "dış ünite defrost sıcaklığı" değeri kumanda

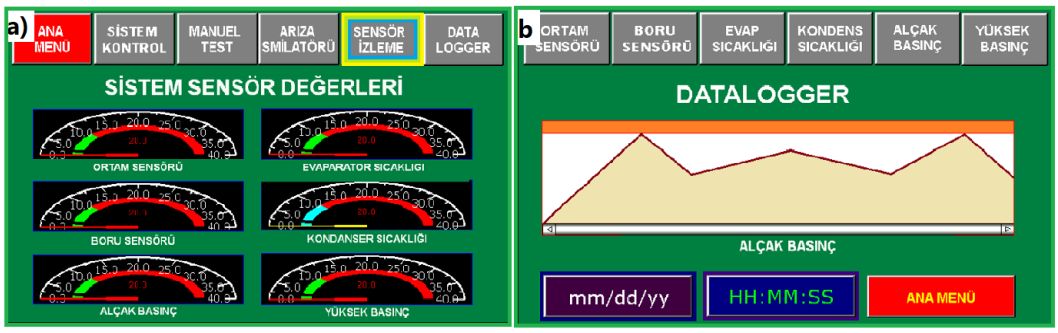
ekranında tanımlanmalıdır.

Şekil 4. a) Başlangıç ekran görüntüsü ve b) arıza eğitim simülatörünün sistem kumanda ekranı

Sistem manuel kumanda edilmek istenirse, Şekil 5a'da yer alan manuel kumanda ara yüzü kullanılmaktadır. Sistem üzerinde yerleştirilmiş olan alıcıların elle devreye alınmasından sonra ara yüzde, kırmızı renkli butonlar pasif, mavi renkli butonlar aktif olan durumu simgelemektedir. Şekil 5b'de gösterilen, "sistem arıza simülatörü" ekranı, sıcaklık modu olan "soğuk çalışma" ya da "sıcak çalışma" seçimi yapıldıktan sonra, sistemde yer alan alıcıların tepkisini gözlemlemek için müdahale edilebilen ekrandır. Sistem çalışırken herhangi bir alıcı devre dışı bırakılırsa, sisteme bağlı tüm elamanlar için elektrik, sıcaklık ve basınç tepkileri buradan gözlenebilir. "Sistem sensör değerleri" izleme arayüzü (Şekil 6a) ise sistem üzerinde kullanılan sensör değerinin gözlemlendiği farklı bir kullanıcı ekranıdır. Şekil 6b'de datalogger ekranı yer almaktadır. Datalogger vasıtasıyla sıcaklık ve basınç değerleri, grafik gösterimi üzerinden izlenebilmekte ve sayısal verilerin depolanabilmesi ile istenildiği zaman kullanılmasına imkân sağlanmaktadır.

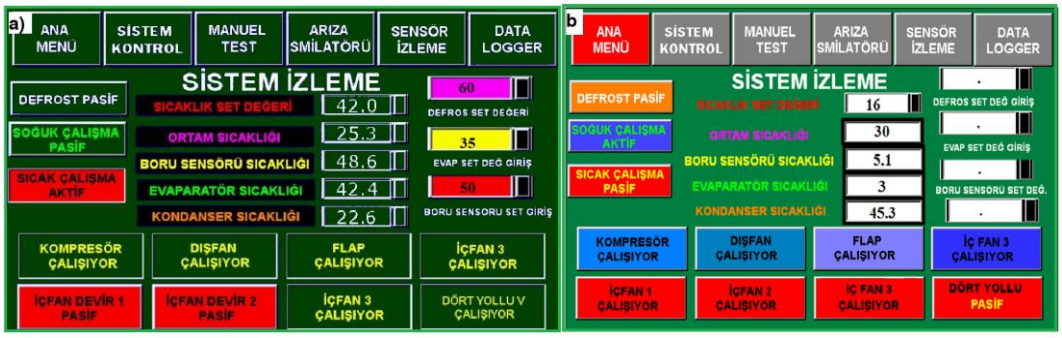


Şekil 5. a) Arıza eğitim simülatörünün manuel kumanda ekranı b) Arıza eğitim simülatörü ekranı



Şekil 6. a)Arıza eğitim simülatörü sensör değerleri izleme ekranı b) datalogger ekranı

Simülatörün işleyiş sürecinde, sayısal ve görsel olarak veri izleme ve kaydetmek amacıyla tüm sensör değerleri kullanılmaktadır. Kullanıcılar menü üzerinden istenilen sensör değeri seçerek, zamanla değişen verileri gözlemleyebilirler. Burada amaç, gerçek zamanlı bir sensör çalışma takibi yapılabilmesidir. Veri kaydı ve raporlama amacıyla, PLC kontrolü altında operatör paneli üzerine yerleştirilebilen USB belleğe Excel dosya formatında aktarım sağlanabilmektedir. Kayıt işlemi, istenilen zaman aralıklarında yapılabilir. Burada verilerin saklanabilmesi, daha sonra incelenebilmesi, analiz edilebilmesi ve raporlanması amaçlanmıştır. Sistem performans değerlerinin hesaplanarak analiz edilebilmesi için daha fazla sıcaklık ve elektrik modüllerine ihtiyaç vardır. Eğitimde şu anda faal kullanımda bu eksikliği giderebilmek için portatif bir datalogger imal edilmiş ve sisteme entegre edilerek, sistem performans değerlerini alabileceğimiz konuma getirilmiştir. PLC sensör değerleri ile datalogger değerleri karşılaştırılarak, alınan değerlerde farklılık olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Eğitim simülatörü a) ısıtma b) soğutma modunda çalışma operatör panel görüntüsü

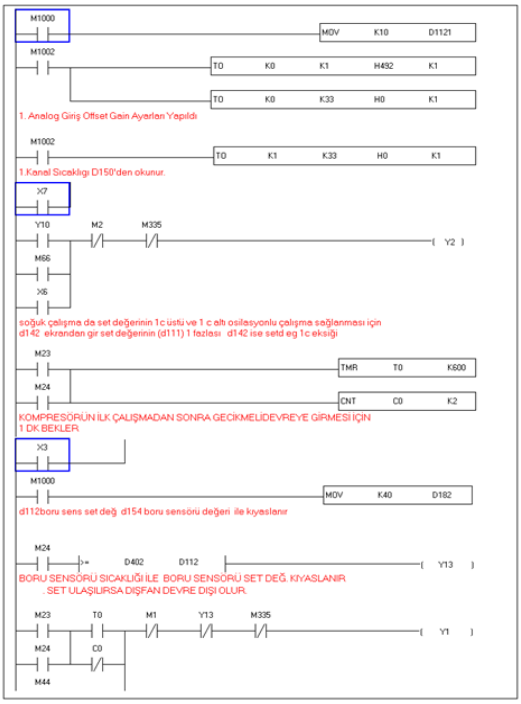
Cihaz ısıtma konumunda çalışırken (Şekil 7a), ortam sensörü oda sıcaklığını algılar. Manuel olarak sisteme yüklenen sıcaklık değeriyle karşılaştırır. Oda sıcaklığı istenilen ve sisteme yüklenilen ayar değerinin altındaysa, klima ısıtma modunda çalışır. Bu durumda, ilk önce dört yollu vana bobini tetiklenir. Kompresör ile dış ünite fan motoru çalışmaya başlar, soğutucu akışkan kompresör tarafından iç üniteye basılır. Sistem, ayarlanan değere ulaştığında durur. PCB kartla çalışan split klimalarda ayar sıcaklığının ortalama 0,5°C altına düştüğünde sistem tekrar çalışmaya başlar (Şimşek ve ark., 2016a; Şimşek ve ark., 2016b). Isıtma konumunda çalışma devam ederken, simülatör boru sensörü 50°C sıcaklık algılarsa, dış ünite fan motoru devreden çıkar, sıcaklık 48°C'a düştüğünde, dış ünite fanı yeniden çalışmaya başlar. Uygulamalarda, ısıtma konumunda R22 ile çalışan klimalarda 200-260 PSI basınçta fan motoru devreye girer, 300-360 PSI basınçta devreden çıkar. Geliştirdiğimiz sistemde sınır değerler 250-360 PSI aralığındadır. Cihaz soğutma konumunda çalışırken, yazın bir klimada hava sıcaklığı düştüğünde basınç değeri 60 PSI' nin altına düşer. Kışın sistemdeki bu değeri koruyabilmek için, soğutucu akışkan eklenirse, sistem aşırı şarj edilmiş olur. Sisteme eklenecek gaz miktarı tüm sistemin dengesini değiştireceğinden (Önder, 2024), katalog değerlerine bağlı kalınması ve boru mesafesi uzadıkça katalog değerleri miktarınca ilave yapılması gerekir. Cihaz ısıtma konumunda çalışırken, operatör panelinde kompresör, iç ünite fan motoru, dış ünite fan motorunun devreye girdiği ve ilgili lambaların da aktif olduğu, sistem üzerindeki butonlarda görülebilir. Eğitim simülatöründe, sistem vakumlanması ya da soğutucu akışkan şarjı esnasında, yaz ve kış mevsimleri için gaz şarjı etkileri

gözlemlenebilir. Bu eğitim, teknik eleman için önemli bir uygulamadır. Simülatörde split klima soğutma konumuna alındığında, belirlenen oda sıcaklığı elde edilene kadar, kompresör, iç ünite ve dış ünite fan motoru çalışmaktadır. Bu konumda çalışan klimada, dört yollu vana bobininde enerji yoktur (Şekil 7b). Sıcaklık istenilen değere ulaştığında, kompresör ve dış ünite fan motoru durur. Oda sıcaklığı istenilen sıcaklığın ortalama 0,5°C üzerine çıktığında kompresör ve dış ünite ve iç ünite fan motoru yeniden çalışmaya başlar (Şimşek ve ark. 2016b). Bu simülatörde, wattmetreden soğutma ve ısıtma konumunda, ortalama 1600-1900 Watt aralığında güç tüketimi okunmaktadır. Simülatör soğutma konumunda çalıştırılmak istendiğinde, operatör paneli üzerinde ortam sıcaklığından daha düşük bir değer girilmiş olmalıdır. Soğutma modu için, panel üzerinde soğutmaya ait sinyal lambaları aktif olmaktadır. Soğutmada çalışan elemanların sensör değerleri ve zamana bağlı değişimler, grafik ekranında izlenebilmektedir. Arıza durumunda sensörlerdeki sıcaklık değerlerine paralel olarak, elektrik değerlerindeki değişim de sistemdeki datalogger üzerinden anlık olarak izlenebilmekte ve PLC ekranı ile karşılaştırma yapılabilmektedir. Sistemde kompresör, iç ünite ve dış ünite fan motoru, dört yollu vana, arıza durumları oluşturulduğunda, arıza durumuna ait basınç değerleri alçak ve yüksek basınç sensörlerince okunabilmekte ve bu basınçlar manometrelerde de gözlemlenebilmektedir. Bu şekilde, sensörlerin de doğruluğu kontrol edilmiş olur. Soğutma modunda çalışan sisteme ait alçak ve yüksek basınç manometrelerinin bir ölçme görüntüsü Şekil 8'de yer almaktadır.

Şekil 8. Farklı dış ortam sıcaklıklarında soğutma modunda çalışan sistemin basınç manometrelerindeki görüntüsü

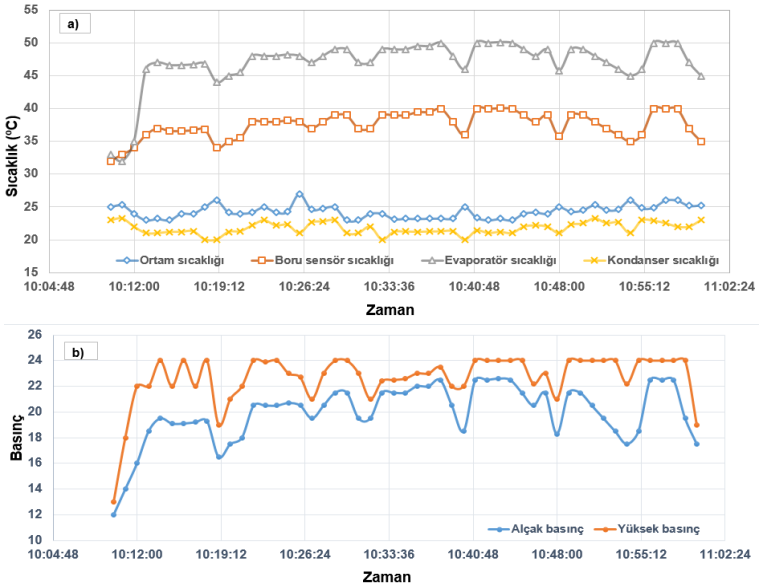
PLC kontrollü ve operatör panelli split klima arıza eğitim simülatöründe kullanılan PLC programının, bir bölümü Şekil 9'da verilmiştir. Simülatörde split klima ısıtma konumuna alındığında, soğutmaya göre temel farklılık olarak dört yollu vana bobini enerjilenir, gaz akış yönü ise tersine hareket eder. Dış ve iç ünite bu mod değişiminde, görevlerini değiştirerek çalışırlar. Dış ünite serpantinlerinin kanatçık aralıklarına ısıtma konumunda çalışırken, hava içerisindeki nem yapışarak buzlanmaya neden olur. Bu durumda dış ortam ve soğutkan arasında ısı transferi azalır. Klima iç ünitesinde üfleme sıcaklığında düşüş gözlenir. İlk çalışma anında, klima sistemi bir süre defrost modunu devreye almaz. Yapılan çalışmada simülatör için yazılan programa göre, ilk 15 dakikada defrost işlemi gerçekleşmez. Çalışma şartlarında buz giderme işleminin tekrar gerçekleşebilmesi için ortalama bir saat süre geçmesi gerekir. İlk 15 dakikalık süre geçtikten sonra, iç ünite boru sensörü, 45°C'nin altında bir sıcaklığı sürekli algılarsa, dört yollu vana bobinin enerjisini keser, yani sensör yaptığı tespit ile sistemi defrost işlemine geçirir. Ardından iç ve dış ünite fan motoru durdurulur.

Defrost işlemi ortalama 6 dakika sürmektedir ve bu işlem bittiğinde klima ısıtma konumunda çalışmaya kaldığı yerden devam eder. Isıtma modunda evaporatör kondenser, kondenser ise evaporatör pozisyonuna döner.

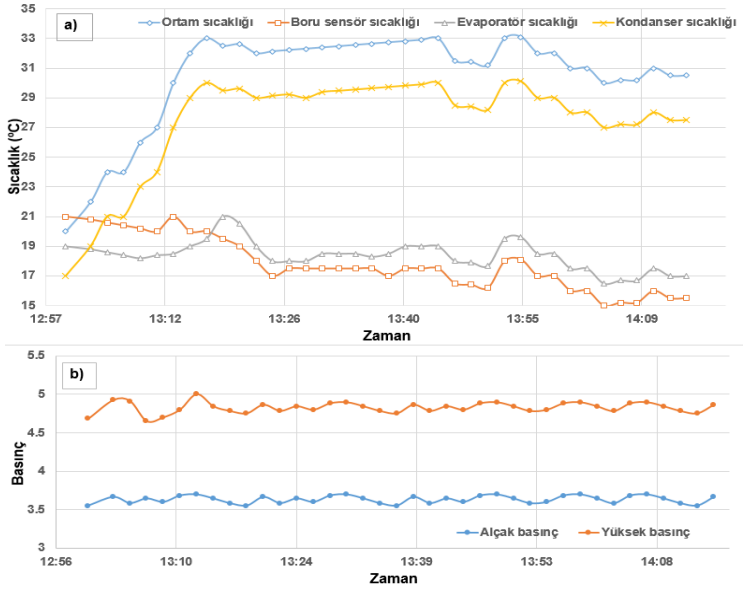


Şekil 9. Simülatörde kullanılan PLC programı

Bu çalışmada elde edilen değerlerde, deney ortamı olarak hem iç hem dış ünite aynı ortamda yer almıştır. Gelecek çalışmada, sisteme yeni modüller eklenecek, dış ünite iklimlendirilecek ortamın dışına taşınarak gerçek çalışma koşullarında program kalibre edilip gerçeğe en yakın değerler elde edilecektir. Şekil 10 ve Şekil 11 kalibrasyon öncesi elde edilmiş değerlere ait grafiklerdir. Isıtma modu basınç sensörlerinin çalışması ile ortam sıcaklığı sensörlerden ve basınç sensörlerinden alınan sıcaklık değişimleri Şekil 10'da, dış ünite fanının durması esnasında, soğutmada sistemdeki basınç değerleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Grafiklerde ısıtma modunda, evaporatör sıcaklıklarının 44-48 ºC, boru sensör sıcaklığının 33-40 ºC, kondenser sıcaklığının 20-26 ºC aralığında çalıştığı gözlemlenebilmektedir. Sisteme gaz şarjı uygulaması için, sistem soğutma konumuna alınmalıdır. Kış aylarında gaz şarjı yapılacaksa, dört yollu vananın enerjisinin kesilerek, devreden çıkartılması gerekir. Bu işlem, dört yollu vana bobini enerji soketi yerinden çıkartılarak yapılır. Şekil 11'de grafiklerde görüldüğü gibi, dış ünite fanının gaz şarjına bağlı olarak, belirli değerler arasında çalışıp durduğu gözlemlenmelidir. Dış ve iç ortam sıcaklıkları, basınç ve nem değişimlerinde meydana gelen her değişim, sistemin çalışmasını farklı etkilemektedir. Her durum için sensör değerleri, ekran ve ikaz butonları gözlemlenebilir. Şekil 11'de soğutma modunda sıcaklık sensörlerinden alınan sıcaklık ve basınç değerlerinin zamana göre oldukça dar bir aralıkta gerçekleştiği gözlemlenebilir.

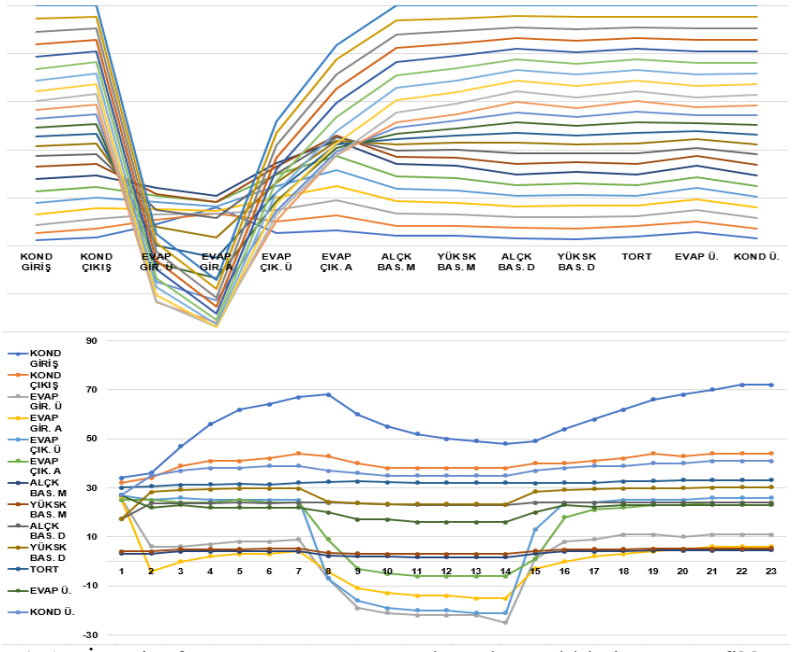


Şekil 10. Isıtma modunda (a) sıcaklık ve (b) basınç sensörlerinden alınan değerlerin zamana göre değişiminin panel görüntüsü



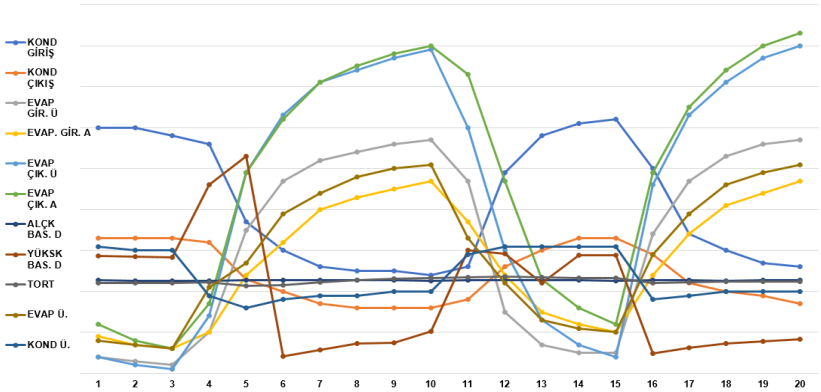
Şekil 11. Soğutma modunda dış ünite fanının durması anında fandaki (a) sıcaklığın ve (b) basıncın zamana göre değişiminin operatör panel görüntüsü

Eğitim simülatörü soğutma modunda çalıştığında ve iç ünite fan arızası verildiğinde (Şekil12), iç ünite serpantinleri arasından hava geçişi olmaması sebebiyle basınçlarda arıza anında düşme görülür. Bir süre sonra iç ünite serpantinlerinde ve iç-dış ünite arasındaki akışkan taşıyan borularda karlanma gözlemlenir. Evaporatör serpantin giriş ve çıkış sıcaklıklarında eksi derecelere aniden düşme grafikte de görülebilmektedir. Bu durum, alçak basınç hattında da düşme olarak kendini göstermiştir. Kondenser gaz giriş sıcaklığı, arızayla birlikte düşmektedir. Bu durum gaz çıkış sıcaklığını da etkilemektedir. Sistemdeki düşük basınç ve evaporatörde sisteme alınamayan ısı, kondenserde de kendisini net olarak göstermiştir. Sistemdeki iç ünite fan arızasında kondenser üfleme sıcaklığı sabitlenmiştir. Sistem istenilen soğutmayı yapamadığı için enerji sarfiyatı oldukça fazla olacaktır. Şekil 12 ve Şekil 13 kalibrasyon sonrası, geliştirilen yeni sisteme aittir.



Şekil 12. İç ünite fan arızası sonucu tüm sistemin sıcaklık, basınç grafikleri

Sistemdeki dört yollu vana arızasından elde edilen değerler, grafik olarak Şekil 13'te verilmiştir. Isıtma modunda sistem çalışırken, normalde 4 yollu vana devrededir, bu çalışmada soğutma modunda 4 yollu vana için değişkenlik sağlanmıştır. Sistem soğutma modunda bir süre çalıştırılarak, sistemde denge sağlanmış, daha sonra dört yollu vana devreye alınıp, devreden çıkartılmıştır. Bu durumda, sistemdeki sıcaklık, basınç ve harcanan enerjideki değişimler gözlemlenerek yorumlanabilmektedir. Dört yollu vana bobini enerjilendirildiğinde, kompresör soğutucu akışkanı iç üniteye basacaktır. İç ünite gaz giriş ve üfleme sıcaklıklarındaki artış, grafiklerde gözlemlenebilmektedir. Buna paralel olarak, dış ünite serpantinleri evaporatör konumuna dönüşeceği için evaporatör gaz giriş çıkış sıcaklıklarında düşme de grafiklerde gözlemlenmektedir. Gaz, kompresörle iç üniteye basıldığı için yüksek basınç tarafı ve alçak basınç tarafı yer değiştirir. Yüksek basınçtaki dengesizlikler grafiklerden gözlemlenebilir. Bu dengesizlik, aynı zamanda kompresör sesindeki değişimle de anlaşılabilir. Kompresörün tükettiği enerji artar, çünkü sistem normal basınç değerleri dışında çalışır. Bu da, güç tüketiminin artmasına neden olur. Sistemde kompresörde oluşacak aşırı zorlanma durumunda termik atabilir ya da kompresörü arızalandırabilir (Şimşek ve ark., 2016; Önder, 2024).



Şekil 13. Dört yollu vana arızası sonucu tüm sistemin sıcaklık, basınç grafikleri

Uygulamalarda, hem ısıtma hem de soğutma konumunda, sırayla her elemanın enerjileri kesilerek arıza oluşturulmakta ve bu durumda sistemin basınç, sıcaklık ve elektrik değerleri gözlemlenebilmektedir. Tüm değerlerin, elektronik ortamda saklanması USB bağlantısı sayesinde farklı cihazlar arasında veri aktarımı mümkündür. Bu durum, günümüzün popüler konularından birisi olan enerji verimliliği hesaplamalarının da yapılabilmesine olanak tanır.

3. Yöntem

Bu makalede, duvar tipi split klimaların kumanda sisteminde kullanılan PCB yerine, PLC kullanılarak, "PLC kontrollü ve operatör panelli split klima arıza eğitim simülatörü" nün arıza eğitiminde kullanılması anlatılmıştır. Arıza gidermenin ilk şartı, sistemin nasıl çalıştığı hakkında bilgi sahibi olmaktır. Bu nedenle, imal edilen bu setin çalıştırılması ile ilgili bilgiler detaylı olarak anlatılmıştır. Sistem üzerindeki tüm sıcaklık, akım ve elektrik güç değerlerini alabilmek için bir datalogger imal edilerek sisteme monte edilmiştir. Geliştirilen bu eğitim setinde, sıcaklık, basınç, güç ve akım değerleri takip edilebilmektedir. Eğitim simülatörü ile akademisyen, öğrenci ve eğitim alan tüm teknik eleman adayların, split klima çalışma program algoritmalarını belirlemesi ve sistemi istenilen şartlarda programlayarak çalıştırması amaçlanmıştır. Bu split klima eğitim seti ile sistemin vakumlanması, sisteme ideal soğutucu akışkan şarjının yapılması ve dış üniteye gaz toplama eğitimi verilebilmektedir. Eğitim seti üzerinde, elektrik değerlerinin ölçümü ve şemalara göre elektrik bağlantılarının yapılması eğitiminin verilmesi de sağlanabilmektedir. Farklı çalışma sıcaklıkları ve basınçlarda sistem davranışlarının gözlenmesi, farklı bölgelerde çalışacak cihazlarda ideal değerlerle çalıştırılması ve en yüksek verimi almak için soğutma sistemlerinin test edilmesi sağlanmıştır. Bu eğitim seti, farklı noktalardaki kullanıcılar için farklı programlama, farklı değerlerde denemeler yapma, sonuçları akademik olarak ortaya çıkarma özelliğine sahiptir. Set üzerine yerleştirilen harici butonlar kullanılarak, sistem elemanlarının manuel olarak çalıştırılması ya da çalışırken manuel olarak durdurulması mümkündür. Bu durum, teknik elemanların, oluşabilecek arızalarda sistemi ve tepkilerini gözlemleyerek arıza eğitimi gerçekleştirebilmelerini sağlar. Bu eğitim simülatörü, split klima eğitimi yanında, PLC eğitim ve programlama yöntemlerini de kapsamaktadır. Teknik elemanların sistemi tanıma, sistemin farklı sıcaklık ve basınçlardaki davranışlarını görme ve sistemdeki arızaları tanıma yeteneği kazanması için önemli bir araçtır. Bu sayede, sektörde ihtiyaç haline gelen (Aksoy ve ark., 2022; Esengül, 2025), split klima sistemlerini gözlemleyen, yorumlayan, arızayı teşhis edip çözüm üretebilen nitelikli teknik elemanlar yetiştirilebilecektir. Ayrıca enerji verimliliği uygulamalarında da kullanılabilecek niteliktedir.

4. Sonuç

İklimlendirme sektöründe, deneyimli teknik elemanların yetişebilmesi için teorik bilgilerin pratiğe aktarılması gereklidir. Nitelikli teknik elemanların yetişebilmesi için laboratuvar ortamlarında kullanılan deney setleri ve eğitim simülatörleri en uygun araçlardır. Deney setleri ve eğitim simülatörleri üzerinde eğitim almak, bilgilerin somut hale gelmesini sağlar. Yapılan müdahaleler ya da oluşan

arızların sonuçlarını, hem sistem elemanları hem de grafik üzerinde görebilmek; tekrar edilebilir işlemler yapabilmek; ölçme ve kontrol cihazlarını kullanmak; veri toplamak ve analiz işlemleri gerçekleştirmek, teknik elemanı endüstriyel ortama hazırlamak için son derece önemli uygulamalardır. Deneyler, yanlış ve doğru işlemleri ayırt edebilmeyi, nedenleri ve sonuçlarıyla birlikte öğretir. Gözlem becerileri ve dikkat unsurları geliştiren teknik elemanlar, sorunları analiz etme ve çözüm üretme becerisi kazanmış olurlar. İklimlendirme sistemleri için bu çalışmada geliştirilen "PLC kontrollü ve operatör panelli split klima arıza eğitim simülatörü" de teknik elemanların yeteneklerini geliştirmek amacıyla yapılmış bir uygulamadır.

Simülatörde, operatör paneli ekranı ya da sistem üzerinde bulunan harici butonlar kullanılarak, split klimanın kompresör, dört yollu vana, iç ünite fanı, dış ünite fanı gibi 220 Volt ile beslenen elektrik alıcıları manuel olarak devreye alınabilir. Yapılan işlemlerin sonucunda, sisteme ait tüm elemanların tepkisi anlık olarak gözlemlenebilir. Sistem stabil çalışırken, aktif durumda olan ve 220 Volt gerilim ile beslenen ana elemanların enerjileri kesilerek arıza oluşturulabilir. Sistemin bu sefer arızalara karşı; sıcaklık, basınç ve elektrik sinyallerinde oluşturduğu tepkileri gözlemlenebilir. Sistem çalışırken, sıcaklık ya da basınç sensör değerlerindeki değişimler, operatör paneli üzerinden takip edilebilir. Soğutkan şarj miktarı değiştirilerek, sistemin sayısal değerleri grafik olarak bilgisayar ortamına direkt aktarılabilir. Elektrik, güç ve akım değerleri, zamana bağlı olarak manuel kaydedilip grafiklendirilebilir. İç ve dış ortamdaki sıcaklık, basınç ve nem miktarındaki değişiklikler sistemin çalışmasını etkilemektedir. Meydana gelen değişiklikler, sensörlerden alınan değerlerle panel ekranında rahatlıkla gözlemlenebilir. İç ve dış ortamlardaki sıcaklık ve sistem üzerindeki sayısal değişimler gözlemlenerek, sistemin optimum çalışma koşulları hakkında yorumlar yapılabilir. Operatör panelli PLC ile çalışan split klima arıza eğitim simülatöründe vakumlama, sistem kapasitesine uygun miktarda gaz şarjı gibi servis işlemleri yanında, ana elemanlardaki elektrik değerlerinin ölçümünü yapma eğitimi, PLC eğitim ve programlama yöntemlerini de kapsamaktadır. Farklı programlarda sistem davranışı ve karşılaşılan arızalar öğrenilebilir, sistemin ideal şartlarda arızasız çalışması için gereken değerler tespit edilebilir. Akademisyenler, teknik elemanlar ya da mesleki eğitim alan öğrenciler, kendi belirledikleri split klima çalışma program algoritmalarını oluşturup, sistemi istedikleri şartlarda programlayarak farklı açılardan da inceleyebilirler. Akademik çalışma ve deneylerde akademisyenler sisteme istedikleri kadar sensör ya da elektrik alıcısı ekleyerek deneylerindeki verileri gözlemleyebilir ve bu verileri sistem otomatik olarak kaydettiği için gerekli durumlarda verileri alıp, bilgisayar ortamına aktarabilirler. Elde edilen bu sayısal değerler ile grafikler çizebilir, soğutma sistemi ile ilgili hesaplamalar yapılabilirler. Bu sistemi geliştirerek, kendi atölyelerinde imal edebilir, laboratuvar derslerinde ve bu konudaki derslerin uygulama bölümlerinde kullanabilirler.

Bu arıza eğitim simülatörü, teknik elemanların arızayı doğru bir şekilde teşhis edebilmesini, çözüm yöntemleri için fikir geliştirebilmesini, çözüme yönelik alternatifler sunabilmesini ve sonunda arızayı giderme konularında deneyim kazanmalarını sağlamaktadır. Eğitim kurumlarımızda bu tür sistemlerin üretilmesi, öğrencilerimize uygulamalı deneyimler kazandırırken, ithalat ihtiyacını da minimize

edecektir. Geliştirilen bu sistemler, yeni setlerin tasarımına zemin hazırlayarak sektörün ihtiyaçlarına yönelik çözümler sunabilir. Bir sonraki aşamada, farklı deneysel koşullarda elde edilen veriler kullanılarak, sistemin farklı tepkilerini daha net görebilmek amacıyla, sisteme verilen birim enerji karşılığında elde edilen ısı üretiminin hesaplanması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Çalışmadaki yardımları ve destekleri için Sayın Öğr. Gör. Erdoğan Şimşek'e çok teşekkür ederim.

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

Aksoy A., Özdemir FN., Avcıoğlu Ü. Nitelikli işgücü sorunu üzerine çalışma. Journal of Life Economics 2022; 9(3): 159-169.

Arçelik. Teknik destek ve eğitim yöneticiliği eğitim birimi. split klima eğitim el kitabı 1993; no: 3, istanbul.

Delta. Delta Otomasyon DVP-28SV. https://www.delta-emea.com/en-GB/products/Industrial-Automation/ALL/. (Erişim tarihi 07.03.2025).

Esengül M. Klima sektörü büyürken nitelikli işgücü sıkıntısı artıyor. https://www.milliyet.com.tr/kariyer/klima-sektoru-buyurken-nitelikli-isgucu-sikintisi-artiyor-977002. (Erişim 13.05.2025).

Kabasakal. Türk iklimlendirme sektöründen 2024'te 7,14 milyar dolarlık ihracat. https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turk-iklimlendirme-sektorunden-2024te-7-14-milyar-dolarlik-ihracat/3445458. (Erişim 13.05.2025).

Önder GT. Pressure controlled coolıng system,traıning set. Full Texts Book volume-2,Ed. Kardaşlar A., Mike F., 3th Internatıonal Scıentıfıc Research Conference, November 22-24, 2024; Bahçe, Osmaniye, Türkiye.

Şimşek E., Bilgili M., Küçükatay O. Programlanabilen mantıksal denetleyici Plc ile çalışan split klima tasarımı. Mühendis ve Makina Dergisi 2016a; 57(675): 30-40.

Şimşek E., Karaçaylı İ., Küçükatay O. Sıcaklık ve basınç kontrollü operatör paneli PLC ile çalışan split klima eğitim simülatörü geliştirilmesi. 1st International Conference on Engeneering Technology and Applied Sciences 2016b; 1433-1440.

Şimşek E., Bilgili. M. , Sahin B., Polat, Y. Duvar tipi split klimanın elektronik kartları, arızaları ve çözüm yöntemleri. I. Soğutma Teknolojileri Sempozyumu, İzmir, 2008; p. 89-96.

Şimşek E., Bilgili. M., Yasar A., Sahin B. Influences of variation in air flow passing through the evaporator filters and condenser coils on the performance of wall type split air conditioning system. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2012; 27 (2): 375-383.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 183-195, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 183-195, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Gözlem Hazırlık Süreçlerini Kolaylaştıracak Çok Dilli Bir Astronomi Aracı: BRK-Astronomik Araçlar

Burak Batuhan GÜRBULAK[1*], İlham NASIROĞLU[2]

[1]Atatürk University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Astronomy and Astrophysics, Erzurum
[2]Atatürk University, Faculty of Science, Department of Astronomy and Space Science, Erzurum

[1]https://orcid.org/0000-0003-4120-0562
[2]https://orcid.org/0000-0001-8131-4455
*Sorumlu yazar: burakerz@hotmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.03.2025
Kabul tarihi:26.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Arayüz geliştirme
Astronomik gözlem
Görünürlük
C#
Python
Visual studio

ÖZ

Bu çalışmada, astronomik gözlemler için zamanlama ve teleskop uygunluk değerlendirmelerini kolaylaştıran bir yazılım arayüzü geliştirilmiştir. Arayüz, gözlemcinin coğrafi konumu, teleskop özellikleri ve gök cisimlerinin hareketlerini dikkate alarak gözlem planlamasını optimize etmektedir. Python ve C# kullanılarak geliştirilen sistem, teleskop seçimi, gözlemci verisi, HJD/BJD dönüşümleri ve gözlemlenebilirlik analizlerini tek bir platformda entegre etmektedir. Teknik altyapı, Astropy, NumPy, Pandas ve Matplotlib gibi Python kütüphaneleri ile desteklenmiştir. Yazılım, SIMBAD veritabanından faydalanarak astronomik zamanlama sistemleri (JD, HJD, BJD) ile veri dönüşümlerini gerçekleştirmekte ve çok dilli destek sunmaktadır. Ayrıca, gözlem verilerinin daha verimli analiz edilmesi için veri işleme ve görselleştirme araçları entegre edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen arayüz, gözlem süreçlerini hızlandırarak gözlemcilerin zamanlama ve analiz süreçlerini daha verimli yönetmelerine olanak sağlamaktadır.

A Multilingual Astronomy Tool to Facilitate Observation Preparation Processes: BRK-Astronomical Tools

Research Article

Article History:
Received: 24.03.2025
Accepted: 26.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Interface development
Astronomical observation
Visibility
C#
Python
Visual studio

ABSTRACT

This study describes the development of a software interface that is intended to make the scheduling of astronomical observations and the assessment of telescope suitability easier. The observer's geographical location, telescope specifications, and celestial objects' motions are all taken into account by the interface to optimize observation planning. The system, which was developed using Python and C#, integrates telescope selection, observer data management, HJD/BJD conversions, and observability into a single platform. Astropy, NumPy, Pandas, and Matplotlib, among other scientific Python libraries, support the technical framework. The software retrieves astronomical data from the SIMBAD database and performs time system conversions (JD, HJD, BJD) with multilingual support. Data processing and visualization have also been added to increase efficiency and allow for more accurate observation. In summary, the created interface improves the efficiency and accuracy of astronomical observations by streamlining observational workflows and enabling precise time calculations, observability evaluations, and data transformations.

To Cite: Gürbulak BB., Nasıroğlu I. A Multilingual Astronomy Tool to Facilitate Observation Preparation Processes: BRK-Astronomical Tools. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 183-195.

1. Introduction

One of the earliest scientific disciplines, astronomy is based on observations meant to reveal the characteristics of celestial bodies and their locations within the universe. Astronomers have been inspired and curious about the sky throughout human history, which has led them to study stars, planets, and other celestial objects to gain a deeper understanding of the universe's structure. This fascination turned into a scientific field with the construction of telescopes, and astronomical discoveries have accelerated with the advancement of observing equipment (Kitchin, 2003).

Ever since telescopes were invented, astronomers have gathered detailed insights into the universe's structure by examining the motion of stars, galaxies, planetary systems, and other celestial objects. In astronomy, observations are made using both ground-based telescopes and spacecraft. However, studying a celestial body does not only rely on physical instruments; developing a suitable observation strategy and analyzing the collected data are also essential components of the process. The quality of the data obtained from astronomical observations depends on factors such as timing, atmospheric conditions, and the sensitivity of the instruments used. Scientists apply precise timing techniques, visibility calculations, and advanced data analysis methods to accurately interpret the motion, brightness changes, and physical properties of celestial bodies. In particular, determining the most suitable time for observations plays an important role in ensuring the reliability of the collected data (Rybicki and Lightman, 1979).

Timing systems such as Julian Date (JD), Heliocentric Julian Date (HJD), and Barycentric Julian Date (BJD) play a critical role in data such as the motions, light curves, and positions of celestial bodies. These timing systems enable the data to be corrected for the Earth's motion around the Sun and the observer's position. This provides more accurate information about the true position and motion of celestial bodies. Daily and annual observability of the objects to be observed is calculated using the right ascension (RA) and declination (DEC) values. Another factor affecting the observability periods is the geographical location of the telescopes used in this process (Kutner, 2003).

Databases such as SIMBAD (Set of Identifications Measurements and Bibliography for Astronomical Data) play an important role in selecting celestial objects to be observed. SIMBAD is a database that facilitates access to comprehensive information about celestial objects, their properties, locations, and previous observations. In addition, other databases and imaging tools such as NASA's (Wenger et al., 2000) SkyView and Aladin provide the observer with additional information about the locations and properties of celestial objects (Bonnarel et al., 2000).

This study focuses on the planning of observing time using databases such as SIMBAD, and time systems such as JD, HJD, and BJD for astronomical observations. Decision processes of telescopes used during observations and factors such as observability are discussed. An interface was designed with C# and Python programming languages using Visual Studio, and observability calculation processes were integrated into this interface.

2. Materials and Methods

The reference database for astronomical object descriptions and bibliographies is known as SIMBAD. For millions of astronomical objects, it includes baseline data, descriptions, and a few chosen observational measures. CDS, Strasbourg, is responsible for the development and upkeep of SIMBAD. SIMBAD is a vital tool utilized globally for a variety of astronomical investigations due to its capacity to compile all types of published observational data about stars or galaxies (Wenger et al., 2000). The Python programming language is quite appealing to a lot of individuals. Along with Perl, Ruby, and other interpreted programming languages, Python has grown in popularity since its launch in 1991. Since about 2005, Python and Ruby have grown in popularity for creating websites utilizing a variety of web frameworks, including Django (Python) and Rails (Ruby). Such languages are often referred to as scripting languages. They can be used to write scripts quickly to automate small programs or other tasks. Python, among the interpreted languages, for various historical and cultural reasons, has developed a large and effective community of scientific computing and data analysis. In recent years, Python has become one of the most important languages for data science, machine learning, and software development in general, both in academia and industry (Oliphant 2007). For tasks such as data analysis, interactive computing, and data visualization, Python is often compared to other popular tools and languages, such as R, MATLAB, SAS, and Stata. Its robust library ecosystem, including tools like pandas and scikit-learn, has further cemented its popularity for data analysis. Combined with Python's versatility in general-purpose software engineering, it stands out as an excellent choice for building data applications (McKinney, 2017).

Numpy; Numerical Python is abbreviated as Numpy. Numpy is the foundational package for scientific computing and the core of Python's numerical computing capabilities. For the majority of scientific applications using numerical data in Python, it offers the data structures and techniques needed. Additionally, it is a Python library that offers a multidimensional array object, several derived objects (like arrays and matrices), and many routines for fast array operations, including arithmetic, logical, shape processing, sorting, selection, discrete Fourier transforms, basic linear algebra, basic statistical operations, random simulation, and much more (McKinney, 2017; Harris et al., 2020).

Pandas; It provides high-level data structures and functions designed to make working with structured or tabular data fast, easy, and impressive. Since its inception in 2010, it has helped Python become a powerful and productive data analysis environment. Pandas combines the powerful array computing ideas of NumPy with the flexible data processing capabilities of spreadsheets and relational databases (such as SQL). It provides advanced indexing functionality to make it easier to transform, slice, and select subsets of data (McKinney, 2010).

Matplotlib; It is the most popular Python library used to produce graphs and other two-dimensional data visualizations. It was created by John D. Hunter and designed to create publication-quality graphics. The Python library is actively maintained by a large number of developer teams. While other

visualization libraries are available to Python programmers, Matplotlib remains the most widely used. For this reason, it is usually well-integrated with the rest of the ecosystem (Hunter, 2007).

Scipy; It is a toolkit that addresses a number of common areas of formal computing problems. Scipy is a set of convenience functions and mathematical methods built on top of Numpy. It adds many capabilities to Python by giving the user access to high-level commands and classes for data manipulation and visualization (Jones et al., 2001; McKinney, 2010).

Scikit-learn; has become the world's leading general-purpose machine learning toolkit for Python programmers. In just seven years, there are more than 1,500 contributing users worldwide. Scikit-learn leverages this rich environment to provide state-of-the-art implementations of many popular machine-learning algorithms while maintaining an easy-to-use interface that is tightly integrated with the Python language. This responds to a growing need for non-specialists in the software and web industries, beyond statistical data analysis in fields other than computer science, such as biology or physics. Scikit-learn is different from other machine-learning tools in Python for several reasons(Pedregosa et al., 2011).

Astropy; It was launched in 2011 with the desire to bring together developers in the field of astronomy to coordinate the development of a common set of Python tools for astronomers. One of the main goals of the Astropy project is to develop a core package that covers much of the astronomy-specific functionality needed by researchers and complements more general scientific suites such as Numpy and Scipy, which are invaluable for numerical array-based calculations and more general scientific algorithms (Van der Walt et al., 2011).

Astroquery; It is a Python-based toolkit developed to retrieve data from astronomical databases and web forms(Ginsburg et al., 2019).

Geopy; It is a Python client for many popular geocoding web services. It makes it easy for Python developers to find the coordinates of addresses, cities, countries, and landmarks across the world using geocoders and other data sources (Lopez Gonzalez-Nieto et al., 2020).

Pytz; this module provides date-time conversion functions and helps the user to serve the international client base. Python enables time zone calculations in our applications and also allows us to create time zone-aware date-time instances (Lutz, 2010).

Astral; It calculates the times of various positions of the sun: dawn, sunrise, noon, sunset, dusk, solar altitude, solar azimuth, moonrise, sunset, azimuth, and zenith (Lutz, 2010).

Timezonefinder; It is a Python package that allows you to find the time zone corresponding to the given coordinates on the globe, completely offline (Lutz,2010).

Integrated development environments (IDEs), such as Visual Studio, are very popular among software developers because they simplify many of the daily development or maintenance tasks. Modern IDEs; integrated debuggers support the development process by providing helpful tools such as automatic code editing, code completion, and integrated version control (Amann et al., 2016). Since software development began, the need for tools for writing, compiling, debugging, and deploying applications has increased. In this regard, Microsoft Visual Studio stands out as a best-of-breed IDE in

the continuous evolution of integrated development environments. Visual Studio is positioned as a powerful tool that developers can use to complete the entire development cycle in one place, making it easy to deploy applications. To improve every stage of the software development process, Visual Studio includes compilers, code completion tools, source control, extensions, and many more features. This multilingual environment supports many different languages including C++, C#, JavaScript, TypeScript, and Python, appealing to a broad development ecosystem (Beller et al., 2015).

C# programming language .NET is one of the languages developed by Microsoft for technology. It is a 100% object-oriented programming language derived from the C/C++ and Java programming languages. When programming languages are evaluated according to their distance from machine language to daily spoken language, high-level languages are written close to everyday spoken language, while low-level languages have a writing style close to machine language. C# belongs to the class of intermediate programming languages. With the C# language, database applications, 2D-3D desktop, mobile, and console games, image processing, web projects, automation projects, intelligent systems, mobile device applications, and many other projects can be developed (Troelsen and Japikse, 2021).

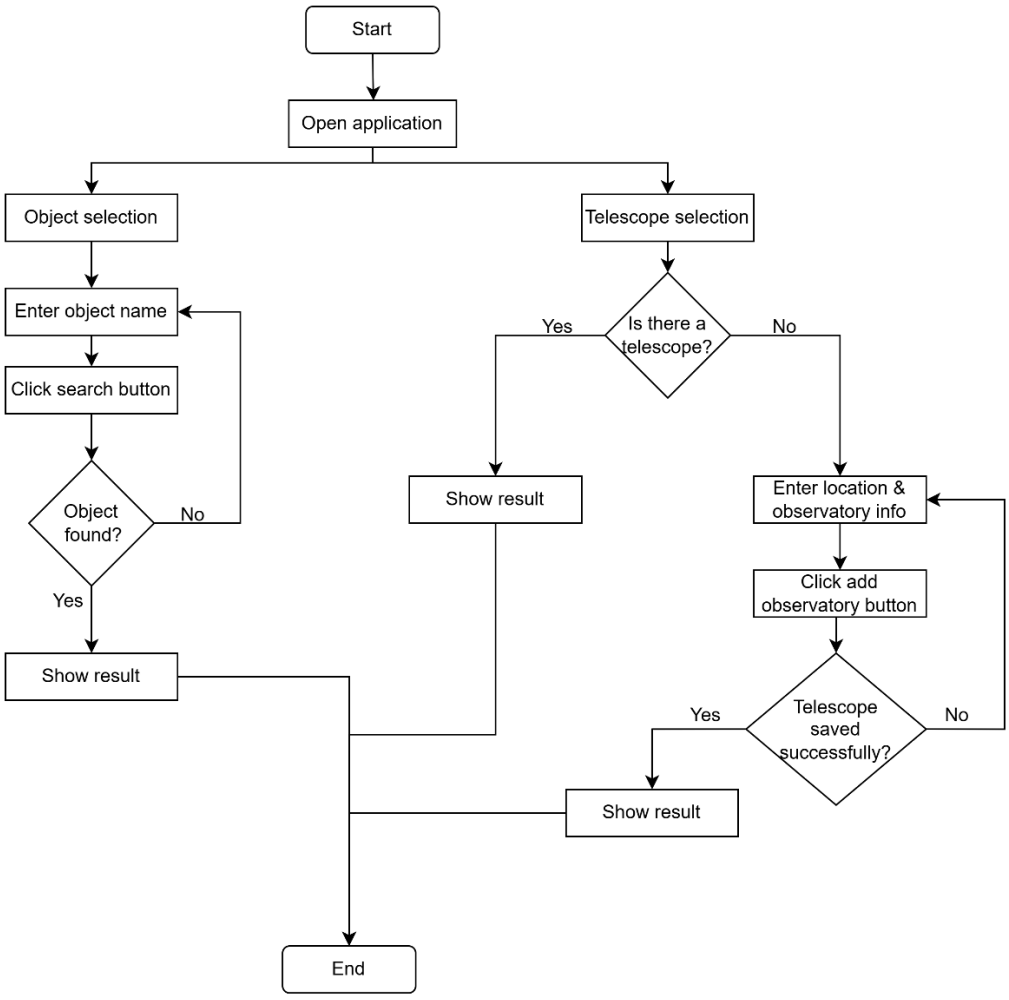


Figure 1. A section of the interface algorithm

In this study, the user interface was developed using the Python programming language. A schematic representation of the main algorithmic structure is presented in Figure 1. Various specialized libraries were used for data processing, visualization, and astronomical calculations.

NumPy and Pandas were used for data manipulation and analysis, while Matplotlib was used for graphical visualization. Astropy and Astroquery libraries were used for astronomical calculations and data retrieval. Geolocation-based calculations were performed using the Geopy library, and time zone management was supported by Pytz and TimezoneFinder. In addition, the Astral library was integrated to perform sun position and illumination calculations. These libraries were used collectively to ensure that the interface meets the functional requirements of the study. All software components were implemented and tested using their current stable versions.

3. Results and Discussion

In this study, an interface design has been developed that combines features such as source selection, source, and telescope positions, and calculating the visibility of sources in telescopes to be observed before starting observations in astronomy. Python, C# programming languages and packages, and Visual Studio were used to design the interface. Python, C#, and the above-mentioned libraries are needed for the interface to work. The interface works in four different languages (Turkish, English, Russian, and Chinese) and two different themes (light and dark). The designed interface consists of four tabs (Figure 2).

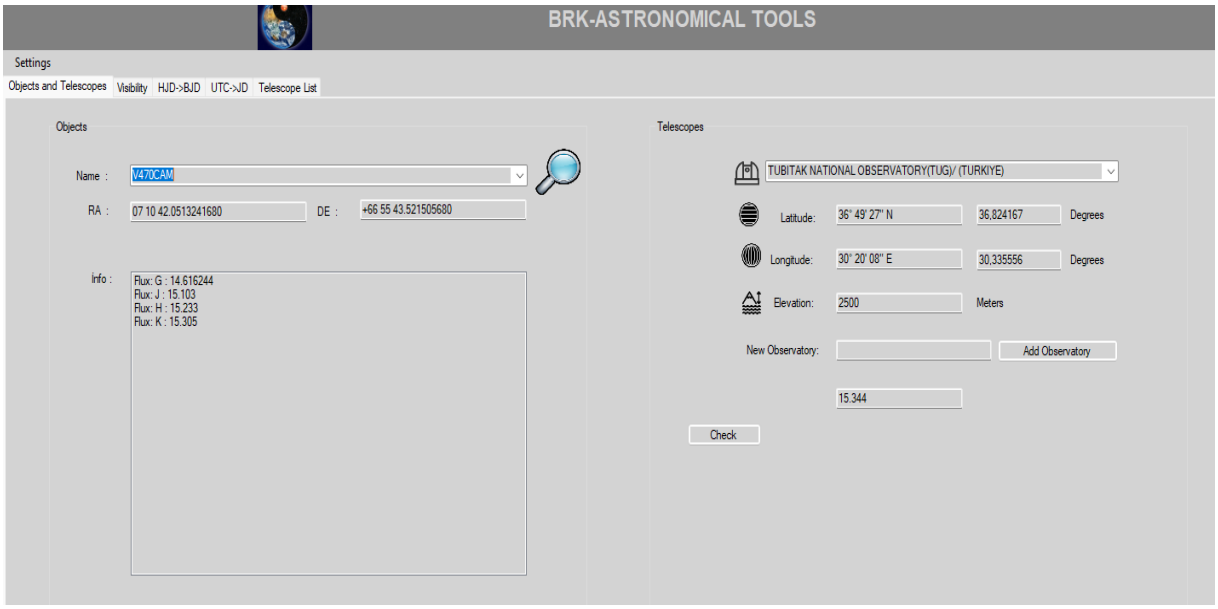


Figure 2. Interface overview.

These tabs are Objects and Telescopes, Visibility, HJD/BJD Converter, and UTC/JD Converter. They are explained in the following subsections.

1. Object and telescopes:

The first tab, shown in Figure 3, contains the Object and Telescope menus. In the Object section, the source we are going to examine is written and searched for. Here, the flux values are given along with the RA and Dec information for the source. There are approximately 140 different observatory datasets in the Telescope menu. The telescope to be used for observation can be selected by searching for its name in this section. If the observatory is not available in the library, the necessary information (latitude, longitude, altitude, and telescope name) can be entered and added to the system with the "Add Observatory" button. In addition, the suitability of the selected object and telescope in terms of brightness is evaluated by using the "Check" button. If the suitability is achieved, the second tab can be accessed to continue the observation preparation process.

Figure 3. There is an object menu positioned on the left side of the interface and a telescope menu on the right.

2. Observability:

As shown in Figure 4, the first step is to enter the coordinates of the object to be studied in degrees. Then, depending on the location to be observed, the date and time are set. After entering the coordinates of the telescope used, annual or daily observability analysis can be performed. To generate a daily observability graph, the "Visibility (daily)" button can be clicked on the same tab. If an annual observability graph is desired, the "Visibility (annual)" button should be used (Figure 4).

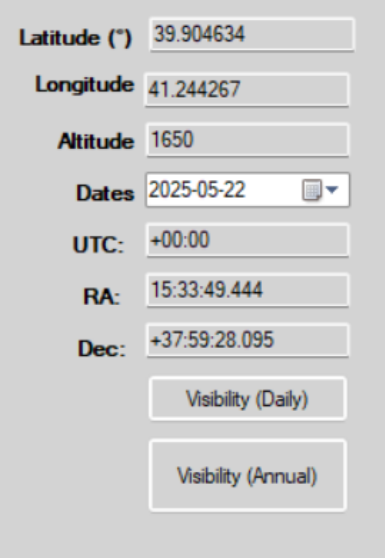


Figure 4. Data displayed in Tab 2.

Figure 5 presents a sample graph illustrating the altitude measurements (in degrees) of celestial objects, such as NSVS 07826147, observed throughout the day. On the right side of the graph, additional information such as sunrise and sunset times and astronomical twilight is provided in both Turkish and English. The observation time window can be determined by considering the operational limits of the telescope and the length of the night.

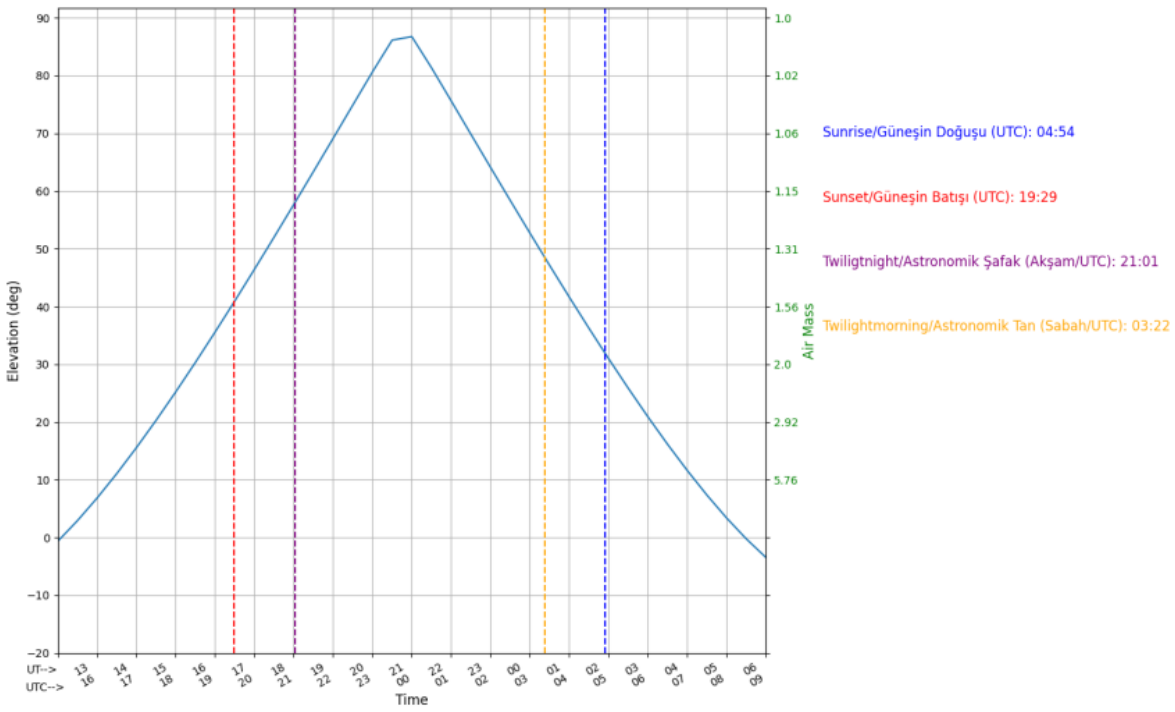


Figure 5. Example of an observability graph.

Air mass is defined as the ratio of the path traveled by a celestial object's light through the Earth's atmosphere to the minimum atmospheric thickness traversed at the zenith. This ratio increases as the

object approaches the horizon. This determines the extent to which light will be affected by atmospheric refraction, scattering, and absorption. Air mass serves as a critical parameter in correcting atmospheric effects, particularly during photometric observations. It also plays a crucial role in assessing the quality of observation conditions and planning the most appropriate observation times (Young, 1994). Therefore, the air mass value was considered in the analyses and incorporated into the relevant graphs.

3. HJD to BJD converter:

Figure 6 shows the HJD to BJD converter tab. Multiple HJD values can be entered on this screen. For the conversion process, the RA (HH MM SS.S) and Dec (DD MM SS.S) coordinates of the target are entered in the relevant fields. Then, when the "Convert" button is pressed, the interface converts the entered HJD values to BJD and presents the results in a list. In this way, the conversion from HJD to BJD for observations at different times can be performed quickly and practically.

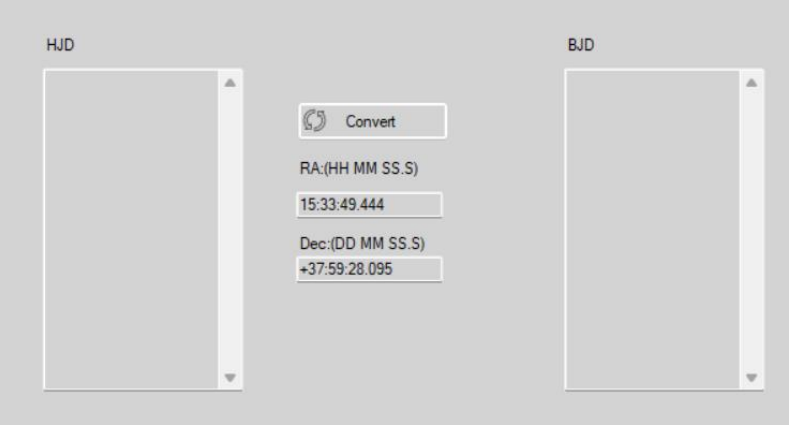


Figure 6. HJD and BJD are displayed in Tab 3.

Figure 7 shows the UTC and Julian Date conversion tab. In this tab, you can convert from UTC Date to Julian Date or from Julian Date to UTC Date by entering values in the relevant fields. For the conversion process, simply click on the appropriate "Convert" button.

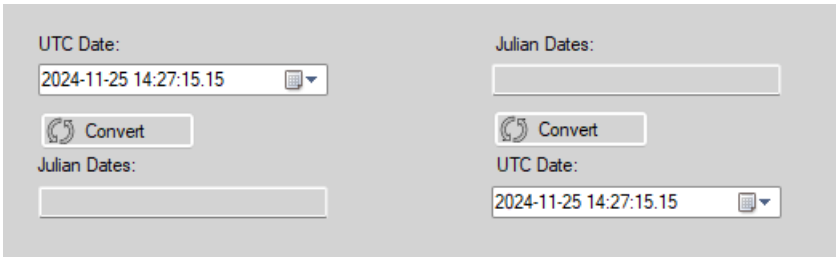


Figure 7. UTC converter.

Timing systems used during astronomical observations, observability calculation methods, and a software interface that facilitates the efficient use of telescopes have been developed. The designed

interface enabled the integration of data from the SIMBAD database into the planning of astronomical observations. This interface facilitates observability analyses of celestial bodies and increases efficiency by automating conversions between timing systems. The interface can perform annual and daily observability calculations suitable for the telescope location using the RA and DEC information of celestial objects. This feature provides a significant advantage both in planning new observations and in analyses based on existing data. In particular, the ability to integrate the positions and features of more than one telescope into the system provides convenience for multi-center observations.

The accuracy of astronomical observations depends on the precision of the timing systems used. Conversions between JD, HJD, and BJD enable a more precise analysis of observational data. This work has ensured that these transformations are performed automatically in the interface. The HJD and BJD transformations are critical, especially in studies that study the brightness changes of stars.

In the context of high precision astrometry and time delay calculations, several important vectors and corrections must be taken into account. Such calculations can be performed using the following equation.

$$BJD_{TDB}=JD_{UTC}+\frac{\vec{r}\cdot\hat{n}}{c}+\Delta_{rel}+\frac{2GM_{\odot}}{c^3}log(1-cos\,\theta)_{+}\Delta_{E\odot} \quad (1)$$

The position vector $\vec{r}$ represents the observer's position relative to the barycenter, while TDB represents Barycentric Dynamical Time. The unit vector $\hat{n}$ indicates the direction toward the observed astronomical source. When modeling signal propagation with high accuracy, relative corrections, denoted Δrel, must be included. Although these corrections are typically on the order of microseconds, they are important for precise timing measurements. Moreover, the term $\frac{2GM_{\odot}}{c^3}log(1-cos\,\theta)$ accounts for the Shapiro delay caused by the curvature of spacetime near massive bodies such as the Sun, where G is the gravitational constant, $M_{\odot}$ the solar mass, c the speed of light, and θ the angle between the observer–Sun and observer–source directions. Finally, the Einstein delay (ΔE⊙) accounts for relativistic time dilation effects due to the observer's motion in the gravitational potential of the solar system, including contributions from gravitational redshift and time dilation. All of these components are critical to provide overall accuracy in precision astrometric and timing analyses. (Eastman et al., 2010).

Python's Numpy, Pandas, Matplotlib, Scipy, and Astropy libraries provide data processing and visualization of the processed data. These libraries enable the interface to perform the necessary mathematical calculations quickly and efficiently. In particular, modules such as Astral and Timezonefinder facilitate accurate and reliable results in timing calculations.

Comparing the interface with a web-based conversion tool, it was observed that the interface provided higher numerical accuracy up to ten decimal places (approximately 10^{-10}), while the web tool (Eastman et al., 2010) was limited to six decimal places (approximately 10^{-6}). Tests showed that the maximum observed difference in calculated values between the two systems was 1.99. This level of deviation is typically sufficient for practical astronomical applications.

The interface offers the possibility to compare flux values to determine telescope and object compatibility. This feature allows the selection of the most suitable observation targets, taking into account the limitations of the telescopes. The ability to add telescope data to the system makes it possible to integrate new observatories into this platform. The multilingual nature of the software facilitates its use by international scientists. Light and dark theme support provides a customizable experience according to the user's preferences.

4. Conclusion

The interface developed in this study provides a user-friendly, modular platform that performs operations such as astronomical time transformations (JD, BJD, HJD), daily and annual observability analyses of sources, and identifies suitable sources for observation (Isaac Newton Group of Telescopes, 2025). Even while there are numerous standalone web applications available for these tasks nowadays, there isn't a complete solution that integrates all of these features into a single interface. In this respect, it offers significant advantages over some commonly used desktop and web-based astronomy tools in the literature (Ohio State University Department of Astronomy, 2025).

Most existing systems focus on specific functions and generally require an internet connection. In web-based applications, in particular, access to the systems can sometimes be difficult due to maintenance work, server issues, or access restrictions. Furthermore, most such tools only offer English language support, requiring users to perform operations such as localization or manual editing of output (Ohio State University Department of Astronomy, 2025). However, thanks to its offline functionality, the developed interface can be effectively used even in environments with limited internet connection and on low-end computers. Because the Python-based backend is designed in an open-source and modular manner, it can easily adapt to future developments and specific requirements. Moreover, the system's transaction log module provides a transparent error management mechanism for the user by recording every transaction in detail. Other prominent advantages include facilitating access for users of different languages through multilingual support and providing performance efficiency by minimizing system resources (RAM and CPU).

The interface was created using Visual Studio and developed using the C# and Python programming languages to satisfy these requirements. It aims to integrate the developed system with machine learning algorithms and big data analysis techniques and provide a structure that can suggest more advanced observation strategies. In addition, enriching it with wider language options and customizable features that can adapt to different user needs will increase the accessibility and effectiveness of the system. The interface will continue to be periodically updated and optimized regularly, and developments will continue to improve the effectiveness of the observation planning process.

Acknowledgments

This study was supported by Atatürk University, BAP Project FDK-2024-14239, and the TUBITAK Scientist Support Programs Presidency (BIDEB) 2211-A National PhD Scholarship Program.

Conflict of Interest

No conflict of interest has been declared by the authors.

Authors' Contribution Statements

The contribution of the authors is equal.

References

Amann S., Proksch S., Nadi S., Mezini M. A study of visual studio usage in practice. 2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER) 2016; 124–134. https://doi.org/10.1109/SANER.2016.39

Beller M., Gousios G., Panichella A., Zaidman A. When, how, and why developers (do not) test in their IDEs. Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering 2015; 179–190. https://doi.org/10.1145/2786805.2786843

Bonnarel F., Fernique P., Bienaymé O., Egret D., Genova F., Louys M., Ochsenbein F., Wenger M., Bartlett JG. The aladin interactive sky atlas: a reference tool for identification of astronomical sources. Astron Astrophys Suppl Ser 2000; 143: 1–14. https://doi.org/10.1051/aas:2000331

Eastman J., Siverd R., Gaudi BS. Achieving better than 1 minute accuracy in the heliocentric and barycentric Julian dates. Publications of the Astronomical Society of the Pacific 2010; 122(894): 935–946.

Ginsburg A., Sipőcz BM., Brasseur CE., Cowperthwaite PS., Craig MW., Deil C., Guillochon J., Guzman G., Liedtke S., Lim PL., Lockhart KE., Mommert M., Morris BM., Norman H., Parikh M., Persson MV., Robitaille TP., Segovia JC., Singer LP., Tollerud EJ., de Val-Borro M., Valtchanov I., Woillez J. Astroquery: An astronomical web-querying package in python. Astron J 2019; 157: 98. https://doi.org/10.3847/1538-3881/AAFC33

Harris CR., Millman KJ., van der Walt SJ., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., Taylor J., Berg S., Smith NJ., Kern R., Picus M., Hoyer S., van Kerkwijk MH., Brett M., Haldane A., del Río JF., Wiebe M., Peterson P., Gérard-Marchant P., Sheppard K., Reddy T., Weckesser W., Abbasi H., Gohlke C., Oliphant TE. Array programming with numpy. Nature 2020; 585: 357–362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2

Hunter JD. Matplotlib: A 2D graphics environment. Comput Sci Eng 2007; 9(3): 90–95. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

Isaac Newton Group of Telescopes. Staralt – altitude and azimuth of stars. Accessed July 24, 2025. https://astro.ing.iac.es/staralt/

Jones E., Oliphant T., Peterson P. Scipy: open source scientific tools for python. 2001.

Kitchin CR. Astrophysical techniques. CRC Press; 2003.

Kutner ML. Astronomy: A physical perspective. Cambridge University Press 2003. https://doi.org/10.1017/cbo9780511802195

Lopez Gonzalez-Nieto P., Gomez Flechoso M., Arribas Mocoroa ME., Muñoz Martin A., Garcia Lorenzo ML., Cabrera Gomez G., Alvarez Gomez JA., Caso Fraile A., Orosco Dagan JM., Merinero Palomares R., Lahoz-Beltra R. Design and development of a virtual laboratory in python for the teaching of data analysis and mathematics in geology: Geopy. 2020; :2236–2242. https://doi.org/10.21125/inted.2020.0687

Lutz M. Programming python. O'Reilly Media 2010.

McKinney W. Data structures for statistical computing in python. 2010; 56–61. https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a

McKinney W. Python for data analysis. O'Reilly Media 2017.

Ohio State University Department of Astronomy. Time utilities. Accessed July 24, 2025. https://astroutils.astronomy.osu.edu/time/

Oliphant TE. Python for scientific computing. Comput Sci Eng 2007; 9: 10–20. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.58

Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: machine learning in python. Journal of Machine Learning Research 2011; 12: 2825–2830.

Rybicki GB., Lightman AP. Radiative processes in astrophysics. John Wiley & Sons; 1979. https://doi.org/10.1002/asna.2113070305

Troelsen A., Japikse P. Pro c# 9 with .net 5. Apress; 2021. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6939-8

Van der Walt S., Colbert SC., Varoquaux G. The numpy array: a structure for efficient numerical computation. Comput Sci Eng 2011; 13: 22–30. https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37.

Wenger M., Ochsenbein F., Egret D., Dubois P., Bonnarel F., Borde S., Genova F., Jasniewicz G., Laloë S., Lesteven S., Monier R. The simbad astronomical database. Astron Astrophys Suppl Ser 2000; 143. https://doi.org/10.1051/aas:2000332

Young AT. Air mass and refraction. Applied Optics 1994; 33(6): 1108–1110.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 196-213, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 196-213, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Yapı Denetim Firmaları İçin Uygulanan Havuz Sisteminin Osmaniye İli Özelinde Değerlendirilmesi

Veysel Burak BOYSAL[1*], Şahin Tolga GÜVEL[2], Abdulkadir BUDAK[3]

[1,2,3]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 80750, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0001-6565-4660,
[2]https://orcid.org/0000-0002-6878-2876,
[3]https://orcid.org/0000-0002-6747-9103
*Sorumlu yazar: burak.boysal.01@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 26.03.2025
Kabul tarihi:26.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Yapı
Yapı denetim
Havuz sistemi
Yapı denetim firmaları

ÖZ

Özel yapılar için yapı denetim firmalarının belirlenmesinde, "Yapı Sahipleri ile Yapı Denetimi Hizmet Sözleşmesi İmzalayacak Yapı Denetim Kuruluşlarının Elektronik Ortamda Belirlenmesine İlişkin Usul ve Esaslara Dair Tebliğ" esas alınmaktadır. Bu tebliğ ile mevzuatta değişiklik yapılmış ve havuz sistemi getirilmiştir. Havuz sistemi ile yüklenici firmaların, çalışacakları yapı denetim firması ulusal yapı denetim sistemi tarafından atanmaya başlanmıştır. Bu durum yapı denetim firmalarının, yapı müteahhitlerine, işverenlere (proje tasarımcıları) ve yapı sahiplerine olan bağlılığını ortadan kaldırmıştır. Böylece yapım işlerinin yapı denetim firmalarına daha adil dağıtılması sağlanmıştır. Bu çalışma iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, Osmaniye ili özelinde havuz sisteminin yapı denetim sistemine etkisi konuyla ilgili taraflara anket yolu ile sorulmuş, veriler istatistiksel metotlarla analiz edilmiştir. İkinci kısımda ise Osmaniye ilindeki yapım işlerinin 2019 yılı öncesi ve sonrasında yapı denetim firmaları arasındaki dağılım oranları incelenmiştir. Sonuç olarak, havuz sisteminin gelmesiyle, 2011 yılı ve 2019 yılındaki inşaat kalitesinin sistemde iyileşmeyi etkilemediği anlaşılmaktadır. Ancak 2011 yılına nazaran, 2019 yılı yapı denetim sistemi mevzuat değişiminin inşaat kalitesinde daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen tüm bulgular değerlendirilmiş ve sonuçlara yönelik öneriler sunulmuştur. Bu çalışmanın yapı üretim taraflarına, konuyla ilgili akademik çalışmalara ve mevzuata oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir.

Evaluation of the Repository System Applied for Building Inspection Companies in Osmaniye Province

Research Article

Article History:
Received: 26.03.2025
Accepted: 26.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Building
Building control
Repository system
Building Inspection Companies

ABSTRACT

The Communiqué on the "Procedures and Principles for the Electronically Determination of Building Inspection Agencies to Sign Building Inspection Service Contracts with Building Owners" is taken as basis in determining building inspection companies for private buildings. This Communiqué, changes were made to the legislation and the pool system was introduced. With the pool system, the construction inspection company that the contractor companies will work with has started to be appointed by the national building inspection system. This situation has eliminated the dependence of building inspection firms on building contractors, employers (project designers) and building owners. Thus, a fairer distribution of construction works to building inspection companies was ensured. This study consists of two parts. In the first part, the effect of the pool system on the building inspection system in

Osmaniye province was asked to the relevant parties through a questionnaire, and the data were analyzed with statistical methods. In the second part, the distribution rates of construction works in Osmaniye province before and after 2019 were examined. As a result, with the arrival of the pool system, it is understood that the construction quality in 2011 and 2019 did not affect the improvement in the system. However, compared to 2011, it was determined that the 2019 building inspection system legislation change was more effective on construction quality. The obtained all findings were evaluated and suggestions for the results were presented. It is thought that this study will be very beneficial to the building production parties, academic studies and legislation on the subject.

To Cite: Boysal VB., Güvel ŞT., Budak A. Yapı Denetim Firmaları İçin Uygulanan Havuz Sisteminin Osmaniye İli Özelinde Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 196-213.

1. Giriş

İnsanlar tarih boyunca sağlıklı ve güvenli yapılarda yaşamayı istemiştir. İnsanların temel ihtiyaçlarından olan barınma ve güvenlik amacıyla oluşturulan yapılarda, üretim hatalarına karşı çeşitli yaptırımlar uygulanarak denetim yapılması sağlanmıştır.

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak barınma gereksinimini sağlayan yapıların özelliği, ülkelerin konumlarına ve kültürel yapılarına göre şekillenmiş ve buna bağlı olarak yapıların denetimi için farklı mekanizmalar geliştirilmiştir (Bayraktar, 2001).

Yapı denetimi; güvenli, ekonomik, sağlıklı yapı inşa edilmesi için yapıların, ilgili idarelerden ve yüklenicilerden bağımsız bir şekilde, projelendirme ve inşa aşamasında yürürlükte olan yönetmeliklere ve standartlara uygun olarak yapılmasının sağlanması süreci şeklinde tanımlanabilir (Karahan, 2008).

Bir başka tanıma göre ise, yapı denetimi, hayatın güvenli ve sağlıklı olarak devamı için fen, sağlık ve sanat kaidelerine uygun yapıların inşasını sağlayan bir kontrol mekanizmasıdır (Akbıyıklı ve ark., 2017).

Yapı üretimi; 300'e yakın endüstri dalına ait ürünün girdi olarak kullanılması nedeniyle, girdi çeşitliliği ve miktarı en fazla olan üretim çeşitlerindendir. Yapım süreci incelendiğinde, yapımdaki her bir imalat aşamasının kendinden bir önceki aşamada yapılan imalatların üzerini örtmesi nedeniyle alttaki imalatın denetlenmesinin zor olduğu görülmektedir. Bundan dolayı yapım sürecindeki tüm aşamalarda denetimin kesintisiz yapılması zorunlu olmaktadır (Öcal ve Pancarcı, 2008, Budak ve Oral, 2024).

1999 yılında meydana gelen Marmara Depremi; nitelikli yapılaşmaya geçiş için bir dönüm noktası olarak kabul edilebilir. Yaşanan bu depremde; 66.448 konut binası ağır hasara, 66.756 konut binası orta hasara ve 79,576 konut binası da hafif hasara uğramıştır. Deprem sonucu hayatını kaybeden kişi sayısı 17,408, yaralanan kişi sayısı 43.953'tür. İstanbul'da ağır hasarlı konut binası 3.073, orta hasarlı konut binası 13,339'dur. 12,455 konut binası da hafif hasara uğramıştır. İstanbul'da ölen kişi sayısı 454, yaralanan kişi sayısı 1,880'dir (Özmen, 2020). Deprem felaketinden sonra sağlıklı ve güvenilir yapıları inşa etmedeki yanlışlarımız, eksikliklerimiz fark edilmiş, yapı üretimindeki denetim sistemi tekrar ele alınmış, mevzuatta güncellemeler yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Yakın zamanda yaşanan 06.02.2023 Kahramanmaraş Pazarcık merkezli, 11 ili etkileyen büyük deprem ise bu durumun önemini ve içinde bulunduğumuz durumun hassasiyetini bir kez daha vurgulamıştır.

1999 Marmara depreminden sonra, 2001 yılından bu yana uygulanmakta olan özel yapıların denetimi amacıyla "4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun" çıkarılmıştır. Bu kanunda özel yapı denetiminin bu amaçla kurulmuş yarı-özel kuruluşlar tarafından yapılması öngörülmüş ve yapı denetimini üstlenmiş olan teknik personelin birlikte hizmet vermesi sağlanmıştır (Erdiş ve Gerek, 2012). Bu tarih sonrasında, 4708 sayılı Kanun ve bu kanun esas alınarak hazırlanan Yapı Denetimi Uygulama ve Esasları Yönetmeliği'nin uygulanmasına pilot olarak seçilen 19 ilde başlanmıştır.

4708 sayılı Kanun'un uygulamasıyla birlikte yapı üretimi ve yapı denetiminde bazı iyileşmeler olmuştur. 4708 sayılı Kanun, 01.01.2011 tarihi itibarı ile bütün illere yaygınlaştırılarak uygulanmaya başlanmıştır. 4708 sayılı Kanunun uygulandığı ilk dönemlerde yapım işini denetleyecek olan yapı denetim kuruluşu, yapı sahibi tarafından belirlenmekteydi. Ancak yapı sahibinin yapı üretimi ve yasal mevzuat ile ilgili bilgisinin olmaması, aynı zamanda resmi işlemlerle uğraşmak istememesi vb. durumlar nedeniyle yapı üretim yaşam döngüsündeki tüm aşamalar (tasarım, yapım, denetim ve tesis yönetim vb.) işi alan yüklenicilerin, denetim firmalarının veya tasarımcıların inisiyatifine bırakılmaktaydı. Böylece, yüklenicilerin yapı denetim firmasının seçimine müdahale etme imkanları olmakta, bu da arada organik bir bağ oluşmasına sebep olabilmekte ve yapı denetim firması sözleşmede yapı sahibine bağlı gibi görünmekle beraber yüklenicinin seçimi etkileme ihtimali yükleniciyi gölge işveren konumuna getirebilmekteydi (Bayram ve arkadaşları, 2018). Bu durum yapı denetim firmalarını yapı sahibine karşı bağımlı ve işin yürütülmesi açısından ise işlevsiz hale getirmekteydi. Ancak 2018 yılında yapılan bir düzenleme ile 4708 sayılı Kanun'da değişiklikler yapılmış ve 01.01.2019 tarihinden itibaren yapı denetimini üstlenecek kuruluş elektronik sistemle belirlenmeye başlanmıştır. Böylece, yapı denetim firmalarının işi üstlenmesi kişilerin müdahalesinden bağımsız hale getirilmiştir. Yeni sistemde; yapı sahibi ile yapının mimari proje müellifine ait bilgiler Ulusal Yapı Denetim Sistemine (UYDS) girilir. Sisteme girişi yapılan yapı için Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Yapıya İlişkin Bilgi Formu (YİBF) oluşturulur ve iş ilgili belediyenin sistemine düşer. Yapı sahibinin dilekçesiyle de iş ilgili belediye tarafından UYDS havuz sistemine aktarılır. Bir (1) gün içerisinde de iş, üstlendiği toplam inşaat alanı ve yapı sınıfı uygun olan ve o ilde faaliyet gösteren bir yapı denetim firmasına atanmış olur. Yapı denetim kuruluşunun denetim süreci, uygulamanın yapı ruhsatı ve ekinde yer alan projelerine göre tamamlandığını gösterir iş bitirme tutanağı düzenlenmesi ile son bulmaktadır. Ancak yeni mevzuat değişikliği ile uygulanan yeni sistemin etkinliğinin değerlendirilmesinin, tüm taraflar ve doğal afetlere dirençli kentleşme açısından gerekli olduğu açıktır. Yapılan literatür taramasında yeni düzenlemenin etkinliğini değerlendiren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın amacı, yapı denetim sisteminde 01.01.2019 tarihi itibarıyla uygulanmaya başlayan, yapı denetim firmalarının UYDS ile belirlenmesi yönteminin inşaat kalitesine, yapı üretiminin denetimine ve yapı denetim işlerinin dağılımına olan etkilerini incelenmek ve tespit edilen problemler için çözüm önerileri sunmaktır.

2. Önceki çalışmalar

Yapı denetim sistemi hakkında yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Demir (2017) çalışmasında, yapı denetimin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde uygulanma şeklini araştırarak, uygulamada yer alan problemleri araştırmıştır. Bu amaçla bölgede bulunan yapı mütehhitleri, yapı denetim kuruluşları ve ilgili idareler ile bir anket çalışması yapılmıştır. Çalışmada; yapı müteahhitlerine ve yapı denetim kuruluşlarına uygulanan cezai yaptırımlarda adil olunması, denetim faaliyetlerinin ranttan uzak tutulması, ilgili idarelerde çalışan teknik personel için deneyim zorunluluğu getirilmesi önermiştir.

Özdemir (2018) tarafından yapılan çalışmada, yapı denetim problemlerinin tespiti amacıyla Muğla ilinde faaliyetine devam etmekte olan yapı denetim kuruluşlarıyla anket çalışması yapılmış ve belirlenen problemlerin çözümü için öneriler getirilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonunda; Ulusal Yapı Denetim Sistemine havuz sistemi getirilmesinin, Bakanlık tarafından alınan kontör ve benzeri ücretlerin kaldırılmasının ve yapı denetim personelinin ücretlerinin arttırılmasının gerekli olduğu ifade edilmiştir.

Bayram ve diğerleri (2018) Türkiye'deki 28 farklı ilde faaliyet gösteren yapı denetim kuruluşlarında halihazırda çalışmakta olan toplamda 200 adet teknik personele yönelik, iki ana bölüm içeren bir anket çalışması uygulamışlardır. Yapının üretimin ve denetim aşamalarında karşı karşıya gelinen etik sorunları belirlemiş ve yapı sahipleri ile yapı denetim kuruluşları arasındaki ilişkilerin daha sağlıklı olması için çözüm önerileri geliştirmişlerdir. Bu kapsamda, elde edilen veriler istatistiksel yöntemlerle değerlendirilerek ve yapı denetim sisteminde karşılaşılan etik sorunlar tarafsız bir bakış açısıyla ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak; yapı denetim firmalarının, yapının taşıyıcı sisteminin uygun üretimini sağladığını, ancak yapı mimarisinin projeye uygun üretimi ile ilgili birtakım problemlerin nadir karşılaşılmakta beraber halen devam ettiğini belirtmişlerdir.

Yağız (2019), nitelikli konut üretiminde yapı denetimin yeri ve unsurları ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Yapılan çalışmada Bursa'da faaliyet gösteren yapı denetim kuruluşları tarafından yapılan değerlendirmelere başvurmuştur. Bu amaçla, Bursa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü'ne gelen şikayetler üzerinden, şikayetlerin nitelikleri belirlenmeye ve nitelikli konut yapımında yapı denetiminin etkisi ile ilgili öneriler getirilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışma sonunda; ekonomik, sosyokültürel ve fiziksel yönlerden kullanıcıların gereksinim ve taleplerinin tespit edilmesi için, proje ve uygulamada görev ve sorumluluk bilinci bulunması halinde nitelikli konut yapımının sağlanabileceği ifade edilmiştir.

Güncü (2020) yapı denetiminde yaşanan sıkıntıların tespit edilmesi amacıyla Van ilinde faaliyet gösteren yapı denetim kuruluşlarıyla anket çalışması yaptığı tez çalışmasında, yaşanan sorunları tespit ederek çözüm önerileri getirmiştir. Tezin sonuç kısmında; Bakanlık tarafından inovasyon ve dijitalleşmeden yararlanarak yapı denetimi ve imar mevzuatı kapsamında görevleri tanımlanmış olan tüm kurumlara, kuruluşlara ve kişilere yapı denetim sisteminin ve yapı ruhsatına ilişkin iş ve işlemlerin en iyi şekilde anlatılması gerektiği, teknik personelin mesleki yetkinliklerinin en yüksek seviyeye

çıkarılmasının gerekliliği, ülkemizde yapılan her bir yapıya mühendislik hizmeti verilmesinin, bilimsel, çağdaş ilkelere ve standartlara uygun doğal afetlere dirençli yapılar üretilmesi konusunda ilerleme sağlanmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Boysal (2022)'de Osmaniye ili merkezinde ve ilçelerinde bulunan yapı denetim kuruluşlarında çalışan yapı denetçileri ve yardımcı kontrol elemanları ile yapı denetim sistemi içinde önemli rol üstlendiği düşünülen şantiye şefleri, proje müellifleri, yapı müteahhitleri, ruhsat düzenleyen idarelerin yapı denetimi ve yapı ruhsatı servisinde görevli teknik personelin mevcut yapı denetimin uygulanması ve olası çözümlerle ilgili düşünceleri anket ile derlemiştir. Bu tez çalışmasında, yapı denetimine ait hizmet bedeli ödemesinin, tüm büyüklüklerdeki yapı inşaat alanı için kademeli ödeme yapılmasına müsait hale getirilmesini, projeyi hazırlayan, yapının müteahhitlik hizmetini üstlenen ve şantiye şefliği yapan teknik personelin birbirlerinden farklı kişiler olmasıyla mesleki bağımsızlığın ve ilave istihdamın sağlanması gerektiğini, yapı denetim kuruluşlarının iş süresince her türlü denetim ve yazışmayı elektronik ortamda yapmaları ve bu yazışmaları UYDS sistemine kaydetmelerinin zorunlu tutulmasının gerekliliğini, imar barışı ile düzenlenen yapı kayıt belgelerini, yapı kullanım izin belgesine dönüştürmek için sürenin sınırı koyulması ve süresi içinde dönüştürülmemiş yapı kayıt belgelerin iptali ile, söz konusu yapının kaçak yapı statüsüne çevrilmesi ve bu konu hakkında Bakanlık tarafından teknik danışmanlık ve eğitim hizmeti verilmesi gerektiğini belirtmiştir.

İnce ve Soylu (2024) yaptıkları çalışmada Türkiye'deki yapı denetim sistemini, asrın felaketi olarak anılan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ışığında değerlendirilmişlerdir. Yapı denetiminin, inşaat sektöründe kalite güvencesi, yönetmeliklere ve hukuka uyum ve projelerde verimlilik gibi önemli avantajlar sunduğunu ve bu sistemin, yeni yapıların belirli standartlara uygun inşa edilmesini sağlayarak deprem gibi doğal afetler karşısında daha güvenli olmasını sağladığını belirtmişlerdir. Ancak, Kahramanmaraş depreminin, yapı denetim sisteminin eksikliklerini acı bir şekilde ortaya koyduğunu, depremde yıkılan veya ağır hasar gören binaların çoğunluğunun eski yönetmeliklere göre inşa edilmiş olsa da, yeni yönetmeliklere uygun inşa edilmiş bazı binaların da hasar görmesi, mevcut yapı denetim süreçlerinin yeterliliği konusunda ciddi soru işaretleri doğurduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada, yapı denetiminin sadece kağıt üzerinde kalmaması gerektiğini, gerçek uygulamalarda da etkin bir şekilde yürütülmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

3. Materyal ve Yöntem

Araştırma izni Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Rektörlüğü Fen Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu'ndan 04.10.2022 tarihinde 2022/8/4 sayılı yazı ile alınmıştır.

Bu çalışmada, 2018 yılında yayınlanan mevzuat gereğince, yapı denetim firmalarının denetleyecekleri işlerin elektronik ortamda belirlenmesinin yapı denetim sistemine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda konu ile ilgili literatür, yasal mevzuat ve elde edilen bilgilere istinaden geliştirilen anket bu çalışmanın

materyallerini oluşturmaktadır. Yapı denetim sistemi ülke genelinde uygulanmaktadır. İllere göre farklı bir uygulama yapılmamaktadır. Bu nedenle çalışmanın, araştırmacının kolay erişim sağlayabileceği Osmaniye ilinde herhangi bir ilde yapılması yeterli görülmüştür. Bu kapsamda, anket çalışması Osmaniye ilindeki yapı denetim personeline, belediye teknik personeline, yapı müteahhitlerine, şantiye şeflerine ve proje müelliflerine yönelik hazırlanmıştır. Anket çalışması iki kısımda incelenmiştir. İlk kısımda, yapı denetim mevzuatı incelenmiş, konuyla ilgili geçmiş çalışmaların taraması yapılarak elde edilen bilgiler kapsamında yapı denetim sisteminde yapılan mevzuat değişikliğiyle yapı denetim firmalarının elektronik olarak atanmasının sistem üzerindeki etkisinin belirlenmesi için Osmaniye ilinde yapı denetimde sorumluluğu bulunan taraflara yönelik anket çalışması yapılmıştır. İkinci kısımda ise, 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanunu'nun Türkiye genelinde uygulanmaya başladığı 2011 yılından itibaren Osmaniye ilinde faaliyet gösteren yapı denetim firmalarının üstlendikleri iş dağılımı ile 11.05.2018 tarihli düzenleme sonucu 01.01.2019 sonrası iş dağılımı karşılaştırılmıştır. Anket sonucu elde edilen verilerin analizinde, herbir soruya ait normal dağılım analizi için Kolmogrov Smirnov ve Shapiro-Wilk analizleri SPSS programı kullanılarak yapılmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Veriler normal dağılıma uymadığından parametrik olmayan istatistiki analizler kullanılmıştır. Gruplar arası görüş farklılığının belirlenmesinde Kruskal Wallis testi, aynı işin öncesi ve sonrası etkileri arasındaki farklılığı ortaya koymak için Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi SPSS programı kullanılarak uygulanmıştır. Sonuç olarak, tüm bulgulara göre, yapı denetim sistemindeki bu düzenlemenin inşaat sektöründeki taraflar üzerindeki ve denetimdeki etkileri değerlendirilmiştir. Anket 5 dereceli Likert ölçeğe göre yüz yüze yapılmıştır. Ankette toplam 350 kişiye ulaşılsa da toplamda 268 kişiden cevap alınmıştır. Çalışmada farklı gruplar olduğundan, her bir grup için Cronbach Alpha değeri aşağıda Tablo 1'de verilmiştir. Tablodaki sonuçlara göre her bir grup açısından verilerin iç tutarlılığının yüksek olduğu söylenebilir (Taber 2018).

Tablo 1. Grupların Cronbach alpha değerleri

Sıra No	Anket Grupları	Gronbach Alpha Değerleri
1	YDP	0,711
2	BTP	0,889
3	YM	0,896
4	ŞŞ ve PM	0,885

*YDP (YAPI DENETİM PERSONELİ
*BTP (BELEDİYE TEKNİK PERSONELİ)
*YM (YAPI MÜTEAHHİDİ)
*ŞŞ (ŞANTİYE ŞEFİ)
*PM (PROJE MÜELLİFİ)

Tablo 2. Anket verilerinin normal dağılım analiz sonucu

Soru No	Soru	n	Kolmogrov Smirnov (sig.)	Shapiro-Wilk (sig.)
1	Yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi	268	0,00	0,00
2	Havuz Sisteminin Gelmesiyle Yapı Denetimlerindeki İyileşme Yaşanma Durumu	268	0,00	0,00
3	Havuz sistemine geçilmesi ile inşaat kalitesinde artış durumu	268	0,00	0,00

2.1. Kruskal Wallis Testi

Bu testin uygulanabilmesi için örneklem kümelerinin bağımsız ve değişkenlerinin sürekli ve verilerin aralıklı bir ölçekle elde edilmiş olması gerekir. Bu test ile soruya verilen cevapların istatistiksel olarak gruplar arası anlamlı bir fark olup olmadığının belirlenmesi için örneklemdeki grupların sıra ortalamaları belirlenir ve aşağıda 1 no'lu denklemde verilen H istatistiği kullanılarak %95 güven aralığında H_0 hipotezi test edilir. Eğer hipotez kabul edilirse test edilen soru için grupların %95 güven aralığında aynı görüşte oldukları, eğer en az iki grubun sıra ortalamaları arasında fark varsa yani hipotez reddedilirse grupların %95 güven aralığında istatistiksel olarak farklı görüşte oldukları kabul edilir (Bülbül, 2001).

Bu çalışmada da ankete katılan gruplar arası görüş farklılıklarını ortaya koymak için Kruskal Wallis testi kullanılmıştır. Bu testte H_0 hipotezi test edilmiştir. Bu hipotez genel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

H_{01}: Ankete katılan gruplar arasında görüş farklılığı yoktur.

$$H = \frac{12}{N(N+1)} + \sum_{j=1}^{k} \left(\frac{R_j^2}{n_j}\right) - 3(N+1) \qquad (1)$$

k: Örnek sayısı

n_j: Her örnekteki birim sayısı

N: Örnekteki tüm birimlerin sayısı

R_j: j. örnek için sıra sayıları toplamı

2.2. Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi

Normal dağılıma uymayan ölçümlerde, Wilcoxon eşleştirilmiş işaretli sıra testinde eşleştirilmiş veya bağımlı iki grup arasındaki sıra ortalamaları karşılaştırılır. İki grup arasında fark olduğunu belirlemek için Wilcoxon eşleştirilmiş işaretli sıra testi kullanılır Wilcoxon eşleştirilmiş işaretli sıra testinde ise, değişkenler arasında ölçüm fark puanları hesaplanır, küçükten büyüğe sıralama yapılır, pozitif ve negatif farkların sıra sayıları toplanır, z istatistiği hesaplanır ve z tablosundan karşılaştırılarak sonuca ulaşılır ve yorum yapılır (Divine ve ark., 2013). Bu çalışmada Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi ile ankete katılan gruplardan hangi ikisinin arasında anlamlı fark olduğunu belirlemek için kullanılmıştır.

3. Araştırma Bulguları

Çalışma kapsamında elde edilen araştırma bulguları aşağıda alt başlıklar halinde verilmiştir.

3.1. Ankete Katılanların Profili

Ankete katılanların, yapı denetim mevzuatında belirtildiği şekliyle ve üstlendikleri görev ve sorumluluklarına göre dağılımları Tablo 3'de gösterilmektedir. Tabloya göre, yapı denetim personeli (YDP) 135 kişi (%50), belediye teknik personeli (BTP) 20 kişi (%7,35), yapı müteahhitleri (YM) 51 kişi (18,75), şantiye şefleri (ŞŞ) ve proje müellifleri (PM) ise 65 kişi (%23)'dir. Ayrıca ankete katılanların demografik dağılımları ise Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmektedir.

Tablo 3. Anket gruplarının dağılımı

Sıra No	Anket Grupları	Katılımcı Sayısı	%
1	YDP	136	50,00
2	BTP	20	7,35
3	YM	51	18,75
4	ŞŞ ve PM	65	23,90
	TOPLAM	272	100,00

Tablo 4. Yaş Dağılımları

Sıra No	Yaş Dağılımı	Yapı Denetim Personeli	Belediyer Personeli	Yapı Müteahhidi	Şantiye şefi ve proje müellifi	Genel Ortalama
1	23-27	33,32	0	3,92	24,62	15,46
2	28-32	22,2	18,75	11,76	21,53	18,56
3	33-37	7,4	18,75	15,69	18,46	15,07
4	38-42	7,4	25	17,65	15,38	16,36
5	43-47	5,93	31,25	33,33	12,31	20,70
6	48-52	5,18	6,25	13,73	4,62	7,45
7	52 ve üzeri	18,59	0	3,92	3,08	6,40

Tablo 5. Öğrenim Durumu

Sıra No	Yaş Dağılımı	Yapı Denetim Personeli	Belediyer Personeli	Yapı Müteahhidi	Şantiye şefi ve proje müellifi	Genel Ortalama
1	İlkokul/Ortaokul	0	0	15,68	0	3,92
2	Lise	0	18,75	25,20	0	6,38
3	Ön Lisans	6	18,75	3,92	0	11,85
4	Lisans	85	25	54,90	95,24	72,85
5	Yüksek Lisans	9	31,25	0	4,76	5

Tablo 6. Mesleki dağılım

Sıra No	Yaş Dağılımı	Yapı Denetim Personeli	Belediye Personeli	Yapı Müteahhidi	Şantiye şefi ve proje müellifi	Genel Ortalama
1	İnşaat Mühendisi	50,5	37,5	41,17	46,15	43,83
2	Mimar	31,1	12,75	9,81	27,70	20,28
3	Makina Mühendisi	9,6	6,25	0	4,61	5,12
4	Elektrik-Elektronik Mühendisi	5,9	6,25	0	9,23	5,35
5	Tekniker	2,9	37,5	3,92	0	11,07
6	Harita Mühendisi	0	0	0	12,31	3,07
7	Diğer(Kalıp, Demir, Alçı, Elektrik Ustası vb.)	0	0	45,10	0	11,28

3.2. Yapı Denetim Sistemi Uygulamasının Yapı Kalitesine Etkisi

Ankete katılanlara, 01.01.2011 tarihinde yapı denetim sistemi uygulanmasına geçilmesi ile inşaat kalitesinde artış olması durumu sorulmuş, ankete katılanların vermiş oldukları cevaplar Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde; Osmaniye ilinde, 01.01.2011 tarihi itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasına geçilmesinin, inşaatlarda kaliteyi artırdığı düşüncesine tüm paydaşların çok büyük bir oranda katıldıkları görülmüştür.

Tablo 7. Yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi

Soru No: 1	Osmaniye ilinde, 01.01.2011 tarihi itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasına geçilerek, inşaatların kalitesinde artış olmasına yönelik görüşe katılıyor musunuz?					
Sıra No	Cevaplar	YDP%	BTP%	YM%	ŞŞ/PM%	Genel Ortalama%
1	Kesinlikle Katılıyorum	31,5	37,5	35,30	30,77	33,77
2	Katılıyorum	45,7	43,75	47,05	55,39	47,97
3	Kararsızım	22,8	12,5	13,73	7,7	14,18
4	Katılmıyorum	0	6,25	0	3,07	2,33
5	Kesinlikle Katılmıyorum	0	0	3,92	3,07	1,75

Tablo 7'de yer alan soruya verilen yanıtlar için SPSS programı ile normallik testi yapılmıştır. Tablo 2'de Kolmogrov-Smirnov ve Shapiro-Wilk analiz sonuçlarına göre $p<0,05$ olması nedeniyle, elde edilen veriler normal dağılıma uymamaktadır.

Bu nedenle, Tablo 7 sorusuna ait veriler için gruplar arası görüş farklılıklarını tespit etmek amacıyla Kruskal Wallis analizi yapılmıştır. Analiz sonucu grupların ortalama sıralama değerleri Tablo 3'te verilmiş ve Kruskal-Wallis analiz sonucuna göre $p>0,05$ olduğundan Tablo 7'de yer alan soru ile ilgili gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir görüş ayrılığı bulunmadığı yorumu yapılmıştır. Yani, yapı denetim sistemi uygulamasının yapı kalitesine etkisi konusunda; YDP, BTP, YM ve ŞŞ/PM gruplarının, %95 güven aralığında aynı görüşte oldukları anlaşılmaktadır.

Tablo 8. H_{01} hipotezi Kruskal-Wallis analizi sonucu

Hipotez No	Hipotez	Anlamlılık (sig.)	Açıklama
H_{01}	Yapı denetim sistemi uygulamasının yapı kalitesine etkisi konusunda; gruplar arası görüş farklılığı yoktur	0,961	Kabul

3.3 Yapı Denetim Sisteminde 2019 Yılı İtibarıyla Uygulanan Düzenlemenin Etkileri

Ankete katılanlara Yapı Denetim Kuruluşlarının UYDS üzerinden elektronik dağıtımla görevlendirilmesinin, ruhsat alınması ve uygulama aşamalarında yaptığı iş ve işlemlerde, mevzuata, plana, standartlara vb. uygunlukta artış gözlemlenmesi durumu sorulmuştur. Ankete katılanların vermiş oldukları cevapların yer aldığı Tablo 9 incelendiğinde; artış gözlemlenmesine dair tespite, belediye personeli hariç tüm paydaşların büyük ölçüde katıldıkları görülmüştür. Belediye personellerinin %50'sinin yeni mevzuat değişikliğinin yapı denetim sisteminde iyileşme etkisine katılmadıkları dikkate değerdir.

Tablo 9. Havuz sisteminin gelmesiyle yapı denetimlerindeki iyileşme yaşanma durumu

Soru No: 2	Havuz sisteminin gelmesinden sonra yapı denetim kuruluşlarının genel olarak denetimlerinde iyileşme yaşanması görüşüne katılıyor musunuz?					
Sıra No	Cevaplar	YDP%	BTP%	YM%	ŞŞ/PM%	Genel Ortalama%
1	Kesinlikle Katılıyorum	31,5	2,5	-	16,92	24,47
2	Katılıyorum	37,1	2,5	-	69,23	43,78
3	Kararsızım	2,0	18,75	-	13,85	17,53
4	Katılmıyorum	11,4	18,75	-	0	10,05
5	Kesinlikle Katılmıyorum	0	12,5	-	0	4,17

Tablo 10'da yer alan soruya verilen yanıtlar için SPSS programı ile normallik testi yapılmıştır. Tablo 2'de Kolmogrov-Smirnov ve Shapiro-Wilk analiz sonuçlarına göre $p<0,05$ olması nedeniyle, elde edilen veriler normal dağılıma uymamaktadır.

Bu nedenle, Tablo 11'da yer alan soruya ait verilerdeki gruplar arası görüş ayrılıklarını tespit etmek amacıyla Kruskal-Wallis analizi yapılmıştır. Kruskal Wallis analiz sonucuna göre $p>0,05$ olduğundan Tablo 10'da yer alan soru ile ilgili gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir görüş ayrılığı bulunmamaktadır. Buna göre YDP, BTP, YM ve ŞŞ/PM, %95 güven aralığı içinde aynı görüşte oldukları anlaşılmaktadır.

Tablo 10. H_{02} hipotezi Kruskal Wallis analizi sonucu

Hipotez No	**Hipotez**	**Anlamlılık (sig.)**	**Açıklama**
H_{02}	Yapı denetim sisteminde 2019 yılı itibariyle uygulanan düzenlemenin etkileri konusunda; gruplar arası görüş farklılığı yoktur	0,189	Kabul

3.4. Yapı Denetim Sisteminde Havuz Sistemine Geçilmesi ile İnşaat Kalitesinde Artış Durumu

Ankete katılanlara 01.01.2019 tarihinden itibaren havuz sistemine geçilmesiyle, inşaatların kalitesindeki artış durumu sorulmuştur. Ankete katılanların vermiş oldukları cevaplar Tablo 11'de verilmiştir. Tablo 11 incelendiğinde; katılımcıların, Osmaniye ilinde, 01.01.2019 tarihinden itibaren havuz sistemine geçilmesiyle, inşaatların kalitesinden artış olmuştur görüşüne büyük ölçüde katıldıkları görülmüştür.

Tablo 11. Havuz sistemine geçilmesi ile inşaat kalitesinde artış durumu

Soru No: 3	Osmaniye ilinde, 01.01.2019 tarihinden itibaren havuz sistemine geçilmesiyle, inşaatların kalitesinden artış olmasına yönelik görüşe katılıyor musunuz?					
Sıra No	Cevaplar	YDP%	BTP%	YM%	ŞŞ/PM%	Genel Ortalama%
1	Kesinlikle Katılıyorum	42,8	25	23,53	18,46	27,45
2	Katılıyorum	28,6	31,25	52,94	47,70	40,12
3	Kararsızım	17,1	31,25	0	12,31	15,16
4	Katılmıyorum	5,7	12,5	7,85	4,61	7,66
5	Kesinlikle Katılmıyorum	5,8	0	15,68	16,92	9,61

Tablo 11'de yer alan soruya verilen yanıtlar için SPSS ile normallik testi yapılmıştır. Tablo 2'de Kolmogrov Smirnov ve Shapiro-Wilk analiz sonuçlarına göre $p<0,05$ olması nedeniyle elde edilen veriler normal dağılıma uymamaktadır. Bu sebeple, Tablo 11'de yer alan sorudan elde edilen verilerdeki gruplararası görüş ayrılıklarını tespit etmek için Kruskal Wallis analizi yapılmıştır. Tablo 12'de verilen Kruskal Wallis analiz sonucuna göre $p>0,05$ olduğundan Tablo 11'de yer alan soru ile ilgili gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir görüş ayrılığı bulunmamaktadır. Yani YDP, BTP, YM ve ŞŞ/PM, Tablo 12 sorusu için, %95 güven aralığında aynı görüşte oldukları anlaşılmaktadır.

Tablo 12. H_{03} hipotezi Kruskal-Wallis analizi sonucu

Hipotez No	Hipotez	Anlamlılık (sig.)	Açıklama
H_{03}	Yapı denetim sisteminde havuz sistemine geçilmesi ile inşaat kalitesinde artış durumu hakkında; gruplar arası görüş farklılığı yoktur.	0,995	Kabul

3.5. Yapı Denetim Sisteminin 01.01.2019 tarihi öncesinde ve sonrasında denetledikleri aylık ortalama inşaat alanları

Ankete katılan yapı denetim firması çalışanlarına 01.01.2019 tarihi öncesinde ve sonrasında denetledikleri aylık ortalama inşaat alanları sorulmuştur. Ankete katılanların vermiş oldukları cevaplar Tablo 13'de ve Tablo 14'de verilmiştir. Tablo 13 incelendiğinde; yapı denetim kuruluşlarının 01.01.2019 tarihi öncesinde toplam 197,713 m^2 inşaat alanını, 01.01.2019 tarihi sonrasında ise toplam

66,316 m^2 inşaat alanını denetledikleri görülmüştür. Ayrıca 2019 öncesinde denetlenen işlerin yapı denetim firmalarına dağılımı %6,32 ile %14,19 arasında değişirken, 2019 sonrasındaki işlerin dağılımı %5,95 ile %7,31 arasında değişmektedir. Tablo 14 incelendiğinde ise, 2019 öncesi inşaat m^2 dağılımları için değişim katsayısı değerleri %25,90 iken 2019 sonrası için bu durum %6,67 olarak görülmektedir. Sonuç olarak ortaya çıkan durum, işlerin yapı denetim firmalarına dağılımının daha adil yapıldığını göstermektedir.

Tablo 13. Yapı denetim kuruluşlarının 01.01.2019 tarihi öncesi ve sonrasında denetledikleri aylık ortalama inşaat alanı değerleri ve yüzdesel oranları

	01.01.2019 Tarihi Öncesi		01.01.2019 Tarihi Sonrası	
Yapı Denetim kuruluşu	Denetlenen Aylık Ortalama İnşaat Alanları (m^2)	Toplam İnşaat alanındaki Oranı (%)	Denetlenen Aylık Ortalama İnşaat Alanları (m^2)	Toplam İnşaat alanındaki Oranı (%)
A	28.050,00	14,19	4800,00	7,24
B	20.100,00	10,16	4600,00	6,94
C	15.000,00	7,59	4850,00	7,31
D	15500,00	7,85	4290,00	6,47
E	16000,00	8,10	4375,00	6,60
F	13000,00	6,57	4565,00	6,88
G	12500,00	6.32	3950,00	5.95
H	18000,00	9,10	4100,00	6,18
I	17500,00	8,86	4450,00	6,71
İ	13750,00	6,95	4750,00	7,16
J	13750,00	6,95	4687,00	7,07
K	14563,00	7,36	4563,00	6,88
L	0,00	0,00	4089,00	6,17
M	0,00	0,00	4075,00	6,14
N	0,00	0,00	4172,00	6,30
TOPLAM	197.713,00	100,00	66.316,00	100,00

Tablo 14. Yapı denetim kuruluşlarının 01.01.2019 tarihi öncesi ve sonrasında denetledikleri aylık ortalama inşaat alanı verilerine göre tanımlayıcı istatistikler

	N	Değişim aralığı	En küçük değer	En büyük değer	Aritmetik Ortalama	Standart sapma	Değişim katsayısı (%)
2019 öncesi	12	1555	12500	28050	16476,083	4266,493	25,9
2019 sonrası	15	900	3950	4850	4421,0667	294,783	6,67

3.6. 2019 yılı öncesi ve 2019 yılı sonrası inşaat kalitesi ve yapı denetimdeki iyileşme ilişkisi

2019 yılı öncesi ve 2019 yılı sonrası inşaat kalitesi ve yapı denetimindeki iyileşme ilişkisini ölçmek amacıyla $\mathbf{H_{04}}$, $\mathbf{H_{05}}$ ve $\mathbf{H_{06}}$ için Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi kullanılmıştır. Tablo 15'de Wilcoxon İşaretli Sıralar test sonucu verilmiştir.

Tablo 15. Wilcoxon İşaretli Sıralar testi analizi sonucu

Hipotez No	Hipotez	Anlamlılık (sig.)	Açıklama
H_{04}	2011 yılı sonrası ile 2019 yılı sonrası arasında değişen mevzuatın inşaat kalitesine etkisi konusunda; katılımcılar arasında görüş farklılığı yoktur	0,312	Kabul
H_{05}	2019 yılı itibariyle yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine etkisi ile 2019 yılı itibariyle yapı denetiminde iyileşme etkisi arasında, katılımcılar arasında görüş farklılığı yoktur	0,01	Red
H_{06}	2019 yılı öncesi ve 2019 yılı sonrasında yapı denetiminde iyileşme etkisi konusunda; katılımcılar arasında görüş farklılığı yoktur	0,00	Red

Her iki soru grubu için ayrı ayrı Wilcoxon İşaretli Sıralar Test sonuçları aşağıda verilmiştir.

H_{04} hipotezi için; 2011 yılı itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi, 2019 yılı itibariyle havuz sistemine geçilmesi ile inşaat kalitesinde artış durumu ile ilgili verilere ait tarafların görüş birliğinde olmalarına rağmen, taraflar dikkate alınmadan genel olarak, her iki durum için, inşaat kalitesine etkisindeki değişim arasında anlamlı bir fark bulunup bulunmadığı Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi ile analiz edilmiştir. Test sonucu Tablo 15'de verilmiştir. Bu sonuca göre, $p<0,05$ olmadığından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığı belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, 2011 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine etkisindeki değişim ile 2019 yılı havuz sisteminin gelmesiyle yapı denetimlerdeki iyileşme yaşanması değişimi arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Her iki mevzuat değişikliği durumunda da birbirine yakın seviyede iyileşme olduğu anlaşılmaktadır.

H_{05} hipotezi için; 2019 yılı itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi ve 2019 yılı itibariyle havuz sisteminin gelmesiyle yapı denetimlerindeki iyileşme yaşanması ile ilgili verilerde tarafların görüş birliğinde olmalarına rağmen, taraflar dikkate alınmadan genel olarak, inşaat kalitesine etkisindeki değişim ile yapı denetim sistemi uygulamasındaki iyileşme değişimi arasında anlamlı bir fark bulunup bulunduğu Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi ile analiz edilmiştir. Test sonucu Tablo 15'de verilmiştir. Bu sonuca göre, $p<0,05$ olduğundan istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunduğu belirlenmiştir. Tablo 16'da verilen ortalama sıralamaya göre, 2019 yılı havuz sisteminin gelmesiyle yapı denetimlerdeki iyileşmeye olan etkisinin, 2019 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine olan etkisine göre istatistiksel olarak daha fazla olduğu etkisi olduğu belirlenmiştir.

Tablo 16. H_{05} hipotezi için Wilcoxon işaretli sıralar testi ortalama sıralama değerleri

	Ortalama sıralama
Pozitif sıralama	84,77
Negatif sıralama	72,16

H_{06} hipotezi için; Tablo 7'de 2011 yılı itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi ve Tablo 11'de 2019 yılı itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi ile ilgili verilere ait tarafların görüş birliğinde olmalarına rağmen, taraflar dikkate alınmadan genel olarak, 2011 ile 2019 yıllarına göre inşaat kalitesine etkisindeki değişim arasında anlamlı bir fark bulunup bulunmadığı Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi ile analiz edilmiştir. Test sonucu Tablo 15'de verilmiştir.

Bu sonuca göre, p<0,05 olduğundan istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunduğu belirlenmiştir. 2011 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine etkisindeki değişim ile 2019 yılı itibariyle yapı denetim sistemi uygulamasının inşaat kalitesine etkisi arasında anlamlı bir fark bulunmaktadır. Tablo 17'de sorulara ait ortalama sıralama değerleri dikkate alındığında, 2019 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesindeki değişim, 2011 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesindeki iyileşmeye göre daha fazla etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 17. H_{06} hipotezi için Wilcoxon işaretli sıralar testi ortalama sıralama değerleri

	Ortalama sıralama
Pozitif sıralama	76,26
Negatif sıralama	75,40

Yapı denetim mevzuatında 2018 yılında yayımlanan değişiklik ile ilgili herhangi bir literatür çalışmasına rastlanılmamıştır. Mevzuattaki değişikliğin yapı denetim sistemine etkisinin ne olduğunun belirlenmesine yönelik bir literatür boşluğu bulunmaktadır. Bu boşluğun giderilmesine yönelik olan bu çalışmada elde edilen bulgular; mevzuatta yapılan değişikliklerle birlikte, yapı denetim sisteminde birtakım iyileştirmeler olduğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışmada; Osmaniye ilinde faaliyet gösteren yapı denetim kuruluşlarında çalışan denetçiler ve yardımcı kontrol elemanları ile yapı denetim sisteminin uygulanmasında önemli görevleri bulunan şantiye şefleri, proje müellifleri, yapı müteahhitleri, ruhsat düzenleyen idarelerde yapı denetimi ve yapı ruhsatı servislerinde çalışan teknik personelin, görevleri ve sorumlulukları çerçevesinde Bakanlık tarafından getirilen havuz sisteminin, yapı denetim kuruluşlarının denetleyebildikleri inşaat alanlarının dağılımına ve yapı denetim kalitesine etkisi, mevcut sistemin yapı kalitesine etkisi ile ilgili görüşleri, yapılan bir anket çalışması ile belirlenmiştir. Anket çalışması neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Yapı denetim firmalarının denetledikleri toplam inşaat alanındaki dağılımın, havuz sisteminin yürürlüğe girmesinin sonrasında daha adil hale geldiği görülmektedir.
- 1/1/2011 tarihi itibarı ile yapı denetimi uygulamasına geçilmesi ile inşaat kalitesinde artış olduğu, 1/1/2019 tarihi itibarı ile yapıları denetleyecek olan kuruluşların elektronik ortamda tespit edilmesi ve buna bağlı olarak yapı denetim kuruluşları tarafından yapılan denetimlerde iyileşme olduğu görülmüştür.
- 2011 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine etkisindeki değişim ile 2019 yılı havuz sisteminin uygulanması ile yapı denetiminde iyileşme arasında anlamlı bir farklılık bulunmamıştır.

- 2019 yılında havuz sisteminin uygulamaya geçmesi ile yapı denetimlerdeki iyileşmeye olan etkisinin, 2019 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine olan etkisine göre istatistiksel olarak daha fazla etkisi olduğu görülmüştür.
- 2019 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesindeki değişim, 2011 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesindeki iyileşmeye göre daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

Bu sonuçlar dikkate alındığında, yapı denetim sisteminde havuz sisteminin firmalara dağıtılan işler hususunda adil bir düzen getirdiği ancak 2011 yılı ve 2019 yılındaki inşaat kalitesinin havuz sistemi gelmesiyle sistemde iyileşmeyi etkilemediği anlaşılmaktadır. Ayrıca 2011 yılındaki yapı denetimlerdeki iyileşmeye nazaran, 2019 yılı yapı denetim sisteminin inşaat kalitesine etkisinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Yapı denetim sistemindeki iyileşme, 2011 ve 2019 yılları mevzuat değişikliğine bağlı değişmemiştir ancak inşaat kalitesinde farklılık belirlenmiştir.

5. Öneriler

Yapı üretiminin denetimi; ruhsat düzenleyen idarelerin, yapı denetim kuruluşlarının, yapı sahiplerinin, yapı müteahhitlerinin ve proje müelliflerinin müşterek hareket ettiği çok paydaşlı bir sistemdir. Havuz sisteminin yapı denetim sistemine olumlu etkisi olduğu açıktır. 2023 depremlerinde ağır hasar alan ya da yıkılan yapılar yeni yapılar göz önüne alındığında, bu çalışmanın sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde; mevzuat değişikliğinin yapı denetiminin kalitesinde iyileşmeye olan etkisinin yeterince olmadığını göstermiştir görülmektedir. Bu bağlamda, yapıların denetiminin daha düzgün ve iyi şartlarda yapılabilmesi amacıyla aşağıda belirtilen öneriler sıralanmıştır.

- Yapı denetim kuruluşlarının özellikle m^2'si düşük olan yapıların denetimini üstlenmede isteksiz davranmalarının önüne geçmek amacıyla il merkezi baz alınarak belirli bir km sınırı belirlenmeli ve o km sınırını aşan yapıları denetleyecek yapı denetim firmalarının ücretlendirmesinde mesafeye (km) göre kademeli bir artış getirilmelidir. Uzaklık kriterinin Bakanlık tarafından otomatik hesaplanacak şekilde bir modül ile uygulanması tavsiye edilmektedir.
- Özellikle müstakil yapılarda, hem yapı sahiplerinin ücretlendirme konusunda hem de yapının denetimini üstlenecek yapı denetim kuruluşlarının hizmet sağlama konusunda mağduriyet yaşanmaması amacıyla yasal mevzuatta bağımsız bölüm sayısı, kat sayısı vb. kriterlerinin de göz önünde bulundurularak atama yapılmasının sağlanması önerilmektedir.
- İşlerin yapı denetim firmalarına adil dağıtılmasıyla birlikte, yapı denetim çalışanlarının işleri takibinin yanlızca evrak üzerinde değil, uygulamalı olarak yapılması gerekmektedir.
- Çalışanların görevlerini yerine getimemeleri halinde, yaptırımların daha fazla olması gerekmektedir.
- Çalışanların ücretlerinin, firmalar tarafından değil, havuzda biriken paradan, devletin belirlediği miktarda, devlet tarafından ödenmesi, çalışanların işlerini daha iyi yapmaları hususunda onları pozitif yönde etkileyecektir.

- Yapı denetim firmalarının denetlenmesinin daha sık yapılması ve daha caydırıcı cezaların uygulanması önerilmektedir.
- Yapı sahiplerinin yapı denetim hizmetlerini de kapsayan yapı yaşam döngüsündeki tüm aşamalarda gerekli ve yeterli bilgi sahibi olması beklenemez ancak konuyla ilgili danışmanlık hizmeti alabilir ve bu durumun genel olarak kalite, maliyet ve zaman açısından oldukça etkili olacağı açıktır (Budak ve ark. 2024, Budak ve Karataş 2019, Budak ve Karataş 2022).

Yapı denetimi içinde önemli olduğu düşünülen 4 farklı grubu içeren bu çalışmanın, elde edilen genel sonuçlarına ilave olarak gelecekte yapılacak çalışmalar için de yön gösterici olması amaçlanmıştır. Çalışmada yer alan meslek gruplarının ayrı ayrı incelenmesiyle araştırma içeriği genişletilebilir, geliştirilebilir ya da özelleştirilebilir. Ayrıca 2011 yılından bu yana Türkiye geneli bütün illerde uygulanmasına başlanan yapı denetimi ile ilgili kanun ve yönetmeliklerin, inşaat sektörü üzerine etkilerini tespit etmek için yapılacak araştırmalarda, bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan faydalanılabilir.

Kaynakça

Açıkel DA. Yapı denetiminin kalite üzerine etkisi ve Konya örneği. Konya Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Yüksek Lisans Tezi, 1998.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 18.03.2018, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm , Erişim Tarihi: 01.09.2023.

Akbıyıklı R., Opçin G., Akdemir M., Gündüz E. Türkiye'de yapı denetim kavramı, amacı, yasal dayanağı ve uygulamaları üzerine bir inceleme. Uluslararası Katılımlı 7. İnşaat Yönetimi Kongresi 2017; 217-229.

Bakanlar Kurulu Kararı, 18.03.2018, "Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve Parametre Değerleri Hakkında Karar" https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.htm Resmi Gazete Erişim Tarihi: 22.08.2023.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 03.06.1985, "3194 sayılı İmar Kanunu". https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=3194&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5. , Erişim Tarihi: 16.08.2023.

Bayraktar S. Yapı denetiminin dünyadaki uygulamaları ve Türkiye'deki gelişimi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2001.

Bayram S., Aydınlı S., Budak A., Oral E. Ethical problems in the production and inspection of construction in Turkey. Pamukkale Univ. J. Eng. Sci., 2018; 24(3): 461–467.

Boysal VB. 4708 sayılı yapı denetimi hakkında kanun kapsamındaki yapı denetim sistemi ve sorunları üzerine bir saha çalışması, Osmaniye ili örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Yüksek Lisans Tezi, 2022.

Budak A., Karataş İ. Danışmanın, tasarım öncesi, tasarım ve yapım öncesi aşamalarında BIM sistemindeki rolünün literatür kapsamında incelenmesi. Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Techn 2019; 2(1): 89-96.

Budak A., Karataş İ. Impact of the BIM system in construction management services in developing countries; Case of Turkey. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 28(6): 828–839.

Budak A., Oral E. The level of training in consultancy services in construction management in Türkiye. Hendese Tek. Bilim. Müh. Dergisi 2024; 1(2): 85–90.

Budak A., Öcal ME., Oral EL. Consultancy and owner representation service in construction management. BIDGE Publications, Ankara, 2024.

Bülbül S. Kruskal wallis testi ve friedman testinin alternatif parametrik tekniklerle karşılaştırılması ve bazı parametrik parametrik olmayan çoklu karşılaştırma yöntemleri ile incelenmesi. Öneri Dergisi 2001; 4(15): 89-96.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 13.07.2001, "4708 Sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun". https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=4708&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5., Erişim Tarihi: 17.08.2023.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 05.02.2008, "Yapı Denetim Uygulama Yönetmeliği". https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=11951&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5. Erişim Tarihi: 21.08.2023.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 03.07.2017, "Planlı Alanlar İmar Yönetmeliği". https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=23722&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5. Erişim Tarihi: 21.08.2023.

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 29.12.2018, "Yapı Sahipleri İle Yapı Denetimi Hizmet Sözleşmesi İmzalayacak Yapı Denetim Kuruluşlarının Elektronik Ortamda Belirlenmesine İlişkin Usul ve Esaslara Dair Tebliğ", https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2023/03/20230309-3.htm Erişim Tarihi: 03.09.2023.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 11.01.2019, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Kapsamında Yapılacak Tasarım Gözetimi ve Kontrolü Hizmetlerine Dair Tebliğ", https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/01/20190111-7.htm , Erişim Tarihi: 07.09.2023.

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 02.03.2019, "Yapı Müteahhitlerinin Sınıflandırılması ve Kayıtlarının Tutulması Hakkında Yönetmelik", https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/12/20221229-1.htm Erişim Tarihi: 04.09.2023.

Demir MŞ. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yapı denetimi uygulaması ve yeni bir yapı denetimi modeli önerisi. Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman, Türkiye, 2017.

Divine G., Norton HJ., Hunt R., Ronald M., Jacqueline D. A review of analysis and sample size calculation considerations for Wilcoxon tests. International Anesthesia Research Society 2013; 117(3): 699-710.

Doğan A. Ankara'da yapı denetim sorunlarının belirlenmesiyle ilgili bir saha çalışması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye, 2013.

Erdiş E., Gerek İH. Yapı denetim sürecinde karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri. e-Journal of New World Sciences Academy 2012; 7(1): 291-298.

İç İşleri Bakanlığı, 02.05.2018, "TS 10970 Formlar-Yapı Kullanma İzin Belgesi Standardına ve TS 8737 "Yapı Ruhsatı" Standardına İlişkin Tebliğ", https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/08/20190824-5.htm Erişim Tarihi: 01.09.2023.

İnce HH., Soylu EN. 6 ŞUBAT 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası yapı denetim sisteminin değerlendirilmesi. Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 2024; 2(8): 172-181.

Karahan AY. İstanbul'da faaliyet gösteren yapı denetim şirketlerinin uygulamaya yönelik karşılaştıkları sorunlar ve çözüm önerilerine yönelik bir araştırma. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2008.

Karaoğlu E. 4708 sayılı yapı denetim kanununun denetimdeki verimliliği. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2011.

Kural R. İnşaat sektöründe yapı denetimi ve Afyonkarahisar ilindeki uygulamaların araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Afyon, Türkiye, 2015.

Öcal ME., Pancarcı A. Yapı işletmesi ve maloluş hesapları. Birsen Yayınevi, Ankara, 2008.

Özmen B. 17 Ağustos İzmit körfezi depreminin hasar durumu. Türkiye Deprem Vakfı, Ankara, 2020.

Özdemir H. Problems of building ınspection companies and problems in the construction inspection system: Muğla example. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Muğla, Türkiye, 2018.

Sakallı F. Yapı denetim sisteminde yaşanan sorunlar, 4708 sayılı yapı denetim hakkında kanun'daki eksiklikler ve çözüm önerileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 2008.

Taber KS. The use of Cronbach's Alpha When developing and reporting research ınstruments in science education. Res Sci Educ 2018; 48: 1273-1296.

Ünal C. Yapı denetim firmalarının sorunlarının belirlenmesi ve Adana örneği. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2017.

Yağız S. Türkiye'de yapı denetimi uygulaması ve konut niteliğine etkisi: Bursa alan araştırması. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, Türkiye, 2019.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 214-224, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 214-224, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

PEM Elektrolizörlerde Nem Yönetimi: Gaz Difüzyon Katmanı Tasarım Optimizasyonlarının Flooding Üzerindeki Etkileri

Davut SEVİM[1*], Muhammed Yusuf PİLATİN[2]

[1,2]Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,72100, Batman

[1]https://orcid.org/0000-0002-0227-4772
[2]https://orcid.org/0009-0008-4190-6294
*Sorumlu yazar: davut.sevim@batman.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 08.04.2025
Kabul tarihi:26.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
PEM elektroliz
Gaz difüzyon katmanı
Flooding
Nem

ÖZ

Proton Değişim Membranlı (PEM) elektrolizörlerde nem yönetimi, sistem verimliliğini doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Nem, proton iletkenliğini artırarak elektrokimyasal reaksiyonları desteklerken, aşırı birikimi (flooding) gaz difüzyonunu engelleyerek sistem performansını %20-30 oranında düşürür. Bu çalışmada, nemin PEM elektrolizörlerdeki etkileri, flooding mekanizmaları ve Gaz Difüzyon Katmanı (GDL) tasarım optimizasyonlarının bu sorunu hafifletmedeki rolü ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hidrofobik kaplamalar, gradyan gözenek yapıları, mikrokanallar ve hibrit malzeme kombinasyonları gibi GDL tasarımları, su tahliyesini iyileştirerek flooding riskini %15-30 oranında azaltmaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda, yapay zekâ tabanlı nem kontrol sistemleri, radyal akış kanallı GDL'ler ve grafen bazlı hibrit malzemelerin flooding azaltmada yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir. Bu çalışma, GDL tasarımlarını sınıflandırarak, her yöntemin düşük sıcaklık, yüksek akım yoğunluğu veya endüstriyel uygulamalar gibi farklı koşullarda tercih edilebilirliğini değerlendirir ve teknik öneriler sunar.

Moisture Management in PEM Electrolyzers: Effects of Gas Diffusion Layer Design Optimizations on Flooding

Research Article

Article History:
Received: 08.04.2025
Accepted: 26.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
PEM electrolyze
Gas diffusion layer
Flooding
Humidity

ABSTRACT

Moisture management in Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyzers is a critical factor directly affecting system efficiency. While moisture enhances proton conductivity and supports electrochemical reactions, excessive accumulation (flooding) hinders gas diffusion, reducing system performance by 20-30%. This study comprehensively examines the effects of moisture in PEM electrolyzers, flooding mechanisms, and the role of Gas Diffusion Layer (GDL) design optimizations in mitigating this issue. GDL designs, such as hydrophobic coatings, gradient pore structures, microchannels, and hybrid material combinations, improve water drainage, reducing flooding risk by 15-30%. Recent studies indicate that AI-based moisture control systems, radial flow channel GDLs, and graphene-based hybrid materials offer innovative solutions for flooding reduction. The study classifies GDL designs, evaluates their suitability for conditions like low temperature, high current density, or industrial applications, and provides technical recommendations.

To Cite: Sevim D., Pilatin MY. PEM Elektrolizörlerde Nem Yönetimi: GDL Tasarım Optimizasyonlarının Flooding Üzerindeki Etkileri. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 214-224.

1. Giriş

Proton Değişim Membranlı (PEM) elektrolizörler, sürdürülebilir hidrojen üretimi için en verimli teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir (Carmo ve ark., 2013). Bu sistemler yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilerek, suyun elektrokimyasal ayrışması yoluyla yüksek saflıkta hidrojen elde edilmesine olanak tanır. Elektroliz sürecinde, su molekülleri anotta oksijen ve protonlara ayrışırken ($2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$), protonlar membran üzerinden katoda taşınarak hidrojen gazı oluşturur ($4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$) (Barbir, 2005; Grigoriev ve ark., 2006). Ancak, elektroliz sürecinin verimliliği, sistemin nem yönetimine kritik ölçüde bağlıdır (Ito ve ark., 2011). Nem, protonların membran boyunca taşınmasını sağlayarak elektrokimyasal reaksiyonların sürekliliğini destekler. Yetersiz nemlendirme, membranın iletkenliğini azaltarak sistem verimini düşürür (Li ve ark., 2008). Bununla birlikte, aşırı su birikimi (flooding) elektrotlarda gaz çıkışını engelleyerek reaksiyon yüzeyini kapatır ve sistem performansını olumsuz etkiler (Park ve ark., 2007; Bakangura ve ark., 2016). Bu nedenle, optimal nem seviyesinin sağlanması hem proton iletkenliğini artırmak hem de gaz difüzyonunu engellemeden verimli bir elektroliz süreci yürütmek açısından kritik bir gerekliliktir (Anderson ve ark., 2010).

Flooding, suyun elektrot yüzeyinde ve Gaz Difüzyon Katmanında (GDL) birikmesiyle oluşur. Bu durum, gaz kabarcıklarının elektrot yüzeyinden uzaklaştırılmasını zorlaştırarak reaksiyon bölgelerinin aktifliğini sınırlar (Weber ve Newman, 2004; Karanfil, 2020). Son yıllarda, GDL tasarımı flooding'i azaltmak için yenilikçi çözümler sunmuştur. Hidrofobik kaplamalar, gradyan gözenek yapıları, mikrokanallar ve hibrit malzemeler gibi yenilikçi GDL tasarımları, suyun etkin bir şekilde tahliye edilmesini sağlayarak verimliliği artırır (Wang ve ark., 2011; Genç ve Kallioğlu, 2018; Meyer ve ark., 2023; Alkhaldi ve ark., 2025). Örneğin, platin kaplı titanyum GDL'ler, yüksek basınçlı sistemlerde flooding'i azaltarak dayanıklılığı artırır (Kuhnert ve ark., 2024). Yeni GDL tasarımlarının (ör. radyal akış kanalları, grafen bazlı hibrit malzemeler) ve yapay zekâ tabanlı nem kontrol sistemlerinin flooding kayıplarını %15-30 azalttığını göstermektedir (Vlachaki ve ark., 2024; Hassan ve ark., 2024; Wang ve ark., 2025).

GDL'nin yapısal özellikleri, yalnızca su yönetimi açısından değil, aynı zamanda elektrot yüzeyiyle gaz etkileşimini iyileştirme bakımından da kritik rol oynar. Özellikle gözenek dağılımının optimize edilmesi, gaz ve sıvı fazların dengeli bir şekilde hareket etmesini sağlayarak sistemin uzun vadeli dayanıklılığını artırır (Nam ve Kaviany, 2003; Dalğıç, 2019). Son yıllarda yapılan araştırmalar, GDL'de gradyan gözenek yapısının ve ileri malzeme kombinasyonlarının kullanılmasıyla su yönetiminin iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu tasarımlar sayesinde, elektroliz sürecinde hidrojen ve oksijen üretimi daha stabil hale getirilerek sistem verimi artırılmaktadır (Agmon, 1995; Zenyuk ve ark., 2015).

Yüksek basınçlı PEM elektrolizörler (200-350 bar), endüstriyel uygulamalarda enerji verimliliğini artırırken, gaz geçişi ve flooding riskini yükseltir (Wang ve ark., 2025). Bu bağlamda, GDL'nin gözeneklilik, kalınlık ve akış kanalı tasarımı gibi parametrelerinin optimizasyonu kritik önem taşır (Özdemir ve ark., 2024). Örneğin, 0.08 ml cm^{-2} min^{-1} su akış hızı, anotta elektrokimyasal reaksiyonlar

için yeterli su sağlarken flooding'i minimize eder (Alkhaldi ve ark., 2025). Ayrıca, aralıklı çalışan fotovoltaik entegreli sistemlerde GDL degradasyonu ve flooding ilişkisi üzerine yapılan çalışmalar, yeni hibrit malzemelerin uzun vadeli performansı iyileştirdiğini ortaya koymaktadır (Wallnöfer-Ogris ve ark., 2024).

Bu çalışma, PEM elektrolizörlerde nem yönetiminin önemini ve flooding mekanizmalarını detaylı olarak incelerken, GDL tasarım optimizasyonlarının (hidrofobik kaplamalar, gradyan gözenekler, mikrokanallar, hibrit malzemeler) bu sorunu hafifletmedeki etkilerini değerlendirir. Son yıllardaki literatüre dayalı olarak, farklı GDL tasarımlarının uygulama koşullarına (sıcaklık, akım yoğunluğu, basınç) göre avantajları ve sınırlamaları sınıflandırılmış ve hangi yöntemin hangi senaryoda tercih edileceğine dair teknik öneriler sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Proton Değişim Membranlı (PEM) elektrolizörlerde nem yönetimi ve Gaz Difüzyon Katmanı (GDL) tasarımlarının flooding üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Aşağıda, nem-verim ilişkisi, flooding mekanizmaları ve deneysel metodoloji detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

2.1. Nem ve Verim İlişkisi

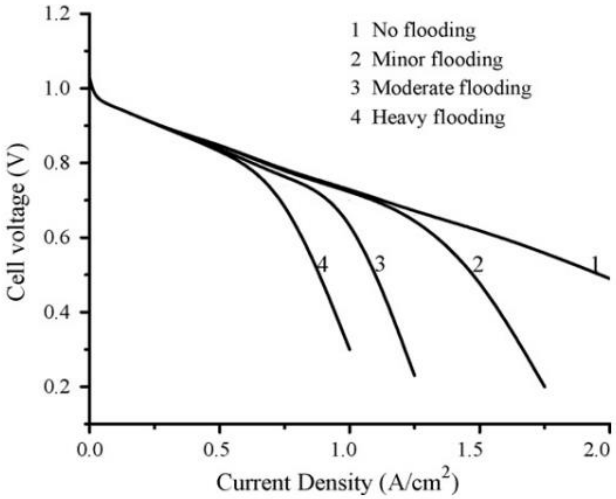
PEM elektrolizörlerde nem, Nafion gibi membranların proton iletkenliğini belirleyen temel bir faktördür. Yetersiz nem, protonların (H^+) anottan katoda taşınmasını zorlaştırarak gaz üretim verimini azaltır (Bakangura ve ark., 2016). %80-100 bağıl nem aralığı, proton hareketliliğini optimize ederek hidrojen ve oksijen üretimini artırırken, elektrotlarda su birikimini (flooding) önler (Nam ve Kaviany, 2003). Ancak, aşırı nemlenme, gaz difüzyonunu engelleyerek performansı düşürebilir. Sıcaklık, nemin membran üzerindeki etkisini doğrudan şekillendiren bir değişkendir. 40°C'nin altındaki sıcaklıklarda su buharlaşmaz ve sıvı fazda birikme eğilimi gösterirken, 80°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yetersiz nemlendirme membranın kurumasına ve iç direncin artmasına neden olur (Genç ve Kallioğlu, 2018). Optimum sıcaklık aralığı olan 60-80°C, sabit su beslemesi ve kontrollü nemlendirme ile en yüksek verimi sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, %90 bağıl nem seviyesinde proton iletkenliğinin maksimuma ulaştığını ve gaz üretiminde %20'ye varan bir artış sağlandığını göstermektedir (Dalğıç, 2019). Buna karşın, kuru membranlar ile reaksiyon hızında %30'a varan bir azalma meydana gelebilmektedir (Barbir, 2005).

2.2. Flooding: Mekanizma ve Etkileri

Flooding, PEM elektrolizörlerde elektrotların veya GDL aşırı su ile dolarak gaz akışının engellenmesi durumudur. Bu olay, sistem verimini düşürerek hidrojen ve oksijen üretimini kısıtlar (Barbir, 2005). Flooding' in oluşumu, aşağıda detaylandırılan mekanizmalar doğrultusunda değerlendirilmiştir:

2.2.1. Su Birikiminin Başlangıcı

Anotta su molekülleri, oksijen, protonlar ve elektronlara ayrışır ($2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$). Üretilen oksijen gazı, gözenekli GDL yapısı üzerinden tahliye edilir. Ancak su girişi fazla olduğunda veya reaksiyon artıkları gözeneklerde biriktiğinde, gaz çıkışı zorlaşır. Katotta ise protonlar hidrojen gazına dönüşmektedir ($4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$). Yüksek akım yoğunluklarında su üretimi arttığından flooding riski yükselmektedir (Şekil 1) (Bakangura ve ark., 2016; Karanfil, 2020).



Şekil 1. PEM yakıt hücresinin su taşkınlarının hücre performansı üzerindeki etkisini gösteren polarizasyon eğrileri: (1) su baskını yok; (2–4) artan su baskını (Li ve ark., 2008).

2.2.2. Gözenek Tıkanması ve Difüzyon Engeli

GDL'nin karbon fiber bazlı gözenekli yapısı, gazların katalizör yüzeyine ulaşmasını sağlar. Ancak, su gözenekleri doldurduğunda oksijen ve hidrojenin difüzyon yolları kapanır. Bu durum, katalizör yüzeyindeki aktif bölgelerin gazlarla temasını engelleyerek reaksiyon oranlarını düşürmektedir. Yapılan çalışmalar, flooding' in gaz difüzyon katsayısını %40 oranında azalttığını göstermektedir (Dalğıç, 2019).

2.2.3. Elektriksel ve Mekanik Etkiler

Flooding, elektrotlar arası iç direnci artırarak proton geçişini zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda, hidrojen saflığını düşürerek basınç dalgalanmalarına yol açabilir (Genç ve Kallioğlu, 2018). Uzun süreli flooding, GDL'nin mekanik yapısını bozabilir, gözeneklerin çökmesine ve katalizör tabakasının ayrılmasına neden olabilir (Bakangura ve ark., 2016).

2.2.4. Flooding' in Görülme Sıklığını Etkileyen Koşullar

Flooding' in oluşumu, sistemin çalışma koşullarına bağlı olarak değişmektedir:

- Düşük sıcaklıklar (<40°C): Su buharlaşmasını azaltarak sıvı suyun birikmesine neden olur.
- %100 bağıl nem: Aşırı nemlenme su yoğunlaşmasını artırarak flooding riskini yükseltir.
- Düşük gaz akış hızları: Su tahliyesinin yetersiz kalmasına neden olabilir.

- Yüksek akım yoğunlukları: Artan su üretimi tahliye kapasitesini aşabilir (Li ve ark., 2008).

Yapılan deneysel çalışmalar, flooding' in gaz üretimini %20-30 oranında düşürdüğünü ve sistemin kararlılığını bozduğunu göstermektedir (Dalğıç, 2019).

2.3. GDL Tasarım Optimizasyonları

Gaz Difüzyon Katmanı (GDL) (Şekil 2), gaz difüzyonunu ve su tahliyesini optimize eden kritik bir bileşen olup, flooding' in önlenmesi için çeşitli yenilikçi yaklaşımlar geliştirilmiştir.

2.3.1. Hidrofobik Kaplamalar

PTFE bazlı malzemeler, suyun gözeneklere nüfuzunu önleyerek tahliye kanallarına yönlenmesini sağlayarak (Barbir, 2005), flooding kayıplarını %15-25 oranında azaltır ve gaz yollarını açık tutar (Dalğıç, 2019). Meyer ve ark., (2023), floropolimer kaplamaların yüksek sıcaklıklarda stabilitesi rapor edilmiştir.

2.3.2. Gradyan Gözenek Yapıları

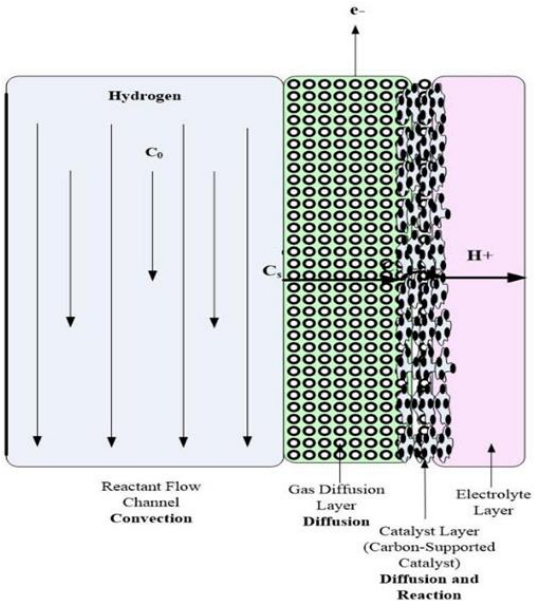
Küçük gözenekler (5-10 μm) gaz akışını optimize ederken (Bakangura ve ark., 2016), büyük gözenekler (50-100 μm) su tahliyesini iyileştirerek su birikimini %30 oranında azaltır ve gaz difüzyonunu artırır (Genç ve Kallioğlu, 2018).

2.3.3. Mikrokanallar

20-50 μm genişliğindeki kanallar sayesinde suyun tahliye çıkışlarına yönlenmesini sağlayarak (Wang ve ark., 2011) gaz üretiminde %20'ye varan artış elde edilmesine katkı sunar ve flooding' i önler (Dalğıç, 2019). Chen ve ark., (2024)' te lazerle işlenmiş mikrokanalların verimi artırdığı rapor edilmiştir.

2.3.4. Hibrit Malzemeler

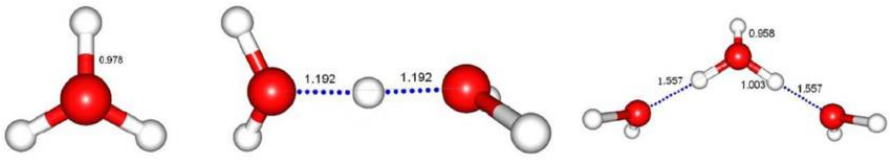
Grafen ve karbon nanotüplerin kullanımı, GDL'nin hem hidrofobik hem de iletken hale gelmesini sağlayarak (Genç ve Kallioğlu, 2018) su tahliyesinde %10-20 oranında iyileşme sağlarken elektriksel iletkenliği artırır (Barbir, 2005; Bakangura ve ark., 2016).



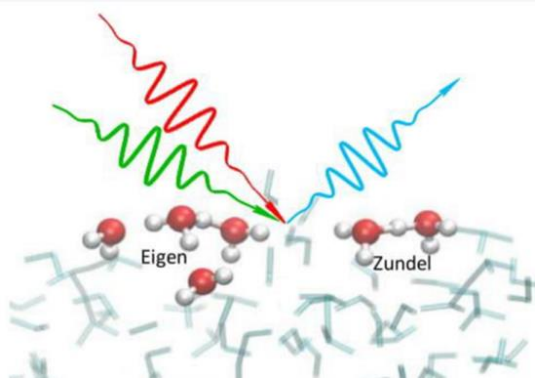
Şekil 2. PEM yakıt hücresinin içyapısındaki Gaz difüzyon katmanı (Web 1, 2025)

2.4. Grotthuss Mekanizması ve Nem-İletkenlik İlişkisi

Grotthuss mekanizması, protonların su molekülleri arasında hidrojen bağı ağı boyunca sıçrama (proton hopping) yoluyla iletilmesini açıklar (Agmon, 1995). PEM elektrolizörlerde, bu mekanizma protonların membrandan katoda etkin bir şekilde geçişini sağlamaktadır. Yüksek nem seviyelerinde (%80-100), Eigen ($H_9O_4^+$) ve Zundel ($H_5O_2^+$) (Şekil 3) katyonlarının dengeli oluşumu proton iletkenliğini artırır (Kreuer, 1996). Ancak, flooding durumu aşırı su birikmesine yol açarak bu mekanizmayı sekteye uğratabilir. Kim ve ark., (2024)' te simülasyonlarla Grotthuss mekanizmasının optimizasyonu rapor edilmiştir. GDL tasarımı, nem yönetimi ve sıcaklık optimizasyonu gibi faktörlerin dikkatlice kontrol edilmesi, PEM elektrolizörlerin verimli çalışmasını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Gelecekteki araştırmalar, bu mekanizmaların daha iyi anlaşılmasını sağlayarak verimliliği artırmaya yönelik yeni stratejiler geliştirebilir (Şekil 4) (Marx ve ark., 1999).



Şekil 3. Eigen ve Zundel katyonlarının denge geometrisi (Prakash ve ark., 2023)



Şekil 4. Eigen ve Zundel Katyonlarının etkileşimi simülasyonu (Marx ve ark., 1999)

3. Bulgular ve Tartışma

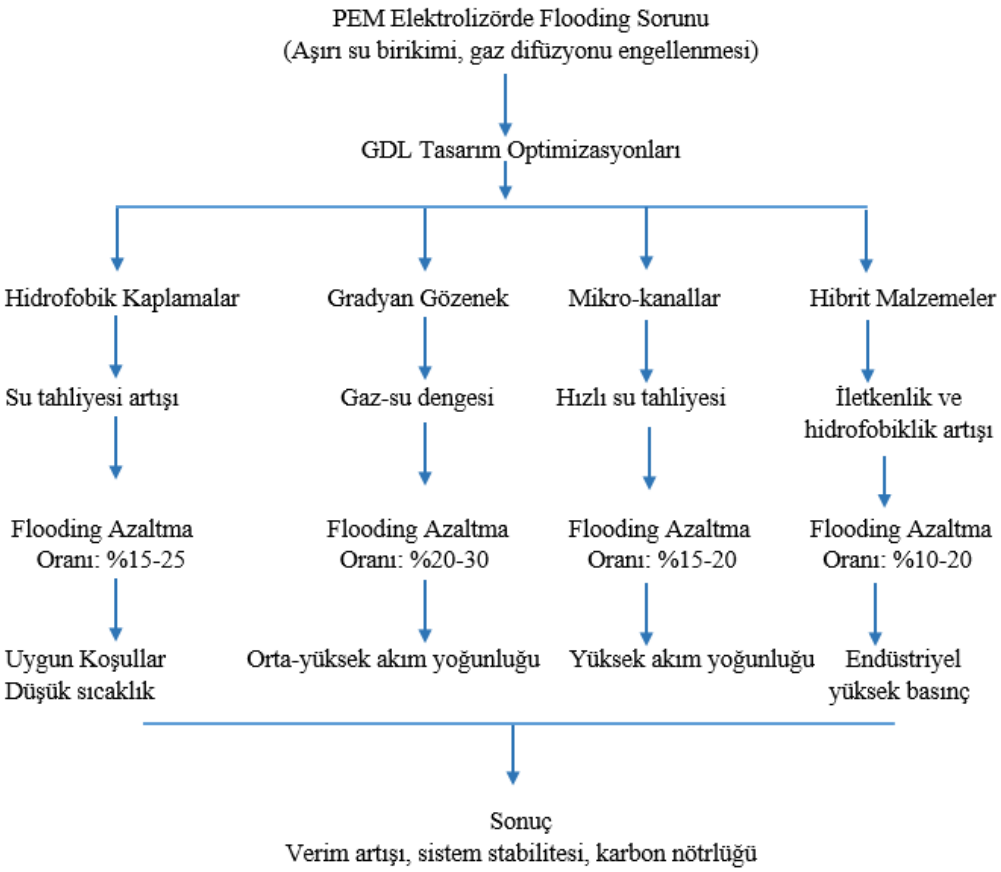
Bu çalışmada, PEM elektrolizörlerde nem yönetiminin çift yönlü etkisi ve flooding'in sistem verimi üzerindeki sonuçları detaylı olarak incelenmiştir. Nem seviyesinin yetersiz olması proton iletimini sınırlarken, aşırı nemin gaz difüzyonunu engellediği ve bunun sonucunda flooding oluşumuna yol açtığı belirlenmiştir. Flooding, elektrot yüzeylerinde sıvı su birikmesi nedeniyle reaktan gazların katalizör yüzeyine ulaşmasını kısıtlayarak elektrokimyasal reaksiyonları olumsuz etkilemektedir (Wang ve ark., 2025).

Flooding' in etkilerini azaltmaya yönelik stratejiler arasında gaz difüzyon tabakası tasarım optimizasyonları öne çıkmaktadır. Hidrofobik kaplamalar, mikrokanallar ve gradyan yapılar gibi yenilikçi tasarımlar, suyun etkin bir şekilde tahliye edilmesini sağlarken, gaz erişimini artırarak elektrolizör performansını iyileştirmektedir. Literatürde yapılan deneysel çalışmalar, optimize edilmiş GDL yapılarının flooding kaynaklı verim kayıplarını %25 oranında azalttığını göstermektedir (Dalğıç, 2019). Tablo 1, dört ana GDL tasarım yöntemini (hidrofobik kaplamalar, gradyan gözenek yapıları, mikrokanallar, hibrit malzemeler) karşılaştırarak, her birinin avantajlarını, dezavantajlarını, uygun koşullarını ve flooding azaltma oranlarını özetlemektedir.

Tablo 1. GDL tasarım yöntemlerinin karşılaştırması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygun Koşullar	Flooding Azaltma Oranı
Hidrofobik Kaplamalar	Kolay uygulanır, düşük maliyet	Yüksek sıcaklıklarda stabilite sorunu	Düşük sıcaklık (<60°C)	%15-25 (Barbir, 2005; Meyer ve ark., 2023)
Gradyan Gözenek Yapıları	Gaz ve su akışını dengeler	Üretim karmaşık, maliyetli	Orta-yüksek akım yoğunluğu	%20-30 (Genç ve Kallioğlu, 2018)
Mikrokanallar	Hızlı su tahliyesi, yüksek verim	Üretim hassasiyeti gerekir	Yüksek akım yoğunluğu	%15-20 (Wang ve ark., 2011;Özdemir ve ark., 2024)
Hibrit Malzemeler	Yüksek iletkenlik, dayanıklılık	Yüksek maliyet, ölçeklendirme zorluğu	Endüstriyel uygulamalar	%10-20 (Genç ve Kallioğlu, 2018; Wallnöfer-Ogris ve ark., 2024)

Bu analiz, GDL tasarımlarının flooding üzerindeki etkilerini sistematik bir şekilde sınıflandırarak, hangi yöntemin hangi koşulda tercih edileceğine dair rehber sunar. Bununla birlikte, GDL tasarımlarının yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında nasıl performans gösterdiği henüz tam olarak bilinmemektedir. Elektrolizörlerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini artırmak için, farklı çalışma koşullarında GDL tasarımlarının uzun vadeli stabilitesini ve verim üzerindeki etkilerini inceleyen daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç vardır. Gelecekteki çalışmalar, hibrit GDL'lerin maliyet optimizasyonu ve yüksek basınçlı sistemlerde uzun vadeli performansına odaklanmalıdır.



Şekil 5. GDL tasarım yöntemlerinin flooding azaltma süreci

Şekil 5' te GDL tasarım yöntemlerinin flooding azaltma sürecini gösteren akış şemasıdır. Bu akış şeması, PEM elektrolizörlerde flooding sorununu azaltmak için kullanılan dört ana GDL tasarım yönteminin (hidrofobik kaplamalar, gradyan gözenek yapıları, mikrokanallar, hibrit malzemeler) çalışma prensiplerini ve uygulama koşullarını görselleştirir. Her yöntemin flooding azaltma oranı ve uygun senaryoları, literatüre dayalı olarak belirtilmiştir (Barbir, 2005; Wang ve ark., 2011; Alkhaldi ve ark., 2025).

4. Sonuç

PEM elektrolizörlerde nem yönetimi, sistem verimliliğini ve dayanıklılığı belirleyen kritik bir faktördür. Yetersiz nem, proton iletimini sınırlandırarak membran kurumasını tetiklerken, aşırı nem

(flooding) gaz difüzyonunu engelleyerek verimi %20-30 oranında düşürür. GDL tasarım optimizasyonları, bu sorunu hafifletmede önemli bir rol oynar. Hidrofobik kaplamalar, gradyan gözenek yapıları, mikrokanallar ve hibrit malzemeler, su tahliyesini iyileştirerek flooding kayıplarını %15-30 oranında azaltır. Çalışmada sunulan sınıflandırmada, GDL tasarım yöntemlerinin avantajlarını, dezavantajlarını ve uygulama koşullarını sistematik bir şekilde özetlemektedir. Hidrofobik kaplamalar, düşük maliyetli ve düşük sıcaklıklı (<60°C) evsel sistemlerde etkili bir çözüm sunarken, gradyan gözenek yapıları ve mikrokanallar, yüksek akım yoğunluklu endüstriyel sistemlerde flooding'i %20-30 oranında azaltır. Hibrit malzemeler, grafen ve karbon nanotüp gibi yenilikçi bileşenlerle yüksek basınçlı (200-350 bar) uygulamalarda uzun vadeli dayanıklılık sağlar, ancak maliyet düşürücü yenilikler gerektirir. Bu çalışma, GDL tasarımlarının flooding azaltmadaki rolünü sınıflandırarak, PEM elektrolizörlerin evsel ve endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesi için teknik bir rehber sunmaktadır. Disiplinler arası yaklaşımlar (malzeme mühendisliği, sıvı-gaz dinamikleri, yapay zekâ) ile bu sistemlerin ekonomik fizibilitesi ve performansı daha da artırılabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Agmon N. The grotthuss mechanism. Chemical Physics Letters 1995; 244(5-6): 456–462.

Alkhaldi S., Aziz M., Amrite A., Prasad AK. Parametric study of PEM water electrolyzer performance. Journal of Applied Electrochemistry 2025; 55(2): 327-343.

Anderson R., Zhang L., Ding Y., Blanco M., Bi X., Wilkinson DP. A critical review of two-phase flow in gas flow channels of proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 2010; 195(15): 4531-4553.

Bakangura E., Wu L., Ge L., Yang Z., Xu T. Mixed matrix proton exchange membranes for fuel cells: State of the Art and Perspectives. Progress in Polymer Science, 2016; 57: 103–152.

Barbir F. PEM Fuel cells: Theory and Practice. Elsevier Academic Press; 2005.

Carmo M., Fritz DL., Mergel J., Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy 2013; 38(12): 4901-4934.

Dalgıç BF. PEM yakıt hücresinde hidrojen gazındaki nem oranına bağlı olarak elektrik üretimindeki değişimin incelenmesi. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:27, Batman, Türkiye, 2019.

Genç Ö., Kallioğlu MA. Proton elektrolit membranlı (PEM) elektrolizörün sayısal incelenmesi ve deneysel doğrulanması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 7(1): 370-380.

Grigoriev SA., Porembsky VI., Fateev VN. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. International Journal of Hydrogen Energy 2006; 31(2): 171-175.

Hassan Q., Algburi S., Sameen AZ., Salman HM., Jaszczur M. Green hydrogen: A pathway to a sustainable energy future. International Journal of Hydrogen Energy 2024; 50: 310-333.

Ito H., Maeda T., Nakano A., Takenaka H. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions. International Journal of Hydrogen Energy 2011; 36(17): 10527-10540.

Karanfil G. Proton exchange membrane fuel cells: Thermodynamics, components and applications. Engineer and Machinery 2020; 61(698): 57–76.

Kreuer KD. Proton conductivity: Materials and mechanisms. Solid State Ionics 1996; 97(1-4): 1–15.

Kuhnert E., Mayer K., Heidinger M., Rienessel C., Hacker V., Bodner M. Impact of intermittent operation on photovoltaic-PEM electrolyzer systems: a degradation study based on accelerated stress testing. International Journal of Hydrogen Energy 2024; 55: 683-695.

Li H., Tang Y., Wang Z., Shi Z., Wu S., Song, D., Zhang J., Fatih K., Zhang J., Wang H., Liu Z., Rami A., Mazza A. A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell. Journal of Power Sources 2008; 178(1): 103-117.

Marx D., Tuckerman ME., Hutter J., Parrinello M. The nature of the hydrated excess proton in water. Nature 1999; 397(6719): 601–604.

Meyer Q., Yang C., Cheng Y., Zhao C. Overcoming the electrode challenges of high-temperature proton exchange membrane fuel cells. Electrochemical Energy Reviews 2023; 6: 16. https://doi.org/10.1007/s41918-023-00180-y

Nam JH., Kaviany M. Effective diffusivity and water-saturation distribution in single- and two-layer PEMFC diffusion medium. International Journal of Heat and Mass Transfer 2003; 46(24): 4595-4611.

Özdemir SN., Taymaz I., San FGB., Okumuş E. Performance assessment and optimization of the PEM water electrolyzer by coupled response surface methodology and finite element modeling. Fuel 2024; 365: 131138.

Park J., Li X., Tran D. Effects of flooding and hydrophobic polymer treatment on the performance of PEM fuel cells. Journal of Power Sources 2007; 172(2): 660-669.

Prakash M., Maiyelvaganan KR., Giri Lakshman N., Al-Mogren M., Hochlaf M. Formation of eigen or zundel features at protonated water cluster–aromatic ınterfaces. ChemPhysChem 2023; 24(16): e202300267.

Vlachaki E., Lekatsas K., Berning T. A thermodynamic analysis of a proton exchange membrane electrolyzer. ECS Transactions 2024; 114(5): 581.

Wallnöfer-Ogris E., Grimmer I., Ranz M., Höglinger M., Kartusch S., Rauh J., Macherhammer MG., Grabner B., Trattner A. A review on understanding and identifying degradation mechanisms in PEM water electrolysis cells: Insights for stack application, development, and research. International Journal of Hydrogen Energy 2024; 65: 381-397.

Wang CR., Stansberry JM., Mukundan R., Chang HMJ., Kulkarni D., Park AM., Plymil AB., Firas NM., Liu CP., Lang JT., Lee JK., Tolouei NE., Yu M., Wang CH., Zhu G., Brouwer J., Atanassov P., Capuano CB., Mittelsteadt., Peng X., Zenyuk IV. Proton exchange membrane (PEM) water electrolysis: cell-level considerations for gigawatt-scale deployment. Chemical Reviews 2025; 125(3): 1257–1302.

Wang Y., Chen KS., Mishler J., Cho SC., Adroher XC. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. Applied Energy 2011; 88(4): 981-1007.

Weber AZ., Newman J. Modeling transport in polymer-electrolyte fuel cells. Chemical Reviews 2004; 104(10): 4679-4726.

Web1: https://www.fuelcellstore.com/gas-diffusion-layer-characteristics-and-modeling. Erişim tarihi: 11.01.2025.

Zenyuk IV., Parkinson DY., Hwang G., Weber AZ. Probing water distribution in compressed fuel-cell gas-diffusion layers using X-ray computed tomography. Electrochemistry Communications 2015; 53: 24-28.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 225-237, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 225-237, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Evaluation of Factors Affecting the Sustainability of Waste Management of Outdoor Ornamental Plant Nurseries by Analytical Network Process Method

Şeyda GÜR[1], Özgür KAHRAMAN[2*], Necmettin GÜR[3]

[1]Harran University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Şanlıurfa
[2]Çanakkale Onsekiz Mart University, Faculty of Architecture and Design, Department of Landscape Architecture,Çanakkale
[3]Çanakkale Onsekiz Mart University, School of Graduate Studies, Department of Landscape Architecture, Çanakkale

[1]https://orcid.org/0000-0002-4639-9657
[2]https://orcid.org/0000-0003-1336-9942
[3]https://orcid.org/0000-0002-8856-7188
*Corresponging author: ozgurkahraman@comu.edu.tr

Research Article

Article History:
Received: 26.02.2025
Accepted: 30.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Outdoor ornamental plants
Nursery
İzmir
Analytical network process
Waste management
Sustainability

ABSTRACT

Waste management and sustainability have become important issues worldwide. The production of outdoor ornamental plants and the increasing amount of waste associated with production have taken their place in waste management, which has become important both in our country and around the world. Waste management and waste recovery in outdoor ornamental plant nurseries require serious strategic and economic planning. Waste control and management in the outdoor ornamental plant production and sales sector play an important role both financially and environmentally. There are factors that influence the sustainability of waste management in outdoor ornamental plant nurseries. In this study, the factors affecting the sustainability of waste management were determined through a literature review and expert opinions from 24 businesses located in 6 different districts of İzmir. The identified factors were then evaluated using the AAS method, which is frequently used in decision-making processes, again with expert opinions. Strategic recommendations were made based on the results obtained.

Dış Mekan Süs Bitkisi Fidanlıklarının Atık Yönetiminin Sürdürülebilir Olmasını Etkileyen Faktörlerin Analitik Ağ Süreci Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 26.02.2025
Kabul tarihi:30.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Dış mekan süs bitkileri
Fidanlık
İzmir
Analitik ağ süreci
Atık yönetimi
Sürdürülebilirlik

ÖZ

Atık yönetimi ve sürdürülebilirlik tüm dünyada önemli bir konu haline gelmiştir. Dış mekan süs bitkisi üretimi ve üretime bağlı artan atık miktarı hem ülkemizde hem de dünyada önemli hale gelmiş olan atık yönetimi içerisinde kendi yerini almıştır. Dış mekan süs bitkisi fidanlıklarında atık yönetimi ve atıkların yeniden kazanımı ciddi bir stratejik ve ekonomik planlamayı gerektirmektedir. Dış mekan süs bitkisi üretimi ve satışı sektöründe atıkların kontrolü ve yönetimi hem finansal hem de çevresel açıdan önemli bir paya sahiptir. Dış mekan süs bitkisi fidanlık işletmelerinde atık yönetiminin sürdürülebilirliği üzerine etkili faktörler vardır. Bu çalışmada atık yönetiminin sürdürülebilirliği üzerine etkili olan faktörler, literatür taraması ve İzmir ilinde 6 farklı ilçede yer alan 24 işletmede görev alan uzman görüşleri alınarak belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen faktörler karar verme sürecinde sıklıkla kullanılan AAS yönteminde yine uzman görüşleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre de stratejik önerilerde bulunulmuştur.

To Cite: Gür Ş., Kahraman Ö., Gür N. Evaluation of Factors Affecting the Sustainability of Waste Management of Outdoor Ornamental Plant Nurseries by Analytical Network Process Method. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 225-237.

1.Introduction

If the concept of ornamental plants is defined in general, they are plants that aesthetically appeal to the eye, have many functional features and provide economic gain. In addition to being a general concept, the concept of ornamental plants is divided into 4 different subgroups. These are outdoor ornamental plants, indoor ornamental plants, cut flowers and geophytes (Ay, 2009). Outdoor ornamental plants are decorative plants that are used in landscape design and planning of various areas such as parks, gardens and various recreation areas, highways and landscaping of buildings, and are produced and sold for this purpose (Figure 1) (Çelik et al., 2014).

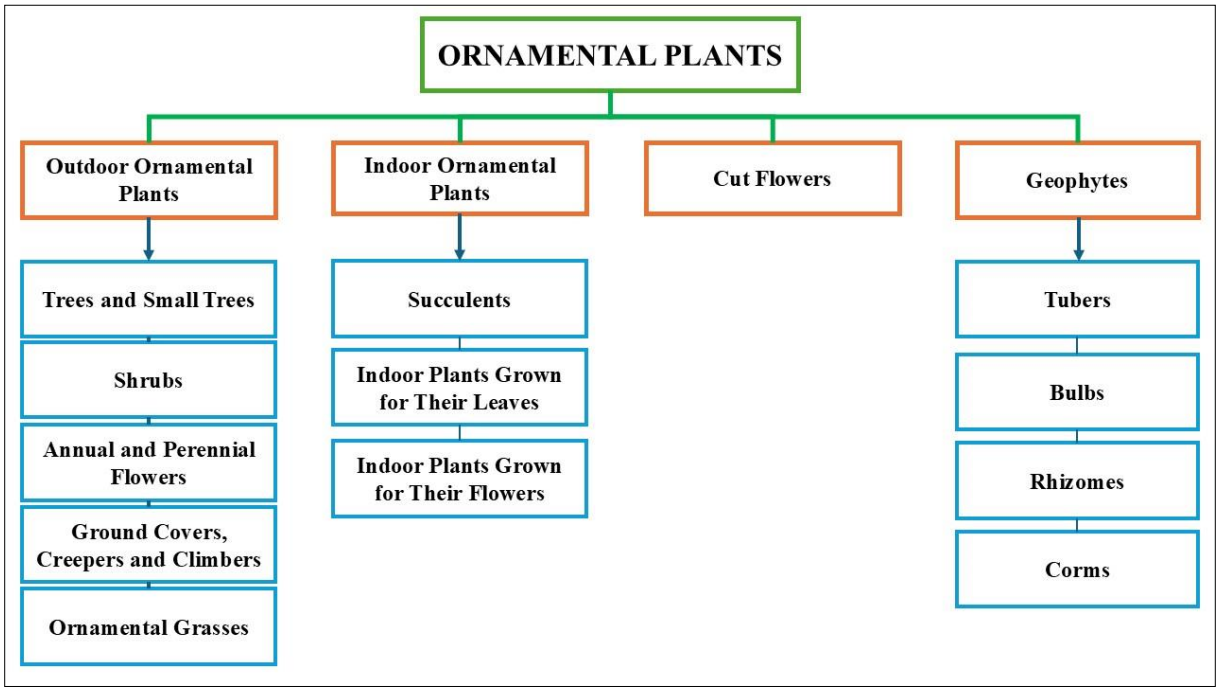


Figure 1. Classification of ornamental plants

The production of ornamental plants takes place in open areas or greenhouses. These production areas are generally called nurseries. Nurseries are private and commercial areas established on lands that are suitable for agriculture or not, where various plant species with different commercial importance and functions are grown and offered for sale (Kılıç and Yılmaz, 2020). Outdoor ornamental plant production is gradually increasing today. In 2009, ornamental plant production was around 57 million units, and in 2016, this number increased to around 412 million units. With the continuous increase in ornamental plant production over the years, it has increased to around 2.16 billion units in 2023. Even 525484.719 of this number was composed of outdoor ornamental plants. According to TÜİK data, ornamental plant production decreased by 6.1% in 2024 compared to the previous year and decreased to approximately 2.32 billion units. In outdoor ornamental plants, this number decreased to 441107.059 in 2024. Compared to the previous year, outdoor ornamental plant production decreased by 16.1% (TÜİK, 2025). In 2024, although there is a decrease in the amount of production compared to the previous year, it is

noteworthy that the amount of production is very high and reaching this high number in the production of outdoor ornamental plants leads to the conclusion that there is also an increase in waste in nursery enterprises. In other words, the increase in the production of outdoor ornamental plants means a direct increase in the waste generated by production in this sector.

Regardless of the sector, the correct management of the wastes of the enterprises is very important in terms of preventing environmental problems. The impact of crop production residues such as carbon, water and ecological footprints is high. The correct management of the collection, transport, storage, disposal or reuse of waste, etc., which cause many environmental problems, is crucial. For a sustainable life and environment, waste management must be sustainable (Şiriner Önver, 2019).

There are studies on waste management and outdoor ornamental plant nurseries in the literature. Morrissey and Browne (2004) examined waste management models and practices to determine sustainable waste management. They stated that there is a basis for considering environmental, economic and social aspects together for sustainable management in the management models they examined. Wilson et al. (2013), in their study, examined how cities in developing countries deal with the solid waste problem within the integrated sustainable waste management system. They defined the integrated waste management system as a method that examines both physical components and management elements together. As a result of their analyses, they stated that the integrated waste management system achieved 95% success in the collection of solid waste in middle-income cities and 50% success in low-income cities. Elsaid and Aghezzaf (2015), in their study, focused on the design and operation of a sustainable waste management system in urban areas. They evaluated some existing waste management models for waste management and to what extent they can be applied in the case of Cairo city. They stated that cost management should be done well to apply the models they examined in the basic dimension and ranked the suitability of the models according to these costs. As seen in the studies in literature, it is very important to plan waste management in a strategic sustainable way. When considered from this point of view, determining and evaluating the factors that ensure the sustainability of waste management is a multi-criteria decision-making problem. The ANP method is frequently used in decision-making problems of decision-makers in literature. The method presents qualitative evaluations to decision-makers in a quantitative way during the decision-making process. At the same time, it provides the opportunity to reflect real life by showing and considering the interaction and feedback between the criteria that are effective on the problem on the network structure. In this case, it shows that the results obtained by the decision-makers are suitable for real life.

This study was conducted to determine and evaluate the factors affecting the sustainability of waste management in outdoor ornamental plant nurseries. For this purpose, the ANP method, one of the multi-criteria decision-making methods, was used in the study.

2. Materials and Methods

In this study, the factors affecting the sustainability of waste management in outdoor ornamental plant nurseries were evaluated using the analytical network process method. To provide an example for the study and to obtain expert opinions, businesses operating in 6 different districts of İzmir province that produce and sell outdoor ornamental plants were selected from those willing to participate in the study. These nursery businesses operate in Aliağa, Bayındır, Çeşme, Menemen, Ödemiş and Urla districts (Figure 2).

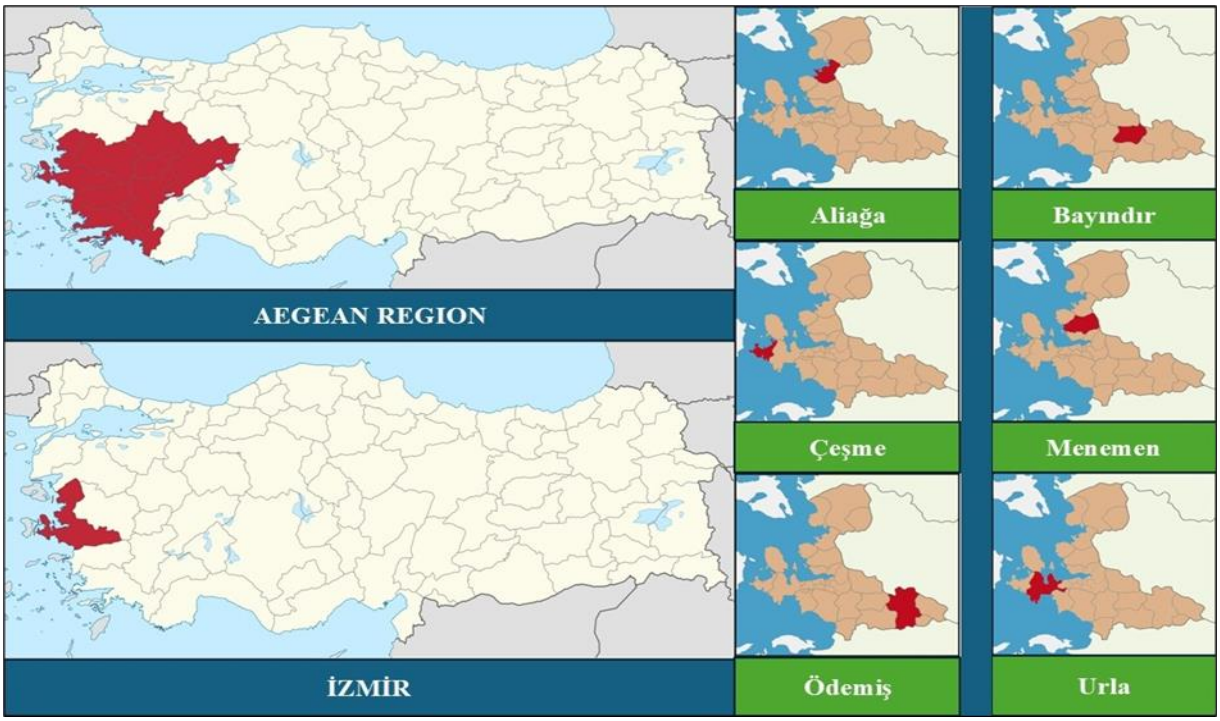


Figure 2. Districts where sample nursery enterprises are located in the study (Wikipedi, 2025a; Wikipedi, 2025b; Wikipedi, 2025c; Wikipedi, 2025d; Wikipedi, 2025e; Wikipedi, 2025f; Wikipedi, 2025g; Wikipedi, 2025h)

A total of 24 enterprises, 2 each from Aliağa and Menemen districts, and 5 each from Bayındır, Çeşme, Ödemiş, and Urla districts, participated in this study voluntarily. Expert opinions were obtained from the enterprise owners, landscape architects, and agricultural engineers.

- Stage 1: The factors affecting the sustainability of waste management in outdoor ornamental plant nursery businesses were determined through literature reviews.
- Stage 2: Expert opinions were obtained for the purpose of establishing relationships between criteria in the ANP method and determining the impact weights of the criteria.
- Stage 3: At the end of the ANP method, the factors were evaluated, and suggestions were made.

2.1. Analytical Network Process (ANP) method:

The analytical network process consists of four consecutive steps (Yang et al., 2010):

1. Definition of the problem: The definition of the problem to be addressed for the solution of the multi-criteria problem is made and expert opinions are obtained for the evaluation of the criteria, sub-criteria and alternatives in the evaluation process.
2. Creation of the network structure: In this stage of the method, the binary relationships, dependencies and interactions between the determined criteria are shown.
3. Establishment of binary comparison matrices: Binary comparison matrices are created to determine the levels of importance between the determined criteria and sub-criteria. The superiority of the criteria over each other is determined and Saaty's 1-9 scale is used when determining these superiorities. Saaty's 1-9 scale is shown in Figure 3. An example binary comparison matrix is shown in Figure 4.

Importance Level	Definition	Explanation
1	Equally Important	Both criteria are equally important.
3	Moderately Important	One criterion is slightly more important than the other.
5	Strongly Important	One criterion is strongly more important than the other.
7	Very Strong Degree Important	One criterion is strongly more important than the other.
9	Absolutely Important	One criterion is very strongly more important than the other.
2, 4, 6, 8	Intermediate Values	There are minor differences between the criteria compared.

Figure 3. Saaty’s 1-9 scale (Mkude and Peter, 2024)

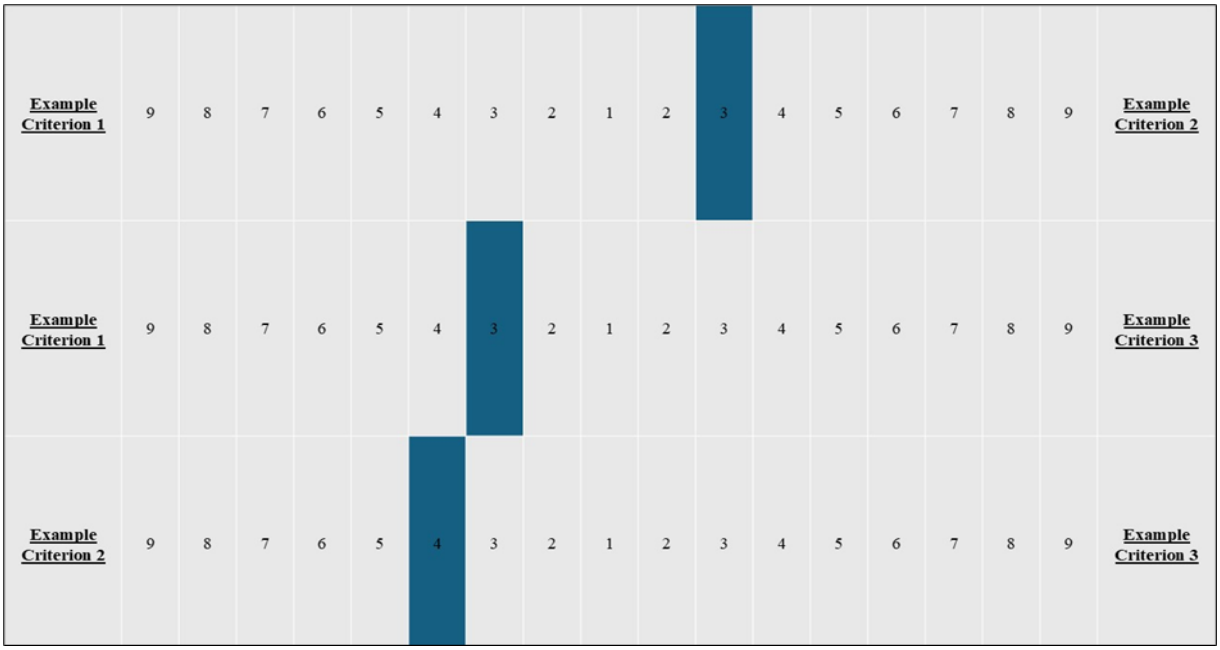


Figure 4. Example pairwise comparison matrix (Gür et al., 2024)

4. Determination of weights: After the creation of pairwise comparison matrices, the weights of the criteria are determined. In the literature, it is seen that researchers frequently use the Super Decision package program (Choi and Kwag, 2013; Song et al., 2018; Termeh and Vahıd, 2018; Wang and Yi, 2020; Aghmashhadi et al., 2022; Qiao et al., 2022). In this study, the Super Decision package program was used to ensure that the solution process can be continued quickly and without errors. In this program, the criteria weight results can be reached after the importance levels of the criteria are entered according to the pairwise comparison matrices. According to the application steps of the method, three super matrix structures are created to reach these weights theoretically. The rows of the super matrix structure are taken to the power of the largest degree until they have the same value, and the limit super matrix is created. The effect of the factors on the decision-making process can be shown with this matrix structure.

3. Results and Discussion

In the first stage of the method, the factors that ensure the sustainability of waste management of outdoor ornamental plant nurseries were determined by literature review. The finalized main and sub-criteria are given in Table 1.

Table 1. Main criteria, sub-criteria and explanations of the criteria (Yılmaz and Bozkurt, 2010; Gündüzalp and Güven, 2016; Ömürbek et al., 2019; Tezel and Yıldız, 2020; Gül and Yaman, 2021; Gürcan and Açıksöz, 2023).

Main Criterion	Sub-Criteria	Criterion Description
Supply Chain	Transport and Storage	In the process of waste management, it is important to separate, collect and stack waste according to its type and characteristics, as well as to store and transport it temporarily. During the transportation, stacking and storage process, the process must be carried out in a way that does not pollute the environment in terms of odor, dust, leakage, etc.
	Supply Chain Integration	Collecting waste from its source means being informed and transparent about every stage of the process until the last stage. Information flow and cooperation should be ensured throughout the chain, considering the targets by ensuring the integration of economic, social and environmental dimensions.
Technology and Automation	Digitization of Applications	Digitalization of the applications is used throughout the process to monitor and control processes throughout waste management and to ensure easy flow of information.
	Waste Monitoring and Analysis	To reduce the negative effects of waste collection, storage and disposal, it is necessary to carefully carry out monitoring, analysis and control activities such as reducing waste, ensuring effective reuse, and separating according to type and characteristics throughout the waste management process with technology-based applications.
Cost	Waste Costs	It is the total cost of activities such as collecting, transporting, separating and recycling waste within the waste management process.
	Circular Economy	Within the scope of waste management, resources are protected with a circular economy, environmental pollution is prevented, waste is prevented as much as possible, and unavoidable waste is recycled and reused.
Consciousness	Sustainable Material Use	For the sustainability of waste management, the materials used must be reusable.
	Waste Management Awareness	To act consciously and be informed about reducing waste or recycling by acting consciously against environmental pollution and protecting resources.
	Legal Regulatory Framework	These are the laws, directives and legislation developed by countries to protect the environment, which impose responsibilities on the parties involved in waste management.

After the first stage of the working method, which was completed with the determination of the criteria, the second stage was started. In this stage, expert opinions were obtained from the business owners, agricultural engineers or landscape architects in the 24 businesses specified in the material to establish bilateral relations between the criteria and to determine the criteria's weights. After the expert opinions were obtained, the ANP method was implemented.

Accordingly, in the first step of the ANP method, the problem definition was determined as the evaluation of the factors affecting the sustainability of waste management in outdoor ornamental plant nurseries. After the problem definition was made, the second step of the ANP method was started. In this step, the network structure and binary relationships between the main and sub-criteria determined by literature reviews were created. (Figure 5). To understand the binary relationships more easily, the sub-criteria were coded and shown. Accordingly, the codes of the sub-criteria;

- Transportation and Storage-A
- Supply Chain Integration-B
- Digitalization of Applications-C
- Waste Monitoring and Analysis-D
- Waste Costs-E
- Circular Economy-F
- Sustainable Material Use-G
- Waste Management Awareness-H
- Legal Regulatory Framework-I.

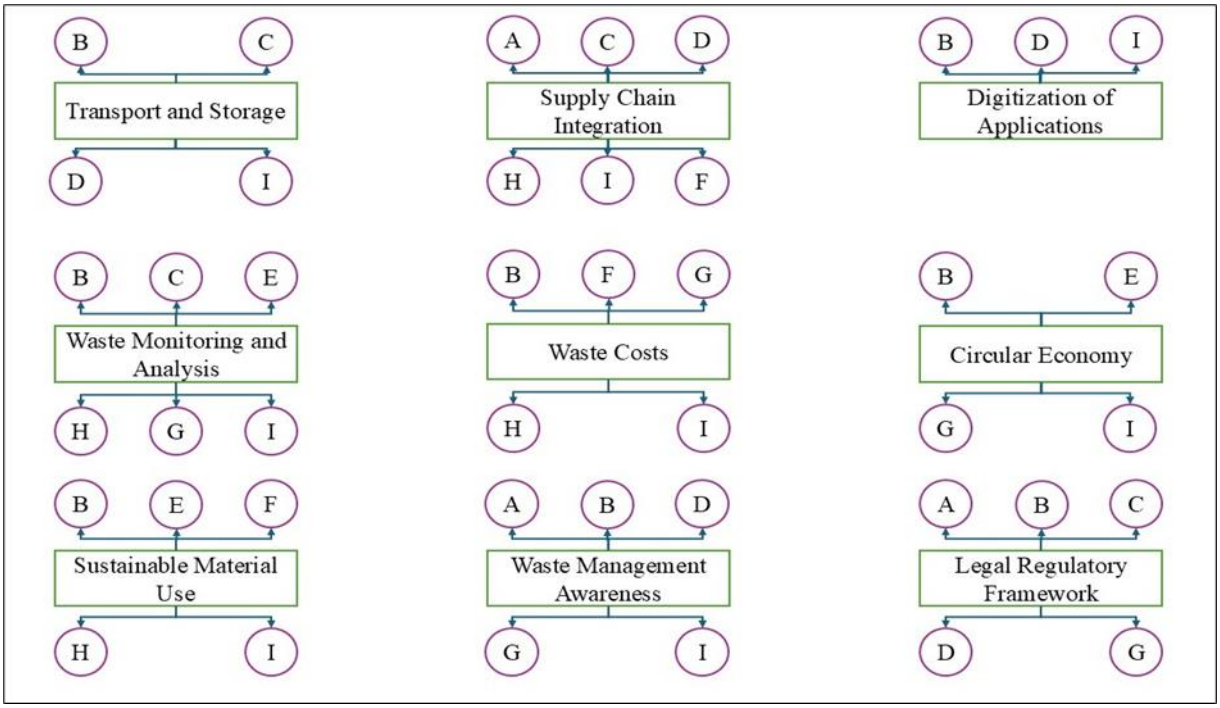


Figure 5. Binary relationships between criteria and network structure

After completing the first two steps in the ANP method, the third step was taken. In this step, pairwise comparison matrices were created according to the interactions in the network structure. After completing the pairwise comparison matrices, the fourth and final step was taken. In this step, the importance levels of the main and sub-criteria were calculated and weighted. It was determined that the

consistency rates were less than 0.1 in all comparisons made. This situation indicates that all comparisons and evaluations made were consistent. Table 2 shows the criterion weights obtained from the comparison matrices of the main and sub-criteria.

Table 2. Criteria weights and importance levels obtained from the ANP method.

Main Criterion	Main Criterion Weight	Sub-Criteria	Sub-Criteria Weight
Supply Chain	0.221	Transportation and Storage	0.375
		Supply Chain Integration	0.625
Technology and Automation	0.204	Digitization of Applications	0.361
		Waste Monitoring and Analysis	0.639
Cost	0.321	Waste Costs	0.475
		Circular Economy	0.525
Consciousness	0.254	Sustainable Material Use	0.295
		Waste Management Awareness	0.278
		Legal Regulatory Framework	0.427

When the weight values of the criteria are examined, it is seen that the values are very close to each other. In this case, it can be commented that the effect of all criteria on the waste management process is almost the same importance based on the main criteria. It is also seen that the cost criterion stands out in the main criteria. Today, the increase in the production and sale of outdoor ornamental plants every year also increases the size of the waste of nursery enterprises (Gür and Erduran Nemutlu, 2022). For this reason, although the main criterion of cost is very important in the waste management process for outdoor ornamental plant nurseries, it is necessary to resort to ways to reduce costs.

The main criterion of consciousness comes after the cost criterion with a weight value of 0.254. The consciousness criterion has shown that nursery enterprises should be conscious about the subject in both production and sales during the waste management process. It is envisaged that with the awareness gained, the level of waste will be reduced, or nursery waste will be recycled as much as possible by separating it at source.

The supply chain with a weight value of 0.221, and the technology and automation criteria with a weight value of 0.204 follow the other criteria. Optimizing the supply chain and ensuring information flow at every stage of the chain is very important for the waste management process. Including technology and automation applications in ensuring this information flows correctly and quickly will increase sustainability.

Table 2 also shows the weight values of the sub-criteria. The weight value of each sub-criteria should be evaluated within the main criterion it belongs to. For example; while the transportation and storage sub-criterion has a weight value of 0.375 within the supply chain main criterion, the supply chain integration sub-criterion has a weight value of 0.625. When the weight values of the sub-criteria are

examined, the sub-criteria within the cost main criterion are seen to be more important. In particular, the circular economy makes the recycling of waste from the producer to the consumer important in environmental, social and community dimensions. Sustainable planning and arrangements should be made for the waste management process according to the criterion weights obtained because of the evaluation of these criteria.

Kulaç (2006) used the ANP method in the selection of solid waste management system for Eskişehir Tepebaşı Municipality in his study. This study is like Kulaç (2006) in terms of using the ANP method in waste management. However, this study differs in that nursery operations in İzmir province were used as the sample area, sustainability was adopted as the problem definition in waste management, and private enterprises were preferred instead of public institutions. In addition, when the literature was examined, no study was found in which multi-criteria decision-making methods were used for waste management in outdoor ornamental plant nurseries.

4. Conclusion and Recommendations

In this study, the factors affecting the waste management process of outdoor ornamental plant nurseries were evaluated. ANP method was used in this process. 4 main criteria and 9 sub-criteria related to the waste management process were determined and evaluated in line with expert opinions.

According to the findings, in the outdoor ornamental plant production and sales sector, the first thing to be done is to raise awareness about waste, environmental health and its effects on humans through information in the recommendations to be given to nurseries for waste management. In this information, businesses can provide information about recycling such as separation at source to consumers through advertising on products, as well as through the public.

Considering the costs that businesses must bear, it is seen that it is necessary to act quickly, especially in terms of waste reduction. Care should be taken to reuse products such as pots, seedling bags, viols, seedling fixing rods made of plastic materials used in production and storage. Organic-based residues such as weeds, fallen leaves and pruning residues, especially after plucking, can be recycled into production by being evaluated as compost.

In order to avoid negative situations such as leakage during the transportation and storage of waste or during the fertilization and pesticide application of plants, and to be informed about such situations immediately, the integration of the entire process with technology makes it possible to intervene immediately in the event of any negative situations that may be encountered.

When viewed from all these points, sustainability of waste management in outdoor ornamental plant nurseries is closely related to the criteria determined in this study, the binary relationships of the criteria and the weight evaluations of the criteria. Nursery businesses can plan a long-term and sustainable waste management process by considering the criteria and suggestions in this study.

Conflict of Interest Statement

The authors declares that there is no conflict of interest.

Summary of Researchers' Contribution Declaration

The authors declare that they have contributed 100% to the article.

References

Aghmashhadi AH., Azizi A., Zahedi S., Hoseinkhani M., Cirella GT. Land suitability mapping using GIS-based ANP for residential zoning: Case research from central Iran. Transactions in GIS 2022; 26(2): 1017-1039.

Ay S. Süs bitkileri ihracatı, sorunlari ve çözüm önerileri: Yalova ölçeğinde bir araştırma. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2009; 14(3): 423-443.

Choi KH., Kwag HJ. A reviews on the performance evaluation based on network analysis and super-efficiency analysis. Journal of Digital Convergence 2013; 11(10): 255-262.

Çelik Y., Karakayacı Z., Polat AT., Eşitken A. Konya ilinde dış mekân süs bitkileri üretiminin brüt kar analizi. Meyve Bilimi 2014; 1(2): 45-54.

Elsaid S., Aghezzaf EH. A framework for sustainable waste management: challenges and opportunities. Management Research Review 2015; 38(10): 1086-1097.

Gül M., Yaman K. Türkiye'de atık yönetimi ve sıfır atık projesinin değerlendirilmesi: Ankara örneği. Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi 2021; 35(4): 1267-1296.

Gündüzalp AA., Güven S. Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya belediyesi ve semt tüketicileri örneği. Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi 2016; 9(1): 1-19.

Gür N., Erduran Nemutlu F. İzmir-Urla bölgesindeki dış mekân süs bitkisi işletmelerinin değerlendirilmesi. ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi 2022; 10(2): 312-321.

Gür N., Kahraman Ö., Gür Ş. İzmir Bölgesi bazı dış mekân süs bitkisi üretim ve satış fidanlıklarının performanslarına etki eden kriterlerinin analitik ağ süreci yöntemi kullanılarak önceliklerinin belirlenmesi. Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi 2024; 25(2): 124-132.

Gürcan C., Açıksöz S. Akıllı atık yönetimi ve örnek uygulamalar. Kent Akademisi 2023; 16(1): 577-594.

Kılıç E., Yılmaz M. Mehmet Tevfik Bey'in 1917 yılı verilerine göre Hendek Orman Fidanlığı raporu ve önemi. Ormancılık Araştırma Dergisi 2020; 7(1): 49-61.

Kulaç A. Eskişehir Tepebaşı Belediyesi için katı atık yönetim sistemi seçiminde analitik serim süreci (ANP) yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

Mkude CG., Peter M. Examining the interdependencies of e-government challenges using PESTELMO, DEMATEL and ANP: A case study of Tanzania. Information Polity 2024; 29(3): 313-330.

Morrissey AJ., Browne J. Waste management models and their application to sustainable waste management. Waste Management 2004; 24(3): 297-308.

Ömürbek V., Erk Ç., Herek S. Üniversitelerde atık yönetimi uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2019; (35): 124-161.

Qiao L., Qi A., Zhang Y., Wang B., Zhou J. Weighting research on the first-class curriculum evaluation system of landscape architecture based on the analytic network process method. Mathematical Problems in Engineering 2022; 2022(1): 2320181.

Song YK., Kim JH., Choi B., Han N., Kim MG., Lee J., Lee H., Lee BJ., Oh JM. Strategic priorities to improve effectiveness of anti-smoking interventions for the Korean military: An application of the analytic hierarchy process. Military Medicine 2018; 183(7-8): 223-230.

Şiriner Önver M. Çöp/atık yönetimi ve belediyeler. Journal of Current Debates in Social Sciences 2019; 2(1): 111-123.

Termeh SVR., Vahıd S. Cutaneous leishmaniasis susceptibility mapping using multi-criteria decision-making techniques analytic hierarchy process (AHP) and analytic network process (ANP). Journal of Research in Environmental Health 2018; 3(4): 275-286.

Tezel Ö., Yıldız E. Sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarında Dünya ve Türkiye karşılaşması: EDİKAB örneği. Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi 2020; 9(2): 35-48.

TÜİK. Bitkisel üretim istatistikleri. https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2024-53447 (Tarih 29.01.2025).

Wang C., Yi K. Impact of spatial scale of ocean views architecture on tourist experience and empathy mediation based on “SEM-ANP” combined analysis. Journal of Coastal Research 2020; 103: 1125-1129.

Wikipedia. Aegean Region. 2025a. https://tr.wikipedia.org/wiki/Ege_B%C3%B6lgesi (Tarih 29.01.2025).

Wikipedia. İzmir. 2025b. https://tr.wikipedia.org/wiki/%C4%B0zmir (Tarih 29.01.2025).

Wikipedia. Aliağa. 2025c. https://tr.wikipedia.org/wiki/Alia%C4%9Fa (Tarih: 29.01.2025).

Wikipedia. Bayındır. 2025d. https://tr.wikipedia.org/wiki/Bay%C4%B1nd%C4%B1r,_%C4%B0zmir (Tarih 29.01.2025).

Wikipedia. Çeşme. 2025e. https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87e%C5%9Fme,_%C4%B0zmir (Tarih 29.01.2025).

Wikipedia. Menemen. 2025f. https://tr.wikipedia.org/wiki/Menemen (Tarih 29.01.2025).

Wikipedia. Ödemiş. 2025g. https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%96demi%C5%9F (Tarih 29.01.2025).

Wikipedia. Urla. 2025h. https://tr.wikipedia.org/wiki/Urla (Tarih 29.01.2025).

Wilson DC., Velis CA., Rodic L. Integrated sustainable waste management in developing countries. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Waste and Resource Management 2013; 166 (2): 52-68.

Yang YH., Hui YV., Leung LC., Chen G. An analytic network process approach to the selection of logistics service providers for air cargo. Journal of the Operational Research Society 2010; 61(9): 1365-1376.

Yılmaz A., Bozkurt Y. Türkiye'de kentsel katı atık yönetimi uygulamaları ve Kütahya katı atık birliği (KÜKAB) örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2010; 15(1): 11-28.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 238-253, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology,
9(1): 238-253, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Sembolik Kontrol Kullanarak Quasi-Doğum-Ölüm Süreçleri için En Olası Yol Hesaplaması

Mete ÖZBALTAN[1*]

[1]İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35665, Menemen, İzmir

[1]https://orcid.org/0000-0002-3215-6363[1]
*Sorumlu yazar: mete.ozbaltan@bakircay.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 08.03.2025
Kabul tarihi:30.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Ayrık olay sistemleri
Ayrık denetleyici sentezi
Quasi-doğum-ölüm süreçleri
Gizli Markov modelleri
Maksimum olasılık tahmini
Optimizasyon algoritması

ÖZ

Bu çalışmada, gizli Markov modelleri aracılığıyla quasi-doğum-ölüm süreçlerinde en olası yolları hesaplamak için ayrık olay sistemlerinin kontrol teorisini kullanıyoruz. İlk olarak, quasi-doğum-ölüm süreçlerinin, ayrık olay sistemleri bağlamında bir kontrol problemi olarak nasıl çerçevelenebileceğini ele alıyoruz. Ardından, quasi-doğum-ölüm süreçlerini bir kontrol sentez problemi olarak kodluyoruz. Güvenlik ve optimizasyon algoritmalarının uygulanması ile elde edilen denetleyicinin en iyi yolları nasıl seçmesini sağladığını açıklıyoruz. Önerilen yöntemi vaka çalışmaları ile doğruluyoruz ve sunduğumuz yaklaşımın literatürde kullanılan yöntemlere kıyasla üstün performans sağladığını gösteriyoruz.

The Most Probable Path Derivation for Quasi-Birth–Death Processes by Using Symbolic Control

Research Article

Article History:
Received: 08.03.2025
Accepted: 30.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Discrete event systems
Discrete controller synthesis
Quasi-birth–death processes
Hidden Markov models
Maximum likelihood estimation
Optimization algorithm

ABSTRACT

In this study, we utilize the control theory of discrete event systems to compute the most likely paths in quasi-birth-death processes through hidden Markov models. We begin by discussing how quasi-birth-death processes can be framed as a control problem within the context of discrete event systems. Following this, we encode quasi-birth-death processes as a controller synthesis problem, explaining how to apply safety and optimization algorithms enables the controller to select the best paths. We validate our proposed method through several case studies and report its superior performance compared to various state-of-the-art techniques found in the literature.

To Cite: Özbaltan M. The Most Probable Path Derivation for Quasi-Birth–Death Processes by Using Symbolic Control. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 238-253.

1. Introduction

Quasi-Birth-Death processes (QBDs) are stochastic processes characterized by a hierarchical structure of states, where newly introduced states are referred to as “birth” states and states exiting the system are referred to as “death” states (Latouche and Ramaswami, 1999). QBDs are preferred over alternative methods such as Hidden Markov Models (HMMs) (Rabiner, 1989) due to their clearer definition of specific states and

transitions (Etessami et al., 2010). They are widely utilized in processes across telecommunications, finance, and manufacturing.

QBD processes have powerful expressive capabilities but are not capable of computing optimal paths over a state sequence. However, QBD processes can be modeled as a HMMs (Etessami et al., 2010). HMMs typically use dynamic programming techniques to compute the optimal state sequence by means of the Viterbi algorithm (Viterbi, 2010). However, we focus on the discrete controller synthesis method, which allows for more accurate results and enables the definition of certain constraints that cannot be captured using the Viterbi algorithm within the system.

The discrete controller synthesis method was initially developed by (Ramadge and Wonham, 1987) as a language theory. Subsequently, it has been modeled in several forms, including Petri nets (Luo and Zhou, 2016), finite state machines (Chen and Lin, 2001), and automata (Asarin et al., 1998), and has been applied in various studies.

(Antoniotti and Mishra, 1995; Marchand et al., 2000) are pioneering works on the discrete controller synthesis method. However, the main challenge in these studies is the state explosion problem. Later, (Berthier and Marchand, 2014) avoided the effects of the state explosion problem by employing symbolic methods. The symbolic discrete controller synthesis method has found numerous application areas; for example, it is used for the power aware embedded systems (Özbaltan and Berthier, 2021). Additionally, it has been utilized in the computation of the most likely paths by (Özbaltan and Kurucan, 2024).

In this study, we contribute with presenting a framework that addresses the need for clearer explanations in stochastic processes, specifically in QBD processes, where the optimization of processes through the computation of the most likely paths is essential. Our approach offers both lower computational complexity and higher reliability. Specifically, we employ the symbolic discrete controller synthesis method to tackle the problem of computing the most likely paths in QBDs. Furthermore, our framework allows for the definition of mutual constraints on the most likely paths, or situations that require additional specifications, thereby providing a novel approach in comparison to the methods already available in the literature.

1.1. Related Work

(Van Leeuwaarden and Winands, 2006) found the equilibrium distribution for a type of QBD process by probabilistically constructing the rate matrix and reducing the problem to counting lattice paths, using the advanced form of the Ballot theory. (Bean et al., 2018) examined polynomial matrix equations critical for analyzing QBD processes, fluid queues, and random walks, focusing on algorithms like Newton's Method for solving the basic quadratic equation in QBDs. (Bean and Nielsen, 2010) use rational arrival process for QBDs, using a prediction process framework to calculate the G matrix, demonstrated through queues with dependent, non-Markovian arrival and service times. (Tayachi et al., 2019) analyzed virtual switch performance in manufacturing systems using a Markovian queuing model

with limited buffers, focusing on metrics like packet wait time and blocking probability, and using QBD processes along with numerical analysis. (Elhafsi and Molle, 2007) presents a solution for QBD processes with finite state spaces, developing a level dependent rate matrix for operative computation of the vectors in various queueing systems.

(Cawley and Pachter, 2003) highlighted the untapped potential of sampling methods in HMMs for identifying alternative splicings and exons, and introduces a memory efficient algorithm as a better alternative to the Hirschberg algorithm for gene finding and RNA prediction. (Bonafonte et al., 1993) critiques HMMs in speech analysis for using unsuitable state duration models and proposes a modified Viterbi algorithm for hidden semi Markov models that handles log-convex state duration probability density functions efficiently with only a small increase in computational cost. (Koller et al., 2015) presented an optimization using HMMs to improve map matching of noisy GPS data, reducing computation time by up to 45% without losing accuracy, especially in larger datasets. (Brejova et al., 2007) explores using HMMs for biological sequence annotation, showing that more accurate results can be achieved with efficient algorithms compared to simpler heuristics. (Özbaltan, 2024) introduces hidden abstract stack Markov models, which use a hybrid method includes Probabilistic Context Free Grammars (PCFGs) and HMMs, enhancing HMM expressiveness for applications like natural language processing while maintaining bilinear complexity for parameter learning, avoiding the cubic complexity of PCFGs.

Özbaltan and Çaşka (2024) introduces a modeling framework that integrates symbolic approach to robotic environments, using synchronous programming techniques to represent robotic behaviors and control objectives, and employs Discrete Controller Synthesis (DCS) algorithms by means of the ReaX platform for synthesising supervisors deployed on Simscape, demonstrated with a collaborative Unmanned Aerial Vehicle (UAV) robots example. (Samari et al., 2024) presents a data-driven method for designing safety controllers for nonlinear systems using measured data, ensuring long term safety through a sum of squares optimization approach, validated in case studies. (Wu, 2024) develops a method for controlling nonlinear systems with state and input constraints, using functional inequalities and the barrier method to ensure feasible control and regional stabilization, supported by a numerical example. Çaşka (2024) employs the control methodology to manage quadcopter type unmanned aerial vehicles, comparing its performance with PID optimized by recent metaheuristic algorithms, and investigates optimal path planning for single and multiple quadcopters addressing the traveling salesman problem, exploring methods to enhance dynamic behavior and path planning efficiency. Oura et al., (2024) introduces a method for controlling stochastic systems with safety conditions using reinforcement learning, efficiently learning controllers to maximize satisfaction probability, demonstrated through simulations.

The remainder of the study continues as follows. Section 2 will explain the relationship between quasi-birth-death processes and hidden Markov models and detail how to compute the most likely path in quasi-birth-death processes using the symbolic discrete controller synthesis method. In Section 3, we

will report and discuss our experimental results. Finally, Section 4 will present the conclusion of the study and offer recommendations for future work.

2. Materials and Methods

In this work, we identify the most probable path for QBD processes by using symbolic control. As shown in Figure 1, the framework of our work begins by transforming QBD processes into HMMs. Subsequently, we encode this mapping into a model formulation of the Symbolic Discrete Controller Synthesis (SDCS) problem, expressed as parallel synchronized dataflow equations. Finally, we apply our synthesis algorithms to use the resulting controller to determine the most probable path. The details of the modeling framework presented in this study are elaborated in the following subsections.

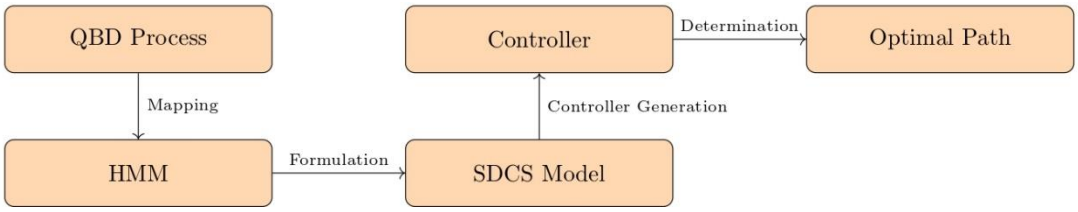


Figure 1. The workflow of our framework

2.1. Quasi-Birth-Death Processes

QBD processes (Latouche and Ramaswami, 1999) are an important mathematical model for stochastic processes, commonly used in fields such as queueing theory. In this process, each state entered by the system is referred to as a "birth", while a state leaving the process is referred to as a "death". In QBD processes, there are two types of states: the main state and sub-states, with a hierarchical structure. Transitions between states occur upward during a birth event and downward during a death event. However, transitions do not necessarily always occur as births or deaths, and births and deaths are not required to happen continuously. QBD processes are widely used for analyzing complex systems in areas such as queueing systems, telecommunications, human resource management, performance analysis, and system dynamics. A general QBD process is shown in Figure 2 and the mathematical model of a QBD process is presented below.

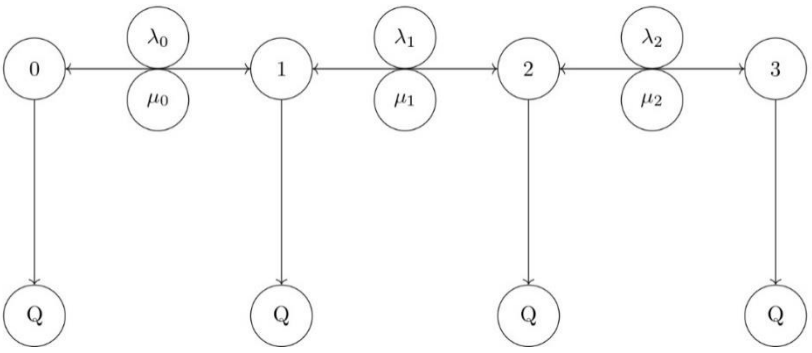


Figure 2. The generic structure of a quasi birth death process

QBD processes (Latouche and Ramaswami, 1999) consist of a main state and sub-states. Similar to Markov models, stochastic transition probabilities are defined in QBD processes.

The transition matrix within the main state in QBD processes is as follows:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P_{00}} & \boldsymbol{P_{01}} & \boldsymbol{P_{02}} & \cdots & \boldsymbol{P_{0N}} \\ \boldsymbol{P_{10}} & \boldsymbol{P_{11}} & \boldsymbol{P_{12}} & \cdots & \boldsymbol{P_{1N}} \\ \boldsymbol{P_{20}} & \boldsymbol{P_{21}} & \boldsymbol{P_{22}} & \cdots & \boldsymbol{P_{2N}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{P_{N0}} & \boldsymbol{P_{N1}} & \boldsymbol{P_{N2}} & \cdots & \boldsymbol{P_{NN}} \end{bmatrix}, \quad (\mathbf{1})$$

where P_{nm} denotes the probability of the transition from state n to state m. Matrix P is defined as the transition matrix that expresses the transition probabilities between the main states in the QBD process. Each row of the matrix represents a specific initial state, and the columns represent states that can be transitioned to. This matrix reflects the stochastic behavior of the process by modeling which state the system can transition from one to another within a time step.

The transition matrix within the sub-states in QBD processes is as follows:

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q_0} & \boldsymbol{Q_1} & \boldsymbol{Q_2} & \cdots \\ \boldsymbol{Q_1} & \boldsymbol{Q_2} & \boldsymbol{Q_3} & \cdots \\ \boldsymbol{Q_2} & \boldsymbol{Q_3} & \boldsymbol{Q_4} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (\mathbf{2})$$

$Q_n(t)$ denotes the probability of the system being in state n at time t, and Q_{nm} denotes the transition rate from state n to state m. Matrix Q is the matrix representing the transition rates or probabilities between sub-states in QBD processes. Each Q_i represents a sub-block matrix showing the transitions between sub-states. Each row and column of the matrix reflects a double-indexed structure (Q_{nm}) encompassing the levels of the system and the substates within those levels. This matrix contains the transition rates of the system and is therefore used in continuous-time QBD processes.

QBD processes typically conclude by reaching fixed values through a convergence process, at which point the transition probabilities are obtained; as follows:

$$\sum_{\boldsymbol{m \neq n}} \boldsymbol{Q_{nm} P_m} = \mathbf{0} \quad (\mathbf{3})$$

2.2. Hidden Markov Models

Hidden Markov Models (HMMs) (Rabiner, 1989) are a stochastic Markov process with unobservable states as in Figure 3, and a HMM is modeled as follows:

- **States:** The system is in one of several hidden states at any time, denoted by $S = \{S_1, S_2, \ldots, S_N\}$, where N denotes total hidden states.

- **Observations:** Each state produces an observable output, denoted by $O = \{o_1, o_2, \ldots, o_M\}$, where M is the total number of observations.
- **Transition Matrix:** The state transition matrix $A=Pr(Q_{t+1}=q_j|Q_t=q_i)$ holds the probabilities of transitioning from one state to another.
- **Emission Matrix:** : The emission matrix $B=Pr(o_t=o|Q_t=q)$ expresses the probability of an output o occurring in the state q at a time t.
- **Initial and Final State Matrix:** The initial state matrix holds the probability of the states occurring at the beginning, while the final state matrix holds the probability of which state will occur in the final state.

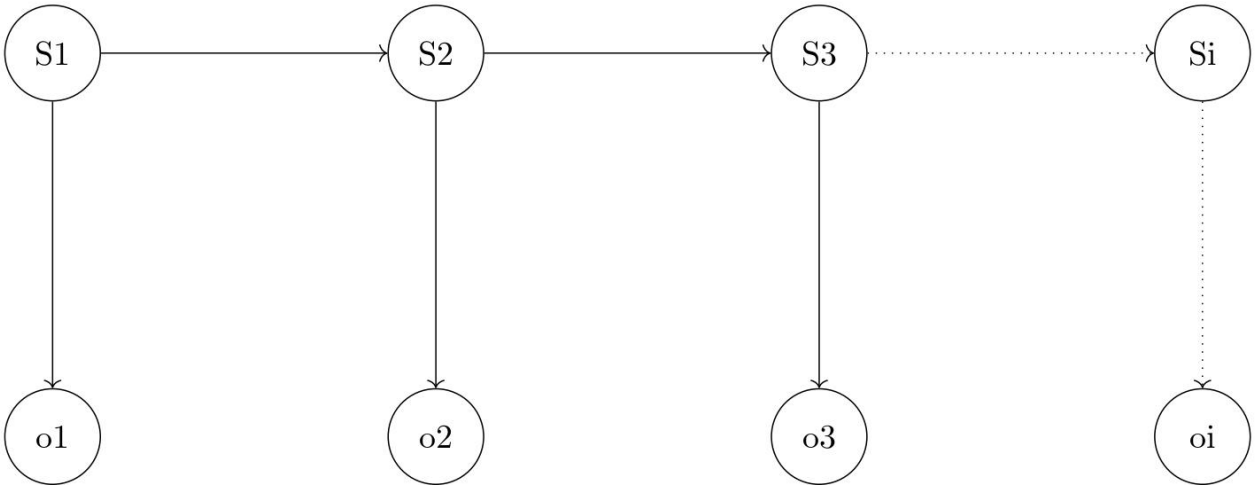


Figure 3. The generic structure of a hidden Markov model

HMMs have 3 problems, evaluation, decoding, and learning (Rabiner, 1989). The evaluation part determines the probability of an observed sequence using a forward or backward algorithm. The forward algorithm is a dynamic programming algorithm, which is the sum of the output probabilities that can be observed in all possible paths from the initial state to the final state. The backward algorithm is the reflection of the forward algorithm on the time axis; the probability of an observed sequence is calculated starting from the final state and moving towards the initial state. The decoding part is determining the most probable state sequence on a sequence of observations, usually with the help of the most widely used Vitrebi algorithm (Etessami et al., 2010). In the Viterbi algorithm, instead of adding all the probabilities as in the forward algorithm, the most probable of each state sequence is selected (Viterbi, 2010). The learning part involves determining the model parameters (i.e., transition and emission matrices) required to produce the observed sequence, usually using the Baum-Welch algorithm (Viterbi, 2010).

2.3. QBD Processes to HMMs Mapping

QBD processes can be described and expressed as HMMs. QBDs are a special case of a probabilistic 1-counter automata. The representation of QBD as a HMM is as follows (Etessami et al., 2010).

QBDs are Markov chains with an infinite state space. The transition matrix has the following structure:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B_0} & \boldsymbol{B_1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots \\ \boldsymbol{A_{-1}} & \boldsymbol{A_0} & \boldsymbol{A_1} & \mathbf{0} & \cdots \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{A_{-1}} & \boldsymbol{A_0} & \boldsymbol{A_1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \quad (\mathbf{4})$$

where B_0, B_1, A_{-1}, A_0, and A_1 are matrices that define the transition probabilities. The matrix P encapsulates the state transition probabilities within the system for the mapping from QBD processes to HMMs and is decomposed into sub-matrices as A and B. The matrix A represents the state transition probability matrix between hidden states in the HMM framework, directly derived from the QBD process's state transitions. The matrix B corresponds to the observation probability matrix, capturing the likelihood of observations given particular hidden states. The indices next to the A and B matrices show the levels. "-1" indicates that the level is decreasing, "0" indicates that it is remaining constant, and "+1" indicates that the level is increasing. In QBD processes, the concept of a level refers to the overall state or load of the system. A common example is the length of a queue. At each level, the system can have a different "weight" or "density", and transitions between these levels occur over time.

The termination probability matrix G represents the probabilities of reaching certain terminal states from given initial states in the Markov chain. G is defined by the following nonlinear equation:

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{A_{-1}} + \boldsymbol{A_0 X} + \boldsymbol{A_1 X^2} \quad (\mathbf{5})$$

Thus, QBD processes can be expressed and analyzed both theoretically and practically in terms of HMMs (Etessami et al., 2010).

One of the most important computational algorithms for the state estimation in HMMs is the Viterbi algorithm (Etessami et al., 2010). We approach the problem with control algorithms that perform better than the Viterbi algorithm.

2.4. The Control Theory of Discrete Event Systems

Discrete event systems control theory was initially proposed as a language theory (Ramadge and Wonham, 1987) and later applied to various domains, such as finite state machines (Chen and Lin, 2001), automata (Asarin et al., 1998), and Petri nets (Luo and Zhou, 2016). The control theory of discrete event systems can be explained using two Mealy machines (Ramadge and Wonham, 1987), M_a and M_b, as shown in Figure 4. Machine M_a has two state conditions: A_0 and A_1. Let us assume that it starts in state A_0. When the input "*a*" is received, it transitions to state A_1; when the input is "*not a*", it remains in the same state. In state A_1, when "*a*" is received, the system transitions back to state A_0, and when

"*not a*" is received, it remains in state A_1. Similarly, let machine M_b have two states: B_0 and B_1, starting in state B_0. When the input "*b*" is received, the system transitions to state B_1; when "*not b*" is received, it stays in state B_0. In state B_1, when "*b*" is received, output "*c*" is generated and the system transitions to state B_0, while remaining in state B_1 when "*not b*" is received. If we want both Mealy machines to be in the same state, that is, either both in state *0* or both in state *1*, and transition to the same state simultaneously, the control theory of discrete event systems suggests that this can be achieved by means of a third Mealy machine. This third machine, *C*, has a single state. It produces output "*b*" in response to the input "*a*" and remains in the same state without producing any output in response to the input "*not a*". If we apply the synchronous product operation to these three Mealy machines, we can achieve the desired system behavior, that is, the specification. This situation implies that in the synchronous parallelism of M_a and M_b, the encapsulation of the input signal "*b*" is achieved, meaning that the "*b*" input is a controllable variable. In other words, we can control the discrete events through a controller that encapsulates the controllable variables in the synchronous parallelism of the two Mealy machines.

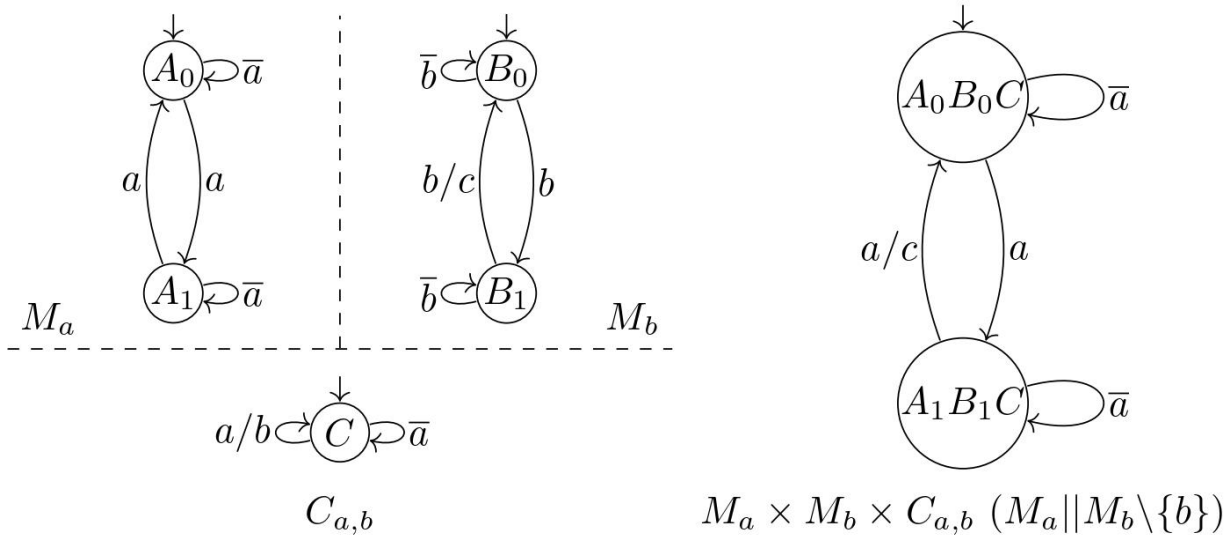


Figure 4. The control theory of discrete event systems

2.5. Discrete Controller Synthesis (DCS) Method

In most cases, the controller needs to be synthesized according to the given specifications (Marchand et al., 2000). This process is referred to as the discrete controller synthesis method. As shown in Figure 5, consider a plant system *S* that is not yet controllable, and let our specifications be represented by the objective *o*. The system has inputs *Y* and outputs *X*. The inputs are categorized into the following parts: controllable inputs (Y_c) and uncontrollable inputs (Y_{uc}), forming two groups. By using appropriate synthesis algorithms, we can generate a supervisor *C* that will produce the intended system behavior.

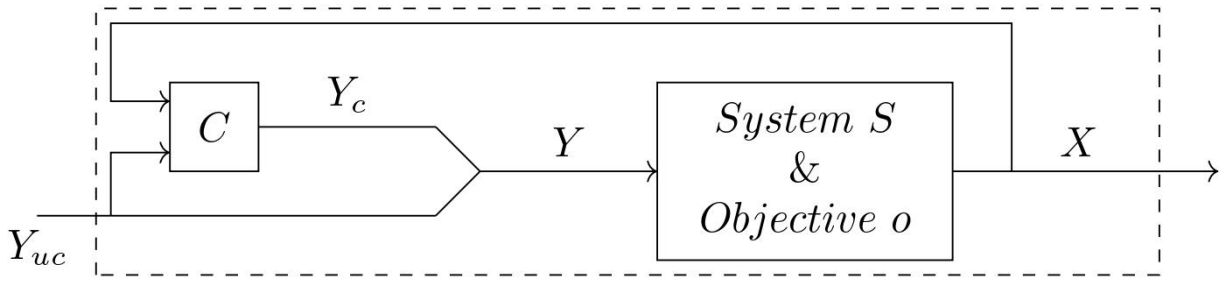


Figure 5. The illustration of the discrete controller synthesis technique

2.6. Computational Steps of the Synthesis Algorithm

In our approach, we utilize the discrete controller synthesis technique and its associated algorithms through the ReaX tool (Berthier and Marchand, 2014). ReaX is a discrete controller synthesis tool that also features its own parallel synchronous dataflow language. Using this language, we encode the plant and specifications in such a way that the resulting system behavior matches our desired outcomes. Afterward, through the compilation process, we generate a controller that guarantees the desired system behavior. The computational steps we follow are illustrated in Figure 6. Initially, the system specifications are defined and written as an expression. The negation of this expression gives us the set of forbidden states, denoted as X_I. In the diagram, X represents our state space region. Within this state space, if, for controllable input variables, any uncontrollable input leads the system to an illegal state, transitioning into X_I, we refer to this as an extended illegal state space X_{EI}. The remaining region of the state space is marked as the safe region, where evaluation is carried out based on the controllable input variables.

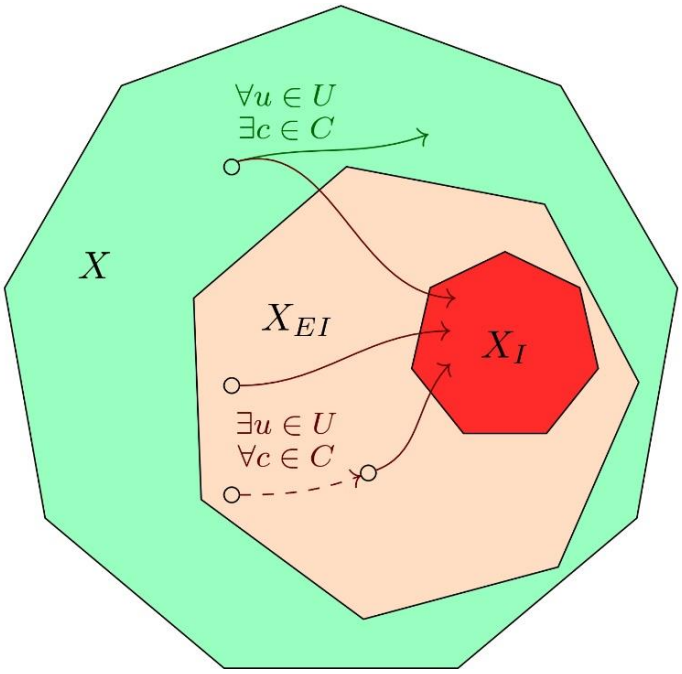


Figure 6. Computational steps of the synthesis algorithm

2.7. Modeling Formalism for the Best Path Computation

In our approach, we first recognize that QBD processes can actually be modeled as HMMs, and we proceed to model it accordingly. We then observe that the most likely path algorithm commonly used in HMMs is the Viterbi algorithm. We identified that the Viterbi algorithm is essentially a control problem, and we formulated the states in the HMM as a discrete controller synthesis problem. We treated the probability values as a cost function and synthesized a controller. Subsequently, we used this controller to find the most likely path.

The Viterbi algorithm is a dynamic programming-based method used to find the hidden state sequence that has the highest probability of producing a given observation sequence (Viterbi, 2010). It works by recursively computing the most probable path to each state at every time step and then backtracking to reconstruct the optimal state sequence.

We first encode the plant and specifications in the form of a parallel synchronous dataflow language. Our modeling phase includes time, states, mutual exclusion constraints, and cost function.

The time variable τ is necessary to facilitate atomic state transitions, and we encode it as shown below:

$$\boldsymbol{\tau = \tau + 1} \tag{6}$$

We have a controller input associated with each state variable, and the state transition is performed by activating the state with this controller, which is encoded as shown below:

$$\boldsymbol{Q_i = c_i,} \qquad \boldsymbol{\forall i \in Q} \tag{7}$$

"*a*" indicates that only one controller is active at any given time while the others remain passive. This situation demonstrates that the controller progresses by selecting one of the possible paths, which is encoded as shown below:

$$\boldsymbol{a = \bigvee_{i=1}^{N} \left(Q_i \wedge \bigwedge_{j=1, j \neq i}^{N} \neg Q_j \right)} \tag{8}$$

We formulate the cost function to perform calculations similar to the Viterbi algorithm. For this, we compute the probabilities in the *A* and *B* matrices of the HMM to calculate the likelihood of transitioning from one state to another and generating an output.

The encoding of the probability values of the matrix *A* as a cost function is as follows:

$$\boldsymbol{p_A = \bigvee_{i,j \in N} Pr(Q_{t+1} = q_j | Q_t = q_i)} \tag{9}$$

The encoding of the probability values of the matrix *B* as a cost function is as follows:

$$\boldsymbol{p_B} = \bigvee_{\boldsymbol{q \in Q, o \in O}} \boldsymbol{Pr(o_t = o | Q_t = q)} \quad (\mathbf{10})$$

p_{LH} represents the probability of transitioning from one state to another and producing a particular output, which is encoded as shown below:

$$\boldsymbol{p_{LH} = p_A * p_B} \quad (\mathbf{11})$$

Finally, we have two objectives: safety and optimization. The safety algorithm ensures the plant and specifications through an invariant. On the other hand, the optimization objective focuses on maximizing the probability while maintaining the integrity of the safety algorithm. Our approach is similar to the Viterbi algorithm, but it explores all possible future scenarios, which results in higher accuracy. The results of our approach are reported in the discussion section.

3. Results and Discussion

In the methodology section, as outlined in the proposed steps, the process begins with mapping the QBD processes to HMMs. Subsequently, these HMMs are modeled as a discrete controller synthesis problem using the parallel synchronized dataflow language, ReaX. This modeling approach encompasses safety objectives, such as mutual exclusions, and also includes optimization goals, enabling the computation of the optimal path. Finally, after applying our safety and optimization algorithms to the model, we generate a supervisor. Concurrently, we implement the HMM model in a Python environment. We then integrate the resulting controller into the HMMs within the Python environment to compute the optimal path and obtain the results.

In stochastic processes, the optimal path is typically computed using the Viterbi algorithm. The Viterbi algorithm determines the likelihood of transitions between hidden states by multiplying the emission probability at each time step. However, our proposed approach examines all potential future steps, resembling a decision-making process. As a result, our method yields significantly better outcomes compared to the Viterbi algorithm.

The Viterbi algorithm involves computing values up to the final observation symbol and then using backtracking to determine the most likely path. In contrast, our proposed approach allows us to look ahead k-steps using the symbolic discrete controller synthesis method. k is a parameter that defines how far ahead the state space can be evaluated within a time window. Specifically, this k-step approach minimizes the total cost function over a time window. In our case, we utilize it to maximize the probability value.

In our experimental evaluation, 1000 random datasets were generated, and the experiments were repeated. During the creation of each dataset, random initial matrices were generated, which include transition and emission probability matrices. The total number of states and observation symbols are also generated randomly. Additionally, an initial state probability matrix and a final state probability matrix were also created. Once these matrices were generated, we randomly constructed state sequences and observation matrices with lengths ranging from 0 to 1000 based on the generated matrices. Subsequently, 80% of the generated dataset is used for the training phase, while the remaining 20% is used for testing.

The Kullback-Leibler (KL) divergence was used to calculate the deviation of the model's predicted from the observed distributions. A lower KL score indicates better alignment between the two distributions. Our method demonstrated superior performance in determining the optimal path compared to previous studies. We improved path accuracy while considering long-term dependencies by means of our optimization algorithm.

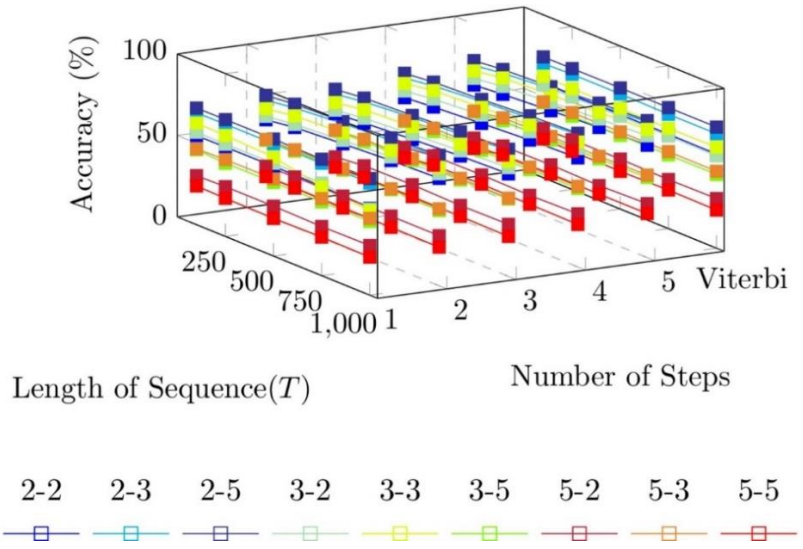


Figure 7. Accuracy results of the Viterbi algorithm and SDCS technique over k-steps

Figure 7 shows the accuracy results of the Viterbi algorithm and Symbolic Discrete Controller Synthesis (SDCS) technique over k-steps. As shown in the figure, there are three axes. The vertical axis represents accuracy results, given as percentages. One of the horizontal axes shows the lengths of the state sequences, ranging from 0 to 1000. The other horizontal axis indicates the steps for k, ranging from 1 to 5, with the results of the Viterbi algorithm shown at the farthest end. The different colors in the legend represent variations in the number of states and symbols, ranging from 2 states and 2 symbols to 5 states and 5 symbols.

The results shown in Figure 7 demonstrate that our approach outperforms the Viterbi algorithm significantly. When examining the performance based on k-step values, it can be observed that the accuracy increases as the k-step value grows. Our experimental evaluations indicate that when the k-

step value exceeds 5, the accuracy tends to plateau. Additionally, changes in the number of state-symbol pairs or the length of the state sequence do not lead to a significant variation in the accuracy of the results.

Table 1. Error rates of the Viterbi algorithm and SDCS technique over k-steps, where the "Algorithm" column indicates the technique used (1 to 5 for future steps in SDCS), the "Error Rate" column shows the percentage deviation

Algorithm	Error Rate (%)
SDCS k-step=1	31.13
SDCS k-step=2	30.27
SDCS k-step=3	30.16
SDCS k-step=4	29.89
SDCS k-step=5	28.87
Viterbi	33.23

We found that increasing step led to a decrease in error rate as shown in Table 1, though the computational complexity grows exponentially with higher step values. The computational complexity of our approach is $O(TN^{k+1})$, compared to the quadratic complexity of the Viterbi algorithm. Table 2 presents the performance of the controller during the compilation process in our proposed approach. The computation times and memory usage are provided for measurements taken with k-step values ranging from 1 to 7.

Table 2. The performance of computational complexity, where the "Algorithm" column indicates the technique used (1 to 7 for future steps in SDCS), the "Time" shows how many seconds it takes for the compilation to be completed, "Memory" indicates the amount of RAM (in KB) occupied during the process

Algorithm	Time (s)	Memory (KB)
SDCS k-step=1	0.31	56574
SDCS k-step=2	11.47	215982
SDCS k-step=3	53.19	612222
SDCS k-step=4	143.66	1811674
SDCS k-step=5	199.65	2835320
SDCS k-step=6	301.53	3024036
SDCS k-step=7	350.72	3572788
Viterbi	412.23	6123840

Our approach outperforms traditional methods and leverages a formal framework for controller synthesis, ensuring safe and appropriate system behavior. Additionally, our method efficiently handles

complex specifications and reduces computational complexity, making it good alternative for realisctic case studies. Our experimental evaluations show that the proposed method is effective for probabilistic processes in order to obtain accurate state sequences.

4. Conclusion

In this work, the control theory of discrete event systems is applied to obtain the accurate state sequence in QBD processes with successful results. QBD models are preferred over HMMs because they allow for more detailed modeling and provide a better representation in certain cases. However, for situations such as computing the most likely path, HMMs are typically used. In our approach, we first transform a system modeled as a QBD into an HMM, and then formulate it as a discrete controller synthesis problem to design a controller that enables the computation of the most likely path. As shown in the evaluation section, this controller yields highly accurate results when determining the most likely path. Our approach also supports the inclusion of constraints and desired specification conditions, making it a flexible and robust solution.

For future work, QBDs can be extended to model expressions involving various conditional states or mutual constraints, and the results can be evaluated accordingly. Additionally, QBD processes can be directly modeled as a symbolic discrete controller synthesis problem. Finally, our approach can be easily applied to such different stochastic processes to obtain effective results.

Statement of Conflict of Interest

The author of the article declares that he has no conflict of interest.

Author's Contributions

The author declares that he has contributed 100% to the article.

References

Antoniotti M., Mishra B. Discrete event models + temporal logic = supervisory controller: Automatic synthesis of locomotion controllers. In Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation 1995; 2: 1441-1446.

Asarin E., Maler O., Pnueli A., Sifakis J. Controller synthesis for timed automata. IFAC Proceedings Volumes 1998; 31(18): 447-452.

Bean N., Latouche G., Taylor P. Physical interpretations for quasi-birth-and-death process algorithms. Queueing Models and Service Management 2018; 1(2): 59-78.

Bean NG., Nielsen BF. Quasi-birth-and-death processes with rational arrival process components. Stochastic Models 2010; 26(3): 309-334.

Berthier N., Marchand H. Discrete controller synthesis for infinite state systems with reax. IFAC Proceedings Volumes 2014; 47(2): 46-53.

Bonafonte CA., Ros MX., Marino JB. An efficient algorithm to find the best state sequence in hsmm. In Eurospeech 1993: 3rd European Conference on Speech Communication and Technology 1993; 22-25.

Brejova B., Brown DG., Vinar T. The most probable annotation problem in hmms and its application to bioinformatics. Journal of Computer and System Sciences 2007; 73(7): 1060-1077.

Chen YL., Lin F. Safety control of discrete event systems using finite state machines with parameters. In Proceedings of the 2001 American Control Conference 2001; 2: 975-980.

Çaşka S. The performance of symbolic limited optimal discrete controller synthesis in the control and path planning of the quadcopter. Applied Sciences 2024; 14(16): 1-27.

Cawley SL., Pachter L. Hmm sampling and applications to gene finding and alternative splicing. Bioinformatics 2003; 19(2): 36-41.

Elhafsi EH., Molle M. On the solution to qbd processes with finite state space. Stochastic Analysis and Applications 2007; 25(4): 763-779.

Etessami K., Wojtczak D., Yannakakis M. Quasi-birth–death processes, tree-like qbds, probabilistic 1-counter automata, and pushdown systems. Performance Evaluation 2010; 67(9): 837-857.

Koller H., Widhalm P., Dragaschnig M., Graser A. Fast hidden markov model map-matching for sparse and noisy trajectories. In 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems 2015; 2557-2561.

Latouche G., Ramaswami V. Introduction to matrix analytic methods in stochastic modeling. SIAM 1999; 45-78.

Luo J., Zhou M. Petri-net controller synthesis for partially controllable and observable discrete event systems. IEEE Transactions on Automatic Control 2016; 62(3): 1301-1313.

Marchand H., Bournai P., Le Borgne M., Le Guernic P. Synthesis of discrete-event controllers based on the signal environment. Discrete Event Dynamic System: Theory and Applications 2000; 10(4): 325-346.

Oura R., Ushio T., Sakakibara A. Bounded synthesis and reinforcement learning of supervisors for stochastic discrete event systems with ltl specifications. IEEE Transactions on Automatic Control 2024; 69(10): 6668-6683.

Özbaltan M. Hidden abstract stack markov models with learning process. Mathematics 2024; 12(13): 1-19.

Özbaltan M., Berthier N. Power-aware scheduling of data-flow hardware circuits with symbolic control. Archives of Control Sciences 2021; 31(2): 431-446.

Özbaltan M., Çaşka S. Incorporating symbolic discrete controller synthesis into a virtual robot experimental platform: An implementation with collaborative unmanned aerial vehicle robots. Drones 2021; 8(5): 1-15.

Özbaltan M., Kurucan M. Obtaining the most likely path in stochastic hidden input automata by using limited optimal discrete control. IEEE Access 2024; 12: 14776-14786.

Rabiner LR. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. Proceedings of the IEEE 1989; 77(2):257–286.

Ramadge PJ., Wonham WM. Supervisory control of a class of discrete event processes. SIAM Journal on Control and Optimization 1987; 25(1): 206-230.

Samari B., Akbarzadeh O., Zaker M., Lavaei A. From a single trajectory to safety controller synthesis of discrete-time nonlinear polynomial systems. IEEE Control Systems Letters 2024; 8: 3123-3128.

Tayachi Z., Escheikh M., Barkaoui K. Performance evaluation of virtual switch with batch arrival using quasi-birth–death process. In 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management 2019; 1-6.

Van LJ., Winands E. Quasi-birth-and-death processes with an explicit rate matrix. Stochastic Models 2016; 22(1): 77-98.

Viterbi AJ. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. IEEE Transactions on Information Theory 1967; 13(2): 260–269.

Wu JL. Control synthesis for discrete-time nonlinear control systems under state and input constraints. IEEE Transactions on Automatic Control 2024; 69(12): 8418-8432.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 254-267, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 254-267, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Enhancement Political Optimizer Algorithm Based on the Leader Redistribution Mechanism

Manaf Adnan Farhood Al-JARAH[1*], Fatma Özge ÖZKÖK[2*]

[1,2]Erciyes University, Engineering Department, Computer Engineering,38280, Kayseri

[1]https://orcid.org/0000-0003-3580-6269
[2]https://orcid.org/0000-0002-1421-4670
*Corresponding author: manaf.farhood@gmail.com

Research Article

Article History:
Received: 30.09.2024
Accepted: 08.08.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Optimization algorithm
Political optimizer
Benchmark problems
Uni-model functions
Multi-model functions

ABSTRACT

Optimization algorithms are mathematical steps used to find an optimal solution from a set of possible solutions. These solutions usually require a long time, while optimization algorithms can find solutions quickly. Algorithms are typically combined to overcome algorithm weaknesses or improve performance. In this article, we have enhanced the Political Optimizer (PO) using a mechanism that randomly redistributes the leader's positions to increase the searching efficiency and overcome the problem of stagnation in the local solution. We aimed to redistribute the leaders' locations inside the election campaign process to open the road for the leaders to move to new areas. This idea was applied in critical conditions to have a little effect on the algorithm. The enhancement was promising, and the results improved well for the exploration and exploitation phases. We compared the performance of the enhancement algorithm with the classical political optimizer algorithm beside 13 different state-of-the-art algorithms. The evaluation occurred on 50 benchmark problems, 25 were unimodal and 25 were multi-modal objective functions, while the mean result was completed to achieve the stability of the algorithms. The Enhanced Political Optimizer (EPO) achieved 23 optimal solutions and 13 close to the optimal solutions, while the results of the PO were 17 optimal and ten solutions close to the optimal. In terms of execution time, the algorithm was very promising, where the execution times in one run are (0.79336 ~ 0.16673) for the unimodal functions, while multi-model functions record (1.0874 ~ 0.16953) of the highest and lowest values, respectively.

Lider Yeniden Dağıtım Mekanizmasına Dayalı Geliştirme Politik Optimizasyon Algoritması

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 30.09.2024
Kabul tarihi:08.08.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Optimizasyon algoritması
Politik optimizasyon
Kıyaslama problemleri
Tek modelli fonksiyonlar
Çok modelli fonksiyonlar

ÖZ

Optimizasyon algoritmaları, olası çözümler kümesinden optimum bir çözüm bulmak için kullanılan matematiksel adımlardır. Bu çözümlerin bulunması genellikle çok uzun zaman alırken, optimizasyon algoritmaları çözümleri kısa sürede bulabilir. Algoritmalar genellikle algoritmadaki zayıflıkları gidermek veya performansı iyileştirmek için birleştirilir. Bu makalede, arama verimliliğini artırmak ve yerel çözümdeki durgunluk sorununu aşmak için liderlerin konumlarını rastgele yeniden dağıtan bir mekanizma kullanarak Politik Optimizasyoncuyu (PO) geliştirdik. Liderlerin seçim kampanya süreci içindeki konumlarını yeniden dağıtarak liderlerin yeni alanlara taşınmasına yol açmayı amaçladık. Bu fikir, algoritmaya küçük bir etki yaratmak için kritik koşullarda uygulandı, geliştirme çok umut vericiydi ve sonuçlar hem keşif hem de istismar aşamaları için çok iyi iyileşti. Geliştirme algoritmasının performansını, 13 farklı son teknoloji algoritmanın yanı sıra klasik politik optimizasyon algoritmasıyla karşılaştırdık. Değerlendirme 50 kıyaslama problemi üzerinde yapıldı, 25'i tek modlu ve 25'i çok modelli amaç

fonksiyonlarıydı ve ortalama sonuç algoritmaların kararlılığını elde etmek için hesaplıydı. Gelişmiş Politik Optimizasyon (EPO) 23 en iyi çözüme ve en iyiye yakın 13 çözüme ulaşırken, PO'nun sonuçları 17 en iyi ve en iyiye yakın 10 çözümdü. Yürütme süresi açısından algoritma çok ümit vericiydi, tek modlu fonksiyonlar için bir çalıştırmada yürütme süreleri (0.79336 ~ 0.16673) iken, çok modelli fonksiyonlar sırasıyla en yüksek ve en düşük değerleri (1.0874 ~ 0.16953) kaydetti.

To Cite: Al-Jarah MAF., Özkök FÖ. Enhancement Political Optimizer Algorithm Based on the Leader Redistribution Mechanism. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 254-267.

1. Introduction

Optimization algorithms are mathematical methods or procedures used to find the best possible solution to a problem, often under constraints (Tao et al., 2024). These algorithms aim to maximize or minimize an objective function, representing the optimization goal (Zhou et al., 2023). Optimization is critical in various fields, including engineering, economics, machine learning, and operations research (Cheraghi and Hossein Jahangir, 2023). The aim behind inventing optimization algorithms is to solve NP-hard problems that take several years to solve. Optimization algorithms can solve these problems in several steps thanks to their simple mechanics and their avoidance of useless solutions (Chatterjee et al., 2024). Optimization algorithms are divided into two categories: heuristic and meta-heuristic algorithms. Each of these classes is designed to achieve optimal solutions using simple techniques; these techniques usually mimic creatures' behaviors in hunting or any other organized steps to achieve something. Suppose the meta-heuristic algorithm is based on natural behavior. In that case, it is called a Nature-inspired meta-heuristic algorithm, which has been classified into four major groups in the literature: Evolution-based, swarm-based, physics-based, and human behavior-based algorithms (Khan et al., 2024; Ramnath et al., 2024). This study on human behavior-based algorithms called the political optimizer (PO) has improved this algorithm using an adaptation technique to its mechanism. The primary political optimizer simulates the government formation and parliamentary gaining strategies (Askari et al., 2020). The algorithm is designed in four aspects: two involve the exploration phase, the election campaign, and the party switching, and two involve the exploitation phase, which is the election phase and parliamentary affairs. Several improved occurred in the PO in the literature, such as multiple filter political optimizer (Sahu et al., 2022a), political optimizer with interpolation strategy (Zhu et al., 2021), Quasi-oppositional-based political optimizer (Basetti et al., 2021), modeling of chaotic political optimizer (Sunitha et al., 2022) and Dragonfly political optimizer (Muppidi and Kishore, 2023). In this study, we added a heuristic redistributed for the leader's position in the election campaign phase to improve the balance between the exploration and the exploitation phases.

Despite its innovative design, the Political Optimizer (PO) exhibits several mathematical limitations. Its dual-role mechanism can cause interdependent updates that risk premature convergence in complex landscapes. The Recent Past-Based Position Updating Strategy (RPPUS), though effective, introduces search path dependency and may misguide the search in dynamic environments. Additionally, relying on only two reference solutions (party leader and constituency winner) limits directional diversity. The

performance is also sensitive to the party switching rate (λ), which requires careful tuning to balance exploration and exploitation. Lastly, the fixed structure of equal party and constituency sizes reduces adaptability in heterogeneous problem domains.

To handle these limitations, this article proposed periodic random reselection of leaders when no fitness improvement occurs, promoting exploration and preventing stagnation. The structured position-updating logic adapts based on fitness trends, dynamically adjusting search radii to balance exploitation and exploration. This ensures more diverse and adaptive search behavior while preserving the core socio-political structure of the original algorithm. The highlighted points that pushed us to create the article on the enhanced Political Optimizer algorithm include some problem statements, motivation, and the contributions can be summarized in some points:-

- Finding the optimal solution for multi-objective optimization problems by PO is challenging, so the exploration phase should be improved. At the same time, several unimodal problems should be dropped in the local solution.
- Although the PO algorithm represents a complex algorithm, it has a fast running time and short time complexity.
- Our contribution is improving the exploration phase by redistributing the leaders' positions. This idea creates a new search space where the leaders replace the positions with standard agents. This mechanism provides a new search space for the leaders and prevents the algorithm from getting stuck in a local minimum.

After the introduction, this paper begins with a literature review section containing the newer development research of political optimizer algorithms from the highest impact international publishing journals (Elsevier and Springer). Section 3 illustrates the method of the enhancement process, while the fourth section displays the framework's results and implementation steps. This research ends with a discussion and future work, besides highlighting some limitations and gaps State-of-the-art.

2. Literature Review

Dong et al. (Dong et al., 2022) proposed GPOFWA, a hybrid of the Political Optimizer and Fireworks Algorithm, improving subgroup limitations via spark mechanisms. It was validated on 30 benchmark problems, outperforming state-of-the-art algorithms.

Chander et al. (Chander et al., 2023) developed a hybrid Dolphin Echolocation–Political Optimizer to optimize the Tversky index for feature selection. Achieved 0.937 accuracy in classifying big data using clustering techniques.

Sahu et al. (Sahu et al., 2022b) combined multiple filter-based ranking with Political Optimizer to handle high-dimensional, imbalanced DNA microarray data. The hybrid showed strong performance across various machine learning models.

Bashkandi et al. (Bashkandi et al. 2023) introduced a hybrid method using PO, PSO, and CNN for automated brain tumor detection. The PO optimized CNN structure, achieving superior accuracy on preprocessed brain MRI datasets.

Fathy and Rezk (Fathy and Rezk 2022) used the Political Optimizer to estimate SOFC model parameters under steady and dynamic conditions. It achieved high accuracy and robustness, outperforming several modern optimizers.

Kiani et al. (Kiani, Anka, and Erenel 2023) proposed PSCSO, enhancing Sand Cat Swarm Optimization using parliamentary principles to improve exploration and exploitation. Validated on CEC benchmarks and engineering problems, it showed superior performance.

3. Background

3.1. Political optimizer

Politics can be said to be an improvement process from two angles. The first angle is where individuals work to maximize public gain to win elections. In contrast, the other angle pushes parties to secure the most significant number of seats in Parliament to win the formation of a government. The sequence of political improvement includes four stages, each two stages going in one direction: the first direction includes the election campaign and party switching. In contrast, the second direction includes elections between parties and parliamentary affairs. The fifth stage is done only once and includes the formation of the party and the allocation of electoral districts, while the remaining four stages are repeated periodically (Askari et al., 2020).

3.2. Exploration phase

Both the election campaign and the party-switching processes represent the exploration phase in the PO algorithm. In this phase, each agent in the population improves its position concerning the parity leaders or the area winners. The new agent position will update toward the leader or the winner positions locally called (center) according to two conditions and three equations in each condition. See Equations 1 and 2.

$$p^j(t+1) = \begin{cases} m^* + r(m^* - p^j(t)), & \text{if } p^j(t-1) \le p^j(t) \le m^* \text{ or } p^j(t-1) \ge p^j(t) \ge m^* \\ m^* + (2r-1)\lvert m^* - p^j(t)\rvert, & \text{if } p^j(t-1) \le m^* \le p^j(t) \text{ or } p^j(t-1) \ge m^* \ge p^j(t) \\ m^* + (2r-1)\lvert m^* - p^j(t-1)\rvert, & \text{if } m^* \le p^j(t-1) \le p^j(t) \text{ or } m^* \ge p^j(t-1) \ge p^j(t) \end{cases} \quad (1)$$

equation (1) will be active if the solution is improved (i.e., if the fitness of the previous solution is less than the fitness of the current solution), while equation (2) will be active if the solution is collapsed (i.e., the fitness of previous solution is higher than the fitness of current solution) (Askari et al., 2020).

$$p^j(t+1) = \begin{cases} m^* + (2r-1)|m^* - p^j(t)|, & \text{if } p^j(t-1) \le p^j(t) \le m^* \text{ or } p^j(t-1) \ge p^j(t) \ge m^* \\ p^j(t-1) + r(p^j(t) - p^j(t-1)), & \text{if } p^j(t-1) \le m^* \le p^j(t) \text{ or } p^j(t-1) \ge m^* \ge p \\ m^* + (2r-1)|m^* - p^j(t-1)|, & \text{if } m^* \le p^j(t-1) \le p^j(t) \text{ or } m^* \ge p^j(t-1) \ge p^j(t) \end{cases} \quad (2)$$

where

pj (t): Fitness value of the current position of candidate i in party j at iteration t.

Pj (t + 1): Fitness value of the previous position of candidate i in party j at iteration $t-1$.

pj: Position vector of candidate i in party j

r: A random number in the range [0,1], used for stochastic updating of positions.

m∗: A value used in the position update; initially holds the kth dimension of the party leader p∗ and then of the constituency winner c∗

3.3. Exploitation phase

This phase involves the election process and Parliamentary affairs. The election process represents the first exploitation process with mathematical representation by evaluating the fitness of each solution and selecting the fitness one. On the other hand, Parliamentary affairs simulate the exploitation and convergence processes.

4. Materials and Methods

4.1. Enhancement idea

By reviewing the multi-objective problem results, it can be predicted that the weakness of the algorithm in achieving the optimal solution means the algorithm's exploration phase needs a mechanism to improve it. It is clear that the algorithm updates the locations of the agents to the leaders or the winners, but this creates monotonous solutions and inhibits the algorithm's ability to find unconventional solutions, rather than switching positions with the most diminutive leader, fitness. Randomly redistributing the leaders' positions creates a high probability of searching for new solutions. It may allow a vanished leader to regain popularity, see Figure 1.

The exploration phase is divided into two steps depending on the previous solution. If the current solution is greater than or equal to the previous solution, Equation 1 will activate; otherwise, Equation 2 will activate. We exploit the first condition (greater than or equal) to divide it into two conditions. The first is (greater than), which activates Equation 1, and the second is (equal), which activates Equation 3.

Algorithm 1 Election campaign part 3 leaders' redistribution *(P, fitness)*

```
for each, I belong to (1, search agent) do.
    if Prefitness = = fitness(i) then each six iterations
        [~, sorted_indices] = sort-fitness
        diversity_threshold = 0.2
        for each i belongs to (1, searchAgent) do.
            Sp = [0, 1]
            if sp < diversity_threshold then
                r = [1, n]
                position (i, :) = position(sorted_indices(r), :)
            end
        end
    end
end
```

$$P(i + 1) = P(sorted_indices(rand(1,N))) \quad (3)$$

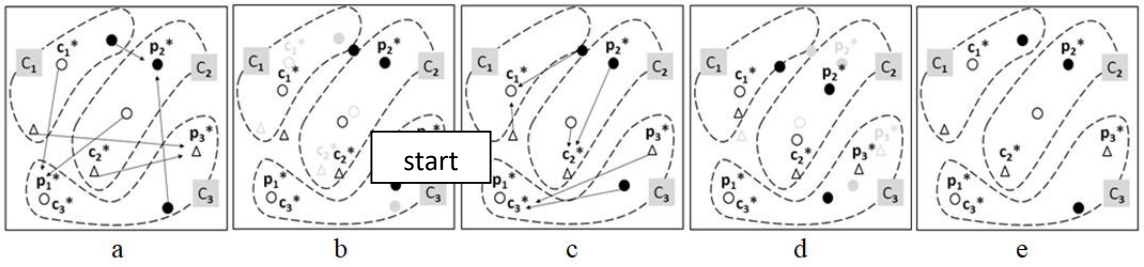


Figure 1. (a, b) shows the position improvement according to the leaders (Equations 1, 2). (c, d) Shows the position improvement according to the constituency winners (Equations 1, 2). (e) Illustrate the new mechanism of the leader's reselection process (Equation 3).

4.2. Total framework

This section explains the total algorithm block diagram, where the algorithm begins by initializing the parity members by creating the population agents. After each individual has been evaluated using the objective function to calculate their fitness, their fitness enables us to select both leaders and winners. After that, the main loop will run until the criteria condition is eliminated (see Figure 2). In the election campaign section, the enhancement statement has been added under this condition (If the previous solution = current solution), then run Equation 3.

4.3. Benchmark functions

To evaluate the performance of the enhancement algorithm, we test it on two sets of benchmark problems from the state-of-the-art; the first set is unimodal-objective functions to test the exploitation capabilities, and the second set is a multimodal-objective function to test the exploration ability. The two sets are explained in two sections below;

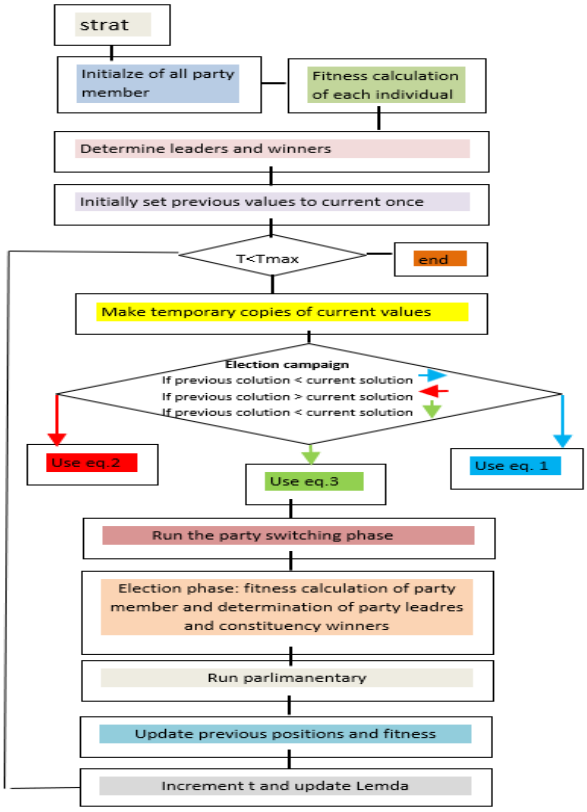


Figure 2. The total framework of the enhancement political optimizer

The unimodel objective functions are (F1 – Sphere, F2 - Quartic Noise, F3 - Powell Sum, F4 - Schwefel's 2.20, F5 - Schwefel's 2.21, F6 – Step, F7 – Stepint, F8 - Schwefel's 1.20, F9 - Schwefel's 2.22, F10 - Schwefel's 2.23, F11 – Rosenbrock, F12 – Brown, F13 - Dixon & Price, F14 - Powell Singular, F15 – Zakharov, F16 - Xin-She Yang, F17 - Perm 0,D,Beta, F18 - Three-hump Camel, F19 – Beale, F20 – Booth, F21 – Brent, F22 – Matyas, F23 - Schaffer N. 4, F24 - Wayburn Seader 3 and F25 – Leon). While the multi-model objective functions are (F1 - Schwefel's 2.26, F2 – Rastrigin, F3 - Periodic, F4 - Qing, F5 - Alpine N. 1, F6 - Xin-She Yang, F7 – Ackley, F8 - Trignometric 2, F9 – Salomon, F10 - Styblinski-Tang, F11 - Griewank, F12 - Xin-She Yang N. 4, F13 - Xin-She Yang N. 2, F14 - Gen. Pendlized, F15 - Pendlized, F16 - Egg Crate, F17 - Ackley N.3, F18 - Adjiman, F19 - Bird, F20 - Camel 6 Hump, F21 - Branin RCOS, F22 - Goldstein Price, F23 - Hartman 3, F24 - Hartman 6, F25 - Cross-in-tray, F26 - Bartels Conn) the optimal values of this functions are mentioned in the results section.

5. Results and Discussion

Acer Nitro PC has implemented all experiments with an Intel CPU 2700G and 6GB GPU. In this section, we arrange the enhancement algorithm to test 50 benchmark problems, with 25 used for the exploration phase and 25 for the exploitation phase. The experiments were run multiple times to determine the optimal parameter values. The experiments were careful not to tamper with the values of the original variables of the basic PO algorithm, such as the population number, the number, and the value of Lambda. However, simultaneously, we implement the experiments several times to obtain the best

values for the new variables, such as the diversity threshold and the iteration period. The experiments found that the best results can be achieved by making the diversity threshold 0.2, and the change occurs every six iterations. See Table 1, which tests more than one case, and select the best values of parameters on the Rosenbrock function.

Table 1. Test several cases to determine the best values of the diversity threshold iteration change

Case number	The diversity threshold	iteration change	Reuslt		
			Best	Worst	main
Case 1	0.1	3	0	0	0
Case 1	0.2	6	0	0	0
Case 3	1	10	0	26.9348	2.6935
Case 4	5	20	0	27.3911	2.7391

Each problem was run ten times, and the final average was calculated to obtain a result with the highest possible stability. At the same time, the results were compared with the original PO algorithm in addition to 13 other algorithms from the literature. Whale Optimization Algorithm (WOA) (Mirjalili and Lewis, 2016), Differential Evolution (DE) (Kukkonen and Lampinen, 2004), Biogeography Based Optimizer (BBO) (Simon, 2008), Grey Wolf Optimizer (GWO) (Mirjalili et al., 2014), Krill Herd (KH) (Gandomi and Alavi, 2012), Salp Swarm Optimization (SSA1) (Mirjalili et al., 2017), Social Spider Algorithm (SSA2) (Yu and Li, 2015), Butterfly Optimization Algorithm (BOA) (Arora and Singh, 2019), Cuckoo Search (CS) (Yang and Suash Deb, 2009), Gravitational Search Algorithm (GSA) (Rashedi, Nezamabadi-pour, and Saryazdi 2009), Sine Cosine Algorithm (SCA) (Mirjalili, 2016), Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) (Rao et al., 2011), Soccer League Competition (SLC) (Moosavian and Kasaee Roodsari, 2014) algorithm. In table 2 the results show the ability of EPO to achieve the nearest to the optimal solution was not achieved in the old version where (F2, F4, F5, F8, F9, F13, F15, F16, F21 and F24) This proves the evolution of the algorithm in the exploitation scenarios where ten new nearest to optimal solution achieved. In contrast, the primary PO achieved only two solutions (F7, F9). The EPO algorithm also obtained an optimal solution for (F19 and F23), thus outperforming the basic PO algorithm. In the exploratory phase, the Enhancement algorithm has obtained 13 optimal solutions (F2, F8, F9, F11, F16 – F22, and F24, F25) in addition to what it shares with the old algorithm of solutions in (F2, F8, F9, F11, F16, and F25) see Table 3. By comparing the nearest to the optimal solution, it was also able to find five new nearest optimal solutions (F1, F5–F7, and F12). In terms of execution time, the algorithm was very promising, where the execution times in one run are

(0.79336 ~ 0.16673) for the unimodal functions, while multi-model functions record (1.0874 ~ 0.16953) of the highest and lowest values, respectively. In the summary of the results section, from 50 benchmark problems, the EPO achieved (26, 18) while the PO achieved (17, 6) optimal and nearest to the optimal solutions, respectively.

Table 2. Comparison among the PO and EPO, besides the other 13 optimization algorithms, to evaluate the performance around the uni-model functions

Fn	Stats	Opt.	BOA	SSA1	WOA	SCA	SSA2	GWO	SLC	KH	TLBO	GSA	CS	BBO	DE	PO	EPO
F-1	Mean	0	1.9E-14	9.4E-08	7.4E-149	1.6E+02	9.3E-05	1.9E-29	1.4E-75	1.3E+00	1.6E-92	6.6E-02	1.0E+02	1.1E+02	3.5E-10	0.0	0
F-2	Mean	0	9.5E-04	3.0E-01	1.8E-03	2.0E+00	1.2E-01	1.5E-03	5.8E-04	1.3E-01	9.2E-04	8.1E-02	1.6E-01	3.9E-03	4.6E-02	3.7E-04	0.000
F-3	Mean	0	2.0E-16	7.9E-07	5.2E-218	2.6E-03	1.4E-26	1.9E-128	2.4E-112	2.1E-07	6.8E-221	1.7E-13	8.4E-12	0.0	4.9E-13	0.0	0
F-4	Mean	0	1.3E-11	3.8E+01	3.9E-102	20E+00	4.5E-03	7.1E-17	4.3E-38	5.3E+00	1.1E-45	1.5E+01	6.4E+01	4.1E+01	8.6E-06	7.7E-179	3.46e-180
F-5	Mean	0	1.2E-11	1.7E+01	7.5E+01	6.2E+01	3.7E+01	1.6E-06	8.6E-36	5.1E+00	3.1E-37	7.4E+00	1.6E+01	5.3E+01	1.8E+01	2.7E-158	1.42e-158
F-6	Mean	0	1.1E+01	8.9E-08	4.2E-01	3.6E+02	1.3E-04	1.7E+00	7.0E-02	1.4E+00	1.8E-05	8.3E-01	9.7E+01	1.0E+02	2.0E-10	0.0	0
F-7	Mean	25 – 6n	-58.60	-212.88	-275.00	-149.80	-51.08	-219.12	-265.72	-79.52	-271.64	-180.40	-233.04	-257.64	-274.96	-275.00	-275
F-8	Mean	0	1.8E-14	5.8E+03	1.3E+05	3.9E+04	2.4E+04	3.1E-04	5.6E-72	3.7E+03	6.5E-13	1.5E+03	1.3E+04	3.6E+04	8.6E+04	1.8E-274	1.80e-281
F-9	Mean	0	3.0E+73	5.0E+36	1.5E-101	1.3E+00	4.1E+68	1.1E-16	1.2E-38	3.5E+59	2.7E-45	2.7E+02	1.0E+10	3.6E+01	6.7E-05	1.5E-179	1.93e-179
F-10	Mean	0	1.9E-21	2.7E-07	0.0E+00	1.7E+08	5.8E-12	3.9E-93	0.0E+00	5.8E-08	0.0E+00	3.5E-03	9.3E+02	1.2E-01	7.6E+03	0.0	0
F-11	Mean	0	4.9E+01	1.7E+02	4.8E+01	2.5E+06	1.7E+02	4.7E+01	4.6E+01	2.5E+02	4.3E+01	1.3E+02	4.5E+03	4.3E+03	7.7E+01	0.0	0
F-12	Mean	0	1.5E-14	2.4E-10	9.3E-147	9.7E-02	7.8E-06	4.5E-32	1.3E-78	2.0E+02	3.1E-95	5.5E+00	1.6E+00	0.0	5.9E-13	0.0	0
F-13	Mean	0	0.99	8.04	0.67	16298.5	9.44	0.67	0.67	9.92	0.67	4.21	67.82	237.28	2.34	0.05	0.03
F-14	Mean	0	1.7E-14	6.4E+00	7.1E-14	2.3E+02	1.2E+00	1.7E-05	2.2E-77	2.8E+00	7.6E-08	3.1E+00	8.6E+00	4.5E+01	5.8E-01	0.0	0
F-15	Mean	0	1.7E-14	1.4E+02	9.3E+02	9.3E+01	6.3E+02	2.2E-06	2.5E-54	4.0E+02	5.4E-03	1.2E+02	6.0E+02	2.9E+02	4.9E+02	9.9E-188	1.008e-189
F-16	Mean	-1	9.1E-48	6.9E-276	-3.2E-01	6.8E-290	0.0E+00	1.2E-165	0.0E+00	5.8E-61	0.0E+00	6.7E-54	0.0E+00	0.0	0.0	-4.8E-01	-0.2
F-17	Mean	0	939.27	44.34	514.73	44.40	131.14	571.13	19.78	97.61	0.72	578.76	2.40	135.89	1.70	16.76	0.9
F-18	Mean	0	1.1E-17	1.5E-15	1.6E-144	2.3E-91	1.2E-02	1.8E-290	2.9E-100	1.7E-11	5.9E-214	1.0E-20	9.3E-26	0.0	2.7E-197	0.0	0
F-19	Mean	0	2.1E-01	2.3E-15	4.4E-11	1.2E-04	5.3E-02	3.0E-02	0.0E+00	1.1E-10	0.0E+00	1.9E-20	1.4E-20	1.8E-01	0.0	1.7E-23	0
F-20	Mean	0	8.5E-02	1.7E-14	1.7E-04	6.0E-04	1.4E-17	1.8E-07	0.0E+00	9.9E-11	0.0E+00	3.1E-20	5.0E-26	0.0	0.0	0.0	0
F-21	Mean	0	1.6E+01	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.3E-04	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.4E-87	1.383e-87
F-22	Mean	0	1.2E-15	5.8E-16	0.0E+00	3.3E-78	2.8E-08	6.7E-162	2.4E-98	7.3E-12	7.2E-155	1.2E-21	2.8E-28	0.0	2.8E-117	0.0	0
F-23	Mean	0.29257	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.31	0.29	0.30	0.29	0.29	0.29258
F-24	Mean	21.35	19.48	19.11	19.11	19.13	19.11	19.11	19.11	19.11	19.11	19.11	19.11	20.44	19.11	19.11	19.1059
F-25	Mean	0	1.5E-02	1.7E-15	1.3E-05	2.1E-04	5.4E-02	4.8E-07	1.4E-32	8.5E-03	4.4E-22	5.1E-03	6.1E-23	0.0	0.0	0.0	0

Optimal solution Nearest to optimal

Table 3. Comparison among the PO and EPO, besides the other 13 optimization algorithms, to evaluate the performance around the multi-model functions.

Fn	Stats	Opt.	BOA	SSA1	WOA	SCA	SSA2	GWO	SLC	KH	TLBO	GSA	CS	BBO	DE	PO	EPO
F-1	Mean	0	3.1E+02	1.8E+02	9.4E+01	3.2E+02	3.5E+02	2.2E+02	2.0E+02	2.2E+02	1.9E+02	3.5E+02	1.7E+02	4.2	2.0E+02	1.3E-05	1.27E-05
F-2	Mean	0	2.9E+01	9.6E+01	0.0	7.8E+01	6.5E+01	2.0E+00	0.0	2.5E+01	9.8E+00	3.6E+01	2.1E+02	0.0	3.0E+02	0.0	0
F-3	Mean	0.9	1.5E+01	1.0E+00	1.0E+00	1.1E+01	3.5E+00	1.6E+00	1.7E+00	5.3E+00	5.6E+00	1.0E+00	2.5E+00	9.0E-01	9.4E+00	9.3E-01	0.96
F-4	Mean	0	1.4E+04	8.1E+01	5.3E+03	2.1E+09	5.0E+01	8.4E+03	3.0E+02	2.2E+03	2.8E+00	2.7E+08	1.0E+10	9.0E+05	1.5E+03	7.7E+01	41.01
F-5	Mean	0	2.2E-14	7.5E+00	2.0E-103	5.4E+00	3.3E-01	5.1E-04	4.5E-40	2.0E-01	2.5E-47	8.6E-03	2.5E+01	1.6E-02	3.3E-02	3.4E-182	2.7e-183
F-6	Mean	0	3.9E+25	1.2E+06	1.0E+04	4.2E+07	9.4E+21	6.6E-23	8.0E-25	3.0E+13	1.7E-15	1.2E-01	1.0E+10	1.4E+15	2.3E+02	7.2E-196	6.36e-196
F-7	Mean	0	1.2E-11	3.4E+00	2.0E-15	1.8E+01	2.3E-01	8.6E-14	-7.5E-16	2.8E+00	4.2E-15	3.0E-02	1.0E+01	1.9	3.8E-06	-8.9E-16	-4.4409e-16
F-8	Mean	1	1.7E+02	4.2E+02	1.3E+02	1.0E+04	2.4E+01	5.7E+01	9.8E+01	1.4E+02	3.0E+01	7.4E+04	3.3E+03	2.8E+03	1.5E+01	1.0	1
F-9	Mean	0	3.1E-01	2.6E+00	1.4E-01	2.5E+00	1.6E+00	2.1E-01	1.0E-01	2.7E+00	1.6E-01	4.4E+00	4.7E+00	3.6	5.2E-01	0.0	0
F-10	Mean	-39.16599	NA	-1.6E+03	-1.9E+03	-8.9E+02	-9.0E+02	-1.4E+03	-1.7E+03	-1.6E+03	-1.7E+03	-1.8E+03	-1.6E+03	-2.0E+03	-1.9E+03	-2.0E+03	-1958.3083
F-11	Mean	0	4.9E-15	7.6E-03	8.8E-03	9.4E-01	1.3E-03	1.6E-03	0.0	1.8E-01	0.0	5.3E-02	9.8E-01	1.0	5.9E-04	0.0	0
F-12	Mean	-1	2.2E-18	2.3E-30	-2.4E-01	7.3E-16	1.7E-21	2.2E-23	1.7E-21	8.4E-20	3.7E-23	8.9E-22	4.1E-21	6.9E-22	2.7E-20	-6.8E-01	-0.7
F-13	Mean	0	9.8E-13	7.1E-19	1.4E-20	7.6E-16	7.3E-18	2.7E-12	1.4E-19	4.6E-08	1.7E-19	2.7E-20	1.1E-19	9.9E-20	1.4E-19	1.2E-20	1.20e-20
F-14	Mean	0	5.0E+00	6.2E+01	7.8E-01	1.6E+07	4.7E-02	1.5E+00	1.9E+00	2.1E+01	9.0E-02	2.2E+01	3.1E+01	3.7	1.7E-01	1.3E-32	1.3e-32
F-15	Mean	0	8.6E-01	9.7E+00	1.1E-02	4.3E+06	3.6E-02	5.9E-02	1.6E-03	2.0E+00	1.4E-07	1.5E+00	5.0E+00	5.4E-01	1.1E-03	9.4E-33	9.4e-33
F-16	Mean	0	9.6E-22	2.8E-14	3.7E-218	1.2E-89	1.2E-117	0.0	1.2E-97	1.1E-10	6.6E-217	1.4E-19	1.1E-23	0.0	6.1E-228	0.0	0
F-17	Mean	-195.629	NA	-195.63	-195.63	-195.63	-192.62	-195.63	-195.63	-195.63	-195.63	-195.63	-195.63	-194.57	-195.63	-195.63	-195.629
F-18	Mean	-2.02181	NA	-2.02	-2.02	-2.02	-2.19	-2.02	-2.02	-2.02	-2.02	-2.02	-2.02	-2.01	-2.02	-2.02	-2.0218
F-19	Mean	-106.7645	NA	-106.76	-106.76	-106.71	-80.59	-105.99	-106.76	-105.99	-106.76	-106.47	-106.76	-100.41	-106.76	-106.76	-106.7645
F-20	Mean	-1.0316	NA	-1.03	-1.03	-1.03	-1.01	-1.03	-1.03	-1.03	-1.03	-1.03	-1.03	-0.90	-1.03	-1.03	-1.0316
F-21	Mean	0.3978873	0.90	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.47	0.40	0.40	0.39789
F-22	Mean	-3.862782	NA	-3.86	-3.86	-3.86	-3.10	-3.86	-3.86	-3.86	-3.86	-3.86	-3.86	-3.82	-3.86	-3.86	-3.8628
F-23	Mean	-3.32237	NA	-3.22	-3.27	-2.95	-1.66	-3.28	-3.28	-3.28	-3.32	-3.32	-3.32	-3.08	-3.28	-3.30	-3.2982
F-24	Mean	-2.06261218	NA	-2.06	-2.06	-2.06	-2.85	-2.06	-2.06	-2.06	-2.06	-2.06	-2.06	-2.05	-2.06	-2.06	-2.0626
F-25	Mean	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.19	1.00	1.00	1

Optimal solution Nearest to optimal

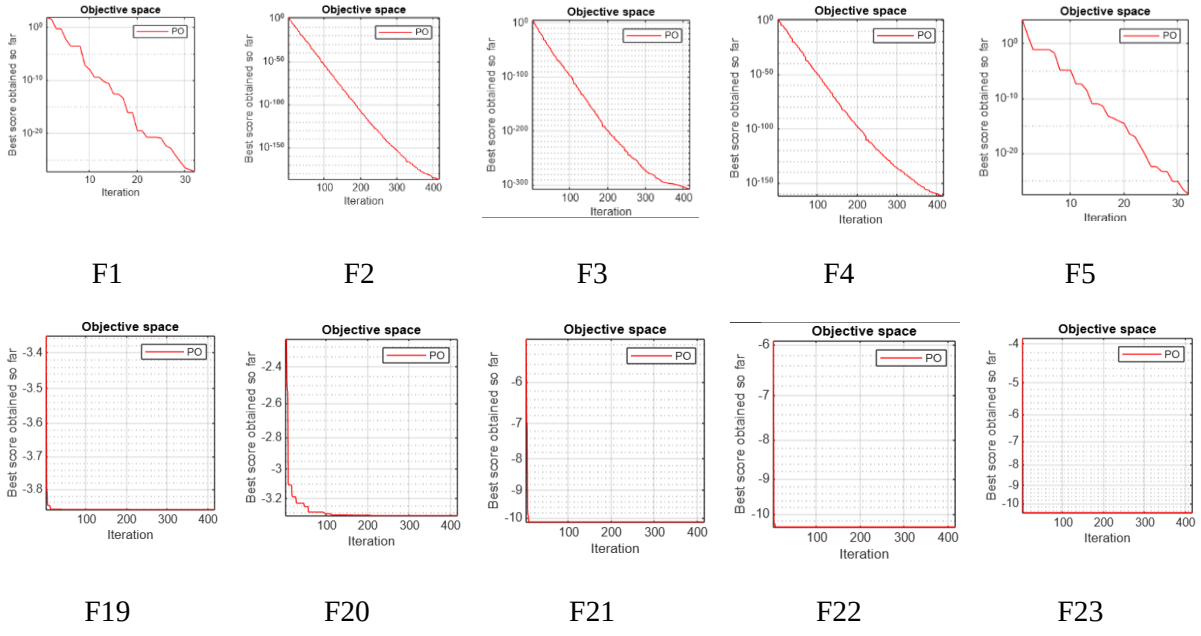


Figure 3: The convergence of the classic political optimizer

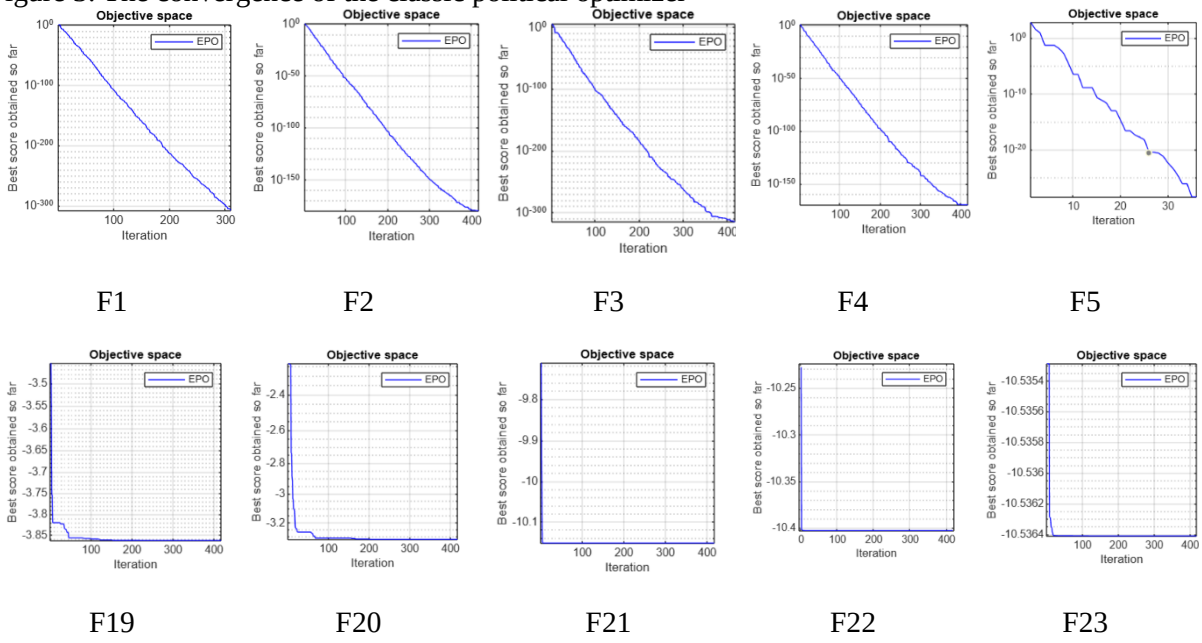


Figure 4. The convergence of the classic Enhancement political optimizer

6. Conclusion

This study presents enhancements to the political optimizer algorithm. The basic optimizer involves the election campaign and party switching mechanism in the exploration technique, and gathers each election phase and parliamentary affairs for the exploitation phase. The algorithm suffered from a weakness in the exploration phase, where the multi-objective functions were not solved, or a good solution could not be found. Also, the exploitation phase missed the optimized solutions repeatedly. Thus, the enhancement idea introduces the basic algorithm to rescue it from these dangers. We aimed to redistribute the leaders' locations inside the election campaign process to open the road for the leaders

to move to new areas. This idea was applied in critical conditions, and each of the six iterations with a threshold value had little effect on the algorithm; the enhancement was very promising, and the result improved very well for both the exploration and exploitation phases. We compared the performance of the enhancement algorithm with the classical political optimizer algorithm beside 13 different state-of-the-art algorithms. The evaluation occurred on 50 benchmark problems, 25 were unimodal and 25 were multimodal objective functions, while the mean result was completed to achieve the stability of the algorithms. Moreover, for future enhancement, the algorithm needs more balance mechanisms to achieve higher results, where there are some functions with alarming results, which means that the algorithm is sometimes stuck in a local minimum, such as F1, F2, and F4. Better results can be achieved by balancing the exploration and exploitation phases.

Conflict of Interest Statement

The article's author declares that there is no conflict of interest.

Contribution Rate Statement Summary of Researchers

The author declares that he has contributed 100% to the article.

References

Arora S., Singh S. Butterfly optimization algorithm: A novel approach for global optimization. Soft Computing 2019; 23(3):715–734. doi:10.1007/s00500-018-3102-4.

Askari Q., Younas I., Saeed M. Political optimizer: A novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization. Knowledge-Based Systems. 2020; 195: 105709. doi:10.1016/j.knosys.2020.105709.

Basetti V., Rangarajan SS., Shiva CK., Pulluri H., Kumar R., Collins RE., Senjyu T. Economic emission load dispatch problem with valve-point loading using a novel quasi-oppositional-based political optimizer. Electronics 2021; 10(21): 2596. doi:10.3390/electronics10212596.

Bashkandi AH., Sadoughi K., Aflaki F., Alkhazaleh HA., Mohammadi H., Jimenez G. Combination of political optimizer, particle swarm optimizer, and convolutional neural network for brain tumor detection. Biomedical Signal Processing and Control 2023; 81: 104434. doi:10.1016/j.bspc.2022.104434.

Chander S., Vijaya P., Fernandes R., Rodrigues AP., Maheswari R. Dolphin-political optimized Tversky index based feature selection in Spark architecture for clustering big data. Advances in Engineering Software. 2023; 176: 103331. doi:10.1016/j.advengsoft.2022.103331.

Chatterjee Y., Bourreau E., Rančić MJ. Solving various NP-hard problems using exponentially fewer qubits on a quantum computer. Physical Review A. 2024; 109(5): 052441. doi:10.1103/PhysRevA.109.052441.

Cheraghi R., Jahangir MH. Multi-objective optimization of a hybrid renewable energy system supplying a residential building using NSGA-II and MOPSO algorithms. Energy Conversion and Management. 2023; 294: 117515. doi:10.1016/j.enconman.2023.117515.

Dong J., Zou H., Li W., Wang M. A hybrid greedy political optimizer with fireworks algorithm for numerical and engineering optimization problems. Scientific Reports. 2022; 12(1): 13243. doi:10.1038/s41598-022-17076-4.

Fathy A., Rezk H. Political optimizer based approach for estimating SOFC optimal parameters for static and dynamic models. Energy 2022; 238: 122031. doi:10.1016/j.energy.2021.122031.

Gandomi AH., Alavi AH. Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2012; 17(12): 4831–4845. doi:10.1016/j.cnsns.2012.05.010.

Khan S., Yairi T., Tsutsumi S., Nakasuka S. A review of physics-based learning for system health management. Annual Reviews in Control. 2024; 57: 100932. doi:10.1016/j.arcontrol.2024.100932.

Kiani F., Anka FA., Erenel F. PSCSO: enhanced sand cat swarm optimization inspired by the political system to solve complex problems. Advances in Engineering Software 2023; 178: 103423. doi:10.1016/j.advengsoft.2023.103423.

Kukkonen S., Lampinen J. An extension of generalized differential evolution for multi-objective optimization with constraints. In: Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (CEC); 2004 Jun 20-23; Portland, OR, USA. IEEE; 2004. p. 752–61.

Mirjalili S. SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems. Knowledge-Based Systems. 2016; 96: 120–133. doi:10.1016/j.knosys.2015.12.022.

Mirjalili S., Gandomi AH., Mirjalili SZ., Saremi S., Faris H., Mirjalili SM. Salp swarm algorithm: a bio-inspired optimizer for engineering design problems. Advances in Engineering Software 2017; 114: 163–191. doi:10.1016/j.advengsoft.2017.07.002.

Mirjalili S., Lewis A.The whale optimization algorithm. Advances in Engineering Software. 2016; 95: 51–67. doi:10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.

Mirjalili S., Mirjalili SM., Lewis A. Grey wolf optimizer. Advances in Engineering Software. 2014; 69: 46–61. doi:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

Moosavian N., Kasaee Roodsari B. Soccer league competition algorithm: a novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks. Swarm and Evolutionary Computation 2014; 17: 14–24. doi:10.1016/j.swevo.2014.02.002.

Muppidi S., Prakash PG., Kishore B. Dragonfly political optimizer algorithm-based rider deep long short-term memory for soil moisture and heat level prediction in IoT. The Computer Journal. 2023; 66(6): 1350–1365. doi:10.1093/comjnl/bxab215.

Ramnath GS., Harikrishnan R., Muyeen SM., Kukker A., Pohekar SD., Kotecha K. A peer-and self-group competitive behavior-based socio-inspired approach for household electricity conservation. Scientific Reports 2024; 14(1): 17245. doi:10.1038/s41598-024-56926-1.

Rao RV., Savsani VJ., Vakharia DP. Teaching–learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. Computer-Aided Design 2011; 43(3): 303–315. doi:10.1016/j.cad.2010.12.015.

Rashedi E., Nezamabadi-Pour H., Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm. Information Sciences. 2009; 179(13): 2232–2248. doi:10.1016/j.ins.2009.03.004.

Sahu B., Panigrahi A., Rout SK., Pati A. Hybrid multiple filter embedded political optimizer for feature selection. In: 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP); 2022; 1–6. IEEE.

Sahu B., Panigrahi A., Rout SK., Pati A. Hybrid multiple filter embedded political optimizer for feature selection. In: 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP); 2022b; 1–6. IEEE.

Simon D. Biogeography-based optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2008; 12(6): 702-713. doi:10.1109/TEVC.2008.919004.

Shubham S., Garg H. Recent advances in linear and integer programming models for decision making. Mathematics. 2023; 11(9): 2150. doi:10.3390/math11092150.

Sunitha G., Pushpalatha MN., Parkavi A., Boyapati P., Walia R., Kohar R., Qureshi K. Modeling of chaotic political optimizer for crop yield prediction. Intelligent Automation & Soft Computing 2022; 34(1): 423-437. doi:10.32604/iasc.2022.024757.

Tao H., Abba SI., Al-Areeq AM., Tangang F., Samantaray S., Sahoo A., Siqueira HV., Maroufpoor S., Demir V., Bokde ND., Goliatt L., Jamei M., Ahmadianfar I., Bhagat SK., Halder B., Guo T., Helman DS., Ali M., Sattar S., Al-Khafaji Z., Shahid S., Yaseen ZM. Hybridized artificial intelligence models with nature-inspired algorithms for river flow modeling: a comprehensive review, assessment, and possible future research directions. Engineering Applications of Artificial Intelligence 2024; 129: 107559. doi:10.1016/j.engappai.2023.107559.

Yang XS., Deb S. Cuckoo search via Lévy flights. In: 2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC); 2009; 210–214. IEEE.

Yu JJQ., Li VOK. A social spider algorithm for global optimization. Applied Soft Computing 2015; 30: 614–627. doi:10.1016/j.asoc.2015.02.014.

Zhou W., Liu Y., Li M., Wang Y., Shen Z., Feng L., Zhu Z. Dynamic multi-objective optimization framework with interactive evolution for sequential recommendation. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence 2023; 7(4): 1228–1241. doi:10.1109/TETCI.2023.3251352.

Zhu A., Gu Z., Hu C., Niu J., Xu C., Li Z. Political optimizer with interpolation strategy for global optimization. PLoS One 2021; 16(5): e0251204. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251204

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 268-291, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 268-291, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Endüstriyel/Madensel Atıklardan Elde Edilen Geopolimer Bileşenler Üzerinde Taguchi Metodu Yardımıyla Farklı Üretim Parametrelerinin Etkisinin Belirlenmesi

Hülya TEMİZER[1*], Özlem ÇAVDAR[2], Yavuz Selim AKSÜT[3]

[1,2,3] Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29000, Gümüşhane, Türkiye

[1]https://orcid.org/0009-0001-4618-6336
[2]https://orcid.org/0000-0002-5459-0769
[3]https://orcid.org/0000-0002-4568-3605
*Sorumlu yazar: hlytemizer@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 02.05.2025
Kabul tarihi:16.08.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Taguchi metodu
ANOVA
Yüksek fırın cürufu
Uçucu kül
Maden atığı

ÖZ

Çimento üretimi kaynaklı CO_2 sera gazının ve diğer kirleticilerin başta iklim değişikliği ve küresel ısınma olmak üzere, çevre ve insan sağlığını tehdit ettiği bilinmektedir. Bu çalışmada, geopolimer kompozit harçlar üzerinde farklı üretim parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Ana bağlayıcılar olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren geopolimer yapılara ek olarak endüstriyel ve madensel katkı maddeleri ilave edilmiştir. Bağlayıcılar üzerinde kür sıcaklığı, kür süresi ve endüstriyel /madensel atıklar gibi birçok parametrenin etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda Taguchi metodu kullanılarak 3 farklı seviye ve 6 farklı parametre ile L27 (3^6) ortogonal matris oluşturulmuştur. Çalışmada, üç farklı molar oranı (8M,10M,12M) olmak üzere sodyum hidroksit çözeltisi ile sodyum silikat kullanılmıştır. 56 gün atmosferik kür uygulanan numunelere ANOVA analizleri de yapılmıştır. Taguchi ve ANOVA istatistiksel sonuçlarına göre, geopolimer numuneler üzerinde en etkili parametrenin kür sıcaklığı olduğu belirlenmiştir. 'En büyük en iyidir' kriteri sonuçlarına göre hazırlanan sinyal/gürültü (S/N) oranı verilerinden en etkin sıcaklığın 75^{o}C olduğu anlaşılmaktadır.

Determination of The Effect of Different Production Parameters on Geopolymer Components Obtained from Industrial/Mineral Wastes Using Taguchi Method

Research Article

Article History:
Received: 02.05.2025
Accepted: 16.08.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Taguchi method
ANOVA
Blast furnace slag
Fly ash
Mine waste

ABSTRACT

The production of cement releases CO_2 and other pollutants that significantly threaten environmental and human health, particularly in relation to climate change and global warming. In this study, the effect of different production parameters on geopolymer composite mortars was investigated. Industrial and mineral additives were added to the geopolymer structures containing blast furnace slag and fly ash as main binders. The effects of numerous parameters such as curing temperature, curing time, and industrial/mineral waste on binders have been investigated. In this context, the L27 (3^6) orthogonal matrix was formed with 3 different levels and 6 different parameters using the Taguchi method. Three different molar ratios (8M, 10M, 12M) of sodium hydroxide solution and sodium silicate were used in the study. After 56 days of atmospheric curing, ANOVA analyses were also performed. According to Taguchi and ANOVA statistical results, the most effective parameter on geopolymer samples was curing temperature. From the noise signal (S/N) ratio data prepared according to the results of the "biggest is best" criterion, it is understood that the most effective temperature is 75 ^{o}C.

To Cite: Temizer H., Çavdar Ö., Aksüt YS. Endüstriyel/Madensel Atıklardan Elde Edilen Geopolimer Bileşenler Üzerinde Taguchi Metodu Yardımıyla Farklı Üretim Parametrelerinin Etkisinin Belirlenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 268-291.

1.Giriş

Portland çimento üretiminin neden olduğu kirletici emisyonların etkisinin hafifletilmesi hususu ve artan maliyetleri günümüz araştırmacılarının önemle üzerinde durdukları konuların başında gelmektedir (Çavdar ve Temizer, 2024). Standart portland çimentosu, 2019 yılında yaklaşık 4,2 milyar ton üretimle inşaat sektöründe kullanılan en yaygın yapı malzemesi olarak bilinmektedir (Ganes ve Muthukannan, 2021). Yapılarda çok yaygın bir biçimde kullanılan portland çimentosunun neden olduğu bu sorunların azaltılması, yeni malzeme gruplarının geliştirilmesi ile yakından ilişkilidir (Çavdar ve Yetgin, 2005). Özellikle üretim aşamasında atıkların değerlendirilmesi ile azalan maliyetler, düşük CO_2 salınımlarına olan katkısı ve portland çimentoya benzer performanslar göstermesi gibi birçok özellik, geopolimer uygulamaları son dönemlerde teşvik etmektedir. Ancak bu alanda kullanılacak olan geopolimer bağlayıcıların çevre üzerindeki olumlu etkilerinin yanı sıra mekanik özelliklerinin de istenilen beton performans beklentilerini karşılıyor olması gerekir. Bu nedenle çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak hazırlanan geopolimer betonlarda, dayanım/ durabilite testleri ile birlikte kimyasal/ fiziksel özelliklerinin araştırılması konuları da araştırmacıların ilgi alanlarıdır (Tonyalı, 2021).

Geopolimerler, düşük sıcaklıklarda üretimi yapılabilen, kısa sürede sertleşebilen amorf, yarı kristal ve üç boyutlu geopolimerik yapılardan oluşan inorganik bağlayıcı malzemeler olarak bilinmektedir (Özen, 2021). Phoongernkham ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörlerinin uçucu kül ve yüksek fırın cüruf bağlayıcıları üzerindeki etkileri araştırmışlardır. 3 farklı çözelti hazırlayarak uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve bunların karışımları denenmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarının farklı geopolimer numuneler için 42,8 MPa, 171,7 MPa ve 114,5 MPa olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar üzerinde reaksiyon ürünlerinin, alkali aktivatörler türlerinin ve reaksiyon şartlarının oldukça önemli olduğu belirtilmiştir (Phoongernkham ve ark., 2015).

Taguchi yöntemi kullanılarak üretilmiş, uçucu kül bazlı geopolimer beton karışımlarının basınç dayanımı ve su emme özellikleri üzerinde çeşitli parametrelerin etkisi incelenmiştir. Uçucu kül yerine geleneksel Portland çimentosunun eklenmesinin, farklı molarite de hazırlanmış sodyum hidroksit çözeltililerinin ve farklı kürleme sıcaklıklarında toplam 16 karışım hazırlanmıştır. Varyans analizi ile su emme ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çoklu regresyon analizi kullanılarak, her iki özellik için matematiksel modeller geliştirilmiş ve ardından doğrulama test sonuçları izlenmiştir. Geopolimer beton için sonuçlar değerlendirilmiş ve elde edilen maksimum 7 günlük 64,39 MPa basınç dayanımı ve minimum %3,04 su emme elde edilmiştir. Basınç dayanımı ve su emme özelliklerinde en etkili parametrenin ilave kalsiyum eklenmesinin (uçucu kül yerine OPC formunda) olduğu görülmüştür (Mehta ve ark., 2017).

Bir başka çalışmada, iki farklı atık malzeme olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve çelikhane cürufunu (ÇC) kullanılarak, daha çevre dostu bir bağlayıcının elde edilmesini planlamıştır. Bu amaçla, YFC ve ÇC farklı oranlarda (%80 YFC+ %20 ÇC ve %60 YFC+ %40 ÇC) çimento yerine ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. %80 YFC+ %20 ÇC kullanılarak üretilen geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımlarının, %7,5 ve %9 sodyum oranlarında Portland çimentosuna göre sırasıyla

%16 ve %47 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Değişen bu sodyum oranlarında basınç dayanımları ise sırasıyla 59,87 MPa ve 76,25 MPa olarak tespit edilmiştir (Bingöl, 2022). Endüstriyel yan ürünlerin geopolimer betona dönüştürülmesi, çevre açısından sürdürülebilir yapı elemanlarının ortaya çıkartılması bakımından büyük önem taşımaktadır (Çavdar, 2024). Bu doğrultuda gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise, alümina-silikat bazlı materyaller olarak dolomit ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 çözeltisi kullanılmıştır. Geopolimer beton üretiminde birçok parametrenin etken olduğu vurgulanan çalışmada, optimum numunenin tespit edilmesi için çok fazla sayılarda deneyin yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Bu nedenle çalışmada Taguchi istatistiksel metodu kullanılarak, geopolimer beton üretiminde etkili olan parametreler ve optimum numuneler belirlenmiştir. L9 deney serisi üzerinden karışım oranı, molarite, aktivatör oranı gibi değişken olan etken parametreler kendi içerisinde kıyaslanmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde işlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı gibi sonuçlar incelendiğinde, numunelerin bağlayıcı oranlarının en etkili parametre olduğu ifade edilmiş olup, SEM mikro yapı analizlerinde bu yapıların daha kompakt oldukları gösterilmiştir (Raj ve ark., 2024).

Hamed ve Demiröz (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Taguchi ortogonal L16 dizisi farklı deney parametrelerinin optimizasyonunda kullanılmıştır. Aynı zamanda ANOVA gerçekleştirilerek etkili parametreler belirlenmiştir. Geopolimer ile stabilize edilmiş yüksek plastisiteli killi zemin için en uygun karışım oranlarının %24 uçucu kül, %14 cüruf ve 12 M ile sağlandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu bazlı geopolimerin çimentoya alternatif, sürdürülebilir ve uygulanabilir bir malzeme olarak hizmet edebileceği, aynı zamanda geçirgenliği azaltmak için kullanılabileceği vurgulanmıştır. SEM analizleri iler gerçekleştirilen mikro yapı görüntülerinde, alkali aktivatör eşliğinde uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun hidrasyonu tarafından oluşan birçok geopolimer jelin yoğun bir mikro yapının ortaya çıkmasına neden olduğu belirtilmiştir (Hamed ve Demiröz, 2024). Geopolimer bağlayıcılar olarak atık seramik tozu ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanıldığı çalışmada, bağlayıcı içeriği, ana bağlayıcı oranları, alkali aktivatör çözelti oranları ve molarite gibi değişken parametrelerin etkisini irdelemiştir. Sonuçlar, tek başına bağlayıcı olarak seramik tozunun etkisinin oldukça zayıf olduğunu ancak cüruf ile karışım oluşumunun beraberinde önemli kazanımlar sağladığı belirtilmiştir. 5 faktörlü ve 4 seviyeli L16 ortogonal dizisinin geliştirildiği çalışmada, ANOVA sonuçları 28 günlük basınç dayanımları üzerinde alkali aktivatör /bağlayıcı oranı ve cüruf yüzdesi değişiminin en önemli faktör olduğu, bağlayıcı içeriği ve molaritenin en düşük etki düzeyine sahip olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda mikro yapı analizleri incelendiğinde, benzer kalsiyum hidratları ve silikat fazlarını yansıtan neredeyse eşit Ca/Si ve Si/Al oranlarını göstermiştir. Bununda geopolimer betonun mikro yapısını yoğunlaştıran C-S-H ve C-A-S-H jellerinin oluşumuna yol açtığı söylenmiştir. Yapı içerisinde Ca/Si'ye göre daha yüksek Na/Si oranı, N-A-S-H jelinin C-A-S-H jelleri üzerinde daha baskın olmasına neden olabileceği, bu sonucun mermer tozunun bir yansıması olduğu vurgulanmıştır (Chokkalingam ve ark., 2022). Birçok çalışmada küresel şekillerin varlığının C-A-S-H jellerinin gelişimini doğruladığı bildirilmiştir. Bu durum çalışmada Ca/Si ve Si/Al oranlarının sırasıyla 2,89 ve

1,40 olmasıyla doğrulanmıştır. %100 cüruf içeren numune optimum orana sahip %40 mermer tozu içeren numuneye kıyaslandığında, küresel şekillerin boyutunda bir azalmaya yol açtığı, ancak yüksek Ca/Si, Si/Al ve Na/Si oranlarından da anlaşılacağı üzere C-A-S-H ve N-A-S-H jellerinin daha yüksek derecede bütünleşmesine neden olduğu, bununda karışımın bir sonucu olarak optimum karışımda basınç dayanımının 58,9 MPa ile en yüksek değere ulaştığı belirtilmiştir (Beglarigale ve Yazici, 2014; El-Hassan ve ark., 2018).

Bir başka çalışmada, uçucu külden elde edilen geopolimer beton üzerinde farklı parametrelerin etkisi Taguchı metodu kullanılarak incelenmiştir. Portland çimento ile ikame edilmiş uçucu kül karışımlı betonun basınç dayanımı üzerinde kür süresi, kür sıcaklığı, bekleme süresi, alkali aktivatör oranı, NaOH molaritesi gibi farklı parametrelerin etkisi 36 karışım üzerinde incelenmiştir. Aynı zamanda, dikkate alınan parametrelerle ilgili olarak geopolimer numunelerin basınç dayanımını belirlemek için bir regresyon denklemi geliştirilmiştir. L36 ortogonal deney serisi kullanılarak hazırlanan numunelerde, portland çimento ilavesinin basınç dayanımları üzerinde en etkili faktör olduğu belirtilmiş olup, bunu kür süresi, dinlenme süresi, alkali çözelti oranı ve molarite gibi faktörler takip etmiştir (Raja ve ark., 2021). Taguchi optimizasyon yöntemi farklı ürün grupları ve katkı içeriklerinin belirlenmesinde kullanılan etkili bir optimizasyon yöntemidir (Litu ve ark., 2024; Soltani ve ark., 2024). Farklı kürleme koşullarının geopolimer yapılar üzerindeki etkisi çok önemlidir ve araştırılması gerekir. Farklı kürleme koşullarının geopolimer numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri açısından çok etkili olduğu vurgulanmaktadır (Durak ve Şimsek, 2022; Tunçel, 2024). Günümüz endüstrisi birçok atık bağlayıcıyı bünyesinde (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve atık mermer tozu) barındırmaktadır. Bu ürünlerin mevcut potansiyeli düşünüldüğünde, geopolimer harç ve beton üretiminde ileride önemli noktalara geleceği oldukça açıktır. Endüstriyel atık bazlı geopolimerlerin mekanik özellikleri; alkali çözelti konsantrasyonu, kalsiyum içeriği, kür sıcaklığı ve yaşı, katkı maddelerinden etkilenme düzeyleri gibi birçok özelliğin ortaya koyulması gerektiği yapılan bir başka çalışmada vurgulanmaktadır (Şenol ve Demiral, 2023). Genel olarak farklı geopolimer bağlayıcı türü ve kür şartlarının (laboratuvar, sıcaklık kürü, su kürü) geopolimer numuneler üzerindeki etkisi incelendiğinde, yüksek fırın cürufunun basınç dayanımları üzerinde olumlu bir etki gösterdiği görülmektedir (Altındal, 2020; Kop ve Yazıcıoğlu, 2023).

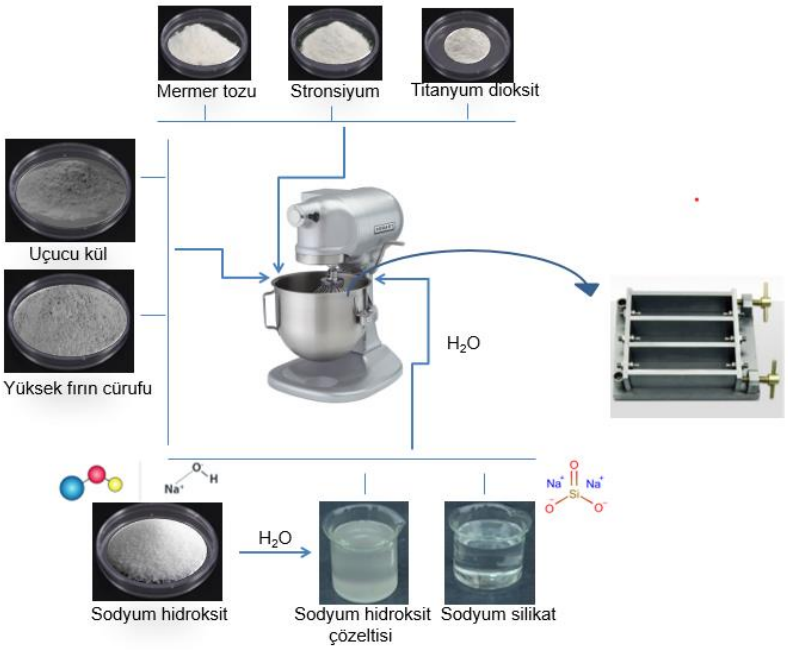
Bu çalışma kapsamında endüstriyel atıkların değerlendirilmesinin yanında deneysel deneme sayısını en aza indirerek farklı faktör ve seviyelere sahip kombinasyonların tanımlanmasını sağlayan istatistiksel bir yaklaşım olan Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem deney tasarımı maliyetini azaltmakta, kaliteyi artırmakta ve sağlam tasarım çözümlemelerine katkı sağlamaktadır. Bu yöntemde 6 temel faktörün (kür süresi, kür sıcaklığı, molarite, maden atığı stronsiyum, mermer tozu, titanyum dioksit) etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir. Endüstriyel atık malzemelerden elde edilen geopolimer numuneler üzerinde katkı maddesi olarak maden atığı (stronsiyum), mermer tozu, titanyum dioksitin etkisi de araştırılmıştır. Bu test edilen kombinasyonlardan elde edilen optimum karışım tasarımı, birçok

performans sonuçlarını ele almakta ve ANOVA testi ile de faktörler arasındaki etki yüzdesi gibi bir çok sonucun elde edilmesine katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada ana bağlayıcılar olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan C sınıfı uçucu kül, Sivas Kangal termik santralinden temin edilmiştir. Uçucu kül içerisinde bulunan $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ miktarı > %50 olduğu için bu kül C sınıfı (yüksek kireçli) uçucu kül olarak bilinmektedir (Yüksek ve Kaya, 2017). C Sınıfı uçucu küllerin çoğu %15'ten fazla CaO içerir, ancak bazı C Sınıfı uçucu küller %10'a kadar az CaO içerebilirler (Belie, 2018). Kangal termik santralinden elde edilen uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan bir diğer bağlayıcı olarak ise yüksek fırın cürufu olup, Bolu Çimento Sanayi A.Ş' den temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir. Bu bağlayıcılarla elde edilen bir geopolimer harç üzerinde mermer tozu, maden atığı (stronsiyum) ve TiO_2 gibi katkı maddelerinin ve üretim parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan stronsiyum Sivas ilinde faaliyet gösteren bir maden işletmesinden temin edilmiştir. Yoğunluğu 3.95-3.97 g/cm^3 aralığında değişen stronsiyumun elemental ve kimyasal kompozisyonu belirlemek amacıyla X-Işını Floresans (XRF) spektrometresi cihazı ile element analizi yapılmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Bir diğer katkı malzemesi olarak kullanılan mermer tozu, yine Sivas ilinde faaliyet gösteren Özmersan mermer A.Ş' den temin edilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi, havuzdan alınan mermer tozu kurutma ve ardından eleme işleminden (200µm lik elek ile) geçirilmiştir. Analizleri yapılan mermer tozuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4'te verilmiştir. Son olarak çalışmada katkı maddesi olarak kullanılan bileşen Titanyum dioksittir. Mega Analitik firmasından temin edilen TiO_2' ye ait özellikler ise Tablo 5'te verilmiştir. Çalışmadaki malzemelere ait XRF analizi Cumhuriyet Üniversitesi meteoroloji ve malzeme bölümünde yapılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan dere kumu Sivas/Kızılırmak (Türkiye) deresinden temin edilmiştir. Dere kumu 4mm'lik elekten geçirilerek karışım içerisinde bu şekilde kullanılmıştır. Geopolimer harç hazırlığı kapsamında, öncelikle tüm kuru bileşenler (yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve katkı maddeleri) karıştırma mikserine alınmıştır. Mikser düşük devirde çalıştırılarak kuru bileşenlerin homojen bir karışım elde edene kadar yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Ardından alkali aktivatör olarak hazırlanan sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile sodyum silikat (Na_2SiO_3) solüsyonu ayrı bir kapta karıştırılmış ve kuru karışıma ilave edilmiştir. Sonrasında 50 gram su eklenerek karışımın kıvamı ayarlanmıştır. Bu aşamadan sonra karıştırma işlemi 1,5 dakika daha sürdürülmüş ve ardından mikser yüksek devirde 4 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Karışım daha sonra spatula yardımıyla elle karıştırılarak homojenlik artırılmış, ardından mikser tekrar çalıştırılarak 1 dakika yüksek devirde, 1 dakika da orta devirde olmak üzere toplam 2 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan taze geopolimer harç, önceden kalıp yağı ile yağlanmış 40×40×160 mm boyutlarındaki prizma kalıplara yerleştirilmiş, vibrasyon ile boşluklar giderilmiştir. Mekanik performansın değerlendirilmesi amacıyla, numuneler üzerinde eğilme dayanımı ve basınç dayanımı

deneyleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ardından kırılan parçalar üzerinde basınç dayanımı deneyleri yine aynı standard uygun şekilde uygulanmıştır. Eğilme ve basınç dayanım deneyleri Gümüşhane üniversitesi yapı laboratuvarında bulunan Yüksel Kaya Makina cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 1. Geopolimer harçların oluşumuna ait şematik gösterim

Taguchi metoduna göre farklı kür süresi, kür sıcaklığı, aktivatör molaritesi gibi değişkenler etki parametreleri olarak tanımlanmıştır. Bu parametrelerin her biri için 3 (üç) farklı seviye belirlenmiştir. Bu seviyeler maden atığı (stronsiyum için) 25 g, 50 g ve 75 g; mermer tozu için, 25 g, 50 g ve 75 g; TiO_2 için ise 5 g, 7.5 g ve 10 g olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, çalışmada 24 saat, 48 saat ve 72 saat kür süreleri için, kür sıcaklığı için 75ºC, 90ºC ve 105ºC değerleri, molarite için ise 8M, 10M ve 12M (Molar) seviyeleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak MiniTab programında Taguchi metodu ile L27 (3^6) ortogonal matrisi oluşturulmuştur. Tablo 6'da görüldüğü gibi 27 adet deney kodu belirlenmiştir. Toplamda 324 adet numune ısıl kür sonrasında 7, 28, 56 ve 90 gün ortam kürü uygulanarak deney gününe kadar hava almayacak şekilde bekletilmiştir. Bu çalışmada Taguchi ve ANOVA analizleri için 56 günlük numuneler seçilmiştir. Seçilen bu numunelere ait Sinyal/Gürültü (S/N) oranları ve Anova istatistiksel verileri elde edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim kütle ve ultrasonik dalga hızları üzerinden S/N oranları ve ANOVA analizleri ile birçok veri yorumlanmıştır.

Tablo 1. Uçucu kül'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler (Kaya, 2016).

Bileşen	(%)
MgO	3,12
Al_2SO_3	14,2
SiO_2	35,01
SO_3	7,56
Na_2O	1,21
K_2O	1,06
CaO	25,75
Fe_2SO_3	5,42
Çözünmez kalıntı	24,21
Kızdırma kaybı	6,02
TOPLAM	99,35
Fiziksel kompozisyon	
Özgül ağırlık(ton/m^3)	2,72
45 mikron elek bakiyesi(%)	44,3
Blain özgül yüzey (cm^2/gr)	3320

Tablo 2. Yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	(%)
SiO_2	40,5
Al_2O_3	12,8
Fe_2O_3	1,11
CaO	35,5
MgO	5,81
K_2O	0,6
SO_3	0,22
TiO_2	0,71
Na_2O	0,7
TOPLAM	97,95
Özgül yüzey (cm^2/g)	5384
Nem (%)	0,1

Tablo 3. Stronsiyuma ait yapılan XRF element analizi sonuçları

Element	%	±2
Sr	82,72	0,55
S	8,88	0,06
Ca	5,90	0,08
Si	1,18	0,02
P	0,875	0,021
Al	0,177	0,069
Ba	0,155	0,012
Mn	0,030	0,005
Ce	0,025	0,014
W	0,016	0,002

Tablo 4. Mermer tozuna ait kimyasal özellikler

NOCHE – Traverten Bileşenleri	%
Al_2O_3	0,22
CaO	54,51
FeO_3	0,11
MgO	0,41
SiO_2	0,87
Yoğunluğu g/cm^3	2,69

Tablo 5. Titanyum dioksite ait yapılan XRF element analizi sonuçları

Element	%	±2
Ti	56,52	1,14
Bal	23,59	1,69
Mg	11,68	1,94
Al	5,75	0,51
Si	0,974	0,069
Cr	0,617	0,141
P	0,284	0,026
S	0,280	0,023
Sr	0,202	0,010
Cl	0,054	0,008

2.1. Taguchi Optimizasyonu

Bu çalışmada Taguchi istatiksel metodu kullanılarak geopolimer harç üretiminde etkili olan parametre, seviye ve optimum numuneler belirlenmiştir. 27 farklı ortogonal dizi ile 27 farklı deney kodu oluşturularak test denemeleri gerçekleştirilmiştir. Sinyal/gürültü (S/N) oranı kullanılmasının amacı anlamsız denemeleri azaltmak ve giriş parametresi optimizasyonuna yardımcı olmasıdır. Sinyal terimi istenilen değeri veya yanıt değişkenini, gürültü terimi ise istenmeyen değeri ve ya standart sapmayı gösterir. Bu orandaki yanıt değişkeni, varyasyon seviyesini ölçmek için bir metrik görevi görür. Amaç ise bu oranı optimize etmek veya maksimize etmek ve bu şekilde istenmeyen varyasyonların veya gürültü etkisini en aza indirmek ve sinyal kalitesini arttırmaktır.

$$\frac{S}{N} = -10x log_{10}(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Yi - Yo)^2) \quad (1)$$

$$\frac{S}{N} = -10x log_{10}(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Yi)^2) \quad (2)$$

$$\frac{S}{N} = -10x log_{10}(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(1/Yi^{2})) \quad (3)$$

Taguchi metoduna göre 3 farklı denklem kategorize edilmiştir. Burada ‘n’ gerçekleştirilen deney sayısını, ‘Yi’ optimizasyon için hedeflenen yanıt değişkenini, ‘Yo’ yanıtların ortalamasını temsil etmektedir. Denklem (1). Nominal kombinasyonun optimizasyon için en uygun olduğunu, Denklem (2). daha küçük daha iyidir optimizasyonunu, Denklem (3) ise en büyük değerlerin optimizasyonunun en uygun olduğunu ‘daha büyük daha iyidir’ vurgular.

Taguchi metodu ile oluşturulmuş olan 27 farklı geopolimer harç karışım oranları Tablo 6’da görülmektedir. Burada uçucu kül oranı sabit tutulmuştur (75 g olarak). Maden atığı (stronsiyum), mermer tozu ve titanyum dioksit (TiO_2) olarak kullanılan katkı malzemeleri ise yüksek fırın cürufu ile ikame edilerek kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, maden atığı (stronsiyum), mermer tozu ve titanyum dioksit harç üretiminde toplamda 500 g olacak şekilde kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan katkı malzemesi miktarı; maden atığı için 25g, 50g, 75g, mermer tozu 25g, 50g, 75 g, titanyum dioksit için ise 5 g, 10 g, 15 g olarak 3 farklı seviyede belirlenmiştir. Aynı zamanda kür süresi (24 saat, 48 saat, 72 saat), kür sıcaklığı (75ºC, 90ºC, 105ºC) ve molarite (8M,10M,12M) şeklinde her biri 3 farklı seviye olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu doğrultuda 3 farklı seviyede toplam 6 farklı değişken parametre için Taguchi metodu kendi arayüz programı ile L27 yani 3^6 ortogonal matrisi elde edilmiştir. 7, 28, 56 ve 90 günlük her bir yaşı için belirlenen numunelerin dökümü tekrarlanarak toplam 324 numune üzerinden eğilme ve basınç dayanım testleri yapılmıştır. Oluşturulan bu geopolimer yapıdaki harçlar 40x40x160mm kalıplarda dökülerek 7, 28, 56 ve 90 gün boyunca hava almayacak şekilde bekletilmiştir.

Tablo 6. Geopolimer malzemelere ait karışım oranları

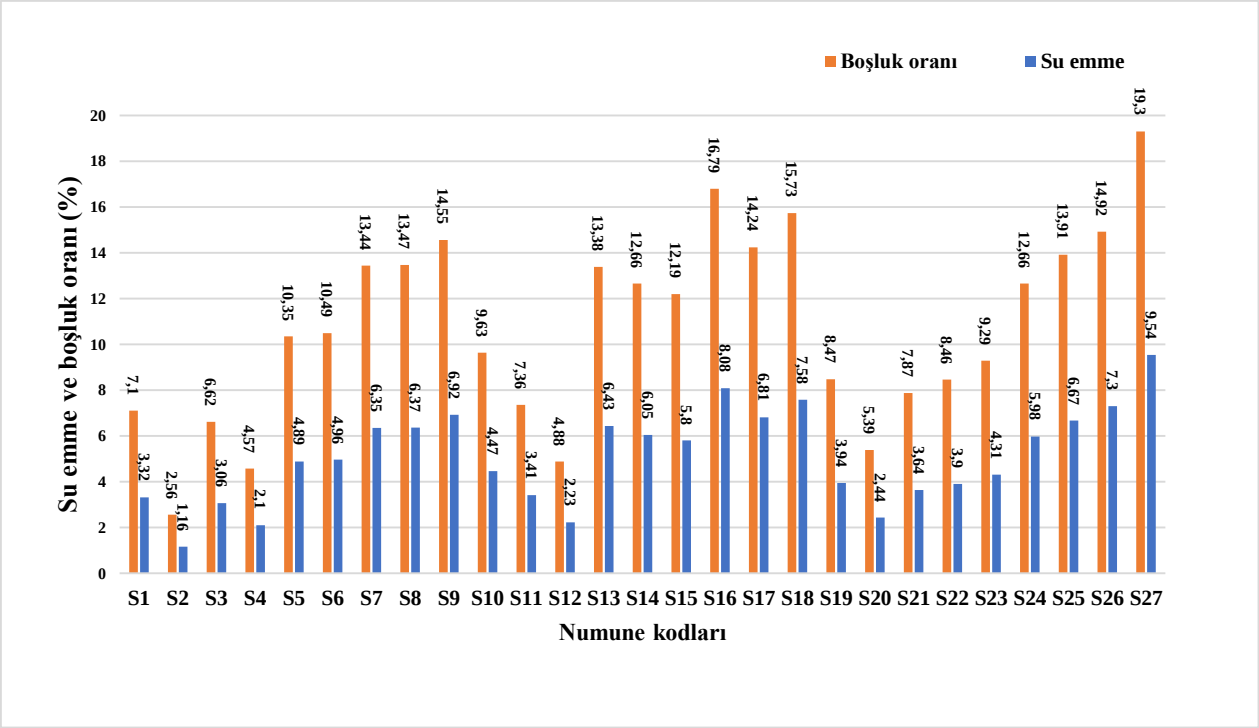
Numune Kodu	Kür süresi (s)	Kür sıcaklığı (^{0}C)	Molarite (M)	Yüksek fırın cürufu (g)	Uçucu kül (g)	Maden atığı (Stronsiyum) (g)	Mermer tozu (g)	TiO_2 (g)
S1	24	75	8	370	75	25	25	5
S2	24	75	8	342,5	75	25	50	7,5
S3	24	75	8	315	75	25	75	10
S4	24	90	10	345	75	50	25	5
S5	24	90	10	317,5	75	50	50	7,5
S6	24	90	10	290	75	50	75	10
S7	24	105	12	320	75	75	25	5
S8	24	105	12	292,5	75	75	50	7,5
S9	24	105	12	265	75	75	75	10
S10	48	75	10	317,5	75	75	25	7,5
S11	48	75	10	290	75	75	50	10
S12	48	75	10	270	75	75	75	5
S13	48	90	12	367,5	75	25	25	7,5
S14	48	90	12	340	75	25	50	10
S15	48	90	12	320	75	25	75	5
S16	48	105	8	342,5	75	50	25	7,5
S17	48	105	8	315	75	50	50	10
S18	48	105	8	295	75	50	75	5
S19	72	75	12	340	75	50	25	10
S20	72	75	12	320	75	50	50	5
S21	72	75	12	292,5	75	50	75	7,5
S22	72	90	8	315	75	75	25	10
S23	72	90	8	295	75	75	50	5
S24	72	90	8	267,5	75	75	75	7,5
S25	72	105	10	365	75	25	25	10
S26	72	105	10	345	75	25	50	5
S27	72	105	10	317,5	75	25	75	7,5

3. Bulgular ve Tartışma

Taguchi yöntemine göre oluşturulan 27 farklı numune serisinden elde edilen su emme ve boşluk oranı sonuçları Şekil 2'de görülmektedir. Çalışmada en düşük su emme ve boşluk oranları S1 ve S20 numune serilerinde bulunmuştur. Su emme oranları %1,40 ile %9,23 arasında değişmektedir. En düşük su emme oranı S1 numunesinde gerçekleşirken, en yüksek su emme oranı S26 numunesinde gerçekleşmiştir. Boşluk oranları %3,8 ile %18,75 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, en düşük boşluk oranı S1 numunesinde meydana gelirken, en yüksek boşluk oranı S26 numunesinde gözlenmiştir. Su emme ve

boşluk oranları üzerinde en etkili parametrenin kürleme sıcaklığı olduğu düşünülmektedir. En düşük su emme ve boşluk oranına sahip S1 numunesi 75 ºC'de ısıl kür uygulanırken, en yüksek su emme ve boşluk oranına sahip S26 numunesi 105ºC'de ısıl kür uygulanmıştır ve kür süresi ve sıcaklığındaki artışın bu sonuçları doğrudan etkilediği düşünülmektedir. Ayrıca bağlayıcı malzemelerin içeriklerindeki farkların da bu sonuca katkı sağlayabilecek önemli bir parameter olduğu söylenebilir. S1 numunesinde yüksek fırın cürufu miktarı 370 g iken, S26 numunesinde 345 g'dir. Bununla birlikte S26 numunesinde mermer tozu oranı 50 g ile S1'e göre iki kat fazladır. Mermer tozu esasen mineral dolgu olarak görev yapmakta ve bağlayıcı reaktivitesine doğrudan katkı sunmamaktadır. Bu nedenle, S26 numunesinde daha az reaktif bağlayıcı bulunması, geopolimerizasyonun yetersiz gerçekleşmesine ve gözeneklerin daha az jelle kapatılmasına yol açmış olabilir. Bağlayıcı miktarındaki azalma ve inert katkıların artışı, reaksiyon ürünlerinin (N-A-S-H, C-A-S-H) hacmini azaltmakta, bu da mikroyapıda boşluk oluşumunu artırmaktadır (Duxson ve ark., 2007; Provis ve van Deventer, 2009).

L27 deney serisi üzerinden elde edilen toplam 324 farklı numuneye ait elde edilen basınç dayanımları Şekil 3'te görülmektedir. Deneylerde kür süresi, kür sıcaklıkları, katkı maddeleri ve molarite gibi çok fazla değişeni içeren geopolimer numuneler içinde en optimum numunelerin elde edilmesi amacıyla kullanılan L27 deney serisine ait numunelere basınç testi uygulanmıştır. Buradan elde edilen veriler aynı zamanda Taguchi yöntemine göre hesaplama yapılan analizler için istenilen giriş sınır şartlarının oluşturmaktadır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımının S20 deney serisi içinde 90 günlük ortam kürüne maruz bırakılan geopolimer numunede (65,74 MPa) meydana geldiği görülmektedir. Aynı zamanda en düşük basınç dayanımı S18 deney serisi içinde 28 günlük ortam kürüne maruz bırakılan geopolimer numunede (24,02 MPa) oluştuğu görülmektedir (Tablo 7). Genel olarak 7, 28, 56 ve 90 günlük ortam kürüne bırakılan numuneler kendi içerisinde değerlendirildiğinde S18 deney serisinde en düşük basınç dayanımlarının elde edildiği, benzer şekilde S19 ve S20 deney serilerinde ise diğer serilere kıyasla, daha yüksek basınç dayanımlarının meydana geldiği söylenebilir. 56 günlük numunelerde de benzer şekilde en yüksek basınç dayanımı S20 numunesinde 56,16 MPa olarak bulunmuştur. En düşük basınç dayanımı ise S18 numunesinde 24,21 MPa olarak ölçülmüştür. Şekil 4. ise 324 adet geopolimer numune için elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. En yüksek eğilme dayanımları S1 ve S20 harç serilerinde kaydedilmiştir. S1 serisi için maksimum değerler hem 7 hem de 28 günlük numunelerden elde edilirken, S20 serisi en yüksek değerlere 7, 28 ve 90 günde ulaşılmıştır. Yeterli kür süresi sağlanmadığında, geopolimer matristeki aktivasyon reaksiyonları tamamlanamamakta, bu da dayanım gelişimini sınırlamaktadır. Ancak uzun süreli ve uygun sıcaklıktaki kür işlemi, daha fazla reaksiyon ürünü oluşumuna ve dayanımda artışa neden olmaktadır (Cheah ve ark., 2016).

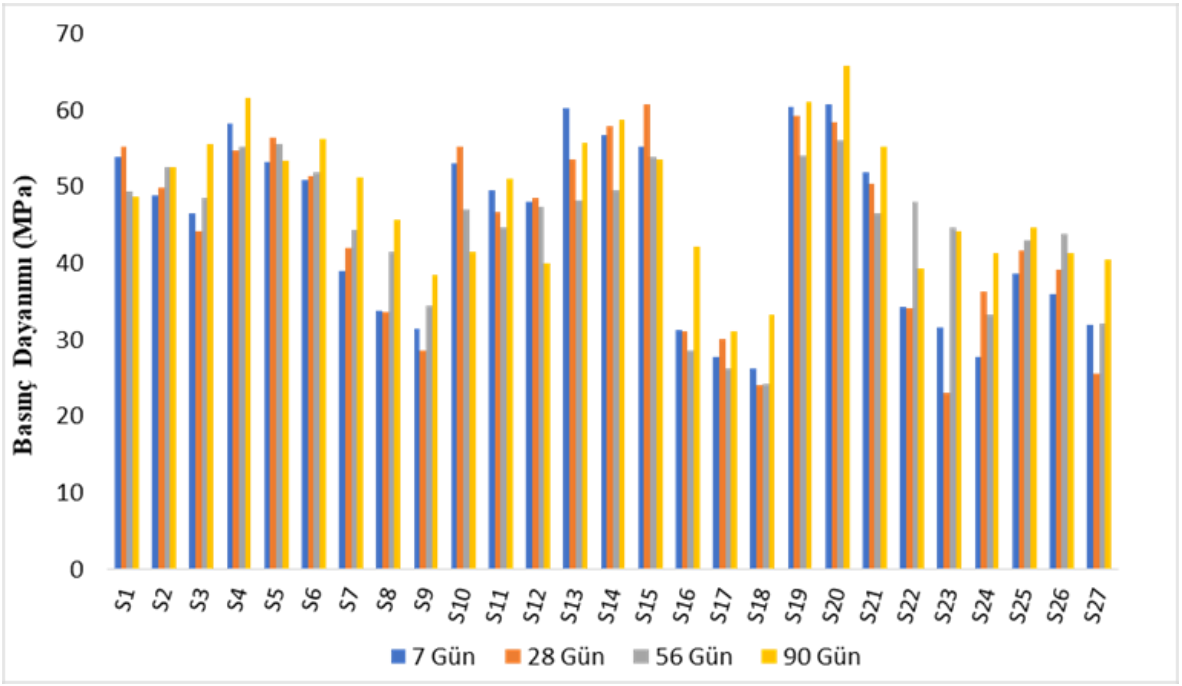


Şekil 2. Numunelerin su emme ve boşluk oranları

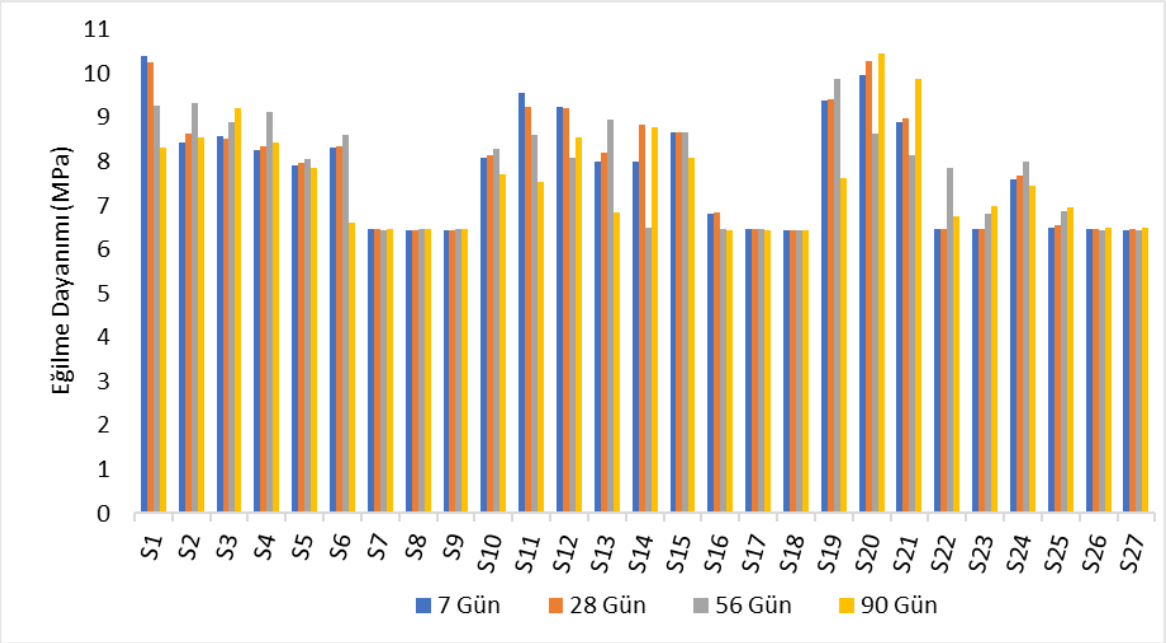
Tablo 7. Eğilme ve basınç dayanımı değerleri tablosu

Numune	Eğilme Dayanımı(MPa) 7g	Eğilme Dayanımı(MPa) 28g	Eğilme Dayanımı(MPa) 56g	Eğilme Dayanımı(MPa) 90g	Basınç Dayanımı(MPa) 7g	Basınç Dayanımı(MPa) 28g	Basınç Dayanımı(MPa) 56g	Basınç Dayanımı(MPa) 90g
S1	4.12	4.38	3.93	4.10	53.93	55.22	49.37	48.75
S2	3.91	4.01	4.19	4.42	48.83	49.80	52.50	52.49
S3	3.63	3.47	3.79	4.30	46.48	44.24	48.57	55.51
S4	4.56	4.21	4.48	4.98	58.34	54.73	55.18	61.67
S5	4.07	4.33	4.55	4.32	53.25	56.43	55.67	53.37
S6	3.90	3.88	3.95	4.20	50.89	51.34	51.96	56.19
S7	3.06	3.31	3.48	4.11	38.91	42.03	44.37	51.17
S8	2.66	2.73	3.26	3.70	33.81	33.55	41.54	45.62
S9	2.55	2.24	2.89	3.30	31.46	28.62	34.52	38.43
S10	4.05	4.24	3.78	3.28	53.00	55.33	46.97	41.46
S11	3.78	3.62	3.55	4.01	49.47	46.66	44.67	50.99
S12	3.66	3.70	3.67	3.10	47.96	48.46	47.38	39.91
S13	4.78	4.19	3.66	4.30	60.26	53.50	48.20	55.83
S14	4.52	4.67	3.94	4.40	56.72	57.92	49.48	58.73
S15	4.34	4.88	4.34	4.21	55.22	60.79	53.84	53.58

Numune	Eğilme Dayanımı(MPa) 7g	Eğilme Dayanımı(MPa) 28g	Eğilme Dayanımı(MPa) 56g	Eğilme Dayanımı(MPa) 90g	Basınç Dayanımı(MPa) 7g	Basınç Dayanımı(MPa) 28g	Basınç Dayanımı(MPa) 56g	Basınç Dayanımı(MPa) 90g
S16	2.45	2.51	2.33	3.20	31.25	31.05	28.63	42.14
S17	2.18	2.38	2.14	2.53	27.71	30.12	26.28	31.02
S18	2.05	1.92	1.89	2.61	26.21	24.02	24.21	33.21
S19	4.75	4.59	4.20	4.90	60.50	59.36	54.02	61.08
S20	4.80	4.52	4.36	5.17	60.81	58.46	56.16	65.74
S21	4.09	3.95	3.74	4.48	51.90	50.40	46.55	55.33
S22	2.75	2.73	3.79	3.10	34.27	34.17	48.10	39.34
S23	2.52	1.85	3.53	3.47	31.58	23.05	44.71	44.19
S24	2.24	2.93	2.68	3.32	27.67	36.32	33.30	41.40
S25	3.13	3.39	3.39	3.53	38.57	41.69	43.03	44.72
S26	2.93	3.20	3.44	3.25	35.88	39.13	43.83	41.25
S27	2.61	2.09	2.52	3.18	31.97	25.61	32.08	40.52



Şekil 3. Geopolimer numunelere ait basınç dayanımı



Şekil 4. Geopolimer numunelere ait eğilme dayanımı

Oluşturulan geopolimer harç numunelerin parametre ve seviyeleri Tablo 8'de gösterilmektedir. Burada Minitab uygulaması ile geliştirilen Taguchi metodu ile 6 farklı parametre ve 3 farklı seviye belirlenmiştir. Belirlenen bu parametre ve seviyelere göre Taguchi ve Anova sonuçları değerlendirilmiştir. Geopolimer numunelerdeki farklı parametrelerin etki seviyeleri Taguchi yöntemi ve varyans analizi ile belirlenmiştir. Tablo 9, en yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği numuneler arasında her bir parametrenin tüm seviyelerdeki ortalama yanıt değerini göstermektedir. 27 farklı numune üzerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı sonuçlarına göre optimum parametrelerin belirlenmesinde etki sırası kür sıcaklığı, molarite, kür süresi, mermer tozu, stronsiyum, TiO_2 şeklindedir. Ortalama yanıt değerlerine göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 1. seviyede, mermer tozu 2. seviyede, TiO_2 2. seviyede optimum olduğu söylenebilir.

Basınç dayanımına ait S/N oran değerleri Tablo 10'da görülmektedir. Optimum parametrelerin belirlenmesinde etki sırası kür sıcaklığı, molarite, kür süresi, mermer tozu, stronsiyum, TiO_2 şeklindedir. Basınç dayanımı S/N oranına göre kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 3. seviyede, stronsiyum 1. seviyede, mermer tozu 1. seviyede, TiO_2 1. seviyede optimum değerlere ulaşmıştır. Parametrelerin önem derecesi S/N analizinden elde edilen ortalama yanıt tablosundaki "delta" değerinden anlaşılabilir. Delta değeri, ilgili parametre için elde edilen S/N oranlarından en büyük ve en küçük olanın farkı ile bulunmaktadır. Delta değeri büyük olan parametre sonuçlar üzerinde daha fazla etkili olmaktadır (Yenginar, 2020).

Tablo 8. Taguchi metoduna göre oluşturulan malzemelerin parametre ve seviye değerleri

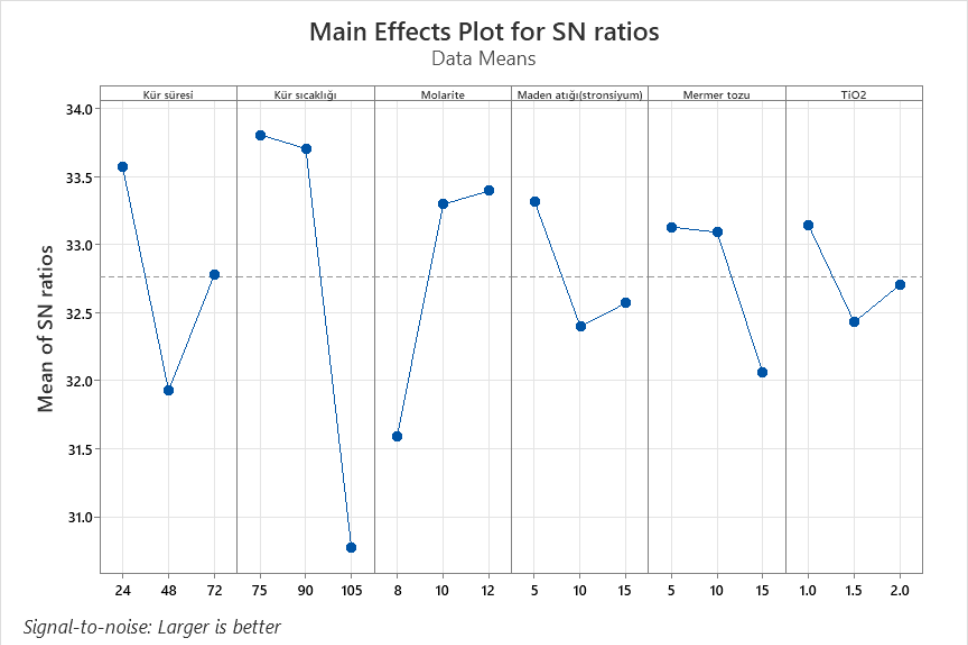
Parametre	Seviye		
	1	**2**	**3**
Kür süresi (s)	24	48	72
Kür sıcaklığı (^{o}C)	75	90	105
Molarite (M)	8	10	12
Madenatığı(Stronsiyum) (%)	5	10	15
Mermer tozu (%)	5	10	15
TiO_2 (%)	1	1,5	2

Tablo 9. Basınç dayanımı için ortalama yanıt değerleri

Level	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO_2
1	**48,19**	**49,11**	39,52	**46,77**	45,96	**46,56**
2	41,07	48,94	46,75	43,83	**46,09**	42,83
3	44,18	35,39	**47,17**	42,84	41,38	44,05
Delta	7,11	13,72	7,65	3,93	4,71	3,73
Rank	3	1	2	5	4	6

Tablo 10. Basınç dayanımı için Sinyal /Gürültü oranı

Level	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO_2
1	**33,57**	**33,81**	31,59	**33,31**	**33,13**	**33,14**
2	31,93	33,70	33,29	32,40	33,09	32,43
3	32,78	30,77	**33,39**	32,57	32,06	32,71
Delta	1,64	3,04	1,80	0,92	1,07	0,72
Rank	3	1	2	5	4	6



Şekil 5. Basınç dayanım S/N oranı grafiği

Basınç dayanımı S/N oranları incelendiğinde Şekil 5, 1. Seviye olan 24 saat kür süresinde maksimum değere ulaşmıştır. Kür sıcaklığı 75 ºC olan 1 seviyede maksimum değere ulaşmıştır ve kür sıcaklığı arttıkça S/N oranı azalmıştır. Molarite 12M 3. Seviyede maksimum değere ulaşmıştır ve molarite değeri azaldıkça S/N oranı azalmıştır. Stronsiyum % 5 oranında 1. Seviyede maksimum S/N oranına ulaşmıştır. Mermer tozu %5 oranında maksimum S/N oranına ulaşmış olup oran arttıkça S/N oranı azalmıştır. TiO_2 %1 oranında 1. Seviyede maksimum S/N oranına ulaşmıştır.

Basınç dayanımı sonuçları üzerinden yapılan analizlerde %92,46'lık güven düzeyinde belirleme katsayısı elde dildiği Tablo 11'da görülmektedir. En etkili parametrenin %52,97 ile kür sıcaklığı olduğu aynı zamanda p değerinin de 0,000 ile anlamlı olduğu belirlenmiştir. %15,80 oranı ile ikinci öneme sahip olan molarite parametresi ise yine 0,000 p değeri ile anlamlı bir sonuç elde edilmiştir. %10,87 ile 3. Sırada yer alan parametre ise kür süresi ile elde edilmiş olup p değeri 0,001 ile anlamlı bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 11. Basınç dayanım için Varyans analizi

Kontrol faktörler	SD	KT	KO	F	P	Etki yüzdesi
Kür süresi	2	228,93	114,47	10,09	0,001	10,87%
Kür sıcaklığı	2	1115,89	557,94	49,18	0,000	52,97%
Molarite	2	332,89	166,45	14,67	0,000	15,80%
Maden atığı (Strontium)	2	75,07	37,53	3,31	0,066	3,56%
Mermer tozu	2	129,81	64,90	5,72	0,015	6,16%
TiO_2	2	65,25	32,63	2,88	0,089	3,10%
Hata	14	158,83	11,34			7,54%
Toplam	26					100%
S	**R-sq**	**PRESS**	**R-sq(pred)**			
3,36822	92,46 %	590,744	71,96%			

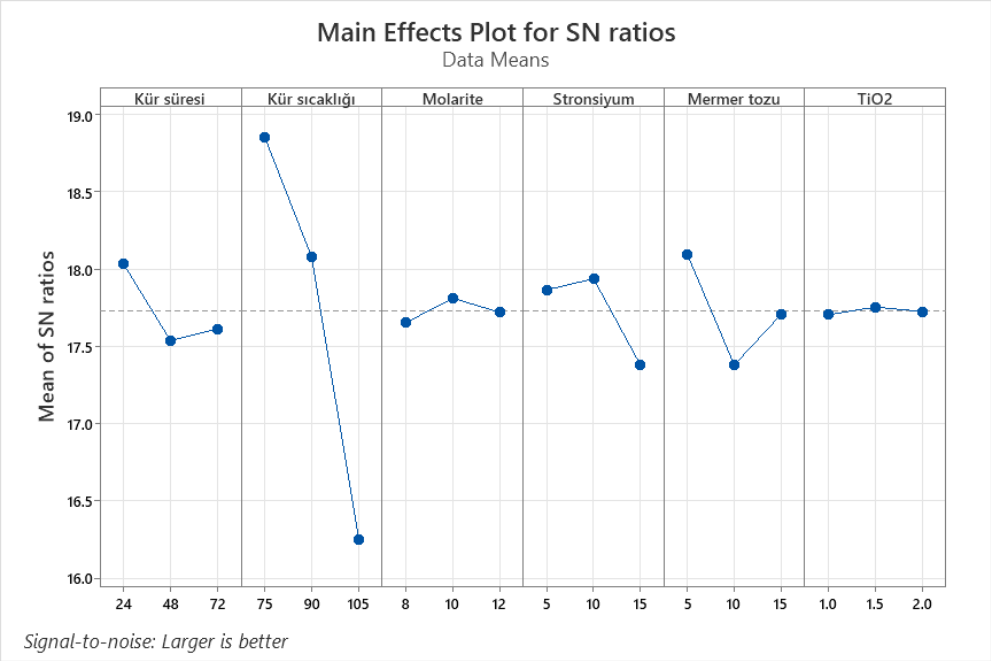
Tablo 12, eğilme dayanımları üzerinde tüm seviyelerde her bir parametreninin ortalama yanıt değerini yansıtmaktadır. Araştırılan parametrelerin eğilme dayanımı üzerindeki etki sırası kür sıcaklığı, mermer tozu, stronsiyum, kür süresi, molarite, TiO_2 şeklindedir. Kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 2. seviyede, stronsiyum 2. seviyede, mermer tozu 1. seviyede, TiO_2 2. seviyede optimum değerlere ulaşılmıştır. Tablo 13, 56 günlük eğilme dayanımına sahip numunelerde S/N oranını göstermektedir. Tabloya göre parametrelerin eğilme dayanımı üzerinde etki sırası kür sıcaklığı, mermer tozu, stronsiyum, kür süresi, molarite, TiO_2 şeklindedir. Kür süresi 1. seviyede, kür sıcaklığı 1. seviyede, molarite 2. seviyede, stronsiyum 2. seviyede, mermer tozu 1. seviyede, TiO_2 2. seviyede optimum değerlere ulaşılmıştır.

Tablo 12. Eğilme dayanımı için ortalama yanıt değerleri

Level	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO_2
1	**8,068**	**8,783**	7,718	7,921	**8,126**	7,765
2	7,603	8,062	**7,832**	**7,977**	7,473	**7,791**
3	7,670	6,497	7,792	7,444	7,742	7,786
Delta	0,464	2,286	0,114	0,533	0,653	0,026
Rank	4	1	5	3	2	6

Tablo 13. Eğilme dayanımı için Sinyal/ Gürültü oranı

Level	Kür süresi	Kür sıcaklığı	Molarite	Maden atığı (stronsiyum)	Mermer tozu	TiO_2
1	**18,03**	**18,86**	17,65	17,87	**18,10**	17,70
2	17,54	18,08	**17,81**	**17,94**	17,38	**17,75**
3	17,61	16,25	17,72	17,38	17,71	17,72
Delta	0,50	2,60	0,16	0,56	0,72	0,05
Rank	4	1	5	3	2	6



Şekil 6. Eğilme dayanımı S/N oranı grafiği

Şekil 6, numunelerin eğilme dayanımına ait S/N oranı grafiğini göstermektedir. Taguchi optimizasyonuna göre 'en büyük en iyidir' hedef alınmıştır. Burada gösterilen parametre ve her bir seviyeye ait optimum seviyeler belirlenmiştir. Eğilme dayanımına ait kür süresi 24 satt 1. Seviyede maksimum değere ulaşılmıştır. Kür sıcaklığı 75 ºC de 1. Seviyede maksimum S/N oranına ulaşılmış olup kür sıcaklığı arttıkça S/N oranı azalmıştır. Molarite oranı %10 oranında kullanıldığında maksimum seviyeye ulaşmıştır. Stronsiyum %10 oranında kullanıldığında S/N oranı maksimum olmuştur. Mermer tozu %5 oranında kullanıldığında maksimum S/N oranına sahip olmuştur. TiO_2 inceleniğinde %1,5 oranında kullanıldığında maksimum değere ulaşılmıştır.

Tablo 14 incelendiğinde, ANOVA sonuçlarına göre %85,26 güven düzeyinde doğruluk görülmektedir. Parametrelerin önemini değerlendirmek için p değeri kullanılır ve bu p değeri 0.05 ten küçük ise istatiksek olarak anlamlı kabul edilir (Tuncel,2024). Tablo 14'te görülen ANOVA sonuçları değerlendirildiğinde, kür sıcaklığının %71,63 ile en etkili parametre olarak görüldüğü ve p değeri 0,005 in çok altında olması sebebiyle anlamlı olduğu düşünülmektedir. İkinci en etkili parametre %5,61 ile

mermer tozu olduğu görülmektedir ayrıca p değeri de 0.103 olduğu belirlenmiştir. Varyans analizi eğilme dayanımı üzerinde en etkili parametrenin kür sıcaklığı olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada seçilen üç farklı kürleme sıcaklığı arasında en düşük kür sıcaklığının eğilme dayanımları üzerindeki olumlu etkisinin basınç dayanımları ile paralel olduğu söylenebilir. Düşük sıcaklık etkisi altında karışımda su bulunmasının hidratasyon sürecini arttırdığı ve buna bağlı olarak daha homojen yapı gruplarının oluştuğu düşünülmektedir. Hidratasyon sürecindeki bu artışın hem basınç hem de eğilme dayanımlarında numunelerin C-S-H ve mikro yapı yoğunluğunu artırdığı söylenebilir (Muhammed ve Yaltay, 2024).

Tablo 14. Eğilme dayanım için Varyans analizi

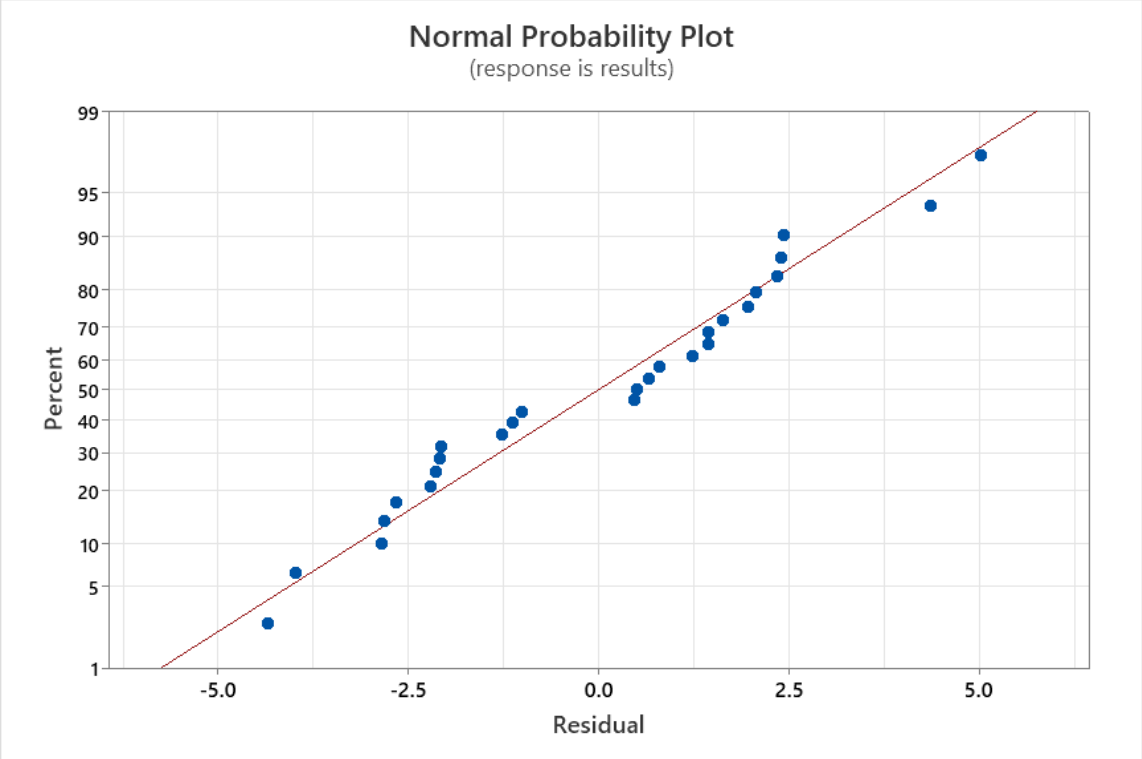
Kontrol faktörler	**SD**	**KT**	**KO**	**F**	**P**	**Etki yüzdesi**
Kür süresi	2	1,1346	0,5673	1,57	0,242	3,30%
Kür sıcaklığı	2	24,5934	12,2967	34,01	0,000	71,63%
Molarite	2	0,0599	0,0300	0,8	0,920	0,17%
Maden atığı (Strontium)	2	1,5453	0,7727	2,14	0,154	4,50%
Mermer tozu	2	1,9372	0,9686	2,68	0,103	5,61%
TiO_2	2	0,0034	0,0017	0.00	0,995	0,01%
Hata	14	5,0619	0,3616			14,74%
Toplam	26					100%
S	**R-sq**	**PRESS**	**R-sq(pred)**			
0,601301	85,26%	18,8271	45,17%			

Tablo 15'de, 27 farklı ortogonal matris ile oluşturulan ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda 6 farklı parametre ve 3 farklı seviye ile belirlenen optimum sonuçlar verilmiştir. Eğilme dayanımına ait optimum sonuçlar şu şekildedir. Kür süresi: 24 saat, kür sıcaklığı: 75 ºC, molarite: 10M, Maden atığı (stronsiyum): %10, mermer tozu: %5, titanyum dioksit: %1,5 oranında kullanılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir. Basınç dayanımına ait optimum sonuçlar şu şeklidedir. Kür süresi: 24 saat, kür sıcaklığı: 75 ºC, molarite: 12M, maden atığı (stronsiyum): %5, mermer tozu: %5, titanyum dioksit: %1 oranında kullanılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir.

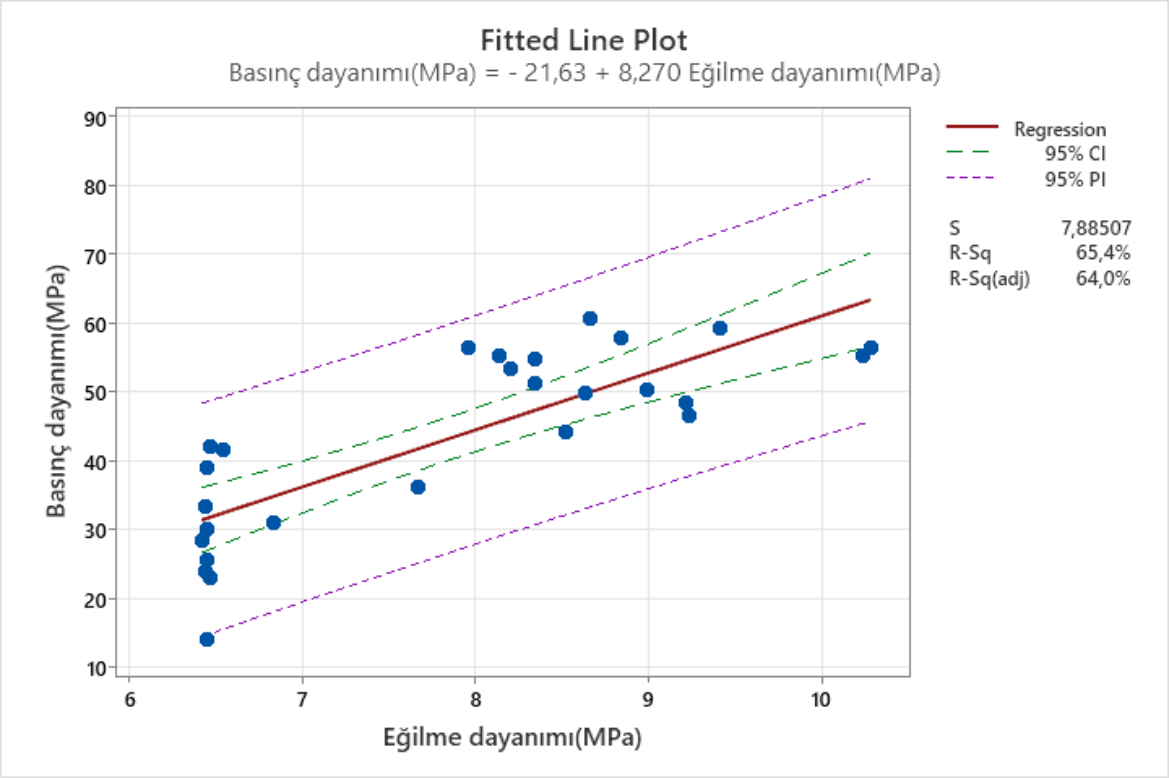
Tablo 15. Taguchi metoduna göre belirlenen optimum numuneye ait parametre ve seviyeler

	Eğilme Dayanımı	**Basınç Dayanımı**
Kür süresi(s)	24	24
Kür sıcaklığı(˚C)	75	75
Molarite (M)	10	12
Madenatığı (Stronsiyum) %	10	5
Mermer tozu (%)	5	5
TiO_2 (%)	1.5	1
Optimizasyon kriteri	En büyük en iyidir	En büyük en iyidir

Şekil 7'de, 27 adet geopolimer numuneye karşılık gelen noktalar görülmektedir. Burada gösterilen noktalar numuneleri temsil etmektedir. Nokta ile gösterilen numuneler çizgiye ne kadar yakınsa o kadar güvenilirlik düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmaya ait numunelerde çizgi üzerine genel olarak yakın olmakla birlikte güvenilirlik düzeyinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı regresyon analizi %65,4 güven aralığında olduğu Şekil 7 (b)'de görülmektedir. Deneysel numuneler öngörülen güven aralığında olduğu ve regresyon eğrisine yakınlığı bazı numunelerde dikkat çekmiştir.



a)



b)

Şekil 7. Basınç dayanımına ait normal olasılık grafiği (a) ve Eğilme dayanımı /Basınç dayanımı regresyon grafiği (b)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Minitab uygulaması üzerinden elde edilmiş L27 (3^6) ortogonal matris üzerinden bulunan, 6 farklı parametre ve 3 farklı seviye ile oluşturulmuş numuneler deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. İstatistiksel sonuçlar Taguchi ve Anova yöntemleri üzerinden değerlendirilmiştir. En büyük en iyidir optimizasyon kriteri kullanılarak elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

•Taguchi metoduna göre hazırlanan 27 farklı numune üzerinden elde edilen en yüksek basınç dayanımı S20 numunesinden 65,74 MPa olduğu gösterilmiştir.

•Eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde 27 farklı numune arasından en yüksek eğilme dayanımına sahip numune S20 numunesinden 10,46 MPa olarak elde edilmiştir.

•Taguchi sonuçlarına göre eğilme dayanımı ile elde edilen optimum faktör, 75 ºC' de kür sıcaklığı olduğu belirlenmiştir.

•Basınç dayanımına göre elde edilen optimum faktör 75 °C kür sıcaklığı olarak elde edilmiştir. S/N sonuçlarına göre kür süresi 24 saat, kür sıcaklığı 75 ºC, molarite 12M, maden atığı %5, mermer tozu %5, titanyum dioksit %1 oranında olduğu istatistiksel sonuçlar doğrultusunda elde edilmiştir.

•Eğilme dayanımı ANOVA sonuçlarına göre %71,63 etki değeri ile kür sıcaklığı en etkili faktör olmuştur.

•Basınç dayanımı ANOVA analizi sonucuna göre %52,97 oranı ile en etkili faktör kür sıcaklığı olmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Gümüşhane Üniversitesi GÜBAP birimi tarafından 2907-23.E3101.07.01 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar, GÜBAP birimine ve çalışanlarına teşekkürlerini sunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Altındal I. Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi. İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 59, İstanbul, Türkiye, 2020.

Beglarigale A., Yazici H. Mitigation of detrimental effects of alkali-silica reaction in cement-based composites by combination of steel microfibers and groundgranulated blast-furnace slag. J. Mater. Civil Eng. 2014; 26(12): 04014091.

Belie ND., Soutsos M., Gruyaert E. Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee 238-SCM, Working Group 4. K. Sideris., H. Justnes., M. Soutsos., Sui T. Fly Ash (ss.55-98). 2018; New York, NY: Springer.

Bingöl Ş. Farklı cüruf türlerinden geopolimer harç üretimi. Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi 2022; 4(2): 173-178.

Cheah CB., Part WK., Ramli M. Effect of sodium silicate and curing regime on properties of load bearing geopolymer mortar block. Journal of Materials in Civil Engineering 2016; 29(4): 04016244.

Chokkalingam P., El-Hassan H., El-Dieb A., El-Mir A. Development and characterization of ceramic waste powder-slag blended geopolymer concrete designed using Taguchi method. Construction and Building Materials 2022; 349: 128744.

Çavdar Ö., Temizer H. Effects on geopolymer mortars of the blast-furnace slags obtained from different regions. International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches 2024; 8(10): 180-190.

Çavdar A., Çavdar Ö. Availability of sedimentary and volcanic rock deposits on Northeastern Turkey as concrete aggregates. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 2024; 134: 103567.

Durak U., Şimşek AA. Investigation of the use of waste iron powder instead of aggregate in fly ash and blast furnace slag based geopolymer systems. Journal of The Institute of Science and Technology 2022; 5(2): 812-828,

Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis JL. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. J Mater Sci 2007; 42, 2917–2933.

El-Hassan H., Shehab E., Al-Sallamin A. Influence of different curing regimes on the performance and microstructure of alkali-activated slag concrete. J. Mater. Civil Eng 2018; 30(9): 04018230.

Ganes AC., Muthukannan M. Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. Journal of Cleaner Production 2021; 282: 124543.

Hamed E., Demiröz A. Optimization of geotechnical characteristics of clayey soils using fly ash and granulated blast furnace slag-based geopolymer. Construction and Building Materials 2024; 441: 137488.

Kaya M. Investigation of mechanical and durability properties of alkali activated mortars produced using different types of fly ashes. Sakarya University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, PhD Thesis, June, Turkey, 2016.

Kop M., Yazıcıoğlu S. Mechanical properties of fly ash and blast furnace slag based geopolymer mortars in thermal curing environment. Gazi University Journal of Science 2023; 11(3): 756-765.

Litu L., Buema G., Mosoarca G., Harja M. Copper ion removal by adsorption using fly ash-based geopolymers: process optimization insights from Taguchi and Anova statistical methods. Materials 2024; 17: 3992.

Mehta A., Siddique R., Singh BP., Aggoun S., Łagód G., Hunek DB. Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method. Construction and Building Materials 2017; 150: 817–824.

Muhammed DT., Yaltay N. Strength and elevated temperature resistance properties of the geopolymer paste produced with ground granulated blast furnace slag and pumice powder. Ain Shams Engineering Journal 15, 2024; 102483.

Özen S. Effect of curing time and temperature on compressive strength of volcanic tuff-based geopolymer. Gümüşhane University Journal of Science and Technology 2021; 11(2): 530-536.

Phoongernkham T., Maegawa A., Mishima N., Hatanaka S., Chindaprasirt P. Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of fa–gbfs geopolymer. Construction and Building Materials 2015; 91: 1–8.

Provis JL., van Deventer JSJ. (Eds.). Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications. Woodhead Publishing, 2009.

Raja SR., Arulraja PG., Anand, N., Balamuralia K., Gokul G. Influence of various design parameters on compressive strength of geopolymer concrete: a parametric study by taguchi method. International Journal of Engineering 2021; 34(10): 2351-2359.

Raj PKA., Sarath D., Nagarajan P., Thomas BSA. simplified mix design for ggbs–dolomite geopolymer concrete using the taguchi method. Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering 2024; 48: 3189–3212.

Soltani A., Tarighat A., Rostami R., Tavakoli D., Moradi A. Investigation of mechanical properties of concrete with clinoptilolite and silica fume using Taguchi method. Innovative Infrastructure Solutions 2024; 9: 77.

Şenol AF., Demiral NÇ. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımının yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların özelliklerine etkisi. 1st International Conference On Scientific and Innovative Studies 2023; 18-20 Nisan, 2023, Konya, s. 273-278.

Tonyalı T. Farklı tür atık malzemeler kullanılarak üretilen geopolimer harçların mekanik ve kalıcılık özelliklerinin incelenmesi. İstanbul Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no:88, İstanbul, Türkiye, 2021.

Tunçel O. Optimization of charpy impact strength of tough pla samples produced by 3d printing using the taguchi method. Polymers 2024; 16: 459.

Yenginar Y. Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Doktora Tezi, sayfa no: 426, Konya, Türkiye, 2020.

Yetgin Ş., Çavdar A. Doğal puzolan katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2005; 17(4): 687-692.

Yüksek S., Kaya S. Kömür baca külü, kireç ve jips ürünlerinden yapı malzemesi yapımı 2017; Yüksek/Apjes 58-70. doi: 10.21541/apjes.292066.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 292-306, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 292-306, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Vibration Control of Offshore Wind Turbines via Particle Swarm Optimized Tuned Mass Dampers

İbrahim ŞENASLAN[1], Boğaç BİLGİÇ[2*]

[1,2]İstanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 34320, İstanbul, Turkiye.

[1]https://orcid.org/0000-0002-8789-489X
[2]https://orcid.org/0000-0003-1156-8841
*****Corresponding author: bilgicbogac@gmail.com

Research Article

Article History:
Received: 16.05.2025
Accepted: 16.08.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Particle swarm optimization
Offshore wind turbine
Tuned mass damper

ABSTRACT

With the growing global emphasis on sustainable energy, offshore wind power has become a key solution due to its environmental advantages and strong energy generation potential. However, offshore wind turbines face significant structural challenges caused by dynamic marine conditions. To ensure realistic performance evaluation, wind and wave inputs were modeled according to the 22nd test case of the FAST v8 simulator. Wind was generated at 12 m/s with active turbulence, while wave loading was simulated for a 150 m water depth using irregular wave modeling, representing typical offshore conditions. Building upon these simulation conditions, the present study utilizes Particle Swarm Optimization (PSO) to enhance the efficiency of a tuned mass damper designed for vibration mitigation in an offshore wind turbine structure. By optimizing the damper parameters, the system effectively reduces structural vibrations, contributing to improved energy efficiency, extended turbine lifespan, and increased operational stability. Simulation results demonstrated notable improvements: the uncontrolled system exhibited an ISE of 0.0575, which was reduced to 0.0277 with a standard TMD (51.8% improvement), and further decreased to 0.0197 after optimization (65.7% improvement over baseline and 28.9% over standard TMD). The results highlight the importance of intelligent optimization methods in advancing the reliability and performance of offshore renewable energy systems, supporting the transition toward a more sustainable energy future.

Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Tasarlanan Ayarlanmış Kütle Sönümleyicilerle Açık Deniz Rüzgar Türbinlerinde Titreşim Kontrolü

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 16.05.2025
Kabul tarihi: 16.08.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Parçacık sürü optimizasyonu
Açık deniz rüzgar türbini
Ayarlanmış kütle sönümleyici

ÖZ

Küresel ölçekte sürdürülebilir enerjiye yönelik artan ilgiyle birlikte, çevresel avantajları ve yüksek enerji üretim potansiyeli sayesinde açık deniz rüzgar enerjisi önemli bir çözüm haline gelmiştir. Ancak açık deniz rüzgar türbinleri, deniz ortamının dinamik koşullarından kaynaklanan yapısal zorluklarla karşı karşıyadır. Gerçekçi bir performans değerlendirmesi sağlamak için, rüzgar ve dalga girdileri FAST v8 simülatörünün 22. test senaryosuna göre modellenmiştir. Rüzgar, aktif türbülansla 12 m/s hızında üretilirken, dalga yükü, tipik açık deniz koşullarını temsil eden düzensiz dalga modellemesi kullanılarak 150 m su derinliği için simüle edilmiştir. Bu simülasyon koşullarında, mevcut çalışmada, açık deniz rüzgar türbini yapısında titreşim azaltma için tasarlanmış ayarlanmış bir kütle sönümleyicinin verimliliğini artırmak için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Sönümleyici parametrelerinin optimize edilmesiyle, yapısal titreşimler etkin bir şekilde azaltılarak enerji verimliliği artırılmakta, türbin ömrü uzatılmakta ve operasyonel kararlılık sağlanmaktadır. Simülasyon sonuçları dikkate değer iyileştirmeler göstermiştir: Kontrolsüz sistem 0,0575'lik bir ISE değeri

sergilerken, standart TMD ile 0,0277'ye düşmüştür (%51,8 iyileştirme) ve optimizasyon sonrasında 0,0197'ye gerilemiştir (%65,7'lik başlangıç iyileştirmesi ve standart TMD ile %28,9 iyileştirme). Bu bulgular, açık deniz yenilenebilir enerji sistemlerinin güvenilirliğini ve performansını artırmada akıllı optimizasyon yöntemlerinin önemini vurgulamakta ve daha sürdürülebilir bir enerji geleceğine geçişi desteklemektedir. Elde edilen bulgular, açık deniz yenilenebilir enerji sistemlerinin güvenilirliğini ve performansını artırmada akıllı optimizasyon yöntemlerinin önemini vurgulamakta ve sürdürülebilir enerji geleceğine geçişi desteklemektedir.

To Cite: Şenaslan İ., Bilgiç B. Vibration Control of Offshore Wind Turbines via Particle Swarm Optimized Tuned Mass Dampers. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 292-306.

1. Introduction

With the global focus shifting towards sustainability, the need for cleaner and more efficient energy sources has become more urgent than ever. Conventional energy sources, particularly fossil fuels, are major contributors to environmental degradation, and their extraction and consumption are associated with escalating economic and ecological costs. In contrast, renewable energy sources have become crucial for energy policies due to their environmentally friendly nature, sustainability, and potential to reduce dependence on conventional hydrocarbon-based energy sources (Xu et al., 2019; Yaghoubirad et al., 2022; Işık et al., 2024; Dave et al., 2025). Renewable energy sources, harnessed from natural phenomena such as solar radiation, wind flow, hydropower, biomass conversion, and geothermal heat, present considerable advantages in terms of both cost-effectiveness and ecological sustainability. Efficiency is a key criterion in selecting renewable sources, encompassing not only energy output but also cost, time, and sustainability (Kiriakidis et al., 2024; Song, 2024). Other factors include operating costs, conversion rates, continuity, environmental impact, and technological readiness.

Among renewable technologies, wind energy is one of the fastest-growing due to its low environmental impact and quick deployment (Song, 2024). Offshore installations are especially advantageous, as they benefit from stronger and more consistent winds compared to onshore sites, enabling higher output and large-scale projects (Desalegn et al., 2023; Tumse et al., 2024). For example, increasing wind speed from 7 m/s to 10 m/s can nearly triple energy production (İlkılıç, 2003).

However, strong offshore winds pose structural challenges. Wind and wave forces induce oscillations that reduce efficiency and accelerate fatigue, making stability control essential. Structural control strategies help maintain performance and durability under harsh conditions (Didier et al., 2024).

Passive dampers, such as the Tuned Mass Damper (TMD), are widely used for vibration mitigation. A TMD consists of an auxiliary mass tuned to the structure’s natural frequency, absorbing vibrational energy and enhancing stability (Lackner and Rotea, 2011; Gao et al., 2024). Other passive devices include tuned liquid column dampers and friction-based systems, which dissipate energy without external power (Colwell and Basu, 2009; Zuo et al., 2017; Deng et al., 2023). In contrast, active damping systems use sensors and actuators to dynamically adjust damping forces in real time, offering high precision but requiring continuous power and complex infrastructure (Lackner and Rotea, 2011; Brodersen et al., 2016; Hu and He, 2017).

Semi-active dampers provide an intermediate solution combining features of both passive and active control systems (Luo et al., 2011; Sun, 2018). These systems require minimal energy and offer adaptable, efficient control, making them particularly suitable for floating offshore wind turbines operating in highly variable marine environments (Caterino, 2015). Overall, semi-active systems provide a promising solution for enhancing both structural integrity and operational performance in offshore wind applications.

Optimization techniques are crucial for improving turbine design and performance, particularly for floating control systems that must endure the harsh and variable offshore environment. Among these, particle swarm optimization stands out as an effective method for optimizing offshore wind turbine systems. Inspired by social behaviors like bird flocking, PSO is a metaheuristic algorithm that efficiently explores large, multidimensional design spaces by simulating particle movement toward optimal solutions. Its simplicity, flexibility, and ability to handle nonlinear, complex problems make it ideal for optimizing parameters such as stiffness and damping coefficients in devices like TMDs. In addition to PSO, other metaheuristic techniques such as Genetic Algorithms and Simulated Annealing are also widely used (Acar et al., 2021; Bakır, 2024; Çaşka and Özbaltan, 2024; Xue et al., 2025). These optimization methods enable the systematic exploration of large design spaces, allowing control systems to adapt to both current operational conditions and future uncertainties. As a result, they significantly enhance the resilience, efficiency, and long-term reliability of offshore wind turbine systems. By improving structural behavior and energy production capacity, these techniques are key to maximizing energy efficiency and ensuring the structural safety of offshore turbines.

This study aims to optimize the parameters of a tuned mass damper for an offshore wind turbine using Particle Swarm Optimization. Unlike traditional approaches that rely on fixed damper configurations, this research leverages a metaheuristic algorithm to achieve superior vibration mitigation under variable offshore conditions. The originality of this work lies in its emphasis on optimization as a design strategy, demonstrating that intelligent algorithms can significantly improve structural stability, reduce fatigue loads, and extend turbine lifespan. By integrating control and optimization, this study contributes to the development of more resilient and efficient offshore wind energy systems.

2. Mathematical Model

2.1. Turbine Model

In the turbine model, NREL 5-MW ITI Energy Barge turbine model was preferred (Jonkman and Matha, 2011). The NREL 5-MW ITI Energy Barge turbine model is given in Figure 1. The turbine parameters are derived from the NREL 5-MW ITI Energy Barge model, featured as test 22 in the FAST v8 simulator. This particular turbine differs from those used in other simulation tests by presenting the most demanding conditions in terms of mass and length. To mitigate potential deterioration, stroke limiters have been integrated into the model to constrain the motion range of the TMD. This modification is

essential for maintaining the structural integrity of the turbine. The properties and parameters of the turbine, tower, and TMD are presented in Table 1.

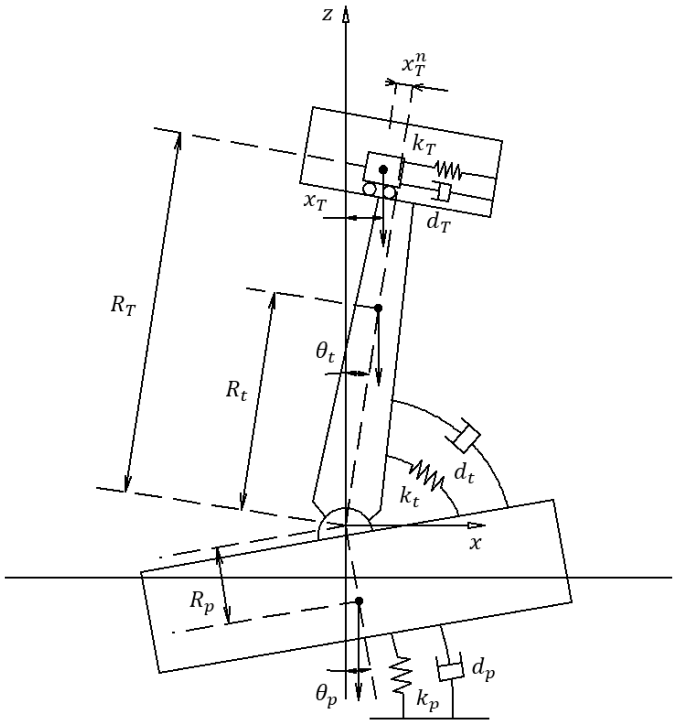


Figure 1. NREL 5-MW ITI Energy Barge turbine model

Table 1. Parameters of turbine, tower and TMD (Hu and He, 2017)

Parameter	Symbol	Value (Unit)
Spring stifness coefficient of platform	k_p	$1.4171 * 10^9$ $(N.m.rad^{-1})$
Spring stifness coefficient of tower	k_t	$9.7990 * 10^9$ $(N.m.rad^{-1})$
Spring stifness coefficient of TMD	k_T	8815 $(N.m.rad^{-1})$
Damping coefficient of platform	d_p	$3.6374 * 10^7$ $(N.m.s.rad^{-1})$
Damping coefficient of tower	d_t	$2.1032 * 10^7$ $(N.m.s.rad^{-1})$
Damping coefficient of TMD	d_T	28720 $(N.m.s.rad^{-1})$
Platform mass	m_p	5452000 (kg)
Tower mass	m_t	347460 (kg)
TMD mass	m_T	110700 (kg)
Distance from the tower hinge to the mass center of platform	R_p	5 (m)
Distance from the tower hinge to the mass center of tower	R_t	38.4 (m)
Distance from the tower hinge to the mass center of TMD	R_T	90 (m)
Mass moment of inertia of platform	I_p	$1.6945 * 10^9$ $(kg.m^2)$
Mass moment of inertia of tower	I_t	$1.8217 * 10^9$ $(kg.m^2)$

In addition to its d_T and k_T values, the TMD is also assigned limiter values of d_{lim}= 500000 and k_{lim}= 500000 to prevent excessive deformation when the displacement exceeds the threshold of 8 meters, x_{lim}=8. The x_{lim} threshold is defined based on the relative position of the TMD within the nacelle. This relative displacement is calculated using the following expression.

$$\mathrm{T} = \tfrac{1}{2} I_t \dot{\theta}_t^2 + \tfrac{1}{2} I_p \dot{\theta}_p^2 + \tfrac{1}{2} m_T \dot{x}_T^2 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{V} = {} & \frac{1}{2} d_t \left(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p\right)^2 + \frac{1}{2} d_p \dot{\theta}_p^2 + \frac{1}{2} d_T \left(\dot{x}_T^n\right)^2 + \frac{1}{2} d_{lim} \left(\dot{x}_T^n - \dot{x}_{lim}\right)^2 + \frac{1}{2} k_t \left(\theta_t - \theta_p\right)^2 \\ & + \frac{1}{2} k_p \theta_p^2 + \frac{1}{2} k_T (x_T^n)^2 + \frac{1}{2} k_{lim} (x_T^n - x_{lim})^2 + m_t g R_t \cos\theta_t \\ & - m_p g R_p \cos\theta_p + m_T g (R_T \cos\theta_t - x_T^n \sin\theta_t)\end{aligned} \tag{2}$$

$$Q_{\theta_t} = M_{wind} \tag{3}$$

$$Q_{\theta_p} = M_{wave} \tag{4}$$

$$Q_{x_T} = 0 \tag{5}$$

Lagrange equation;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \mathrm{K}}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial \mathrm{K}}{\partial q_i} + \frac{\partial \mathrm{D}}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \mathrm{P}}{\partial q_i} = Q_i \tag{6}$$

For $q_i = \theta_p$

$$I_p \ddot{\theta}_p + d_t \left(\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_t\right) + d_p \dot{\theta}_p + k_t \left(\theta_p - \theta_t\right) + k_p \theta_p + m_p g R_p \sin\theta_p = M_{wave} \tag{7}$$

For $q_i = \theta_t$

$$\begin{aligned} & I_t \ddot{\theta}_t + d_t \left(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p\right) + (d_T + d_{lim}) \dot{x}_T^{\mathrm{n}} \left(\frac{-R_T + x_T sin\theta_t}{cos\theta_t}\right) + k_t \left(\theta_t - \theta_p\right) \\ & \quad + (k_T + k_{lim}) x_T^n (-R_T \sec^2\theta_t) - k_{lim} x_{lim} \dot{x}_{lim} - m_t g R_t \sin\theta_t \\ & \quad + m_T g (R_T \sin\theta_t - x_T) \sec^2\theta_t = M_{wind} \end{aligned} \tag{8}$$

For $q_i = x_T$

$$\begin{aligned} & m_T \ddot{x}_T + (d_T + d_{lim}) \dot{x}_T^{\mathrm{n}} \left(\tfrac{1}{\cos\theta_t}\right) + (k_T + k_{lim}) x_T^n \left(\tfrac{1}{\cos\theta_t}\right) - k_{lim} x_{lim} \left(\tfrac{1}{\cos\theta_t}\right) - \\ & m_T g tan\theta_t = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

Where

$$x_T^n = \frac{x_T - R_T sin\theta_t}{cos\theta_t} \tag{10}$$

$$\dot{x}_T^{\mathrm{n}} = \frac{\dot{x}_T \cos\theta_t - R_T \dot{\theta}_t + x_T \dot{\theta}_t sin\theta_t}{cos\theta_t^2} \tag{11}$$

In the equations of motion, small angles are neglected and the equations are simplified (Hu and He, 2017).

$$I_p\ddot{\theta}_p - k_t(\theta_t - \theta_p) + k_p\theta_p + m_p g R_p\theta_p = -d_p\dot{\theta}_p + d_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wave} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} I_t\ddot{\theta}_t + k_t(\theta_t - \theta_p) - (k_T + k_{lim})(x_T - R_T\theta_t)R_T + k_{lim}x_{lim}R_T - m_t g R_t\theta_t \\ + m_T g(R_T\theta_t - x_T) \\ = -d_t(\dot{\theta}_t - \dot{\theta}_p) + M_{wind} - (d_T + d_{lim})(R_T\dot{\theta}_t - \dot{x}_T)R_T \end{aligned} \tag{13}$$

$$m_T\ddot{x}_T + (k_T + k_{lim})(x_T - R_T\theta_t) - k_{lim}x_{lim} - m_T g\theta_t = (d_T + d_{lim})(R_T\dot{\theta}_t - \dot{x}_T) \tag{14}$$

Finally, the k_{lim}, d_{lim} and x_{lim} determined as,

$$k_{\text{lim}} = \begin{cases} k_{Dlim} : x_T^n > x_{Dlim} \\ k_{Ulim} : x_T^n < x_{Ulim} \\ 0 \quad\quad : otherwise \end{cases} \tag{15}$$

$$d_{\text{lim}} = \begin{cases} d_{Dlim} : x_T^n > x_{Dlim} \wedge \dot{x}_T^n > 0 \\ d_{Ulim} : x_T^n > x_{Ulim} \wedge \dot{x}_T^n < 0 \\ 0 \quad\quad : otherwise \end{cases} \tag{16}$$

$$x_{\text{lim}} = \begin{cases} x_{Dlim} : \ x_{tmd}^{nac} > 0 \\ x_{Ulim} : \ x_{tmd}^{nac} < 0 \end{cases} \tag{17}$$

2.2. Wind and Wave Inputs

Wind and wave inputs for the simulation were modeled according to the 22nd test case of the FAST v8 simulator, utilizing the turbine parameters specified earlier (Jonkman and Jonkman, 2016). The wind input was generated with turbulence activated at a wind speed of 12 m/s, following the specifications of wind type 3. The wind speed of 12 m/s falls within typical operational ranges for offshore turbines, ensuring that the simulation captures a practical and realistic energy production scenario, without deviating significantly from real-world conditions. The wave input was modeled at a depth of 150 meters using wavemod 2. This depth is representative of typical locations for offshore wind farms, ensuring that the wave conditions in the simulation align with the characteristics expected at such depths.

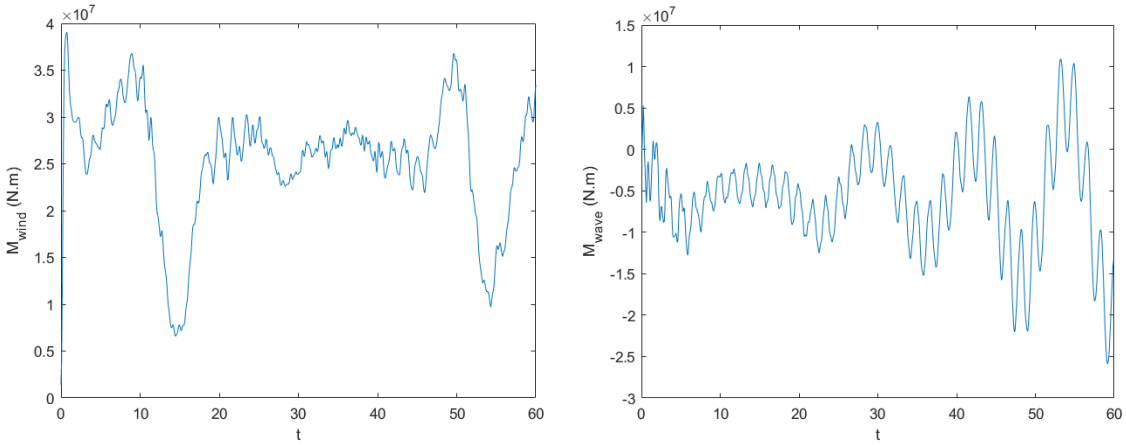


Figure 2. Wind and wave induced moments on the turbine structure

Wind and wave forces were applied to the system over a 60-second interval, as illustrated in Figure 2. These loading conditions offer a realistic representation of the environmental interactions affecting the wind turbine, thereby ensuring that the simulation outcomes are both reliable and applicable to practical scenarios.

3. Optimization Algorithm

Particle Swarm Optimization (PSO) is a nature-inspired, metaheuristic algorithm that utilizes a population of candidate solutions, referred to as particles, which explore the search space by emulating the decentralized and cooperative dynamics observed in social organisms like flocks of birds or schools of fish. Within the PSO framework, a population of particles, each corresponding to a candidate solution, traverses the search space by continuously updating their positions and velocities based on personal best performance and the best-known positions of neighboring particles. At each iteration, each particle evaluates a goal function and records its personal best position P_{best}, while the swarm collectively tracks the global best position G_{best}. Particle velocities are modified by combining three factors: momentum from their prior movement, an individual tendency toward their own optimal position P_{best}, and a collective tendency directed at the swarm's overall optimal position G_{best}. Subsequently, particles move to new positions and the process repeats until the convergence criteria are met. This cycle of evaluation and update continues automatically, guiding the swarm toward increasingly optimal regions of the search space, as depicted in Figure 3.

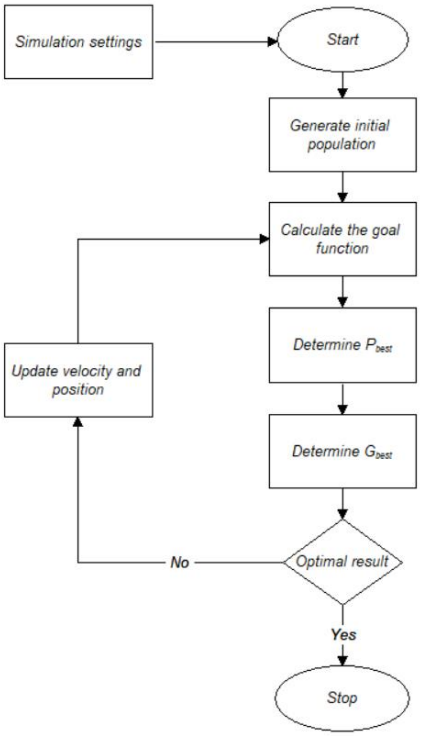


Figure 3. PSO flowchart

In the proposed optimization framework, the Integral of Squared Error (ISE) is selected as the goal function to guide the optimization process. ISE returns an error value by integrating the square of the system's error function over time, thereby emphasizing larger deviations more than smaller ones. For this study, the system error input is defined as the turbine angle θ_t, which plays a pivotal role in determining the structural robustness and the energy conversion efficiency of the wind turbine. Since ISE penalizes increasing errors more severely, it is particularly well-suited for capturing the detrimental effects of large tower deflections. Excessive growth in the tower angle can significantly reduce performance and compromise structural safety. Therefore, the use of ISE as the objective criterion is justified to ensure stable, safe, and efficient turbine operation under dynamic offshore conditions.

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)\, dt \tag{18}$$

$$e(t) = \theta_t - \theta_{t_{ref}} \tag{19}$$

$$\theta_{t_{ref}} = 0 \tag{20}$$

Once the objective function is defined, the simulation can be initialized. Accordingly, the simulation bounds for the TMD mass, damper coefficient, and spring coefficient are set as lower bounds of 10000, 0, 0, and upper bounds of 200000, 100000, 100000, respectively. The lower bound for the TMD mass

is intentionally set to 10000 to avoid numerical instabilities and simulation failures caused by excessively low mass values, different from others. An initial set of particles is created by sampling uniformly across the search domain, ensuring extensive and impartial coverage of the solution space. The inertia weight is adaptively adjusted within the range [0.1, 1.1], which helps balance exploration and exploitation throughout the optimization process. The swarm comprises 100 particles, each of which iteratively revises its position by considering both its personal best location and the optimal positions identified by neighboring particles (Gao et al., 2012). The self-adjustment and social-adjustment weights are both set to 1.49. A Minimum Neighbors Fraction of 0.25 is used to determine local neighborhoods, promoting diversity and preventing premature convergence. The algorithm terminates if no improvement greater than the tolerance of 10^{-6} is observed for 20 consecutive iterations. The algorithm's iterative process is constrained to a maximum of 600 cycles to limit computational resource consumption.

As a result of the simulation, the optimization process identified the optimal parameters as follows: the TMD mass was determined to be 56917, the damper coefficient was found to be 26667, and the spring coefficient was calculated as 7784. These values correspond to the minimum of the objective function under the defined constraints, indicating an effective tuning of the TMD system parameters for optimal performance. These identified parameters are also notably close to the standard TMD values of 110700 for mass, 28720 for damping coefficient, and 8815 for spring stiffness, which further supports the practical applicability and realism of the obtained results.

4. Results

The effectiveness of the optimized TMD system was evaluated under three distinct configurations: without TMD, standard TMD and optimized TMD. As shown in Table 2, each subsequent configuration demonstrates a clear improvement in system performance, measured by the ISE.

Table 2. ISE value of all states for θ_t

State	ISE
Without TMD	0.0575
TMD	0.0277
Optimized TMD	0.0197

From Table 2, the optimized TMD provides an additional 28.9% improvement over the standard TMD, culminating in an overall 65.7% reduction relative to the uncontrolled case. These outcomes demonstrate the considerable impact of optimization on augmenting the damping performance of the system.

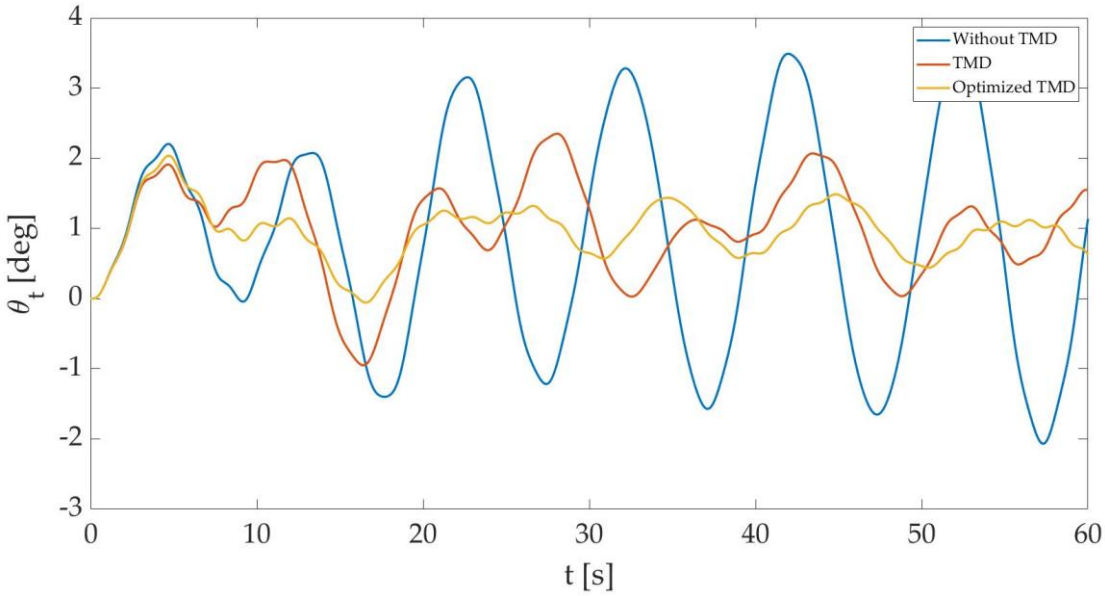


Figure 4. θ_t graph of all states

Figure 4 illustrates the time response of the θ_t. The optimized TMD configuration demonstrates a significant improvement compared to both the uncontrolled case and the standard TMD system. Given that the θ_t angle is directly related to turbine efficiency and structural loading, the reduction in its amplitude with the optimized TMD indicates enhanced energy capture stability and reduced fatigue on critical components. This suggests that the optimization process plays a crucial role in improving turbine performance.

The oscillatory behavior observed is mainly caused by wind and wave excitations (Figure 4). These varying loads prevent the turbine from remaining rigid; instead, limited motion occurs to relieve structural stresses. Under wind action, the platform naturally inclines toward the opposite side of the incoming wind, which introduces additional pitch oscillations. Therefore, an effective TMD -especially in its optimized configuration- is essential to mitigate these oscillations and ensure structural stability.

Table 3. ISE value of all states for θ_p

State	ISE
Without TMD	0.0459
TMD	0.0222
Optimized TMD	0.0234

While the optimization significantly reduced the overall ISE value associated with tower displacement θ_t, as shown in Table 3, a slight deterioration was observed in the ISE of the pitch angle θ_p in a separate state table. This minor increase does not represent a drawback of the optimization process but rather reflects its primary objective: minimizing θ_t, which is the most critical parameter for tower stability and

fatigue reduction. In other words, the optimization prioritized structural safety at the tower top over achieving uniform improvements across all degrees of freedom.

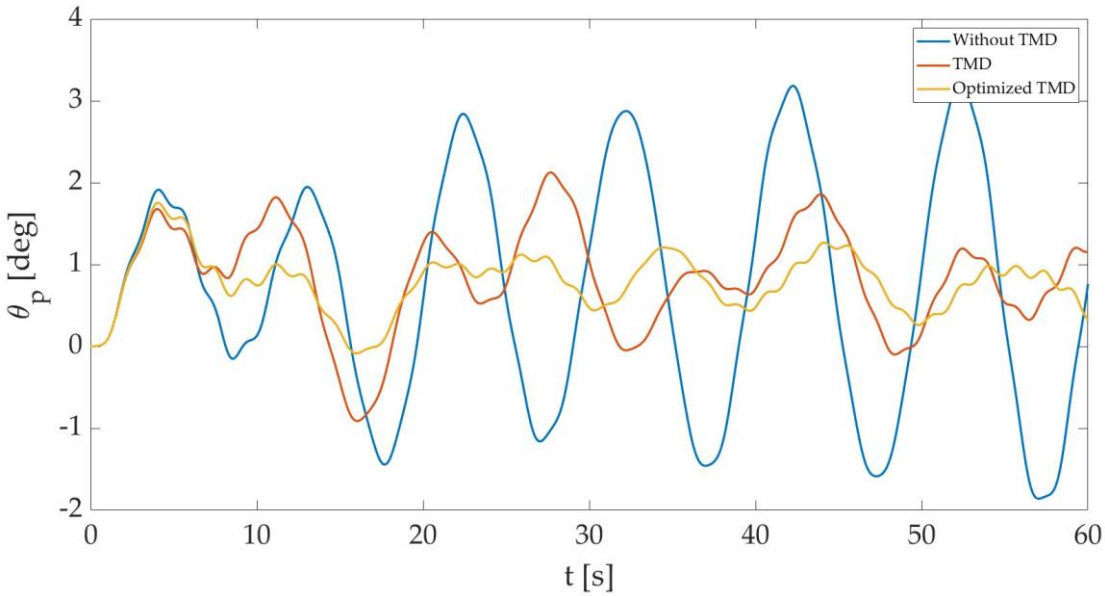


Figure 5. θ_p graph of all states

As shown in Figure 5, the θ_p is also effectively reduced with the optimized TMD. While θ_p has a less direct impact on turbine efficiency than θ_t, minimizing this angle is essential for maintaining platform stability and reducing structural sway, particularly under challenging offshore environmental conditions. The optimized TMD leads to a more substantial reduction in the θ_p angle compared to the standard TMD, further emphasizing its superior performance in stabilizing the turbine.

Table 4. ISE value of all states for x_T

State	ISE
TMD	690.6
Optimized TMD	424.5

In addition to evaluating the structural response, the displacement of the TMD mass x_T was analyzed under two configurations: the standard TMD and the optimized TMD. As shown in Table 4, the ISE associated with x_T decreased from 690.6 in the standard TMD case to 424.5 after optimization. Although the displacement of the TMD mass itself does not directly contribute to structural strength or overall stability, a lower displacement implies that the controller achieves effective vibration mitigation with less auxiliary mass motion. This is advantageous because it reduces the mechanical stress on the damper components and enhances the durability and reliability of the overall control system.

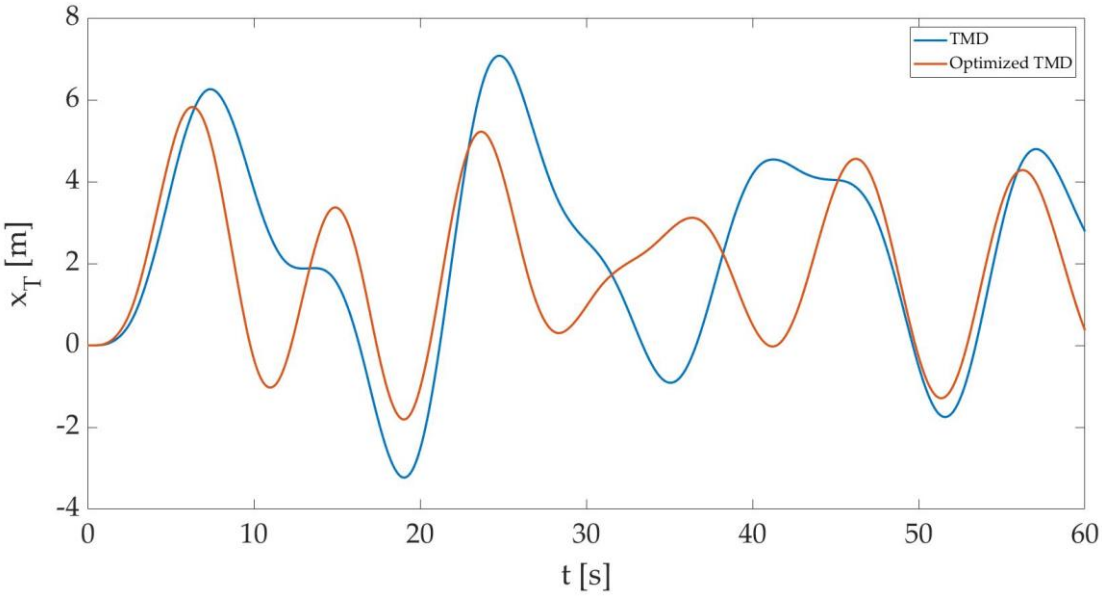


Figure 6. x_T graph of all systems

In Figure 6, the x_T responses are presented. While x_T is not the primary design metric, its behavior provides valuable insight into the motion range and energy dissipation of the TMD. The optimized TMD exhibits smoother, more controlled displacement patterns compared to the standard TMD, contributing to more effective vibration suppression. This result highlights that the optimization process not only improves damping performance but also ensures more efficient energy dissipation.

Overall, the results clearly demonstrate that the application of a TMD, particularly with optimized parameters, significantly enhances the dynamic stability of the offshore wind turbine. These improvements contribute not only to structural safety and durability but also to increased energy production efficiency, underscoring the value of advanced control and optimization strategies in offshore wind energy systems.

5. Conclusion

This study focused on the parameter optimization of the NREL 5-MW ITI Energy Barge offshore wind turbine model. Particle swarm optimization was employed as the optimization method due to its high efficiency and robustness in identifying global optima within complex search spaces. The goal was to enhance the performance of the TMD system in mitigating structural oscillations under offshore environmental conditions.

The optimization results demonstrated a significant improvement in system performance. Based on the ISE values across all system states, the uncontrolled (without TMD) system exhibited an ISE of 0.0575. The inclusion of a standard TMD reduced this value to 0.0277, corresponding to a 51.8% improvement. Following optimization via PSO, the ISE further decreased to 0.0197, marking an overall reduction of approximately 65.7% compared to the uncontrolled case, and an additional 28.9% improvement over the standard TMD.

Compared to existing studies, the distinctive contribution of this work lies in its emphasis on the optimization process rather than relying on fixed TMD configurations. The successful application of PSO illustrates the potential of advanced metaheuristic algorithms for improving structural control strategies in offshore wind energy systems. Such optimization-driven approaches not only enhance structural stability but also play a vital role in extending the operational lifespan of wind turbines by mitigating fatigue loads and dynamic stresses.

Future work can focus on multi-objective optimization strategies that simultaneously address multiple critical responses, such as the pitch angle and tower-top displacement, using algorithms like MOGA to achieve an optimal balance between competing performance objectives. Moreover, the proposed methodology can be applied to different offshore wind turbine configurations, including floating and jacket-supported platforms, to validate its generality under diverse environmental conditions. The integration of real-time adaptive control strategies and hybrid damping systems combining passive and active components also represents a promising direction to further enhance structural resilience and operational efficiency.

The findings highlight optimization as a fundamental component in the design of effective vibration mitigation techniques for offshore wind energy systems. By minimizing structural oscillations, the optimized TMD contributes to increased energy production efficiency, extended turbine lifespan, and enhanced resilience against extreme environmental loads. This work highlights the potential of intelligent control and optimization techniques to drive innovation and reliability in the renewable energy sector, reinforcing their strategic value in the global transition toward sustainable energy systems.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no competing interests.

Consent for Publication

İbrahim Şenaslan: Conceptualization, Investigation, Methodology, Software, Visualization and Writing – original draft.

Boğaç Bilgiç: Conceptualization, Investigation, Methodology, Software, Supervision and Writing – review and editing.

References

Acar U., Kaska Ö., Tokgoz N. Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in turkey. Journal of Building Engineering 2021; 42: 102499.

Bakır H. Modeling and optimization of solar pv-battery based hybrid water pumping system with bldc motor drive. Osmaniye Korkut Ata University Journal of the Institute of Science and Technology 2024; 7(3): 1010-1020.

Brodersen ML., Bjørke AS., Høgsberg J. Active tuned mass damper for damping of offshore wind turbine vibrations. Wind Energy 2016; 20(5): 837–852.

Caterino N. Semi-active control of a wind turbine via magnetorheological dampers. Journal of Sound and Vibration 2015; 345: 1–17.

Colherinhas GB., Petrini F., de Morais MVG., Bontempi F. Optimal design of passive-adaptive pendulum tuned mass damper for the global vibration control of offshore wind turbines. Wind Energy 2020; 24(6): 573–595.

Colwell S., Basu B. Tuned liquid column dampers in offshore wind turbines for structural control. Engineering Structures 2009; 31(2): 358–368.

Çaşka S., Özbaltan M. Comparison of the performances of symbolic discrete control synthesis and optimal pid controller in attitude control of quadcopter uav. Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology 2024; 7(4): 1455-1469.

Dave G., Patel T., Mitra S. Global scenario on renewable energy and net zero goal emphasizing indian standpoint: a short review. Energy Systems 2025.

Deng Y., Zhang SY., Zhang M., Gou P. Frequency-dependent aerodynamic damping and its effects on dynamic responses of floating offshore wind turbines. Ocean Engineering 2023; 278: 114444.

Desalegn B., Gebeyehu D., Tamrat B., Tadiwose T., Lata A. Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life-cycle impact assessments. Cleaner Engineering and Technology 2023; 17: 100691.

Didier F., Liu YC., Laghrouche S., Depernet D. A comprehensive review on advanced control methods for floating offshore wind turbine systems above the rated wind speed. Energies 2024; 17(10): 2257.

Gao L., Huang J., Li X. An effective cellular particle swarm optimization for parameters optimization of a multi-pass milling process. Applied Soft Computing 2012; 12(11): 3490–3499.

Gao Y., Zhai E., Li S., Zhang Z., Xu Z., Zhang G., Racic V., Chen J., Wang L., Zhang Z. Integrated design and real-world application of a tuned mass damper (tmd) with displacement constraints for large offshore monopile wind turbines. Ocean Engineering 2024; 292: 116568.

Hu Y., He E. Active structural control of a floating wind turbine with a stroke-limited hybrid mass damper. Journal of Sound and Vibration 2017; 410: 447-472.

Işık C., Kuziboev B., Ongan S., Saidmamatov O., Mirkhoshimova M., Rajabov A. The volatility of global energy uncertainty: renewable alternatives. Energy 2024; 297: 131250.

İlkılıç C. Rüzgar enerjisi ve kullanımı. Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi 2003; 2(1): 44-48.

Jonkman B., Jonkman J. Fast v8.16.00a-bjj. National Renewable Energy Laboratory 2016.

Jonkman J., Matha D. Dynamics of offshore floating wind turbines-analysis of three concepts. Wind Energy 2011; 14(5): 557–569.

Kiriakidis P., Christoudias T., Kushta J., Lelieveld J. Projected wind and solar energy potential in the eastern mediterranean and middle east in 2050. Science of The Total Environment 2024; 927: 172120.

Lackner MA., Rotea MA. Structural control of floating wind turbines. Mechatronics 2011; 21(4): 704–719.

Luo N., Bottasso CL., Karimi HR., Zapateiro M. Semiactive control for floating offshore wind turbines subject to aero-hydro dynamic loads. Renewable Energy and Power Quality Journal 2011; 9(1): 772–777.

Song Z. Comparative application research of wind energy and solar energy. Highlights in Science, Engineering and Technology 2024; 111: 400-409.

Sun C. Semi-active control of monopile offshore wind turbines under multi-hazards. Mechanical Systems and Signal Processing 2018; 99(2): 285–305.

Tumse S., Bilgili M., Yildirim A., Sahin B. Comparative analysis of global onshore and offshore wind energy characteristics and potentials. Sustainability 2024; 16(15): 6614.

Tümay Ateş K. Short term photovoltaic power plant output power forecasting with hybrid method developed using multilayer artificial neural network model and cultural algorithm model. Osmaniye Korkut Ata University Journal of The Institute of Science and Technology 2022; 5(1): 342-354.

Xu X., Wei Z., Ji Q., Wang C., Gao G. Global renewable energy development: influencing factors, trend predictions and countermeasures. Resources Policy 2019; 63: 101470.

Xue J., Yang H., Song Y., Zhang C., Hu H. A fuzzy decision-making network model for offshore wind turbine selection based on simulated annealing algorithm. Ocean Engineering 2025; 315: 119816.

Yaghoubirad M., Azizi N., Ahmadi A., Zarei Z., Moosavian SF. Performance assessment of a solar pv module for different climate classifications based on energy, exergy, economic and environmental parameters. Energy Reports 2022; 8: 15712–15728.

Zuo H., Bi K., Hao H. Using multiple tuned mass dampers to control offshore wind turbine vibrations under multiple hazards. Engineering Structures 2017; 141: 303–315.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 307-321, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 307-321, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Yumurta Kalite Parametreleri Üzerine Farklı Yetiştirme Sistemleri ve Mevsimin Etkisi

Orhan Atlıhan TEKDEMİR[1*], Emre TEKCE[2]

[1]Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Enstitüsü Organik Tarım İşletmeciliği Anabilim Dalı, Bayburt
[2]Bayburt Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Organik Tarım İşletmeciliği Anabilim Dalı, Bayburt

[1]https://orcid.org/0009-0006-1584-0960
[2]https://orcid.org/0000-0002-6690-725X
*Sorumlu yazar: orhan.atlihan@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 31.12.2024
Kabul tarihi:22.08.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Farklı yetiştirme sistemleri
Aile tipi
Kafes sistemi
Free range sistemi
Yumurta dış ve iç kalitesi

ÖZ

Bu araştırma, farklı yetiştirme sistemlerinde (kafes sistemi, aile tipi ve serbest gezen sistem) üretilen tavuk yumurtalarının dış ve iç kalite parametreleri üzerindeki mevsimsel (ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış) etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada farklı yetiştirme sistemlerinden her bir mevsimde 50'şer adet olmak üzere toplam 600 adet yumurta toplanmıştır. Yumurta örneklerinin dış kalite parametreleri üzerine mevsimin etkisi incelendiğinde; kış mevsiminde kırılma mukavemeti, kabuk kalınlığı, sarı yüksekliği ve sarı indeksi önemli bulunmuştur ($p<0,05$). İlkbahar mevsiminde sarı çapı üzerinde mevsimin etkisi önemli olmuştur ($p<0,05$). Yaz mevsiminde ise şekil indeksi, sarı renk, Haugh birimi, kırılma mukavemeti, kabuk kalınlığı, kabuk ağırlığı ve sarı çapı önemli sonuçlar vermiştir ($p<0,05$). Sonbahar mevsiminde şekil indeksi, yumurta ağırlığı, sarı renk, kabuk kalınlığı, kabuk ağırlığı, sarı yüksekliği ve sarı çapında mevsimin etkisi önemli ($p<0,05$) bulunurken, incelenen diğer dış kalite parametreleri üzerinde istatiksel açıdan anlamlı bir etki gözlenmemiştir ($p>0,05$). Yumurta dış kalite parametrelerine göre, serbest gezen sistemin şekil indeksi (%) ve yumurta ağırlığında, kafes sisteminin ise sarı renkte en iyi sonuçları sağladığı belirlenmiştir ($p<0,05$).Mevsimin yumurta iç kalitesi üzerine etkisi, yumurta sarısında kışın protein, ilkbahar ve yazın ise β-karoten değerleri üzerinde istatiksel açıdan anlamlı bulunurken ($p<0,05$) benzer şekilde yumurta akında, sonbahar mevsiminde pH değerleri, kış ve yaz dönemlerinde ise protein değerleri istatiksel açıdan önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Yumurtanın tümü incelendiğinde ise kış döneminde kuru madde ve kül değerleri önemli sonuçlar vermiş olup, diğer incelenen iç kalite parametreleri üzerinde mevsimin istatistiksel açıdan anlamlı bir etkisi gözlenmemiştir ($p>0,05$). Yumurta iç kalite parametreleri açısından, yumurta sarısında protein ve β-karoten ile tüm yumurtada kuru madde ve kül oranı için serbest gezen sistem; yumurta akında ise pH ve protein değerleri açısından aile ve kafes işletmelerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, yumurta dış kalite özelliklerinde serbest gezen ve kafes sistemlerinin, iç kalite özelliklerinde ise serbest gezen yetiştirme sisteminin en iyi performansı sergilediği belirlenmiştir.

Effect of Different Breeding Systems and Season on Egg Quality Parameters

Research Article

Article History:
Received: 31.12.2024
Accepted: 22.08.2025
Published online:13.01.2026

ABSTRACT

This study was conducted to examine the seasonal (spring, summer, autumn, and winter) effect on the external and internal quality parameters of chicken eggs produced in different rearing systems (cage system, family-type system, and free-range system). A total of 600 egg samples were collected, with 50 eggs from

Keywords:
Different rearing systems
Cage system
Family type
Free range system
Egg external and internal quality

each rearing system in each season. When the effect of the season on the external quality parameters of egg samples was examined, it was found that the breaking strength, shell thickness, yellow height and yellow index were important during the winter season ($p<0.05$). The effect of the season on the yellow diameter in the spring season was significant ($p<0.05$). In summer, shape index, yellow color, Haugh unit, breaking strength, shell thickness, shell weight and yellow diameter gave important results ($p<0.05$). While the effect of the season on the shape index, egg weight, yellow color, shell thickness, shell weight, yellow height and yellow diameter in the autumn season was significant ($p<0.05$), no statistically significant effect was observed on other external quality parameters studied ($p>0.05$). According to the external egg quality parameters, it was determined that the free-roaming system provided the best results in terms of shape index (%) and egg weight, while the cage system provided the best results in yellow color ($p<0.05$).The effect of the season on the internal quality of eggs was statistically significant on protein in winter in egg yolk, and β-carotene values in spring and summer ($p<0.05$), while pH values in autumn season and protein values in winter and summer periods were found to be statistically significant in egg white ($p<0.05$).When all the eggs were examined, dry matter and ash values gave important results during the winter period, and there was no statistically significant effect of the season on the other internal quality parameters studied ($p>0.05$). In terms of egg internal quality parameters, a free-floating system for protein and β-carotene in the yolk and the dry matter and ash ratio in the whole egg; and the best results were obtained in family and cage enterprises in terms of pH and protein values in the egg white.Consequently, it has been determined that free-range and cage systems exhibited the best performance in external egg quality characteristics, while the free-range rearing system showed the best performance in internal quality characteristics.

To Cite: Tekdemir OA., Tekce E. Effect of Different Breeding Systems and Season on Egg Quality Parameters. Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 307-321.

1. Introduction

The egg is an important source of protein that offers the opportunity to meet the rapidly increasing food demand, as well as a nutrient of strategic and critical importance for the livestock sector. Eggs are a rich source of antioxidants containing macronutrients (Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphorus (P), and Potassium (K)) and micronutrients (Iron (Fe), Zinc (Zn), Manganese (Mn), Iodine (I), and selenium (Se)), valuable vitamins (A, D, E, K, and B group (B1, B2, B3, B5, B6, B9, and B12)) (Mathieu-Huart et al., 2014; Wang et al., 2018; Réhault-Godbert et al., 2019; Anonymous, 2024). Eggs are one of the easiest, cheapest, and most preferred protein-rich animal source products for humans. In addition, they are a valuable nutrient in terms of protein digestibility (98%) and biological value (94%) (Sparks, 2006; Altan, 2015; Yenice et al., 2016; Türker and Alkan, 2019). Egg production and quality (internal and external) parameters are influenced by various factors such as age, rearing environment and system, and nutrition (Özbey and Esen, 2007; Jones et al., 2012; Radu-Rusu et al., 2014; Steenfeldt and Hammershøj, 2015; Yenice et al., 2016; Tavares et al., 2018).

Many farming systems, such as conventional, organic, free-range, and enriched cage systems, are applied in egg farming. The most preferred system worldwide is the conventional system (89.7%) (Anonymous, 2016). The main reason for the preference of this system is that the cost of egg production is low due to the high amount of output throughout the year, and the product is accessible to the public (Pavlovski et al., 2010; Rakonjac et al., 2014; Rakonjac et al., 2018). However, it is stated that this

system negatively affects chickens' natural behavior and animal welfare (Campbell et al., 2016; Damaziak et al., 2021). For this reason, depending on consumer demands and increasing expectations, producers have started to apply different production systems to obtain higher yields, meet the increasing demand, and improve standards related to animal health and welfare (Moura et al., 2006; Tavares et al., 2018). Despite intensive research on egg quality, extensive studies focusing on the simultaneous and interactive effects of different breeding systems and seasonal changes on the internal and external quality parameters of eggs are limited in the literature. In this context, our current study aims to examine the seasonal (spring, summer, autumn and winter) effects on the internal and external quality parameters of eggs obtained from various breeding systems (cage, family type and free movement).

2. Materials ve Method

The study was carried out on egg samples obtained from hen egg farms with different rearing systems (cage system, family type, and free-range system) in the central district of Bayburt province in 2021 and 2022 (40.16°N, 39.89°E). To evaluate the effect of seasonal variation on the quality parameters of egg samples, a total of 600 eggs — 50 eggs from each rearing system (cage system, family type, and free-range system) — were collected and examined in four different seasonal periods (spring, summer, autumn, and winter). To minimize confounding factors in the study, the same breed of chickens (Tinted breed), which were obtained from the same hatchery at the same time, were selected.

Feed material and water

Hens in different rearing systems always had access to water. Free-range and cage system hens were fed with second-period layer feed (crude protein: 17%, crude fat: 4.2%, crude fiber: 4.4%, crude ash: 12.2%, lysine: 0.91%, methionine: 0.38%, Ca: 3.9%, P: 0.46%, Na: 0.14%) supplied by a private feed company.

Collection of egg samples

Within the scope of this research, a total of 600 egg samples were collected from producers in Bayburt province, comprising 50 eggs from each of the three different rearing systems (cage system, family type, and free-range system) across four distinct seasons (spring, summer, autumn, and winter). Following their collection, the eggs were transported to the Bayburt University Food Engineering Laboratory. Prior to analysis, the eggs were kept at room temperature for 1 day. Subsequently, their internal and external quality parameters were analyzed.

Egg external and internal quality analysis

In the study, the external quality analysis of the eggs collected in different seasonal periods and different rearing systems was carried out in the laboratory of Atatürk University Faculty of Veterinary Medicine, Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases, using a digital egg tester (Nabel DET6000 digital egg tester, JAPAN). In this context, the egg's external quality (Shape Index (%), Egg Weight (g),

White height (mm), Yolk color, Haugh Unit, Colour, Breaking Strength (kg/f), Shell Thickness (mm), Yolk Height (mm), Yolk Diameter (mm), Yolk Index (%) and Shell Weight (g)) data were analyzed. Egg internal quality analyses (% dry matter, % ash, % fat, pH, protein (%), and β-carotene (μg/g)) were performed at Bayburt University Faculty of Engineering, Food Engineering Laboratory.

In this study, the external quality analysis of eggs collected across different seasonal periods and from various rearing systems was conducted at the Atatürk University Faculty of Veterinary Medicine, Department of Animal Nutrition and Nutritional Diseases Laboratory, using a Nabel DET6000 digital egg tester (JAPAN). The analyzed external quality parameters included: Shape Index (%), Egg Weight (g), Albumen Height (mm), Yolk color, Haugh Unit, Colour, Breaking Strength (kg/f), Shell Thickness (mm), Yolk Height (mm), Yolk Diameter (mm), Yolk Index (%) and Shell Weight (g). Concurrently, internal egg quality analyses, specifically for dry matter (%), ash (%), fat (%), pH, protein (%), and β-carotene (μg/g), were performed at the Bayburt University Faculty of Engineering, Food Engineering Laboratory.

Statistical Analysis

SPSS 22 software was used to analyze the obtained data. A general linear model was employed to determine the effect of season (winter, spring, summer, autumn) and rearing systems (cage system, family type, and free-range system) on the quality parameters of the collected egg samples. Duncan's multiple range test was applied to determine the statistical differences among the means. Statistical significance was set at $p < 0.05$ and $p < 0.01$ levels.

3. Results and Discussion

Evaluation of Egg External Quality Data

Breeding systems are considered a non-genetic factor influencing the quality and quantity of the products obtained and as well as animal welfare (Campbell et al., 2019; Wei et al., 2019; Abo Ghanima et al., 2020). Furthermore, egg quality is influenced by various factors such as age, physiological conditions, composition of the feed used, and internal and external characteristics of the egg (Bouvarel et al., 2011; Bain et al., 2016). The study conducted by Mugnai et al., (2009) stated that pasture was the primary basis of the seasonal effects of eggs obtained from different rearing systems (conventional, organic, and organic-plus). The study reported that organic-plus eggs exhibited superior quality concerning shell weight, yolk color, α-tocopherol, carotenoids, and with no significant differences in other parameters. Another study reported that the fatty acid concentration of egg yolk was influenced in the spring because organic-plus eggs consumed more green grasses from pasture. It was determined that polyunsaturated fatty acids (PUFA) n-6 concentration decreased, and the PUFA n-3 ratio increased in egg samples. Additionally, green grasses in the pasture were shown to effectively improve egg quality (Mugnai et al., 2014).

When the data obtained as a result of the analysis of the eggs collected in the study (Table 1) were evaluated, the best results ($p < 0.01$) were obtained in the eggs produced in the free-range system and family-type enterprises in shape index (%), free-range system and cage system in egg weight (g), cage system in yolk color, free-range and cage systems in breaking strength (kg/f) and shell thickness (mm) in the winter season. In the spring period, the best results ($p < 0.01$) were obtained for egg weight (g) and yolk height (mm) in the free-range and cage system, yolk color and yolk diameter (mm) in cage system, and breaking strength (kg/f) in family type production. In summer, the best results were obtained in egg weight (g), yolk height (mm), and yolk index (%) in the cage system, albumen height (mm) and Haugh unit in free-range and cage systems, shell thickness (mm) and breaking strength (kg/f) in free-range systems ($p< 0.01$). In autumn, the best results were obtained in egg weight (g) in the free-range system and breaking strength (kg/f) in egg samples from family-type enterprises (Table 2) ($p < 0.01$). When the literature data were analyzed, similar studies were not found. However, similar results were obtained when compared with the studies examining the periodical effects of rearing systems (Mugnai et al., 2009; Mugnai et al., 2014; Dong et al., 2017).

Egg quality is determined by the Haugh unit (HU= 100*Log (h+7.57)-(1.7*w^0.37)), which was determined by Raymond Haugh in 1937 (Haugh, 1937). In the formula, h is the height, and w is the egg's weight. According to the formula, it is a key indicator in egg freshness and quality (Khaleel, 2019). Furthermore, egg freshness and quality are affected by the activity of lysozyme and other enzymes (e.g., ovalbumin and ovomucin) in the egg due to prolonged storage time (Roberts, 2004; Huang et al., 2012; Liu et al., 2020; Shan et al., 2020; Kowalska et al., 2021). As a result of the analysis of the data obtained from our study, it was determined that the best results were obtained in summer and autumn in shape index (%), yolk color, and shell weight (g), in summer in Haugh unit and breaking strength (kg/f), in autumn in egg weight, in winter and autumn in yolk height, in winter in the yolk index, in spring, summer and autumn in yolk diameter, in winter, summer and autumn in shell thickness. At the same time, there was no effect on other data (Tables 1 and 2) ($p < 0.05$).

When we evaluated the influence of different rearing systems on egg external quality in different seasonal periods in terms of rearing systems, the best results were obtained in shape index (%) and egg weight in free-range, yolk-color cage systems, while there was no effect on other data (Table 1 and 2) ($p < 0.05$). The literature information on the data obtained from our study was examined, but similar studies were not found. However, when compared with studies on different systems, it showed differences (Mugnai et al., 2009; Dong et al., 2017). The main reason for this is primarily attributed to differences in chicken breeds, differences in vegetation cover, and differences in feeding regimes.

Evaluation of Egg Internal Quality Data

There are various factors affecting egg internal quality. Among these factors, the nutrient content of feed, breed, age, and rearing systems are considered the most important (Cerolini et al., 2005; Rizzi et al., 2016; Minelli et al., 2007; Mugnai et al., 2009; Küçükyılmaz et al., 2012). Studies on the internal

quality of eggs in organic farming systems reported that albumin content and albumin protein percentages in egg samples from organic farming systems were lower than those from n-3-enriched systems (Lordelo et al., 2017). In a similar study, it was reported that free-range and organic eggs were higher in protein content (g/100 g) compared to conventional eggs but did not significantly affect other parameters (fatty acid profile (g/100 g) (9.4-10.1), Dry matter (g/100 g) (23.5-23.7) and whole egg pH (7.6) (Hidalgo et al., 2008). When the effect of season on egg internal quality was examined (summer, autumn, winter, and spring), it was reported that the season and rearing system did not affect the dry matter, protein, and lipid content of eggs from different rearing systems (closed system and organic egg systems) (Mugnai et al., 2009). When the data of our study were analyzed in the yolk part of the egg, the pH value was higher in the cage and family system in the summer period, protein content was higher in the free-range system in the winter period, and the β-carotene content (μg/g) in the eggs collected in the free-range system in the spring and summer periods was higher compared to other groups (Table 3),($p < 0.05$). Regarding the white part of the egg, the pH value was higher in the cage system and family enterprises in the autumn period; protein values were higher in the family enterprises in the summer period, and protein values were also higher in the cage system and family enterprises in the winter period ($p < 0.05$). In terms of dry matter and ash (%), they were higher in free-range farms in the winter period (Table 4) ($p < 0.05$). The data obtained from our study were examined in conjunction with existing literature information, but similar studies were not found. However, when compared with studies on different systems, they showed consistency (Mugnai et al., 2009; Dong et al., 2017).

Table 1. Effect of season on egg external quality

	Shape Index (%)				Egg Weight (g)				White height (mm)				Yolk colour				Haugh unit			
	Autumn	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**
Free Range	68.73±0.52^{b}	69.10^{b}	79.46^{a}	79.16^{a}	61.60±0.82^{cd}	62.93^{abc}	62.46^{bcd}	65.87^{bcd}	6.31±0.21^{abc}	5.69^{c}	6.65^{ab}	6.48^{abc}	9.63±0.29^{cd}	10.36^{c}	13.33^{ab}	13.32^{ab}	77.34±1.58^{abc}	72.21^{c}	80.04^{ab}	77.63^{abc}
Cage System	66.16±0.83^{c}	68.80^{b}	78.67^{a}	79.68^{a}	56.87±1.31^{e}	62.53^{bcd}	65.60^{ab}	62.01^{cd}	5.72±0.33^{c}	5.82^{bc}	6.94^{a}	5.97^{bc}	14.26±0.46^{a}	12.33^{b}	13.41^{ab}	13.84^{a}	74.82±2.51^{abc}	73.04^{c}	81.27^{a}	74.94^{abc}
Family Business	63.58±1.02^{d}	69.00^{b}	79.29^{a}	78.96^{a}	61.14±1.59^{cd}	59.48^{de}	59.19^{de}	64.02^{abc}	6.42±0.40^{abc}	6.16^{abc}	5.65^{c}	6.51^{abc}	7.80±0.56^{e}	9.03^{d}	13.95^{a}	13.96^{a}	78.50±3.08^{abc}	77.09^{abc}	73.94^{bc}	78.27^{abc}
Sem		0.59	0.66	0.64		0.92	1.03	1.01		0.23	0.26	0.25		0.32	0.36	0.36		1.78	1.99	1.95
P values of the groups																				
Season	0.00				0.00				0.05				0.00				0.04			
Cultivation systems (CS)	0.01				0.01				0.64				0.00				0.79			
Season* CS	0.01				0.00				0.00				0.00				0.03			
Impact of the season																				
Autumn	66.15±0.47^{c}				59.87±0.74^{c}				6.15±0.19				10.56±0.26^{b}				76.89±1.42^{ab}			
Winter	68.96±0.34^{b}				61.64±0.53^{bc}				5.89±0.13				10.57±0.19^{b}				74.11±1.03^{b}			
Spring	79.13±0.38^{a}				62.42±0.59^{ab}				6.42±0.15				13.56±0.21^{a}				78.42±1.15^{a}			
Summer	79.26±0.37^{a}				63.96±0.58^{a}				6.32±0.15				13.70±0.21^{a}				76.95±1.12^{ab}			
Impact of the breeding system																				
Free Range	74.11±0.30^{a}				63.22±0.47^{a}				6.28±0.12^{a}				11.66±0.17^{b}				76.80±0.92^{a}			
Cage System	73.32±0.34^{b}				61.75±0.54^{ab}				6.11±0.14^{a}				13.46±0.19^{a}				76.02±1.03^{a}			
Family Business	72.71±0.37^{b}				60.96±0.58^{b}				6.18±0.15^{a}				11.18±0.21^{b}				76.95±1.13^{a}			

There are statistically significant differences between the means indicated by different superscripts in a column (a,b,c) ($p<0.05$). 0,05 significance: 0,01 significance, NS: Not significant ($p>0.05$), SEM: Standard error of the mean (Cultivation systems (CS))

Table 2. Effect of season on egg external quality

	Crushing Strength (kg/f)				Shell Thickness (mm)				Yolk Height (mm)				Yolk Diameter (mm)				Yolk Index (%)				Shell weight (g)			
	Autumn	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**
Free Range	4.68±0.18^{ab}	3.29^{c}	5.08^{a}	3.41^{cd}	0.36^{a}	0.33^{b}	0.37^{a}	0.35^{ab}	21.08±0.22^{a}	19.52^{d}	19.93^{bcd}	21.27^{a}	43.27±0.41	44.13	44.45	44.81	48.9	41.6	45	47.5	7.51±0.12^{bcd}	7.39^{bcd}	8.00^{a}	7.55^{abcd}
Cage System	5.17±0.28^{a}	3.41^{cd}	4.07^{ab}	4.12^{ab}	0.37^{a}	0.33^{b}	0.35^{ab}	0.37^{a}	20.48±0.34^{abc}	19.81^{cd}	20.72^{ab}	20.56^{abc}	41.88±0.65	45.16	44.72	44.26	49	43.9	46.4	46.9	7.31±0.18^{cde}	6.86^{e}	7.79^{abc}	7.84^{ab}
Family Business	3.45±0.34^{cd}	4.13^{ab}	4.33^{b}	4.37^{b}	0.30^{c}	0.35^{ab}	0.36^{a}	0.36^{a}	21.36±0.42^{a}	18.66^{e}	19.81^{cd}	20.58^{abc}	43.18±0.79	43.68	44.7	44.05	49.8	42.8	44.4	47.3	6.87±0.23^{e}	7.10^{de}	7.67^{abc}	7.70^{abc}
Sem		0.2	0.22	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01		0.24	0.27	0.27		0.46	0.51	0.5		0.01				0.13	0.15	0.14
P values of the groups																								
Season	0.00				0.00				0.00				0.00				0.00				0.00			
Cultivation systems (CS)	0.75				0.13				0.18				0.77				0.51				0.03			
Season* CS	0.00				0.00				0.01				0.18				0.66				0.04			
Impact of the season																								
Autumn	4.43±0.16^{a}				0.35±0.01^{a}				20.97±0.19^{a}				42.78±0.37^{b}				49.3±0.01^{a}				7.23±0.10^{d}			
Winter	3.61±0.11^{c}				0.34±0.00^{b}				19.33±0.14^{c}				44.32±0.27^{a}				42.7±0.01^{d}				7.12±0.08^{c}			
Spring	4.49±0.13^{a}				0.36±0.01^{a}				20.15±0.16^{b}				44.62±0.29^{a}				45.3±0.01^{c}				7.82±0.08^{a}			
Summer	3.96±0.13^{b}				0.36±0.00^{a}				20.80±0.15^{a}				44.37±0.29^{a}				47.2±0.01^{b}				7.70±0.08^{a}			
Impact of the breeding system																								
Free Range	4.11±0.10^{a}				0.35±0.00^{a}				20.46±0.12^{a}				44.16±0.24				45.8±0.01				7.61±0.07^{a}			
Cage System	4.19±0.12^{a}				0.35±0.00^{a}				20.40±0.14^{a}				44.00±0.27				46.6±0.01				7.45±0.08^{a}			
Family Business	4.07±0.13^{a}				0.34±0.00^{a}				20.10±0.15^{b}				43.90±0.29				46.1±0.01				7.33±0.08^{a}			

There are statistically significant differences between the means indicated by different superscripts in a column (a,b,c) ($p<0.05$). 0,05 significance: 0,01 significance, NS: Not significant ($p>0.05$), SEM: Standard error of the mean (Cultivation systems (CS))

β-carotene, a precursor of vitamin A, is a carotenoid molecule commonly found in green leafy plants. Its inclusion in poultry nutrition is essential to support the immune system in poultry (Bayraktar et al., 2019). It has been stated that factors such as β-carotene, water-soluble vitamins, and plant diversity, especially in green pasture grasses, accumulate in eggs through this activity, particularly in chickens raised in organic and free-range systems in spring and summer (Mugnai et al., 2009). As a result of the interaction analysis, it was determined that the pH of the egg yolk was not affected by the season and rearing system ($p > 0.05$), and protein content was high in all periods except the winter period, depending on the season. The best results regarding rearing systems were obtained from eggs reared in a free-range system ($p < 0.05$). β-carotene (μg/g) was found to be the highest in the spring and autumn months, and the best results were obtained from free-range systems in terms of rearing systems ($p < 0.05$). Analysis of the white part of the egg revealed that pH was not significantly affected ($p > 0.05$), but the best results for protein were obtained in the winter season, depending on the season, and in the cage system and family farms in terms of breeding systems ($p < 0.05$). Evaluation of the whole egg (Table 4) indicated that while dry matter (%) was not significantly affected ($p > 0.05$), for ash (%), the best results by season were found in summer and the lowest results in the autumn season. The highest results in terms of breeding systems were found in free-range eggs, whereas the weakest results were found in family farms ($p < 0.05$). When the effect of the season was examined regarding the overall fat percentage of the egg, it was determined that the highest levels were observed in summer, and there was no effect in terms of breeding systems ($p > 0.05$). Literature relevant to the data obtained from our study was examined, but directly comparable studies were not found. However, compared with studies on different systems, they did not show consistency (Mugnai et al., 2009; Dong et al., 2017). The discrepancies among the studies are attributed to differences in chicken breeds, vegetation cover, and feeding regime.

Table 3. Seasonal effects on egg white and yolk internal quality parameters

	WHITE PART OF THE EGG								YOLK PART OF THE EGG											
	pH				Protein (%)				pH				Protein (%)				β- karoten (µg/g)			
	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer	Autumn	Winter	Spring	Summer
Free Range	8.78	8.95	8.85	9.05	9.46^{def}	10.47^{cde}	10.70^{bcd}	8.69^{f}	6.09	6.63	6.21	6.11	16.01^{ab}	15.93^{ab}	15.35^{ab}	15.32^{ab}	254.07^{ab}	171.75^{cde}	278.69^{a}	271.03^{a}
Cage System	8.93	9.03	8.96	9.09	10.21^{cdef}	12.88^{a}	10.42^{cde}	9.07^{ef}	6.23	6.51	6.09	6.34	15.15^{ab}	10.16^{c}	16.31^{a}	15.52^{ab}	212.70^{bc}	95.85^{f}	197.92^{cd}	147.75^{de}
Family Business	8.95	8.92	8.96	8.63	10.58^{bcde}	12.07^{ab}	9.96^{def}	11.73^{abc}	6.11	6.09	6.28	6.30	15.75^{ab}	9.11^{c}	15.35^{ab}	14.89^{b}	215.31^{bc}	137.70^{ef}	278.26^{a}	157.39^{de}
Sem	0.09				0.48				0.15				0.40				16.07			
P values of the groups																				
Season	0.80				0.00				0.18				0.00				0.00			
Cultivation systems	0.16				0.00				0.65				0.00				0.00			
Season* CS	0.10				0.00				0.22				0.00				0.02			
Impact of the season																				
Autumn	8.891				10.088^{b}				6.147				15.639^{a}				227.364a			
Winter	8.972				11.812^{a}				6.413				11.739^{b}				135.104c			
Spring	8.928				10.363^{b}				6.197				15.676^{a}				251.631a			
Summer	8.926				9.832^{b}				6.254				15.252^{a}				192.062b			
Sem	0.06				0.277				0.09				0.233				9.28			
Impact of the breeding system																				
Free Range	8.912				9.833^{b}				6.264				15.658^{a}				243.891a			
Cage System	9.006				10.648^{a}				6.296				14.292^{b}				163.560c			
Family Business	8.87				11.089^{a}				6.198				13.780^{b}				197.170b			
Sem	0.05				0.24				0.07				0.20				8.04			

There are statistically significant differences between the means indicated by different superscripts in a column (a,b,c) ($p<0.05$). 0,05 significance: 0,01 significance, NS: Not significant ($p>0.05$), SEM: Standard error of the mean (Cultivation systems (CS))

Table 4. Effect of season on internal quality parameters of eggs in general

	WHOLE EGG											
	% Dry Matter				% Ash				% Oil			
	Autumn	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**	**Autumn**	**Winter**	**Spring**	**Summer**
Free Range	22.27	27.58	29.42	26.31	0.79^{bcd}	1.00^{a}	0.81^{bcd}	0.96^{a}	8.04^{b}	11.79^{bc}	9.36^{b}	8.84^{b}
Cage System	22.12	25.36	24.46	29.43	0.75^{cd}	0.83^{bc}	0.82^{bc}	1.02^{a}	7.08^{b}	7.37	10.35^{b}	19.20^{a}
Family Business	22.02	26.87	22.78	25.99	0.73^{d}	0.86^{b}	0.80^{bcd}	0.96^{a}	6.53^{b}	10.98^{bc}	9.48^{b}	16.02^{ab}
Sem	2.27				0.03				1.70			
P values of the groups												
Season	0.05				0.00				0.00			
Cultivation systems	0.46				0.03				0.43			
Season* CS	0.61				0.00				0.01			
Impact of the season												
Autumn	22.14				0.759^{d}				7.226^{b}			
Winter	26.608				0.903^{b}				10.054^{b}			
Spring	26.224				0.812^{c}				9.735^{b}			
Summer	27.249				0.984^{a}				14.690^{a}			
Sem	1.312				0.015				0.984			
Impact of the breeding system												
Free Range	26.398				0.893^{a}				9.515			
Cage System	25.849				0.859^{ab}				11.006			
Family Business	24.419				0.842^{b}				10.758			
Sem	1.136				0.013				0.852			

There are statistically significant differences between the means indicated by different superscripts in a column (a,b,c) ($p<0.05$). 0,05 significance: 0,01 significance, NS: Not significant ($p>0.05$), SEM: Standard error of the mean (Cultivation systems (CS))

4. Conclusion

This study has revealed that the quality parameters of chicken eggs obtained from different breeding systems in Bayburt vary significantly depending on both breeding systems and seasonal factors. While the best results are obtained in the external egg quality (free-roaming for shape index and egg weight, cage system for yellow color) and internal quality data (free-roaming system); in particular, the positive effect of free-roaming systems on the nutritional content and overall internal quality of eggs strengthens the reflection of animal welfare and natural nutrition opportunities on product quality. The superiority of the cage system over the yellow color is due to the consistent effect of controlled feeding on pigmentation. It has been determined that egg yolk (protein in winter, β-carotene in spring/summer) and egg white (pH in autumn, protein in winter/summer) show significant changes with seasonal effects. As a result, our study, which emphasizes the critical importance of holistic evaluation of breeding systems and seasonal conditions while aiming at high-quality and nutritious egg production, is thought to make an important contribution to the development of sustainable production models.

Acknowledgments

This study was derived from his thesis titled 'The Effect of the Season on the Quality Criteria of Eggs Obtained from Chickens with Different Breeding System in Bayburt' prepared in Bayburt University Graduate School of Postgraduate Education, Department of Organic Agriculture Management. This work was supported by Research Fund of the Bayburt University. Project Number 2021/69003- 03.

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

Abo Ghanima MM., Elsadek MF., Taha AE., Abd El-Hack ME., Alagawany M., Ahmed BM., Elshafie MM., El-Sabrout K. Effect of housing system and rosemary and cinnamon essential oils on layers performance, egg quality, haematological traits, blood chemistry, immunity, and antioxidant. Animals, 2020; 10(2): 245.

Altan Ö. Yumurta oluşumu, kalitesi ve biyoaktif komponentleri. 2015: Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir.

Anonymous (Internatinal Egg). Annual Review 2016. https://www.internationalegg.com/resources/ publications.2016.

Anonymous (USDA), Agricultural Research Service US. https://www.ars.usda.gov/northeast-area/ beltsville-md-bhnrc/beltsville-human-nutrition-research-center/ methods-and-application-of-food-composition-laboratory/. 2024.

Bain MM., Nys Y., Dunn IC. Increasing persistency in lay and stabilising egg quality in longer laying cycles. What are the challenges? British Poultry Science 2016; 57(3): 330-338.

Bouvarel I., Nys Y., Lescoat P. Improving the safety and quality of eggs and egg products, egg chemistry, production and consumption. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition 2011; 261-299.

Bayraktar B., Yiğit AA., Ekici H. Serum β-carotene levels of the local black cattle in lactation period, dry period and different ages, seasons-2019. J Vet Sci Med Diagn 2019; 8: 272.

Campbell D., De Haas E., Lee C. A review of environmental enrichment for laying hens during rearing in relation to their behavioral and physiological development. Poultry Science, 2019: 98(1): 9-28.

Campbell D., Makagon M., Swanson J., Siegford J. Laying hen movement in a commercial aviary: Enclosure to floor and back again. Poultry Science 2016; 95(1): 176-187.

Cerolini S., Zaniboni L., La Cognata R. Lipid characteristics in eggs produced in different housing systems. Italian Journal of Animal Science 2005; 4.

Damaziak K., Musielak M., Musielak C., Riedel J., Gozdowski D., Grzybek W. Effect of different rearing system on eggs production, hatchability, and offspring quality in layer breeders. Poultry Science 2021; 100(6): 1-10.

Dong X., Yin Z., Ma Y., Cao H., Dong D. Effects of rearing systems on laying performance, egg quality, and serum biochemistry of Xianju chickens in summer. Poultry Science 2017; 96(11): 3896-3900.

Haugh H. The Haugh unit for measuring egg quality. The U.S. Egg and Poultry Magazine, 1937; 43, 552-555.

Hidalgo A., Rossi M., Clerici F., Ratti S. A market study on the quality characteristics of eggs from different housing systems. Food Chemistry 2008; 106(3): 1031-1038.

Huang Q., Qiu N., Ma M., Jin Y., Yang H.,Geng F.,Sun S. Estimation of egg freshness using S-ovalbumin as an indicator. Poultry Science 2012; 91(3): 739-743.

Jones DR., Anderson KE., Guard JY. Prevalence of coliforms, Salmonella, Listeria, and Campylobacter associated with eggs and the environment of conventional cage and free-range egg production. Poultry Science 2012; 91(5): 1195-1202.

Khaleel R. Prediction of Haugh unit by egg weight and albumen height. Mesopotamia Journal of Agriculture 2019; 47(3): 37-43.

Kowalska E., Kucharska-Gaca J., Kuźniacka J., Lewko L., Gornowicz E., Biesek J., Adamski M. Egg quality depending on the diet with different sources of protein and age of the hens. Scientific Reports 2021; 11(1): 1-11.

Küçükyılmaz K., Bozkurt M., Herken EN., Çınar M., Çatlı AU., Bintaş E., Çöven F. Effects of rearing systems on performance, egg characteristics and immune response in two ;layer hen genotype. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 2012; 25(4): 559.

Liu X., Wang J., Huang Q., Cheng L., Gan R., Liu L.,Wu D., Li H., Geng F. Underlying mechanism for the differences in heat-induced gel properties between thick egg whites and thin egg whites: Gel properties, structure and quantitative proteome analysis. Food Hydrocolloids 2020; 106: 105873.

Lordelo M., Fernandes E., Bessa R., Alves S. Quality of eggs from different laying hen production systems, from indigenous breeds and specialty eggs. Poultry Science 2017; 96(5): 1485-1491.

Mathieu-Huart A., Lentdecker CD., Riviere G., Sissoko F., Rousselle C. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety (ANSES) health reference values (RV).l and Occupational Health & Safety 2014; 75(3): 292-301.

Minelli G., Sirri F., Folegatti E., Meluzzi A., Franchini A. Egg quality traits of laying hens reared in organic and conventional systems. Italian Journal of Animal Science 2007; 6(1): 728-730.

Moura DJD., Nääs L., Pereira D., Silva R., Camargo G. Animal welfare concepts and strategy for poultry production: a review. Brazilian Journal of Poultry Science 2006; 8: 137-147.

Mugnai C., Dal Bosco A., Castellini C. Effect of rearing system and season on the performance and egg characteristics of Ancona laying hens. Italian Journal of Animal Science 2009; 8(2): 175-188.

Mugnai C., Sossidou EN., Dal Bosco A., Ruggeri S., Mattioli S., Castellini C. The effects of husbandry system on the grass intake and egg nutritive characteristics of laying hens. Journal of the Science of Food and Agriculture 2014; 94(3): 459-467.

Özbey O., Esen F. The effects of different breeding systems on egg productivity and egg quality characteristics of rock partridges. Poultry Science 2007; 86(4): 782-785.

Pavlovski Z., Škrbić Z., Lukić M., Krnjaja V., Bijelić Z., Trenkovski S.Tehnologija proizvodnje jaja sa slobodnog ispusta posebnog i garantovanog kvaliteta (tehničko rešenje). Biotechnology in Animal Husbandry 2010; 26: 55-67.

Radu-Rusu R., Usturoi M., Radu-Rusu C., Vacaru-Opris L., Leahu A., Amariei S. Chemical features, cholesterol and energy content of table hen eggs from conventional and alternative farming systems. South African Journal of Animal Science 2014; 44(1): 33-42.

Rakonjac S., Bogosavljević-Bošković S., Pavlovski Z., Škrbić Z., Dosković V., Petrović MD., Petričević V. Laying hen rearing systems: A review of major production results and egg quality traits. World's Poultry Science Journal 2014; 70(1): 93-104.

Rakonjac S., Bogosavljević BS., Škrbić Z., Lukić M., Dosković V., Petričević V., Petrović MD. Quality and chemical composition of eggs affected by rearing system and hen's age. Biotechnology in Animal Husbandry 2018; 34(3): 335-344.

Réhault-Godbert S., Guyot N., Nys Y. The golden egg: nutritional value, bioactivities, and emerging benefits for human health. Nutrients 2019; 11(3): 684.

Rizzi L., Simioli G., Martelli G., Paganelli R., Sardi L. Effects of organic farming on egg quality and welfare of laying hens. Paper presented at the XII European Poultry Conference, Verona. 2016; 10-14

Roberts JR. Factors affecting egg internal quality and egg shell quality in laying hens. The Journal of Poultry Science 2004; 41(3): 161-177.

Shan Y., Tang D., Wang R., Tu A., Yi Y., Wang X., Liu B., Zhou Y., Huang Q., Lü X. Rheological and structural properties of ovomucin from chicken eggs with different interior quality. Food Hydrocolloids 2020; 100, 105393.

Sparks N. The hen's egg–is its role in human nutrition changing? World's Poultry Science Journal 2006; 62(2): 308-315.

Steenfeldt S., Hammershøj M. Organic egg production. I: Effects of different dietary protein contents and forage material on organic egg production, nitrogen and mineral retention and total tract digestibility of nutrients of two hen genotypes. Animal Feed Science and Technology, 2015; 209: 186-201.

Tavares BDO., Pereira DF., Salgado DDA., Mac-Lean PAB. Mortality, production and quality of eggs of different rearing systems. Engenharia Agrícola 2018; 38: 478-485.

Türker İ., Alkan S. Comparisons of physical and chemical characteristics of eggs obtained using hens reared in deep litter and free-range systems. Journal of Agricultural Sciences 2019; 25(2): 181-188.

Wang J., Um P., Dickerman BA., Liu J. Zinc, magnesium, selenium and depression: a review of the evidence, potential mechanisms and implications. Nutrients 2018; 10(5): 584.

Wei S., Guo Y., Yan P. Comparison of two housing systems on behaviour and performance of fattening pigs. Journal of Applied Animal Research 2019; 47(1): 41-45.

Yenice G., Kaynar O., Ileriturk M., Hira F., Hayirli A. Quality of eggs in different production systems. Czech Journal of Food Sciences 2016; 34(4): 370-376.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 322-331, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 322-331, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Yük Taşıyan İHA'larda Aktif Başkalaşımın Birleştirilmiş Çıkış ve Giriş Varyansı Kısıtlı Kontrolcünün Kontrol Çabasına Etkilerinin Analizi

Fırat ŞAL[1*]

[1]İskenderun Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Bakım ve Onarım Bölümü, 31200, Hatay

[1]https://orcid.org/0000-0003-2412-4131
*Sorumlu yazar: firat.sal@iste.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 19.03.2025
Kabul tarihi:04.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Yük taşıyan İHA'lar
Kısıtlamalı kontrol
Otonom kontrol
Uçuş kontrol sistemi
Aktif başkalaşım

ÖZ

Bu araştırma yayınında birleştirilmiş giriş ve çıkış varyansı kısıtlı kontrolcü ile otonom kontrolü sağlanan yük taşıyan bir İHA'nın maruz kalacağı aktif başkalaşımın kontrolcünün kontrol çabası üzerinde etkileri ele alınmaya ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Otonom kontrolü sağlama adına bu çalışmada çıkış ve giriş varyansı kısıtlı kontrolcüden yani O&I-VC den faydalanılmıştır. Yük taşıyan İHA'nın kanadı ve yatay kuyruğu açıklık doğrultusunda uçuş sırasında uzayıp kısalabilmektedir. Bu uzama kısalmalar O&I-VC kontrolcüsünün başvurulduğu uygulamalarda kontrol çabası üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu çalışmada bu etkiler göz önünde bulundurulup en iyi başkalaşım kombinasyonunun tespiti sağlanmaya çalışılacaktır. En iyi kombinasyonda uçuşun sürdürülebilmesi hem enerji sarfiyatını azaltacak, hem de daha yeşil bir eko sisteme imkân tanıyacak hem de havada kalış süresi, maksimum menzil, tavan irtifası gibi uçuş performans özelliklere de pozitif katkılar sunacaktır.

Effect Analysis of Active Morphing on Control Effort of Combined Output and Input Variance Constrained Controller Guided Load-Carrying UAVs

Research Article

Article History:
Received: 19.03.2025
Accepted: 04.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Load-carrying UAVs
Constrained control
Autonomous control
Flight control system
Active morphing

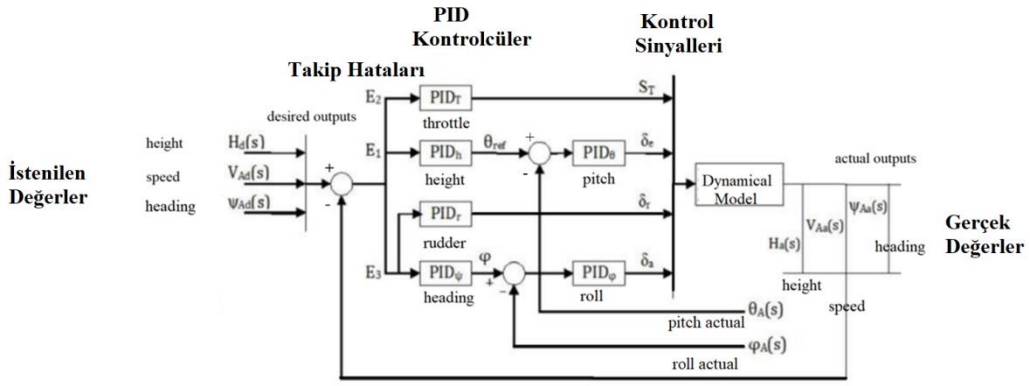
ABSTRACT

In this research article effect analysis of active morphing on control effort of combined output and input variance constrained controller guided load-carrying UAVs are considered and analysed. For satisfying autonomous control, output and input variance constrained controller (i.e., O&I-VC) is benefitted. Wing and horizontal tailplane of the load-carrying UAV is able to extend and shorten in span wise direction. These extensions and shortenings have important effects on control effort of the O&I-VC applied applications. In this article these effects are considered and best morphing combination is tried to be determined. Flight at best combination both satisfy reduce fuel consumption and contribute a green ecosystem and also have positive contributions on flight performance specialties such as maximum endurance, maximum range and ceiling altitude.

To Cite: Şal F. Yük Taşıyan İHA'larda Aktif Başkalaşımın Birleştirilmiş Çıkış ve Giriş Varyansı Kısıtlı Kontrolcünün Kontrol Çabasına Etkilerinin Analizi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 322-331.

1. Giriş

Son zamanlarda insansız hava araçlarında (İHA'larda) faydalanılan otopilot veya uçuş kontrol sistemlerinde kullanılan kontrolcü yöntemleri için oldukça çeşitli araştırmalar yapılmış ve aplikasyonlar sunulmuştur. Bu aplikasyonlardan en yaygın kullanılanı içinde 6 adet PID (oransal-integral-türev) kontrolcü kullanılan 3 katmanlı hiyerarşik ticari otopilot sistemleridir (Chao ve ark., 2007; Oktay ve ark., 2016). Bu çalışmalarda PID kontrolcülerin sahip olduğu kazanç katsayıları birçok farklı şekilde tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunlardan bazılarında bu katsayılar deneme yanılma yöntemi ile tespit edilirken diğer bazılarında ise belli başlı maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde tayin de edilebilmektedirler (Şahin ve ark., 2022; Köse, 2024a; Köse, 2024b; Uzun, 2024). Ayrıca aşağıda Şekil 1'de hiyerarşik ticari otopilot sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. Hiyerarşik ticari otopilot sisteminin görselleştirilmesi

Hiyerarşik otopilot sistemleri 3 katmandan oluşmaktadır. Yuvarlanma ve yunuslama açıları en iç katmanda kontrol sinyallerinden (elevatör yunuslama için ve aileron yuvarlama için) faydalanılarak stabilize edilmektedirler. Orta katmanda ise baş açısı ve irtifa stabilize edilmektedirler. En dış katmanda ise -x ve -y koordinatlarının takibi sağlanmaktadır. PID kontrolcüleri yeniden tasarlandığı çalışmalardan biri Uzun, 2024 çalışmasıdır. Bu çalışmada bir İHA'da kanadın gövdeye montaj açısı ve otonom uçuş kontrol sistemi parametreleri eş zamanlı bir şekilde, rassal bir optimizasyon yöntemi olan eş zamanlı pertürbasyon rassal yaklaştırım (genel olarak bilinen adı SPSA) ile bir otonom uçuş maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde tekrardan tasarlanmıştır. Bu çalışmada otonom uçuş kontrol sistemi parametreleri İHA'nın yunuslama açısını 5 derecede tutmaya çalışan boylamasına PID kontrolcünün 3 adet kazanç katsayısı, İHA'nın yuvarlanma açısını 5 derecede tutmaya çalışan yanlamasına PID kontrolcünün 3 adet kazanç katsayısı ve ayrıca 1 adet İHA'da kanadın gövdeye montaj açısıdır. Bu çalışmada bu 7 takım yeniden tasarım parametresi SPSA ile birlikte ele alınmış ve otonom maliyet fonksiyonunda yani bir başka deyişle kontrol çabasında bu eş zamanlı tasarımın uygulanmadığı duruma göre %86 bir tasarruf gerçekleştirilebilmiştir. PID kontrolcüleri yeniden tasarlandığı çalışmalardan diğer biri de Köse, 2024 çalışmasıdır. Bu araştırmada ise döner kanatlı bir İHA'da yani spesifik olarak oktorotorda kol uzunlukları ve otonom uçuş kontrol sistemi parametreleri yine eş zamanlı

bir şekilde, rassal bir optimizasyon yöntemi olan SPSA ile birlikte bir otonom uçuş maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde tekrardan tasarlanmıştır. Bu çalışmada ise otonom uçuş kontrol sistemi parametreleri oktorotorun yunuslama açısını 5 derecede tutmaya çalışan boylamasına PID kontrolcünün 3 adet kazanç katsayısı, İHA'nın yuvarlanma açısını 5 derecede tutmaya çalışan yanlamasına PID kontrolcünün 3 adet kazanç katsayısı ve ayrıca oktorotorun kol uzunluklarının hepsi bir arada aynı oranda değişimidir. Bu araştırma makalesinde bu 7 takım yeniden tasarım parametresi SPSA ile birlikte ele alınmış ve otonom maliyet fonksiyonunda veya kontrol çabasında bu eş zamanlı tasarımın uygulanmadığı senaryoya göre %93 bir tasarruf sağlanabilmiştir. İHA'larda yaygın olarak kullanılan hiyerarşik ticari otopilotların yanında LQR (yani doğrusal kuadratik regülatör), LQG (doğrusal kuadratik gaussian), MPC (model kestirmeli kontrolcü) gibi farklı kontrolcü uygulamalarda nadirde olsa kullanabilmektedir. Fakat bu yöntemlerle yapılan uçuşlarda çok farklı sıkıntılar yaşanmasında yaygın olarak görülebilmektedir.

Bu çalışmada ise varyans kısıtlı kontrolcülerin özel bir varyasyonu olan çıkış ve giriş varyansı kısıtlı kontrolcüden yani O&I-VC den faydalanılmıştır. Bu özel kontrolcü Şekil 2'deki yük taşıyan İHA'nın dinamik modeline simülasyon ortamında uygulanmaya çalışılmış ve kontrol çabası üzerinde aktif başkalaşımın etkileri ele alınmaya çalışılmıştır.

Şekil 2. Yük taşıyan İHA'nın arazi fotoğrafı

Varyans kısıtlı kontrolcüler otomatik kontrol uygulamaları literatüründe mevcut diğer yaygın kontrol yaklaşımlarına göre birçok üstünlük barındırmaktadırlar. Öncelikle varyans kısıtlı kontrolcüler modifiye edilmiş LQG kontrol uygulamalarıdır ve durum kestirimcisi niyetine Kalman filtrelerinden faydalanırlar. Bunun dışında ikinci dereceden bilgiye haizdirler ve bu çeşit bilgi çok değişkenli kontrol sistemi tasarımında kayda değer ölçüde kullanışlıdır. Çünkü bütün kararlı hale sokan kontrol sistemleri fiziksel olarak anlamlı durum kovaryans matrisine göre parametre edilmişlerdir. Bu tarzdan bilgi için Referanslar (Skelton ve Lorenzo, 1985; Skelton ve Sultan, 1997) ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. Üçüncü olarak ise büyük ve şiddetli bir şekilde akuple çok-girişli çok-çıkışlı (ÇGÇÇ) fiziksel sistemlerde örneğin İHA otopilot sistemlerinde görüldüğü gibi, bu tip varyans kısıtlı kontrolcüler bağımsız değişkenlerin anlık davranışının güvencesini bu değişkenlerin varyansları üzerinde üst limitler

koyarak sağlar. Bu araştırma makalesinde özel olarak kullanılan varyans kısıtlı kontrolcü çıkış ve giriş varyansı kısıtlı kontrolcü yani O&I-VC'dir ve İHA otopilot sistemi içerisinde bu gibi üstünlüklerinden dolayı ele alınmıştır.

Varyans kısıtlı kontrolcüler özellikle otopilot sistemi içerisinde insanlı veya insansız helikopterlerde yaygın bir şekilde daha önceleri ele alınmıştır. Bu çalışmalardan birisi Oktay ve Sultan, 2013'dür. Bu çalışmada insanlı bir helikopter olan Puma SA 330'un dinamik modeli üzerinde kontrol çabasını mümkün olduğunca düşürmek adına pasif başkalaşım yaklaşımından faydalanılmıştır. İlgili bu çalışmada pasif olarak başkalaşan parametreler ana rotor pale uzunluğu, pale veter uzunluğu, açısal hızı, pale burulması, pale doğrusal kütle yoğunluğu ve pale çırpınma yayı esnekliğidir. Pasif başkalaşım yaklaşımı içinde çıkış varyansı kısıtlı (OVC) kontrolcü barındıran helikopter otonom sisteminin kontrol çabasında 40 kt'lık düz seviye uçuşu durumunda yaklaşık %33'luk kazanç sağlamıştır. Yine bir diğer çalışma olan Oktay ve Sultan (2014) çalışmasında bu sefer aktif başkalaşım yaklaşımından faydalanılarak helikopter uçuş kontrol sisteminin kontrol çabasında 40 kt'lık düz seviye uçuşu durumunda yaklaşık %85'lik bir kazanç elde edilmiştir. Bu çalışmada da önceki çalışmada olduğu gibi otonom sistem içerisinde OVC kontrolcüden faydalanılmıştır. Literatürde helikopterler üzerinde farklı varyans kısıtlı kontrolcülerin uygulandığı birçok farklı çalışmada mevcuttur. Örneğin, Oktay ve Sultan, 2015; Oktay ve Şal, 2015a; Oktay ve Şal 2015b; Oktay ev Şal, 2016; Oktay ve Şal, 2017; Şal, 2020; Şal 2022; Şal, 2024 bu kapsamda incelenebilir.

Bu araştırma makalesinde otopilot sistemi içerisinde çıkış ve giriş varyansı kısıtlı kontrolcü yani O&I-VC barındıran yük taşıyan bir İHA'da maruz kalacağı aktif başkalaşımın kontrolcünün kontrol çabası üzerinde etkileri ele alınmaya ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Bu tarz bir varyans kısıtlı kontrolcü İHA'larda ilk defa otonom sistem içerisinde dâhil edilmeye bu makale araştırmasında çalışılmıştır. Bu çalışmanın en önemli literatüre katkılarından biri de budur. Bunun dışında O&I-VC kontrolcüsü aktif başkalaşımın yaşandığı bir senaryoda yine literatürde ilk defa ele alınmıştır. Bu da çalışmanın literatüre önemli katkılarından birisidir. Ayrıca O&I-VC kontrolcüsü ve aktif başkalaşım olgusu literatürde ilk defa bu çalışma kapsamında ele alınmıştır.

2. Kullanılan Yük Taşıyan İHA Dinamik Modelleri

Bu araştırma makalesinde kullanılan yük taşıyan İHA'nın dinamik modellenmesi adına doğrusallaştırılmış boylamasına ve yanlamasına durum uzay modellerinden faydalanılmıştır. Aşağıda Denklem 1a ve 1b de sırası ile durum uzay modelleri sunulmuştur. Bu modellerin ayrıntılı adım adım çıkarılışları için referanslar Etkin ve Reyd, (1996) ile Nelson, (2007) incelenebilir.

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\Delta\dot{u}\\ \Delta\dot{w}\\ \Delta\dot{q}\\ \Delta\dot{\theta}\\ \Delta\dot{h}\end{bmatrix}}_{\dot{\boldsymbol{x}}_l} = \overbrace{\begin{bmatrix} X_u & X_w & 0 & -g & 0\\ Z_u & Z_w & u_0 & 0 & 0\\ M_u + M_w Z_w & M_w + M_w Z_w & M_q + M_w u_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ -\sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & -u_0\cos(\theta_0) & 0\end{bmatrix}}^{A_l} \underbrace{\begin{bmatrix}\Delta u\\ \Delta w\\ \Delta q\\ \Delta\theta\\ \Delta h\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{x}_l} + \overbrace{\begin{bmatrix} X_{\delta_T} & X_{\delta_e}\\ Z_{\delta_T} & Z_{\delta_e}\\ M_{\delta_T} + M_w Z_{\delta_T} & M_{\delta_e} + M_w Z_{\delta_e}\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}}^{B_l} \underbrace{\begin{bmatrix}\Delta\delta_T\\ \Delta\delta_e\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{u}_l} \tag{1a}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\Delta\dot{\beta}\\ \Delta\dot{p}\\ \Delta\dot{r}\\ \Delta\dot{\phi}\\ \Delta\dot{\psi}\end{bmatrix}}_{\dot{\boldsymbol{x}}_{la}} = \overbrace{\begin{bmatrix} \frac{Y_\beta}{u_0} & \frac{Y_p}{u_0} & -(1-\frac{Y_r}{u_0}) & -\frac{g}{u_0}\cos(\theta_0) & 0\\ L^*_\beta + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N^*_\beta & L^*_p + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N^*_p & L^*_r + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N^*_r & 0 & 0\\ N^*_v + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L^*_v & N^*_p + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L^*_p & N^*_r + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L^*_r & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \sec(\theta_0) & 0 & 0\end{bmatrix}}^{A_{la}} \underbrace{\begin{bmatrix}\Delta\beta\\ \Delta p\\ \Delta r\\ \Delta\phi\\ \Delta\psi\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{x}_{la}} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & \frac{Y_{\delta_r}}{u_0}\\ L^*_{\delta_a} + \frac{I_{xz}}{I_{xx}}N^*_{\delta_a} & L^*_{\delta_r} + \frac{I_{xz}}{I_x}N^*_{\delta_r}\\ N^*_{\delta_a} + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L^*_{\delta_a} & N^*_{\delta_r} + \frac{I_{xz}}{I_{zz}}L^*_{\delta_r}\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}}^{B_{la}} \underbrace{\begin{bmatrix}\Delta\delta_a\\ \Delta\delta_r\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{u}_{la}} \tag{1b}$$

Denklemler 1a ve 1b de kullanılan ifadelerin önemli bazılarının açıklamaları aşağıda Tablo 1 de sunulmuştur. Denklem 1a ve 1b içi içe geçmiş olmadığından dolayı boylamasına ve yanlamasına hareketler birbirlerinden bağımsız bir şekilde ele alınabilir.

Tablo 1. Bazı Durum-Uzay modeli terimleri ve açıklamaları

Parametre	Açıklama
X_u , X_w	*u* ve *w* doğrusal hızlarındaki değişimlerimin X kuvvetindeki etkileri
Z_u, Z_w	*u* ve *w* doğrusal hızlarındaki değişimlerimin X kuvvetindeki etkileri
M_u, M_w, M_q	*u*, *w* doğrusal hızlarındaki ve q açısal hızındaki değişimlerimin M momentindeki etkileri
X_{δ_T} , X_{δ_e}	Gaz kolu ve elevatör girişlerindeki değişimlerin X kuvvetindeki etkileri
Z_{δ_T} , Z_{δ_e}	Gaz kolu ve elevatör girişlerindeki değişimlerin Z kuvvetindeki etkileri
Y_{δ_r}	Rudder girişindeki değişimlerin Y kuvvetindeki etkileri
M_{δ_T} , M_{δ_e}	Gaz kolu ve elevatör girişlerindeki değişimlerin M momentindeki etkileri
I_{xx}, I_{zz}, I_{xz}	Sırasıyla ataletsel bileşenler
u, w, q ,θ, h	Boylamasına modeldeki durum değişkenleri: boylamasına doğrusal hız, düşey doğrusal hız, yanal açısal hız, yunuslama açısı, irtifa (sırası ile)
β, p, r, ϕ, ψ	Yanlamasına modeldeki durum değişkenleri: yana kayış açısı, uzunlamasına açısal hız, düşey açısal hız, yuvarlanma açısı, sapma açısı (sırası ile)
δ_T ve δ_e	Gaz kolu ve elevatör girişleri (Uzunlamasına kontrol)
δ_a ve δ_r	Aileron ve rudder girişleri (Yanal kontrol)

Ayrıca Tablo 2 de faydalanılan yük taşıyan İHA'nın bazı fiziksel özellikleri sıralanmıştır.

Tablo 2. Faydalanılan İHA'nın bazı temel özellikleri

Terim	Büyüklük
Toplam Ağırlık	6.5 kg
Boş Ağırlık	3 kg
Kanat Açıklığı	1.6 m
Kanat Veter Uzunluğu	25 cm
Kanat Açıklık Oranı	6.4
Kanat Alanı	0.4 m^2
Yatay Kuyruk Açıklığı	0.4 m
Yatay Kuyruk Veter Uzunluğu	15 cm
Yatay Kuyruk Açıklık Oranı	2.6667
Başvurulan Güç Sistemi	Batarya Tahrikli Elektrik Motorlu
Kanat Aktif Başkalaşım Sistemi	Mevcut
Kanat Açılma Oranı	Maksimum %10 (176 cm e kadar ulaşabilir)
Yatay Kuyruk Başkalaşım Sistemi	Mevcut
Yatay Kuyruk Açılma Oranı	Maksimum %10 (44 cm e kadar ulaşabilir)

3. Kontrolcü Modelleri

Bu araştırma makalesinde yük taşıyan İHA'nın otonom sisteminin içerisinde spesifik bir varyans kısıtlı kontrolcü olan hem çıkış hem de giriş varyansı kısıtlı kontrolcü yani O&I-VC kontrolcüsünden faydalanılmıştır. Bu kontrolcü çıkış varyansı kısıtlı kontrolcü yani OVC ve giriş varyansı kısıtlı kontrolcü yani IVC nin harmanlanmış bir versiyonudur. İlk defa Oktay, 2015 çalışmasında gündeme alınıp geliştirilmiştir. Aşağıda sırası ile OVC ve IVC kontrolcülerin matematiksel ifadeleri özetlenmiştir (Skelton ve Lorenzo, 1985; Skelton ve Sultan, 1997). OVC kontrolcüsünün kısa bir tanıtımı şu şekilde ifade edilebilir: Mevcut bir doğrusal, zamandan bağımsız, kararlı hale getirilebilir ve saptanabilir fiziksel sistem için pozitif tanımlı bir giriş ceza matrisi var iken tam dereceli dinamik bir kontrolcü aşağıdaki şekilde yakalanmalıdır:

$$\min_{A_c,F,G} E_\infty \mathrm{u}^T R \mathrm{u} \tag{3}$$

Bununa beraber bu safhada sistemin çıkışları üzerinde aşağıdaki gibi varyans kısıtlamaları da bulunmaktadır:

$$E_\infty y_i^2 \le \sigma_i^2, \qquad i = 1,....,n_y \tag{4}$$

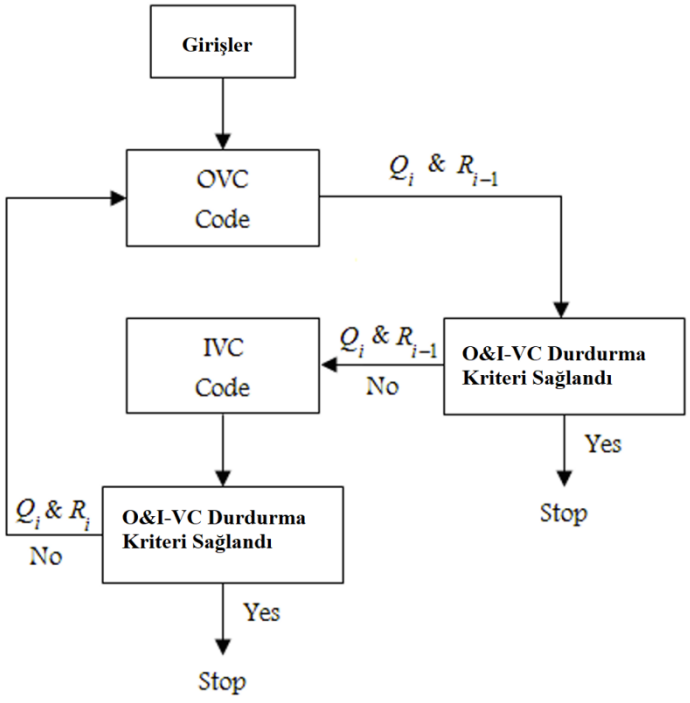
IVC kontrolcüsünün kısa bir tanıtımı ise yine şu şekilde ifade edilebilir: Mevcut bir doğrusal, zamandan bağımsız, kararlı hale getirilebilir ve saptanabilir fiziksel sistem için pozitif tanımlı bir çıkış ceza matrisi var iken tam dereceli dinamik bir kontrolcü aşağıdaki şekilde yakalanmalıdır:

$$\min_{K,F,G} E_\infty y^T Q y \tag{5}$$

Bununa beraber bu safhada sistemin çıkışları üzerinde aşağıdaki gibi varyans kısıtlamaları da bulunmaktadır:

$$E_\infty u_i^2 \le \mu_i^2, \qquad i = 1,....,n_u \tag{6}$$

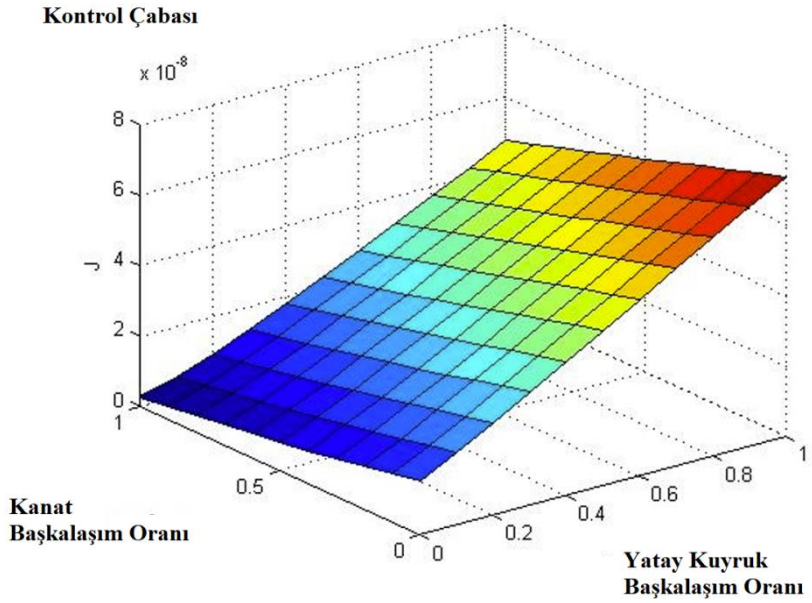
Aşağıda Şekil 3'de ise O&I-VC kontrolcünün hem OVC hem de IVC yi içeren yapısı şematize edilmiştir. *Q* ve *R* matrisleri 2 tane matematiksel Riccati denkleminin çözümü ile elde edilmektedir.



Şekil 3. O&I-VC kontrolcünün blok şeması

4. Aktif Başkalaşımın O&I-VC Kontrolcüsünün Kontrol Çabasına Etkisi

Bu bölümde kanat ve yatay kuyruk açıklık doğrultusunda aktif olarak başkalaşan yük taşıyan bir İHA'nın otonom kontrolünde kullanılan O&I-VC kontrolcünün kontrol çabası temel fokusda tutulmuştur. Kanadı ve yatay kuyruğu uçuş esnasında %10 a kadar genişleyip kısalabilen bu İHA'da bu olaylar gerçekleşirken aynı kontrolcünün üzerindeki varyans kısıtları şartını yerine getirirken ki kontrol çabası nasıl değişmektedir bu ele alınmaya çalışılmıştır. Aşağıda Şekil 4'de -x ve -y eksenlerinde yer alan "1" sayısı tam başkalaşımın gerçekleştiği, "0" sayısı ise hiç başkalaşımın gerçekleşmediği durumu göstermektedir. Düşey eksen olan -z ekseninde ise ilgili kontrolcünü kontrol çabası gösterilmiştir. İlgili şekilden anlaşılmaktadır ki yatay kuyruğun tam başkalaştığı, kanadın ise başkalaşmadığı durumda kontrol çabası maksimum değerini almaktadır. Yine bu şekilden görülmektedir ki yatay kuyruğun başkalaşmadığı, kanadın ise tam başkalaştığı durumda kontrol çabası minimum değerini almaktadır. Eğer ki bu kontrolcü İHA'nın uçuş esnasında otonom sistem içerisinde kullanılacak ise kanadın tam başkalaştığı ve yatay kuyruğun başkalaşmadığı durumda uçuşun büyük bölümünü geçirmek uçuş performansı bakımından daha faydalı olabilecektir. En iyi kombinasyonda uçuşun mümkün olduğunca devam ettirilebilmesi hem enerji sarfiyatını azaltacak, hem de daha yeşil bir eko sisteme imkân tanıyacak hem de havada kalış süresi, maksimum menzil, tavan irtifası gibi uçuş performans özelliklere de pozitif katkılar verecektir.



Şekil 4. Kanat ve yatay kuyruk aktif başkalaşımının O&I-VC kontrolcü kontrol çabasına etkileri

5. Sonuçlar

Bu araştırma yayınında birleştirilmiş giriş ve çıkış varyansı kısıtlı kontrolcü ile otonom kontrolü sağlanan yük taşıyan bir insansız hava aracının (İHA'nın) üzerinde hissedeceği aktif başkalaşımın kontrolcünün kontrol çabası üzerinde etkileri incelenmeye ve detaylı analiz edilmeye çalışılmıştır. Uçuş esnasında otonom kontrolün sağlanması adına bu araştırmada çıkış ve giriş varyansı kısıtlı kontrolcüden yani İngilizce kısaltması olan O&I-VC den yararlanılmıştır. Uçuş esnasında yük taşıyan İHA'nın kanadı ve yatay kuyruğu açıklık doğrultusunda genişleyip daralabilmektedir. Bu daralma ve genişlemeler O&I-VC kontrolcüsünün ele alındığı uygulamalarda kontrol çabası üzerinde kayda değer etkilere sahiptir. Bu çalışmada ise bu etkiler ele alınmaya çalışılıp en iyi başkalaşım kombinasyonunun tespiti bulunmaya çalışılmıştır. Şüphesiz mümkün olduğunca en iyi kombinasyonda uçuşun sürdürülebilmesi hem enerji sarfiyatını azaltabilecek, hem de daha yeşil bir eko sisteme imkân tanıyacak hem de havada kalış süresi, maksimum menzil, tavan irtifası gibi uçuş performans özelliklere de olumlu katkılar sunabilecektir. Bu çalışmada yatay kuyruğun tam başkalaştığı, kanadın ise başkalaşmadığı durumda kontrol çabasının maksimum değerini almakta olduğu, yatay kuyruğun başkalaşmadığı, kanadın ise tam başkalaştığı durumda ise kontrol çabası minimum değerini almakta olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar özetle kanadın tam yatay kuyruğun ise hiç başkalaşmadığı varyasyonu en verimli uçuş şekli olarak açığa çıkarmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynakça

Chao H., Cao Y., Chen YQ. Autopilots for small fixed-wing unmanned aerial vehicles: A Survey, Paper presented at IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2007, Harbin.

Etkin B., Reyd LD. Dynamics of flight: Stability and control. John Wiley & Sons, New York, 1996, bölümler 2-6.

Köse O. Stochastic optimal tuning for flight control system of morphing arm octorotor. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2024: 96(5): 669-678.

Köse O. Octorotor flight control system design with stochastic optimal tuning, deep learning and differential morphing. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2024: 46(6).

Oktay T. Combined outputs variance constrained and input variance constrained design for flight control. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G-Journal of Aerospace Engineering 2015; 229(12): 2196-2204.

Oktay T., Konar M., Onay M., Aydin M., Abdallah Mohamed M. Simultaneous small UAV and autopilot system design. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2016; 88(6).

Oktay T., Sultan C. Simultaneous helicopter and control-system design. AIAA Journal of Aircraft 2013; 50(3): 911-926.

Oktay T., Sultan C. Flight control energy saving via helicopter rotor active morphing. AIAA Journal of Aircraft 2014; 51(6): 1784-1805.

Oktay T., Sal F. Helicopter control energy reduction using moving horizontal tail. The Scientific World Journal: Aerospace Engineering 2015. doi: 10.1155/2015/523914.

Oktay T., Sultan C. Comfortable helicopter flight via passive/active morphing. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 2015; 51: 2876-2886.

Oktay T., Sal F. Helicopter control energy reduction using moving horizontal tail. The Scientific World Journal: Aerospace Engineering 2015. doi: 10.1155/2015/523914.

Oktay T., Sal F. Combined passive and active helicopter main rotor morphing for helicopter energy save. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2016; 38: 1511-1525.

Oktay T., Sal F. Effect of the simultaneous variation in blade root chord length and blade taper on helicopter flight control effort. International Journal of Aerospace Engineering 2017; 1-9.

Nelson RC. Flight stability and automatic control, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 2007, bölümler 2-6.

Sahin H., Köse O., Oktay T. Simultaneous autonomous system and powerplant design for morphing quadrotors, Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2022; 94(8): 1228-1241.

Sal F. Effects of the actively morphing root chord and taper on helicopter energy. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2020; 92(2): 264-270.

Sal F. Simultaneous swept anhedral helicopter blade tip shape and control-system design. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2022; 95(1): 101-112.

Sal F., Simultaneous actively morphing swept anhedral blade tip shape and helicopter flight control-system design, Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2025, submitted.

Skelton RE., Lorenzo MD. Space structure control design by variance assignment, Journal of Guidance, Control, and Dynamics 198; 8(4): 454-462.

Skelton RE., Sultan C. Controllable tensegrity, A new class of smart structures," SPIE Intl. Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, 1997.

Uzun M. Flight control system design of UAV with wing incidence angle simultaneously and stochastically varied. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 2024; 96(5): 715-725.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 332-350, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 332-350, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Spor Kulüplerinde Kurumsal Sosyal Sorumluluğun Kulüp İmajına Etkisinde Marka Sadakatinin Rolü

Servet REYHAN[1], Servet ÖZORUÇ[2], Ali Rıza TEKEREK[3*]

[1]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu, Osmaniye
[2]Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu, Osmaniye
[3]Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara

[1]https://orcid.org/0000-0003-3303-7566
[2]https://orcid.org/0000-0001-5051-3590
[3]https://orcid.org/0000-0002-8405-9928
*Sorumlu yazar: rizatekerek@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 20.06.2025
Kabul tarihi:19.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Kulüp imajı
Kurumsal sosyal sorumluluk
Marka sadakati
Taraftar sadakati

ÖZ

Spor endüstrisinde kurumsal sosyal sorumluluk (KSS), kulüplerin yalnızca toplumsal fayda sağlamakla kalmayıp aynı zamanda marka imajı ve taraftar bağlılığını güçlendiren stratejik bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Ancak literatürde KSS, kulüp imajı ve marka sadakati genellikle ayrı ayrı incelenmiş; bu değişkenleri bütüncül bir model içinde ele alan ve özellikle marka sadakatinin aracılık rolünü test eden çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu araştırma, spor kulüplerinin gerçekleştirdiği kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kulüp imajına etkisinde marka sadakatinin aracılık rolünü incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma, nicel araştırma desenine uygun olarak yapılandırılmış ve veriler, Galatasaray, Fenerbahçe ve Beşiktaş taraftarlarından çevrim içi anket formu aracılığıyla toplanmıştır (n=262) Katılımcıların demografik özelliklerinin yanı sıra kurumsal sosyal sorumluluk, marka sadakati ve kulüp imajına yönelik ölçekler kullanılmıştır. Araştırma modeli kapsamında geliştirilen hipotezler, yapısal eşitlik modellemesi (SEM) ile test edilmiştir. Ayrıca ölçek geçerlik ve güvenirliğini test etmek için yakınsak geçerlik, ayırt edici geçerlik ile Cronbach Alpha katsayıları incelenmiştir. Yapısal eşitlik modellemesi sonucunda, kurumsal sosyal sorumluluğun kulüp imajı üzerinde doğrudan etkisi (β=0,320, $p<0,001$) ve marka sadakati üzerinde pozitif etkisi (β=0,550, $p<0,001$) bulunmuştur. Marka sadakati, bu ilişkide anlamlı bir aracılık rolü oynamıştır (β=0,199, %95 CI [0,100, 0,330]). Bu sonuçlar, spor kulüplerinin marka sadakati ve kulüp imajını güçlendirmek amacıyla KSS faaliyetlerinde özellikle etik ve gönüllü sorumluluk projelerine odaklanmaları gerektiğini göstermektedir.

The Role of Brand Loyalty in the Impact of Corporate Social Responsibility on Club Image in Sports Clubs

Research Article

Article History:
Received: 20.06.2025
Accepted: 19.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Brand image in sports
Club image
CSR in sports
Fan loyalty

ABSTRACT

In the sports industry, corporate social responsibility (CSR) is regarded not only as a means of generating social value but also as a strategic instrument for strengthening brand image and fostering fan loyalty. However, in the existing literature, CSR, club image, and brand loyalty have generally been examined separately; studies that address these variables within an integrated model and specifically test the mediating role of brand loyalty remain limited. This study aims to examine the mediating role of brand loyalty in the impact of corporate social responsibility (CSR) practices carried out by sports clubs on club image. The study was designed in accordance with a quantitative research framework, and data were collected through an online survey administered to supporters of

Galatasaray, Fenerbahçe, and Beşiktaş (n = 262). In addition to the demographic characteristics of the participants, scales measuring corporate social responsibility, brand loyalty, and club image were employed. The hypotheses developed within the research model were tested using structural equation modeling (SEM). Additionally, convergent validity, discriminant validity, and Cronbach's Alpha coefficients were analyzed to assess the reliability and validity of the scales. The results of the structural equation modeling revealed that corporate social responsibility had a direct effect on club image ($\beta = 0,320$, $p < 0,001$) and a positive effect on brand loyalty ($\beta = 0,550$, $p < 0,001$). Moreover, brand loyalty was found to play a significant mediating role in this relationship ($\beta = 0,199$, 95% CI [0,100, 0,330]). These findings suggest that sports clubs should particularly focus their CSR activities on ethical and philanthropic initiatives in order to strengthen brand loyalty and club image.

To Cite: Reyhan S., Özoruç S., Tekerek AR. Spor Kulüplerinde Kurumsal Sosyal Sorumluluğun Kulüp İmajına Etkisinde Marka Sadakatinin Rolü. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 332-350.

1. Giriş

20. yüzyılın ortalarından başlayarak artan toplumsal farkındalık ve halkın beklentilerindeki değişim, işletmeleri sadece kâr amaçlı kurumlar olmaktan çıkarıp daha duyarlı birer toplumsal kurum haline getirmiştir. Kurumsal Sosyal Sorumluluk (KSS) kavramı, işletmeler ve akademik çevreler tarafından giderek daha fazla önem atfedilen temel bir araştırma ve uygulama alanı haline gelmiştir (Carroll, 1999). Bowen (1953), KSS'nin ilk kuramsal temellerini atarken, iş camiasının sadece ekonomik çıkarlar yönünde değil, aynı zamanda topluma fayda sağlama yönünden de sorumlulukları olması gerektiğini önemle vurgulamıştır. Kurumsal sosyal sorumluluk, kurumların sadece hukuki sorumluluklarını yerine getirmeleriyle kalmayıp, ahlaki ve gönüllü sorumluluklar üstlenmeleri gerekliliğini de içermektedir (Carroll, 1991). Bu bağlamda çalışmanın temel amacı spor kulüplerinin yürüttüğü KSS faaliyetlerinin kulüp imajını nasıl etkilemediğini ve bu etkide marka sadakatinin nasıl bir etki üstlendiğini belirlemektir.

Markalar ve spor kulüpleri açısından Kurumsal Sosyal Sorumluluk (KSS) uygulamaları, kurumsal itibarı güçlendiren ve toplumsal fayda yaratan stratejik faaliyetler bütünü olarak değerlendirilmektedir (Güneş ve Koçyiğit, 2018). Kurumların KSS faaliyetleri, toplum için sosyal, ekonomik, ahlaki ve çevresel sorumlulukları desteklediği gibi, bu faaliyetlerle birlikte paydaşlarla daha sağlam ilişkiler kurulmakta ve markaların değerleri artmaktadır (Persais, 2002; Özüpek, 2013). Ayrıca, KSS faaliyetleri toplumda olumlu imaj oluşturmakta ve tüketici gözünde güven oluşturmaktadır (Kelgökmen, 2010).

KSS'nin uygulama yöntemleri süreç içerisinde değişime uğramış, dönemin sosyal düzeni, coğrafi koşulların çeşitliliği ve toplumsal değerlerin farklılık göstermesi, kavramın değişken biçimlerde tanımlanmasına neden olmuştur (Özüpek, 2013). Spor alanına bakıldığında KSS, 2000'li yıllardan itibaren daha sistematik biçimde gündeme gelmiş, özellikle Kuzey Amerika ligleri ve Avrupa futbol kulüplerinde yaygın bir uygulama haline gelmiştir (Breitbarth ve ark., 2015). Literatürde spor KSS'sinin toplumsal fayda yaratmanın ötesinde kulüplere meşruiyet kazandırdığı ancak bazı durumlarda halkla ilişkiler stratejisine indirgenebildiği de belirtilmektedir (Skinner, 2012). Bilhassa spor sektörü gibi duygusal bağlılıkların etkin olduğu alanlarda, KSS faaliyetleri sadece toplumsal fayda sağlamakla kalmayıp, olumlu kulüp imajı ve taraftar sadakati oluşturmada önemli bir faktör haline gelmiştir (Walker

ve Kent, 2010; Ratten, 2010). Sporda KSS uygulamaları, geleneksel hayırseverlik sınırlarını aşarak; eğitim, sağlık, çevre ve kültürel etkileşim gibi çeşitli toplumsal alanlarda sürdürülen katılımcı faaliyetlerle toplumla bütünleşmektedir. Bu gelişmeler, spor kulüplerinin toplumsal kalkınmanın işlevsel ve dönüştürücü aktörleri olarak konumlanmasına zemin hazırlamaktadır (Anşin ve Şentürk, 2020).

Carroll (1979), kurumsal sosyal sorumluluğu dört temel boyutta değerlendirmiştir: ekonomik sorumluluk, yasal sorumluluk, etik ve gönüllülük (hayırseverlik). Bu başlıklar, kulüplerin hem devamlılığını hem de toplumsal işlevini şekillendirmektedir. Finansal yapı bağlamında kâr elde etmeyi hedefleyen spor kulüpleri, hukuki sorumluluklarına uymalı, ahlaki ilkelere bağlı olmalı ve gönüllü toplumsal sorumluluklar üstlenmelidir (Carroll, 1991; Budak ve Budak, 2004). KSS uygulamaları, spor kulüpleri açısından sadece kurumsal saygınlığı değil, bunun yanı sıra, taraftarlarla kurulan ilişkilerin derinleşmesine katkı sağlamakta ve marka sadakatinin inşasında önemli bir rol oynamaktadır (Babiak ve Wolfe, 2009).

İmaj, tüketici ya da taraftarın zihninde markaya ilişkin biçimlenen bilişsel ve duyuşsal algıların bütününü ifade ederken; bu algı düzeyi, markanın uzun vadeli başarısının sürdürülebilirliği açısından kritik bir belirleyicidir (Keller, 1993; Yıldırım ve Başar, 2013). Spora özgü kurumsal yapılarda, duygusal etkileşimin yüksek olduğu bir ortamda kulüp imajı, taraftarların sadakat düzeylerini doğrudan etkileyebilecek önemli bir etkiye sahiptir (Bauer ve ark., 2008). Bu sebeple, kulüplerin KSS çerçevesinde yürüttüğü faaliyetler aracılığı ile olumlu bir imaj oluşturması, yalnızca rekabetçi üstünlük değil, bununla birlikte taraftar bağlılığının pekişmesine yönelik katkı da sağlamaktadır (Ratten, 2010; Walters ve Tacon, 2010).

Marka sadakati, tüketici kitlesinin bir markaya olan bağlılığını hem davranış olarak hem de tutumsal boyutlarıyla belirtmektedir (Huang ve Zhang, 2008). Ancak spor özelinde sadakat yalnızca tüketici davranışlarıyla sınırlı değildir; taraftarlar için bağlılık, kulüp kimliğiyle özdeşleşme, aidiyet ve sosyal kimlik unsurlarıyla şekillenmektedir (Kural ve Özbek, 2023). Bu nedenle taraftarlık bağlamında marka sadakati, kulüp imajını şekillendiren ve sürdürülebilir başarıya katkı sağlayan temel bir unsur haline gelmektedir. Spor kulüplerine özgü değerlendirildiğinde, takım iyi bir sezon geçirmese dahi bağlılık düzeyi yüksek taraftar profili desteğini sürdürerek kulüp imajının olası itibar kaybını engelleyebilmektedir (Kural ve Eraslan, 2023). Marka sadakati, duygusal ve bilişsel bağlılık boyutlarında, spor kulüplerinin uzun vadede sürdürülebilir başarısını şekillendiren temel yapı taşlarından biridir (Gladden ve Funk, 2001).

Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalara baktığımızda, Bauer ve ark., (2005) Alman Bundesliga taraftarları özelinde, marka imajının taraftar sadakati üzerine etkisini incelemişlerdir. Yine Bauer ve ark., (2008), takım marka imajının taraftarların takımlarına yönelik tutumsal ve davranışsal sadakati üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Başka bir çalışmada taraftar katılımı, takımın marka imajı ve taraftar memnuniyetinin futbol taraftarlarının memnuniyetini nasıl etkilediği incelenmiştir (Yun ve ark., 2021).

Ullah ve ark. (2021), taraftarların kurumsal sosyal sorumluluk algılarının bölgesel bağlılık üzerine etkisinde seyirci gururu ve takımla özdeşleşmenin rolünü incelemişlerdir.

Konu ile ilgili ülkemizdeki literatüre baktığımızda, Güneş ve Koçyiğit (2018) Konyaspor taraftarları ile yürüttükleri çalışmalarında kurumsal sosyal sorumluluğun marka imajına etkisini incelemişlerdir. Polat ve ark. (2019) gerçekleştirdikleri araştırmada, futbol taraftarlarının takım imajı algısı ile sadakat düzeyleri ve takımla özdeşleşmeleri arasındaki ilişkileri analiz etmişlerdir. Anşin ve Şentürk'ün (2020) çalışmalarında, spor kulüplerinin gerçekleştirdiği KSS uygulamalarının hem kulüp imajı hem de marka imajı üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Erzurumspor taraftarları örnekleminde gerçekleştirilen çalışmada Han ve Polat (2022), takım imajı ile sadakat ve taraftar güdüleri arasındaki ilişkileri farklı değişkenler özelinde incelemişlerdir. Kural ve Eraslan (2023), gerçekleştirdikleri çalışmada taraftarların kulüp markalarına yönelik sadakat düzeyleri ile kulüp imajı arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir.

Literatürde kurumsal sosyal sorumluluk ile kulüp imajı ve marka sadakati ile kulüp imajı arasındaki ilişkilerin genellikle ayrı ayrı incelendiği görülmektedir (Bauer ve ark., 2008; Güneş ve Koçyiğit, 2018; Polat ve ark., 2019; Yun ve ark., 2021; Ullah ve ark., 2021; Han ve Polat, 2022; Kural ve Eraslan, 2023). Ancak KSS'nin kulüp imajı üzerindeki etkisinde marka sadakatinin aracılık rolü yeterince araştırılmamıştır. Bu bağlamda, yürütülen bu çalışmanın söz konusu literatür boşluğunu doldurarak alana anlamlı bir katkı sağlaması hedeflenmektedir. Çalışmada, spor kulüplerinde gerçekleştirilen KSS faaliyetlerinin kulüp imajı üzerindeki etkisi ile bu etkide marka sadakatinin oynadığı aracılık rolü incelenmiş; böylece, kulüp imajının inşasında ve sürdürülebilirliğinde KSS uygulamalarının nasıl stratejik bir unsur haline geldiği ve bu sürecin sadık taraftar kitlesi üzerindeki etkileri değerlendirilerek literatüre katkı sunulması amaçlanmıştır. Bu bağlamda araştırma hipotezleri şu şekilde belirlenmiştir:

H_1: Kurumsal sosyal sorumluluk kulüp imajı üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahiptir.

H_2: Kurumsal sosyal sorumluluk marka sadakati üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahiptir.

H_3: Marka sadakati kulüp imajı üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahiptir.

H_4: Kurumsal sosyal sorumluluğun kulüp imajı üzerindeki etkisinde marka sadakatinin aracılık etkisi vardır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın bu kısmında araştırmanın evren ve örneklemi, veri toplama araçları, modeli ile hipotezleri ve analiz yöntemleri yer almaktadır.

2.1. Araştırmanın Evren ve Örneklemi

Bu çalışmanın evrenini, Galatasaray, Fenerbahçe ve Beşiktaş futbol kulüplerinin taraftarı olan, 18–55 yaş aralığındaki bireyler oluşturmaktadır. Araştırma evreninin yalnızca bu üç kulüple sınırlandırılmasında, söz konusu kulüplerin Türkiye'de en geniş taraftar kitlelerine sahip olmaları ve kamuoyunda sıklıkla "Üç Büyükler" olarak anılmaları etkili olmuştur. Ayrıca araştırmada yaş aralığı 18–55 olarak sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmanın nedeni, 18 yaş altındaki bireylerin etik gerekçelerle

araştırma kapsamı dışında bırakılması ve 55 yaş üstü bireylerin dijital anketlere katılım oranlarının sınırlı olabileceğindedir. Dolayısıyla 18–55 yaş grubu, hem araştırmaya gönüllü katılım açısından daha erişilebilir hem de spor tüketiminde aktif rol oynayan kesimi temsil etmektedir.

Araştırmada örneklem seçiminde, olasılıksız örnekleme yöntemlerinden kolayda örnekleme tekniği kullanılmıştır. Kolayda örnekleme, araştırmacının erişebildiği ve ulaşılması kolay bireylerden örnek almasına dayalı bir yöntem olup, sosyal bilimlerde sıklıkla tercih edilmektedir (Karasar, 2024). Bu yöntemin en önemli avantajı, kısa sürede geniş katılımcı kitlesine erişme imkânı sağlamasıdır.

Çalışma, çevrim içi anket aracılığıyla yürütülmüş olup, katılım gönüllülük esasına dayalıdır. Böylelikle geniş taraftar kitlesi içerisinden uygun sayıda katılımcıya zaman ve maliyet açısından etkin bir şekilde ulaşılması sağlanmıştır. Sosyal bilimlerde benzer araştırmalarda da kolayda örnekleme tekniğinin tercih edilmesi, yöntemin uygulanabilirliğini desteklemektedir (Büyüköztürk ve ark., 2020).

Araştırmaya katılan bireylerin demografik özelliklerine ilişkin bulgular Tablo 1'de sunulmuştur. Katılımcıların cinsiyet dağılımına bakıldığında, %21,4'sının kadın, %78,6'sının ise erkek olduğu gözlenmektedir. Yaş gruplarına göre değerlendirildiğinde, en yoğun katılımın %35,5 oranıyla 36–45 yaş aralığında olduğu, en az katılımın ise %9,2 ile 46 yaş ve üzeri grubun olduğu anlaşılmaktadır. Gelir düzeyi açısından bakıldığında, katılımcıların önemli bir kısmının (%62,6) orta gelir grubunda yer aldığı tespit edilmiştir. Eğitim düzeyine göre yapılan sınıflamada ise katılımcıların %56,9'unun üniversite mezunu olduğu belirlenmiştir. Takım değişkenine ilişkin analizde, katılımcıların büyük bir kısmının (%42,7) Galatasaray taraftarı olduğu saptanmıştır.

Tablo 1. Demografik bulgular

Değişken	**Grup**	**f**	**%**
Cinsiyet	Kadın	56	21,4
	Erkek	206	78,6
	Toplam	262	100
Yaş	18-25 yaş	68	26
	26-35 yaş	77	29,4
	36-45 yaş	93	35,5
	46 ve üzeri	24	9,1
	Toplam	262	100
Gelir	Düşük	42	16
	Orta	164	62,6
	Yüksek	56	21,4
	Toplam	262	100
Eğitim Düzeyi	Lise	113	43,1
	Üniversite	149	56,9
	Toplam	262	100
Takım	GS	112	42,7
	FB	87	33,2
	BJK	63	24,1
	Toplam	262	100

2.2. Araştırmanın Etik İzni

Araştırma kapsamında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Sağlık Bilimleri Araştırma Etik Kurulu'ndan 23/05/2025 tarih ve 2025/5/10 karar numarasıyla Etik Kurul İzni alınmıştır.

2.3. Veri Toplama Araçları

Bu araştırmada veri toplama aracı olarak çevrim içi anket tekniğinden yararlanılmıştır. Katılımcılara sunulan anket formunun başında, araştırmaya gönüllü olarak katılımı güvence altına alan bir aydınlatılmış onam metnine yer verilmiştir. Katılımcılar, bu metni okuyup onayladıktan sonra anket sorularına yönlendirilmiştir. Anket dört ana bölümden oluşmaktadır: İlk bölümde katılımcılara yönelik demografik bilgilerin yer aldığı "Kişisel Bilgi Formu" bulunurken; ikinci bölümde "Kurumsal Sosyal Sorumluluk" ile ilgili ifadeler, üçüncü bölümde "Marka Sadakati"ne ilişkin maddeler ve son bölümde ise "Kulüp İmajı"na yönelik ölçek yer almaktadır.

Kurumsal Sosyal Sorumluluk Ölçeği; Kurumsal Sosyal Sorumluluk Ölçeği, ilk olarak Jung (2012) tarafından geliştirilmiş ve Türkçe'ye Sönmezoğlu ve ark. (2016) tarafından uyarlanmıştır. Ölçek; ekonomik, yasal, etik ve hayırsever olmak üzere dört alt boyutta yapılandırılmış toplam 16 maddeden oluşmaktadır. Taraftarların kurumsal sosyal sorumluluğa ilişkin algılarını belirlemeye yönelik hazırlanan bu ölçekte, 7 dereceli Likert tipi bir puanlama sistemi kullanılmıştır. Katılımcılar, "hiç katılmıyorum" (1) ile "tamamen katılıyorum" (7) arasında derecelendirme yapmaktadır. Yapılan geçerlik ve güvenirlik analizleri sonucunda, ölçeğin alt boyutlarına ilişkin iç tutarlılık katsayıları sırasıyla; ekonomik sorumluluk için 0,74, yasal sorumluluk için 0,83, etik sorumluluk için 0,89 ve hayırseverlik boyutu için 0,83 olarak hesaplanmıştır. Genel ölçek için Cronbach alfa değeri ise 0,88 bulunmuştur.

Marka Sadakati Ölçeği; Tekin (2020) tarafından geliştirilen Marka Sadakati Ölçeği, dört alt boyuttan oluşmakta olup toplamda 19 madde içermektedir. Bu alt boyutlar; "Marka Davranışı" (6 madde), "Marka Tatmini" (5 madde), "Takımla Özdeşleşme" (5 madde) ve "Satın Alma Niyeti" (3 madde) şeklinde yapılandırılmıştır. Katılımcılar, her bir maddeyi 5'li Likert ölçeği çerçevesinde değerlendirmektedir. Güvenirlik analizleri sonucunda, alt boyutların iç tutarlılık düzeyleri yüksek bulunmuştur. Cronbach alfa değerleri sırasıyla 0,92, 0,85, 0,87 ve 0,87 olarak rapor edilmiştir.

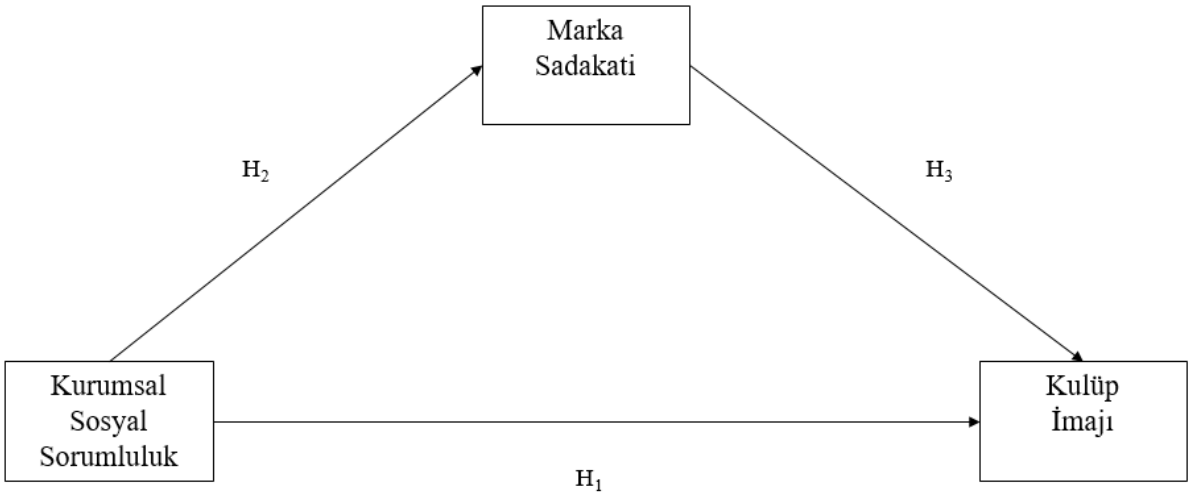
Kulüp İmajı Ölçeği; Spor kulüplerine yönelik izleyici algılarını değerlendirmeye yönelik olarak Jung (2012) tarafından geliştirilen Kulüp İmajı Ölçeği, Sönmezoğlu ve ark., (2016) tarafından Türkçe' ye uyarlanmıştır. Tek faktörlü bir yapıya sahip olan bu ölçek, altı maddeden oluşmakta ve 7 dereceli Likert tipi bir yanıt sistemi ile uygulanmaktadır. Uyarlama çalışması kapsamında yapılan güvenirlik analizlerinde, ölçeğin iç tutarlılığını gösteren Cronbach alfa katsayısı 0,84 olarak hesaplanmıştır.

2.4. Analiz Yöntemleri

Araştırma kapsamında toplanan verilerin çözümlenmesinde SPSS 27.0 ve AMOS 22.0 yazılımlarından faydalanılmıştır. Araştırmada yer alan kurumsal sosyal sorumluluk, kulüp imajı ve marka sadakati yapılarına ilişkin geçerlilik analizleri, modelin ölçüm yapısının doğruluğunu test eden yapı geçerliliği yöntemlerinden biri olan doğrulayıcı faktör analizi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçeklerin iç tutarlılık düzeyleri ise Cronbach alfa katsayısı hesaplanarak değerlendirilmiştir. Katılımcılara ait demografik özelliklerin tanımlanmasında tanımlayıcı istatistiksel analizler kullanılmıştır. Çalışmada, araştırma değişkenleri arasındaki ilişkisel yapıyı belirlemek amacıyla korelasyon analizi uygulanmıştır. Ayrıca, kurumsal sosyal sorumluluk algısının kulüp imajı üzerindeki etkisinde marka sadakatinin oynadığı dolaylı etkiler analiz edilmiştir. Bu bağlamda, söz konusu aracılık ilişkisinin sınanması amacıyla Yapısal Eşitlik Modellemesi'ne başvurulmuştur.

2.5. Araştırmanın Modeli ve Hipotezleri

Bu araştırma spor kulüplerinde kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kulüp imajına etkisinde marka sadakatinin rolünü ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Şekil 1'de yer alan araştırma modeli oluşturulmuştur.



Şekil 1. Araştırma modeli

Spor kulüplerinde yürütülen kurumsal sosyal sorumluluk (KSS) uygulamaları, kulüplerin toplumla olan bağını güçlendirme ve kamuoyu nezdinde olumlu bir imaj oluşturma açısından stratejik olarak kullanılacak araçlardandır (Walters ve Tacon, 2010). Carroll'un (1979) dört boyutlu KSS modeli (ekonomik, yasal, etik ve hayırseverlik) bu stratejinin çok yönlü yapısını ortaya koymakta ve kulüplerin sadece kâr amacı güden yapılar olmayıp aynı zamanda sosyal yükümlülüklere de sahip kurumlar olduklarını göstermektedir.

Özellikle hayırseverlik ve gönüllülüğü temel alan sosyal sorumluluk faaliyetlerinin, kulüp itibarını toplumdaki algısını güçlendirdiği, kamuoyu nezdinde kulübün imajına katkıda bulunduğu literatürdeki çeşitli çalışmalarla vurgulanmıştır (Güneş ve Koçyiğit, 2018; Anşin ve Şentürk, 2020). Spor

kulüplerinin sosyal sorumluluk faaliyetleriyle toplumsal sorunlara çözümler üretmeleri hem taraftarlar hem de toplum nezdinde daha itibarlı ve olumlu bir kulüp algısı yaratmaktadır (Bozdemir, 2015). Bu bağlamda, KSS'nin kulüp imajı üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

H_1: Kurumsal sosyal sorumluluk kulüp imajı üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahiptir.

KSS faaliyetleri, toplumsal faydanın yanı sıra spor tüketicileri ile kulüp arasında ilişkinin derinleşmesine ve bu sayede de marka sadakatinin oluşmasına da katkı sağlamaktadır. Mohr ve ark., (2001), KSS faaliyetlerinin toplumun algısını olumlu yönde etkilediğini ve etkinin de sadakat bağlamında güven oluşturduğunu belirtmişlerdir. Özellikle gönüllülük temelli hayırseverlik faaliyetlerinin tüketiciyle duygusal bağ kurmada etkili olduğu ve bu bağın markaya olan sadakati artırdığı belirtilmiştir (Sönmezoğlu, 2015).

Güneş ve Koçyiğit (2018), çalışmalarında KSS'nin alt boyutlarının doğrudan marka imajı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu sonuç da KSS'nin, markaya karşı oluşan bağlılık üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

H_2: Kurumsal sosyal sorumluluk marka sadakati üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahiptir.

Sadık taraftarların kulübe yönelik davranışsal ve tutumsal yönelimleri, kulüp imajının algısal düzeyde güçlenmesine katkıda bulunmaktadır (Kural ve Eraslan, 2023). Oliver (1999) marka sadakatini dört aşamalı bir süreçle tanımlarken (bilişsel, duygusal, çabasal, eylemsel), özellikle duygusal ve davranışsal sadakatin kulübe olan bağlılığı doğrudan etkilediği bilinmektedir.

Bauer ve ark., (2008), kulüp marka imajının, taraftarların takıma yönelik sadakat düzeylerini etkilediğini belirtmiş, bu ilişkinin özellikle de tutumsal sadakat boyutunda belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Kural ve Eraslan (2023) çalışmalarında ise marka tatmini ve marka davranışı değişkenlerinin kulüp imajı üzerinde anlamlı ve pozitif etkileri olduğu bulgulamışlardır. Bu bağlamda marka sadakati, kulüp imajının inşasında etkili bir belirleyici olarak değerlendirilmektedir.

H_3: Marka sadakati kulüp imajı üzerinde doğrudan pozitif bir etkiye sahiptir.

Literatürde kurumsal sosyal sorumluluğun doğrudan kulüp imajına etkisi (Anşin ve Şentürk, 2020), aynı zamanda marka sadakati ile kulüp imajı arasındaki doğrudan ilişki (Kural ve Eraslan, 2023) açıkça ortaya konmuştur. Ancak, bu iki kavram arasında marka sadakatinin aracı bir rol oynayabileceğine dair çalışmalar da bulunmaktadır. Yun ve ark., (2021), taraftar memnuniyetinin hem marka imajını hem de sadakati etkilediğini, dolaylı olarak da imajla sadakat arasında bir köprü görevi üstlendiğini göstermiştir. Kurumsal sosyal sorumluluğun marka sadakatine olan etkisi (Güneş ve Koçyiğit, 2018) ve bu sadakatin kulüp imajını olumlu yönde şekillendirmesiyle birlikte, marka sadakatinin bir aracı değişken olarak işlev gördüğü sonucuna ulaşmak mümkündür. Bu model, KSS'nin kulüp imajına olan etkisinin daha derinlemesine ve açıklayıcı bir şekilde anlaşılmasına katkı sunmaktadır.

H_4: Kurumsal sosyal sorumluluğun kulüp imajı üzerindeki etkisinde marka sadakatinin aracılık etkisi vardır.

3. Bulgular

Araştırmada kullanılan ölçme araçlarının iç tutarlılık düzeyleri, Cronbach alfa katsayıları üzerinden değerlendirilmiştir. İlgili analiz sonuçları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Ölçeklerin iç tutarlılık düzeylerine ilişkin Cronbach Alfa katsayıları

Ölçekler	Ölçme Aralığı	İfade Sayısı	α Katsayısı
Kurumsal Sosyal Sorumluluk	7'li Likert	16	0,861
Kulüp İmajı	7'li Likert	6	0,958
Marka Sadakati	5'li Likert	19	0,949

Çalışma kapsamında ilk olarak veri toplama araçlarının güvenirliği incelenmiş ve elde edilen iç tutarlılık katsayıları Tablo 2'de sunulmuştur. Kurumsal Sosyal Sorumluluk Ölçeği için Cronbach alfa değeri 0,861, Kulüp İmajı Ölçeği için 0,958 ve Marka Sadakati Ölçeği için 0,949 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler, kullanılan ölçeklerin yüksek düzeyde güvenilirliğe sahip olduğunu ve araştırma bağlamında tutarlı ölçümler sağladığını göstermektedir (Yıldız ve Uzunsakal, 2018).

Araştırma kapsamında, kurumsal sosyal sorumluluk, kulüp imajı ve marka sadakati yapılarına ait ölçüm araçlarının geçerliğini test etmek amacıyla doğrulayıcı faktör analizi (DFA) uygulanmıştır. Bu analiz, modeldeki gözlenen değişkenlerin kuramsal yapılarla ne derece örtüştüğünü ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen temel uyum indeksleri (χ^2/df, GFI, NFI, CFI, TLI ve RMSEA) modelin genel geçerliği açısından değerlendirilmiş ve ilgili bulgular Tablo 3'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 3'te raporlanan bulgulara göre, ölçek maddelerine ait standartlaştırılmış faktör yüklerinin 0,749 ile 0,912 arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerlerin tamamının 0,50'nin üzerinde olması, ilgili maddelerin ilgili yapılarla yeterli düzeyde temsil ilişkisine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, parametrik testlerde elde edilen t değerlerinin 13,705 ile 21,607 aralığında yer alması, bu yüklerin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve modelin yapısal geçerliliğini desteklediğini ortaya koymaktadır (Hair ve ark., 2006).

Doğrulayıcı faktör analizi kapsamında elde edilen model uyum indeksleri Tablo 3'te yer almaktadır. Analiz sonuçlarına göre modelin uyum istatistikleri şu şekildedir: χ^2/df = 1,252, p < 0,001, GFI = 0,855, CFI = 0,980, NFI = 0,907, TLI = 0,979 ve RMSEA = 0,031. Bu değerler, modelin ölçüm yapısının genel olarak "iyi uyum" düzeyinde olduğunu ortaya koymaktadır (McDonald ve Marsh, 1990; Browne ve Cudeck, 1993). Bununla birlikte, GFI değeri 0,855 ile önerilen eşik değerin (0,90) altında kalmıştır. Bu durumun, modelde yer alan değişken sayısının ve madde sayısının yüksek olması nedeniyle GFI değerinin daha hassas hale gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, GFI özellikle büyük örneklem gerektiren bir indeks olduğundan (Hooper ve ark., 2008), 262 katılımcı ile yapılan analizlerde bu değerin nispeten düşük kalması olağandır. Diğer tüm uyum indekslerinin kabul edilebilir düzeyde olması modelin genel uyumunu desteklemektedir.

Tablo 3. Ölçüm modeline ait doğrulayıcı faktör analizi (dfa) uyum indeksleri

Ölçek	Maddeler	Std. Faktör Yükleri	t Değerleri***	CR	AVE
Kurumsal Sosyal Sorumluluk	KS1	0,784	13,988	0,960	0,603
	KS2	0,750	13,227		
	KS3	0,776	13,807		
	KS4	0,777	13,837		
	KS5	0,749	13,208		
	KS6	0,781	13,922		
	KS7	0,771	13,697		
	KS8	0,796	14,267		
	KS9	0,778	13,857		
	KS10	0,772	13,732		
	KS11	0,771	13,705		
	KS12	0,791	14,147		
	KS13	0,814	14,688		
	KS14	0,775	13,795		
	KS15	0,767	13,620		
	KS16	0,778	*		
Kulüp İmajı	IM1	0,869	*	0,958	0,794
	IM2	0,912	21,607		
	IM3	0,897	20,855		
	IM4	0,899	20,953		
	IM5	0,879	19,962		
	IM6	0,890	20,502		
Marka Sadakati	SD1	0,801	*	0,974	0,669
	SD2	0,817	15,516		
	SD3	0,820	15,572		
	SD4	0,824	15,680		
	SD5	0,814	15,427		
	SD6	0,832	15,897		
	SD7	0,829	15,822		
	SD8	0,839	16,099		
	SD9	0,808	15,264		
	SD10	0,810	15,326		
	SD11	0,804	15,168		
	SD12	0,829	15,825		
	SD13	0,786	14,700		
	SD14	0,818	15,518		
	SD15	0,811	15,351		
	SD16	0,825	15,719		
	SD17	0,816	15,470		
	SD18	0,822	15,637		
	SD19	0,834	15,966		
$\chi 2$/df: 1,252; p 0,000; GFI 0,855; CFI 0,980; NFI 0,907; TLI 0,979; RMSEA 0,031					

*1'e sabitlenmiş olduğunu ifade eder. *** p<,001, CR: Bileşik güvenirlik, AVE: Açıklanan varyans oranı

Yapıların yakınsak geçerliliği değerlendirildiğinde, değişkenlere ait faktör yüklerinin tamamının 0,50'nin üzerinde olduğu, birleşik güvenirlik (CR) değerlerinin 0,70'i aştığı ve ortalama açıklanan varyans (AVE) değerlerinin de önerilen minimum sınır olan 0,50'nin üzerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, ölçüm araçlarının yakınsak geçerliliği karşıladığını göstermektedir (Fornell ve Larcker, 1981; Hair ve ark., 2006).

Ek olarak, değişkenler arası korelasyon değerlerinin karelerinin, her bir yapıya ait AVE değerlerinin karekökünden düşük olması, modeldeki yapılar arasında yeterli düzeyde ayırt edici geçerlilik bulunduğuna işaret etmektedir. Spesifik olarak, Kurumsal Sosyal Sorumluluk için AVE = 0,603, Kulüp İmajı için AVE = 0,794 ve Marka Sadakati için AVE = 0,669 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, ölçüm modelinin hem yakınsak hem de ayırt edici geçerlilik açısından tatmin edici düzeyde olduğunu göstermektedir (Fornell ve Larcker, 1981).

Tablo 4'te, araştırmada ele alınan kurumsal sosyal sorumluluk, kulüp imajı ve marka sadakati değişkenleri arasındaki ilişkileri yansıtan korelasyon analizi bulguları sunulmuştur. İlgili analiz sonuçlarına göre, ölçüm modelinde yer alan değişken çiftleri arasındaki korelasyon katsayılarının tamamı 0,80'in altında kalmıştır. Bu durum, değişkenlerin birbirlerinden kavramsal olarak ayırt edilebildiğini ve modelin ayırt edici geçerlilik kriterlerini sağladığını göstermektedir (Kline, 2015).

Tablo 4. Araştırma değişkenlerine ait korelasyonlar ve betimleyici bulgular

Değişkenler	x̄	St. Sapma	1	2	3
1.Kurumsal Sosyal Sorumluluk	3,88	1,760	1,00		
2.Kulüp İmajı	4,12	1,961	0,520**	1,00	
3.Marka Sadakati	3,55	1,055	0,650**	0,506**	1,00

**p<0,01

Tablo 4 incelendiğinde, kurumsal sosyal sorumluluk ile kulüp imajı arasındaki ilişkinin orta düzeyde (r = 0,520, p<0,01), kurumsal sosyal sorumluluk ile marka sadakati arasındaki ilişkinin orta-yüksek düzeyde (r = 0,650, p<0,01) ve kulüp imajı ile marka sadakati arasındaki ilişkinin ise yüksek düzeyde (r = 0,777, p<0,01) olduğu söylenebilir (Cohen, 1988). Bu bulgular, tüm değişkenlerin birbiriyle anlamlı şekilde ilişkili olduğunu ve araştırma modelini desteklediğini göstermektedir.

Araştırma hipotezlerinin sınanabilmesi amacıyla yapısal eşitlik modellemesi uygulanmıştır. Elde edilen model sonuçlarına ilişkin bulgular Tablo 5'te ayrıntılı biçimde sunulmuştur.

Tablo 5. Doğrudan etki

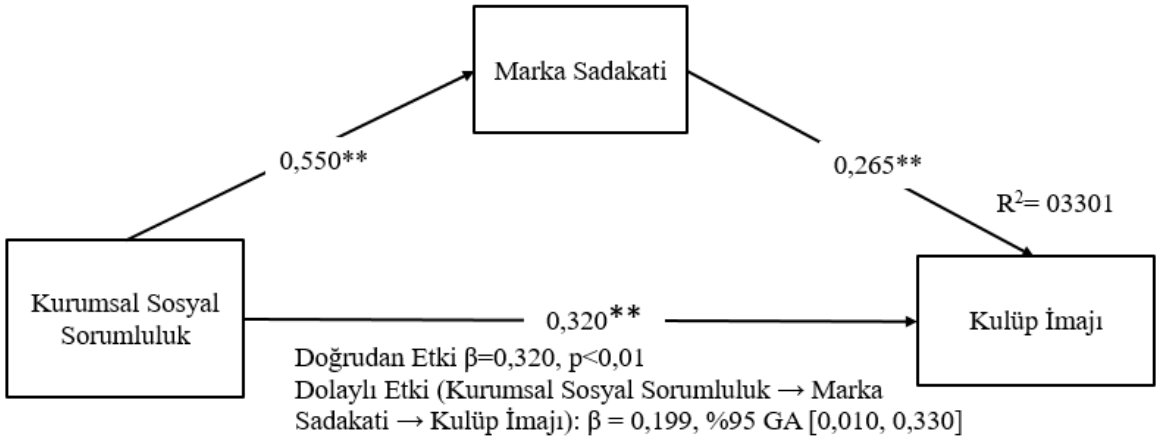
İlişkiler	**β**	**t**	**SH**	**P**
H1. Kurumsal Sosyal Sorumluluk - Kulüp İmajı	0,320	3,641	0,096	***
H2. Kurumsal Sosyal Sorumluluk - Marka Sadakati	0,550	11,188	0,038	***
H3. Marka Sadakati - Kulüp İmajı	0,265	3,064	0,166	***

Not: SH, Standard Hata; Anlamlılık seviyesi * 0,05 ** 0,01 *** 0,001 (çift yönlü)

Tablo 5'te sunulan yapısal eşitlik modellemesi sonuçlarına göre, kurumsal sosyal sorumluluk değişkeni kulüp imajı üzerinde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir etki yaratmaktadır (β = 0,320, p < 0,001). Bu bulgu doğrultusunda H1 hipotezi desteklenmiştir. Aynı şekilde, kurumsal sosyal sorumluluğun marka sadakati üzerindeki etkisi de anlamlı ve olumlu yöndedir (β = 0,550, p < 0,01), dolayısıyla H2 hipotezi de kabul edilmiştir. Öte yandan, marka sadakatinin kulüp imajına olan etkisi de pozitif ve

anlamlı bulunmuştur (β =0,265, p<0,01), bu nedenle H3 hipotezi de istatistiksel olarak desteklenmektedir.

İlgili yapısal modelin yol diyagramı ve standartlaştırılmış katsayıları Şekil 2'de görselleştirilmiştir.



Şekil 2. Yapısal Eşitlik Modeli Sonuçları

Şekil 2'de yer alan yapısal modele göre, kurumsal sosyal sorumluluğun hem kulüp imajı hem de marka sadakati üzerinde doğrudan ve anlamlı etkiler oluşturduğu gözlemlenmektedir. Modeldeki aracılık etkisini değerlendirmek amacıyla, dolaylı etki (β = 0,199) ve toplam etki (β = 0,519) değerleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, marka sadakati değişkeni modele eklendiğinde, kurumsal sosyal sorumluluğun kulüp imajı üzerindeki toplam etkisinde bir artış gözlemlenmektedir (c' < c). Bu durum, marka sadakatinin söz konusu ilişki üzerinde aracı bir rol oynadığını göstermektedir.

Dolayısıyla, "Marka sadakati, kurumsal sosyal sorumluluk ile kulüp imajı arasındaki ilişkide aracılık etkisi göstermektedir" şeklinde ifade edilen H4 hipotezi desteklenmiştir. Yapısal eşitlik modeline ilişkin anlamlılık düzeyleri ve katsayılar detaylı biçimde Tablo 6'da sunulmaktadır.

Tablo 6. Yapısal eşitlik modeli anlamlılık (bootstrap) değerleri

Doğrudan Etki	**(β)**	**LLCI**	**UCCI**
KS-IM	0,320	0,286	0,553
KS-SD	0,550	0,418	0,503
SD-IM	0,265	1,134	1,722
Dolaylı Etki			
KS-IM-SD	0,199	0,100	0,330
Toplam Etki			
KS-IM	0,519	0,423	0,661

Anlamlılık testleri, %95 güven düzeyi esas alınarak Bootstrap yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu analiz tekniği kapsamında, örneklem çoklu yeniden örnekleme yoluyla genişletilerek dolaylı etkilerin kestirimi sağlanmıştır. Hesaplanan bu etkiler doğrultusunda %95 güven aralığını belirleyen alt (LLCI) ve üst

(ULCI) sınır değerleri oluşturulmuştur. Söz konusu güven aralığında sıfır (0) değeri yer almadığı sürece, ilişki istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmektedir (Hayes, 2013).

Tablo 6 incelendiğinde, marka sadakatinin aracı etkisinin en düşük %10 (LLCI = 0,100), en yüksek ise %33 (ULCI = 0,330) düzeyinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu değerlerin her ikisinin de pozitif olması, modelde öngörülen aracılık yapısının anlamlı şekilde desteklendiğini göstermektedir. Nitekim Bootstrap tahminlerine göre, kurumsal sosyal sorumluluğun kulüp imajı üzerindeki toplam etkisinin, marka sadakatinin aracılığıyla %19,9 oranında arttığı belirlenmiştir (β = 0,199; %95 CI [0,100, 0,330]; R^2 = 0,301).

4. Tartışma

Bu çalışmada, spor kulüplerinde kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kulüp imajına etkisi ve bu etkide marka sadakatinin aracılık rolünün araştırılması amaçlanmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular literatür ışığında ortaya konulan tüm hipotezlerin istatistiksel olarak doğrulandığı saptanmıştır. Ayrıca çalışmada ana hipotezimiz olan marka sadakatinin, KSS ile kulüp imajı arasındaki ilişkide aracılık etkisinin olduğu ortaya konmuştur. Bu bulgular, literatürde ampirik ve kuramsal düzlemde desteklenmektedir.

Çalışmanın ilk bulgusu, spor kulüplerinde yürütülen KSS faaliyetlerinin kulübün imajı üzerinde doğrudan anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmamızdaki bu bulgu Güneş ve Koçyiğit (2018) ile Anşin ve Şentürk (2020)'ün bulgularını destekler niteliktedir. Güneş ve Koçyiğit (2018) Konyaspor taraftarları ile yaptıkları çalışmalarında, etik ve hayırseverlik temelli KSS faaliyetlerinin kulüp imajına etkisini incelemişler, çalışma sonunda bu tür faaliyetlerin taraftarlar üzerinde olumlu etki yarattığını rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Anşin ve Şentürk (2020), Beşiktaş taraftarları örneklemi ile yürüttükleri çalışmalarında, KSS'nin özellikle de hayırseverlik boyutunun kulüp imajına en güçlü katkıyı sağladığını bulmuşlardır. Ancak literatürde tüm bulguların bu yönde olmadığı da görülmektedir. Örneğin, Liu ve ark. (2019), Çin futbol kulüpleri örnekleminde yaptıkları araştırmada, KSS uygulamalarının taraftar algısı ve kulüp imajı üzerindeki etkilerinin her boyutta güçlü olmadığını, bazı durumlarda ise sınırlı kaldığını ortaya koymuştur. Bu durum, KSS'nin etkilerinin bağlamsal faktörlere (kulübün tarihi, taraftar profili, yerel toplumsal ihtiyaçlar) bağlı olabileceğini göstermektedir.

Bu bulgulara dayanarak, Kurumsal Sosyal Sorumluluk (KSS) sadece bir dış iletişim aygıtı olarak değil, kulübün değerlerini, vizyonunu ve toplumsal işlevini somutlaştıran önemli bir bileşen olarak ortaya çıktığı yorumu yapılabilir. Ayrıca, bu girişimlerin uygulanması yoluyla, kulüpler kimliklerini yalnızca atletik yetenekleri açısından değil, aynı zamanda sosyal refaha adanmış kuruluşlar olarak da oluştururlar. Bu stratejik konumlandırma, özellikle futbolda olduğu gibi duygusal bağların derinden belirgin olduğu bağlamlarda, kulüp ve taraftarları arasındaki ilişkiyi daha da geliştirir (Walker ve Kent, 2010; Walters ve Tacon, 2010).

Çalışmada elde edilen bulgular, spor kulüplerinde yürütülen Kurumsal Sosyal Sorumluluk (KSS) faaliyetlerinin sadece kulüp imajı üzerinde değil, bunun yanında spor tüketicilerinin marka sadakati üzerinde de doğrudan ve anlamlı bir etki yarattığını göstermektedir. Güneş ve Koçyiğit (2018), taraftarların KSS ile ilgili algılarının hem davranışsal hem de tutumsal sadakat üzerinde olumlu etkiler yarattığını belirterek, özellikle hayırsever yönün taraftarın kulüple olan duygusal bağını artırdığını belirtmişlerdir. Bu sonuç, marka sadakatinin kulüplerin sürdürülebilirliği açısından spor performansına bağlı olmaksızın önemli bir unsur olduğunu savunan Gladden ve Funk (2001)'un görüşleriyle de paralellik göstermektedir. Spesifik olarak, etik sorumluluk ve gönüllülüğe dayanan uygulamalar taraftarlar tarafından samimi ve güvenilir olarak kabul edilir ve böylece sadakatin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlayabilir. Ancak burada önemli bir nokta, marka sadakatinin spor bağlamında farklı bir yapıya sahip olmasıdır. Genel tüketici markalarında sadakat çoğunlukla ürün memnuniyetine bağlı iken, taraftar sadakati sosyal kimlik, toplumsal aidiyet ve kulüple özdeşleşme üzerinden şekillenmektedir (Kural ve Özbek, 2023). Bu farklılık, spor bağlamında sadakatin çok daha duygusal ve uzun vadeli olmasını sağlamaktadır.

Oliver (1999) tarafından tanımlanan ve marka sadakatinin dört boyutunu (bilişsel, duygusal, çabasal ve eylemsel sadakat) kapsayan teorik yapı, bu çerçevede uygun bir örnektir. Kurumsal Sosyal Sorumluluk (KSS) girişimleri sadece bilişsel değil aynı zamanda paydaşlar arasındaki duygusal bağlantıları da güçlendirir ve böylece daha kalıcı bir sadakat biçiminin gelişimini kolaylaştırır. İnsanlar bir kuruluşa, o kuruluş etik kurallara uyuyorsa, yardım faaliyetleri yaparak duygusal bağ kuruyorsa ve toplumsal sorunlara duyarlıysa güven duyar. Bu güven, insanların kuruluşa duygusal olarak bağlanmasını ve fedakârlık yapmaya istekli olmasını sağlar (Biscaia ve ark., 2013; Elden, 2009). Bu durum sosyal kimlik teorisiyle de açıklanabilir; taraftarlar, kulübün sosyal sorumluluk uygulamalarını benimsedikçe kulüple özdeşleşmeleri artmakta ve bu da marka sadakatinin aracılık rolünü güçlendirmektedir (Boroujerdi ve Mansouri, 2023).

Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu, marka sadakatinin kulüp imajını doğrudan ve olumlu yönde etkilemesidir. Kural ve Eraslan (2023), futbol taraftarlarıyla yaptıkları çalışmada, özellikle marka davranışı ve marka tatmini boyutlarının kulüp imajını artıran temel değişkenler olduğunu belirtmiştir. Sadık taraftarlar, kulüp hakkında daha olumlu konuşmakta, kulüp ürünlerini daha fazla satın almakta ve kulübün değerlerini kamuoyuna daha yüksek şekilde aktarmaktadır. Bu durumun da dolaylı yoldan kulübün kurumsal ve toplumsal imajını güçlendirdiği söylenebilir.

Bauer ve ark., (2005, 2008), Bundesliga taraftarlarıyla gerçekleştirdikleri araştırmalarda, kulübün marka imajının sadakat üzerine etkilerini incelemişler, çalışmada sadakatin sadece sportif başarıya değil aynı zamanda kurum imajına da bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu bulgu, Carroll'un (1991) Kurumsal Sosyal Sorumluluk piramidinde bulunan hayırseverlik ve etik sorumluluk düzeylerinin kulüp imajı bakımından etkili bir kriter olduğunu destekler niteliktedir.

Spor kulüplerinde yürütülen KSS faaliyetlerinin marka sadakati üzerindeki olumlu etkisi, kulüp ve taraftar arasında duygusal bir bağ oluşturmakta, bu duygusal bağ da özellikle tutumsal ve davranışsal

sadakati artırmaktadır (Gladden ve Funk, 2001; Güneş ve Koçyiğit, 2018). Dolayısıyla spor kulüplerinin sosyal sorumluluk faaliyetlerinin, yalnızca dışarıya dönük bir imaj stratejisi olmayıp, en önemli iç paydaş olan taraftarların bağlılığını da artırdığı söylenebilir.

Çalışmanın temel bulguları, kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kulüp imajı üzerinde doğrudan ve anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu etkinin açıklanmasında marka sadakatinin aracılık rolü dikkate değer bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen veriler, kulüplerin KSS uygulamalarını yalnızca toplumsal fayda üretme aracı olarak değil, aynı zamanda taraftarların kulüp algısını ve bağlılığını şekillendiren stratejik bir unsur olarak değerlendirmesi gerektiğini göstermektedir.

Araştırmada ulaşılan sonuçlar, marka sadakatinin kulüp imajı ile KSS faaliyetleri arasındaki ilişkiyi güçlendiren kritik bir köprü işlevi gördüğünü kanıtlamaktadır. Başka bir ifadeyle, taraftarların kulüplerine yönelik sadakat düzeyi yükseldikçe, KSS uygulamalarının imaj üzerindeki olumlu etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Bu bulgu, spor kulüplerinin itibar yönetiminde sadakat oluşturma stratejilerini merkeze almasının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, çalışma, kulüplerin KSS stratejilerini planlarken yalnızca toplumsal faydayı değil, taraftar sadakatini de bütüncül bir şekilde dikkate almaları gerektiğine işaret etmektedir. Bu yaklaşım, kulüp imajını güçlendirmek ve sürdürülebilir taraftar ilişkileri geliştirmek açısından kritik bir yönetimsel perspektif sunmaktadır.

5. Öneriler ve Sınırlılıklar

Spor kulüpleri, KSS uygulamalarını yalnızca toplumsal fayda perspektifinden değil, aynı zamanda kulüp imajını güçlendirmek ve taraftar bağlılığını artırmak amacıyla stratejik bir yönetim aracı olarak değerlendirmelidir. Özellikle etik ve gönüllü sorumluluk odaklı projeler taraftarların duygusal bağlılıklarını artırma potansiyeli taşımaktadır. Bu bağlamda, kulüplerin yalnızca bağış temelli klasik yaklaşımlar yerine, taraftarların doğrudan katılımını teşvik eden ve kulüp değerleriyle uyumlu sosyal projeler geliştirmesi önerilmektedir. Örneğin, genç taraftarlara yönelik eğitimler, çevre dostu stadyum projeleri veya yerel topluluklarla ortak sosyal inovasyon projeleri sadakatin güçlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Spor pazarlaması bağlamında değerlendirdiğimizde, iletişim ve dijital kanalların da stratejik olarak kullanılması önemlidir. Kulüplerin KSS projelerini yalnızca geleneksel medya üzerinden değil, sosyal medya platformlarında şeffaflık ve etkileşim temelli kampanyalarla duyurması taraftar katılımını artıracaktır. Özellikle sosyal medya üzerinden taraftarların görüşlerinin alınması, “dijital gönüllülük” uygulamaları ve mobil uygulamalar aracılığıyla taraftarların KSS projelerine dahil edilmesi hem iletişimi güçlendirecek hem de bağlılığı artıracaktır.

5.1. Sınırlılıklar

Bu çalışmanın belirli sınırlılıkları bulunmaktadır. Öncelikle araştırmanın yalnızca belirli futbol kulüpleri taraftarları (FB, BJK, GS) ile sınırlandırılması, bulguların genellenebilirliğini kısıtlamaktadır. Bu nedenle bulguların uzun vadeli etkileri konusunda sınırlılıklar söz konusudur. Bunun yanı sıra, çalışmanın sadece futbol branşına odaklanması, diğer spor dallarındaki taraftar dinamiklerinin dışarıda kalmasına yol açmıştır.

Gelecek araştırmalar için daha derinlemesine analizler önerilmektedir. Özellikle boylamsal araştırma tasarımlarıyla KSS uygulamalarının marka sadakati ve kulüp imajı üzerindeki etkilerinin zamansal olarak nasıl değiştiği incelenebilir. Deneysel yöntemler kullanılarak belirli KSS kampanyalarının farklı taraftar gruplarında nasıl algılandığı test edilebilir. Ayrıca yapısal eşitlik modellemesi ile KSS, marka sadakati, kulüp imajı ilişkisini açıklayan daha karmaşık aracılık ve düzenleyici modeller oluşturulabilir. Sosyal ağ analizi gibi yenilikçi metodolojiler kullanılarak taraftarların dijital etkileşimleri ve KSS kampanyalarının sosyal medya üzerinden etkisi analiz edilebilir. Bununla birlikte, farklı demografik grupların (yaş, cinsiyet, gelir düzeyi, eğitim vb.) KSS algılarını farklılaştırıp farklılaştırmadığı da çok düzeyli analizlerle test edilebilir.

Bu öneriler doğrultusunda, ilerleyen çalışmalarda KSS'nin spor endüstrisinde yalnızca kurumsal itibar ve toplumsal fayda boyutlarıyla değil, aynı zamanda dijitalleşme, taraftar etkileşimi ve yeni medya perspektifleriyle birlikte ele alınması, alana daha kapsamlı katkılar sunacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

Anşin Z., Şentürk ZA. Spor kulüplerinin kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kulüp imajı ve marka imajına etkisi: Beşiktaş taraftarı üzerinde ampirik araştırma. Uluslararası Kültürel ve Sosyal Araştırmalar Dergisi 2020; 6(1): 314-328.

Babiak K., Wolfe R. Determinants of corporate social responsibility in professional sports: Internal and external factors. Journal of Sport Management 2009; 23(6): 717-742.

Bauer HH., Sauer NE., Exler S. The loyalty of German soccer fans: does a team's brand image matter. International Journal of Sports Marketing and Sponsorship 2005; 7(1): 8-16.

Bauer HH., Stokburger-Sauer NE., Exler S. Brand image and fan loyalty in professional team sport: A refined model and empirical assessment. Journal of sport Management 2008; 22(2): 205-226.

Biscaia R., Correia A., Ross S., Rosado A., Maroco J. Spectator-based brand equity in professional soccer. Sport Marketing Quarterly 2013; 22(1): 20-32.

Boroujerdi S., Mansouri H., Hassan S., Nadri Z. The influence of team social responsibility in the attitudinal loyalty of football fans: The mediating role of team ıdentity and team trust. Asian Journal of Sport History & Culture 2023; 2(3): 350-371.

Bowen HR. Social responsibilities of the businessman. New York: Harper & Brothers 1953.

Bozdemir M. Kurumsal sosyal sorumluluk, hizmet kalitesi, kurum imajı ve satın alma niyeti arasındaki ilişki: perakendeci işletmeler üzerine bir uygulama. Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2015.

Breitbarth T., Heere B., Walker M., Kellison TB., Heinze K. Corporate social responsibility in sport. North American Society for Sport Management Conference 2015, sayfa no:298-299, Ottawa, ON, Canada.

Browne MW., Cudeck R. Alternative ways of assessing model fit. In: Bollen, KA., Long, JS. (ed.) Testing structural equation models. Newbury Park, CA: Sage 1993; 136–162.

Budak G., Budak G. Halkla ilişkiler davranışsal bir yaklaşım. 4. Baskı. İzmir: Barış; 2004.

Büyüköztürk Ş., Kılıç Çakmak E., Akgün ÖE., Karadeniz Ş., Demirel F. Bilimsel araştırma yöntemleri. 25. baskı. Ankara: Pegem Akademi; 2018.

Carroll AB. A three-dimensional conceptual model of corporate social performance. Academy of Management Review 1979; 4(4): 497-505.

Carroll AB. Corporate social responsibility-evolution of a definitional construct, Business and Society 1999; 38: 268-295.

Carroll AB. The pyramid of corporate social responsibility: Toward the moral management of organizational stakeholders. Business Horizons 1991; 34(4): 39-48.

Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.

Elden M. Reklam ve reklamcılık. 1. Baskı. İstanbul: Say Yayınları; 2009.

Fornell C., Larcker DF. Structural equation models with unobservable variables and measurement error: algebra and statistics. Journal of Marketing Research 1981; 18(3): 382-388.

Gladden JM., Funk DC. Understanding brand loyalty in professional sport: examining the link between brand associations and brand loyalty. International Journal of Sports Marketing and Sponsorship 2001; 3(1): 54-81.

Güneş İ., Koçyiğit M. Spor pazarlamasında kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin marka imajındaki rolü: Konyaspor taraftarı üzerinde bir araştırma. Kurgu 2018; 26(3): 302-319.

Hair JF. A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). California: Sage Publications; 2006.

Han MT., Polat E. Futbolda takım imajı, takım sadakati ve seyirci güdüleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi: Büyükşehir Belediye Erzurumspor örneği. Türkiye Spor Bilimleri Dergisi 2022; 6(1): 24-41.

Hayes AF. Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis. New York: Guilford Publications; 2013.

Hooper D., Coughlan J., Mullen MR. Structural equation modelling: guidelines for determining model fit, Electronic Journal of Business Research Methods 2008; 6(1): 53-60.

Huang J., Zhang D. Customer value and brand loyalty: multi dimensional empirical test. International Seminar on Future Information Technology and Management Engineering, 20 Nov. 2008; sayfa no:102-106, Loughborough, Leicestershire, UK.

Jung CW. The influence of professional sports team's corporate social responsibility (CSR) on team image, team identification, and team loyalty. St. Thomas University Doctoral Dissertation, sayfa no:206, Miami, USA, 2012.

Karasar N. Bilimsel araştırma yöntemi: Kavramlar, ilkeler, teknikler. 39. baskı. Ankara: Nobel Yayıncılık; 2024.

Kelgökmen İD. İşletmelerin kurumsal sosyal sorumluluk düzeylerinin belirlenmesine yönelik bir literatür taraması. Ege Akademik Bakış Dergisi 2010; 10: 301-318.

Keller KL. Conceptualizing, measuring and managing customer-based brand equity. Journal of Marketing 1993; 57(1): 1-22.

Kline RB. Principles and practice of structural equation modeling. New York: Guilford Publications; 2015.

Kural S., Özbek O. Sports consumption behaviors of football fans: the relationship between social identity, team loyalty and behavioral intention toward consumption. Sport, Business and Management: An International Journal, 2023; 13(6): 685-703.

Kural S., Eraslan A. Futbol taraftarlarının marka sadakati ile kulüp imajı ilişkilerinin incelenmesi. Akdeniz Spor Bilimleri Dergisi 2023; 6(1): 91-102.

Liu D., Wilson R., Plumley D., Chen X. Perceived corporate social responsibility performance in professional football and its impact on fan-based patronage intentions. International Journal of Sports Marketing and Sponsorship 2019; 20(4): 559-581.

McDonald RP., Marsh HW. Choosing a multivariate model: noncentrality and goodness of fit. Psychological Bulletin 1990; 107(2): 247.

Mohr LA., Webb DJ., Haris E. Do consumers expect companies to be socially responsible? The impact of corporate social responsibility on buying behavior. The Journal of Consumer Affairs 2001; 35(1): 45-71.

Oliver RL. Whence consumer loyalty? Journal of Marketing 1999; 63(4 Suppl1): 33-44.

Özüpek MN. Kurum imajı ve sosyal sorumluluk. Ankara: Eğitim Yayınevi; 2013.

Persais E. L'écologie comme atout stratégique: une validation de l'approche ressources par la méthode PLS. Revue Finance Contrôle Stratégie 2002; 5: 195-230.

Polat E., Sönmezoğlu U., Yıldız K., Çoknaz D. Futbol taraftarlarının takım imajı, takım sadakati ve takımla özdeşleşme düzeylerinin belirlenmesi. Uluslararası Spor Egzersiz ve Antrenman Bilimi Dergisi 2019; 5(3): 143-153.

Ratten V. The future of sports management: a social responsibility, philanthropy and entrepreneurship perspective. Journal of Management and Organization 2010; 16: 488-494.

Skinner J. Sport social responsibility. In: Hopwood M., Skinner J., Kitchin P.J. (ed.) Sport public relations and communication. London: Taylor and Francis Ltd.; 2012.

Sönmezoğlu U. Spor kulüplerinin kurumsal sosyal sorumluluk faaliyetlerinin kulüp ve marka imajına etkisi. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, Bolu, Türkiye, 2015.

Sönmezoğlu U., Çoknaz D. Polat E. Kulüp imajı ölçeğinin (KİMJÖ) Türkçe geçerlik ve güvenirlik çalışması. Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi 2016; 10(2): 270-279.

Tekin Y. Spor kulübü taraftarlarının takımlarının lisanslı ürünlerine ilişkin marka sadakati (Ankara ili örneği). Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Ankara, Türkiye, 2020.

Ullah F., Wu Y., Mehmood K., Jabeen F., Iftikhar Y., Acevedo-Duque, Á., Kwan HK. Impact of spectators' perceptions of corporate social responsibility on regional attachment in sports: three-wave indirect effects of spectators' pride and team identification. Sustainability 2021; 13: 597.

Walker M., Kent A., Vincent J. Communicating socially responsible initiatives: an analysis of U.S. professional teams. Sport Marketing Quarterly 2010; 19(3): 125-131.

Walters G., Tacon R. Corporate social responsibility in sport: stakeholder management in the UK football industry. Journal of Management and Organization 2010; 16(4): 566-586.

Yıldırım F., Başar ÖD. Marka sloganları. 1. Baskı. İstanbul: Beta Basım Aş.; 2013.

Yıldız D., Uzunsakal E. Alan araştırmalarında güvenilirlik testlerinin karşılaştırılması ve tarımsal veriler üzerine bir uygulama. Uygulamalı Sosyal Bilimler Dergisi 2018; 2(1): 14-28.

Yun JH., Rosenberger PJ., Sweeney K. Drivers of soccer fan loyalty: Australian evidence on the influence of team brand image, fan engagement, satisfaction and enduring involvement. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics 2021; 33(3): 755-782.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 351-365, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 351-365, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Günlük Toprak Sıcaklığının Zaman Serisi Tahmini için Derin Öğrenme Yaklaşımı

Alper YILDIRIM[1]*, Mehmet BILGILI[2]

[1]Department of Machinery and Metal Technology, Osmaniye Vocational School of Higher Education, Osmaniye Korkut Ata University, 80000, Osmaniye, Türkiye
[2]Department of Mechanical Engineering, Ceyhan Engineering Faculty, Cukurova University, 01950, Adana, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0003-2626-1666
[2]https://orcid.org/0000-0002-5339-6120
*Sorumlu yazar: alperyildirim@osmaniye.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 05.05.2025
Kabul tarihi:12.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Derin öğrenme
Uzun-kısa vadeli bellek (LSTM)
Toprak sıcaklığı
Zaman serisi tahmini

ÖZ

Toprak sıcaklığı (ST), güneş enerjisi, tarım, hidroloji, jeoloji, tarımbilim ve çevre çalışmaları gibi birçok alanda önemli uygulamalara sahip kritik bir klimatolojik parametredir. ST'nin zaman serisi tahmini için doğru modellerin geliştirilmesi, özellikle tarımsal ve çevresel süreçlerin optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, saatlik toprak sıcaklığı tahmini için derin öğrenme yaklaşımlarından biri olan uzun-kısa vadeli bellek (LSTM) sinir ağı kullanılmıştır. Türkiye'nin farklı iklim bölgelerini temsil eden dört ölçüm istasyonundan (Adana, Ağrı, İzmir ve Ankara) 2016–2019 yılları arasındaki saatlik ST verileri analiz edilmiştir. 20 cm, 50 cm ve 100 cm derinliklerdeki ST değerleri, geçmiş ST verileri kullanılarak tahmin edilmiştir. LSTM modelinin performansını değerlendirmek için kök ortalama kare hata (RMSE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve korelasyon katsayısı (R) gibi istatistiksel ölçütler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tahmin doğruluğunun toprak derinliği arttıkça iyileştiğini ortaya koymaktadır. En düşük MAE (0,0385 °C) ve MAPE (0,40 %) değerleri Ağrı'da 100 cm derinlikte elde edilirken, en düşük RMSE (0,0500 °C) değeri ise aynı derinlikte Ankara'da gözlemlenmiştir. Her iki durumda da korelasyon katsayısı en yüksek seviyede (R = 0,9999) olup, modelin yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Bulgular, LSTM yönteminin ST'nin zamansal desenlerini yakalamada son derece etkili olduğunu ve farklı iklim bölgelerinde başarıyla kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Deep Learning Approach for Time-Series Prediction of Daily Soil Temperature

Research Article

Article History:
Received: 05.05.2025
Accepted: 12.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Deep learning
Long short-term memory (LSTM)
Soil temperature
Time series prediction

ABSTRACT

Soil temperature (ST) is a crucial climatological parameter with significant applications in solar energy, agriculture, hydrology, geology, agronomy, and environmental studies. Developing accurate models for time-series prediction of ST is particularly important for optimizing agricultural and environmental processes. This study applies a long short-term memory (LSTM) neural network, a deep learning approach, for predicting hourly soil temperature. Hourly ST data from four measurement stations (Adana, Ağrı, İzmir, and Ankara), representing different climatic regions of Turkey, were analyzed over the period 2016–2019. ST values at depths of 20 cm, 50 cm, and 100 cm were estimated using historical ST data. To evaluate the performance of the LSTM model, statistical metrics such as root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE), and the correlation coefficient (R) were employed. The results indicate that prediction accuracy improves with increasing soil depth. The lowest MAE (0.0385 °C) and MAPE (0.40%) were recorded in Ağrı at 100 cm depth, while the lowest RMSE (0.0500 °C) was observed in Ankara at the same depth. In both cases,

the highest correlation coefficient (R = 0.9999) was achieved, demonstrating the model's high predictive reliability. The findings confirm that LSTM is highly effective in capturing the temporal patterns of ST and can be successfully employed in various climatic regions.

To Cite: Yıldırım A., Bilgili M. Deep Learning Approach for Time-Series Prediction of Daily Soil Temperature. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 351-365.

1. Introduction

One of the most important factors governing the exchange of moisture and energy in the soil-atmosphere boundary layer is the fluctuation of soil temperature (ST) (Farhangmehr et al., 2025). ST regulates critical processes such as soil ventilation, transpiration and evaporation, root plant growth and development, and microorganism activity in the soil. Furthermore, ST varies with depth, with changes at deeper levels being less pronounced than those at the soil surface. ST is typically measured at multiple depths using thermometers or sensors installed at specific soil layers (Zeynoddin et al., 2019). The measurement error of ST thermometers is approximately 0.1°C. However, ST sensors are expensive, and their application requires specialized knowledge. Moreover, direct measurement cannot be applied on a large scale and does not provide continuous data on the soil thermal regime. This limitation results in restricted agronomic, hydrological, and climatological studies, particularly in heterogeneous areas. Consequently, developing an alternative method for direct ST measurement is preferable (Mehdizadeh et al., 2020a).

Recently, existing methods for ST prediction have been categorized into two broad groups: statistical methods and data-driven approaches. Statistical methods primarily rely on empirical data and physical soil models. These methods, also known as "white-box" models, are generally straightforward and easy to interpret compared to data-driven techniques. Due to the nonlinear nature of the relationship between soil temperature (ST) and environmental factors, statistical methods such as linear regression often fail to capture these patterns accurately and tend to exhibit higher error rates (Li et al., 2020). Furthermore, Zeynoddin et al. (2019) demonstrated that ST estimation could be approached as a time series problem using linear methods such as SARIMA, ARIMA, and ARMA. They compared ST predictions based on historical data using these linear models with those obtained from the commonly used nonlinear multilayer perceptron neural network (MLPNN). Their results showed that MLPNN performed better. However, ARIMA is not well-suited for long-term ST forecasting. Given the complexity of ST prediction, fully considering its various aspects is essential. As a result, data-driven methods have emerged as an effective approach for uncovering underlying relationships between ST and its environmental factors (Li et al., 2020).

In the literature, the most commonly used data-driven methods for ST prediction include ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system), ANN (artificial neural network), MLP (multilayer perceptron), CANFIS (coactive neuro-fuzzy inference system), GP (genetic programming), and ELM (extreme learning machine) (Mehdizadeh et al., 2020b). Alternative approaches have gained significant attention recently. In this context, conventional methods such as empirical correlations, soil heat flow models, and energy balance equations—utilizing readily available parameters—along with analytical, numerical,

and experimental methods have been used to predict ST. However, applying these methods is often complex and time-consuming. Over the last few decades, machine learning techniques have been increasingly employed to enhance prediction models in engineering applications. These methods have demonstrated high accuracy and efficiency, as they can model both nonlinear and linear relationships between inputs and outputs. Consequently, machine learning methods have gained popularity in predicting environmental indicators such as soil temperature, air temperature, and greenhouse gas emissions (Guleryuz, 2022).

For example, Bilgili predicted monthly ST at five different depths in Turkey from 2000 to 2007, comparing ANN with linear regression (LR) and nonlinear regression (NLR) methods. The study found that the ANN-based model outperformed the other methods (Bilgili, 2010). Similarly, Gürlek applied artificial neural networks to estimate monthly mean soil temperatures at various depths in the Sivas Province of Turkey, and the results demonstrated the reliability of ANN models in capturing seasonal ST trends in different soil layers (Gurlek, 2023). Zounemat-Kermani (2013) used ANN to predict soil temperature on daily and weekly time scales. The input variables included three meteorological parameters (air temperature, relative humidity, and radiation) and two hydrological variables (flow and precipitation). The study concluded that ANN performed better than multiple linear regression (MLR) in estimating soil temperature. Kim and Singh (2014) utilized MLP and ANFIS methods for daily ST estimation in Champaign and Springfield, USA, and found that the MLP method demonstrated greater accuracy than the ANFIS model.

Talaee (2014) applied the CANFIS method to predict daily ST in semi-arid and arid regions of Iran at various soil depths. The study demonstrated that CANFIS performed reliably in these regions. Mehdizadeh et al. (2020c) proposed bio-inspired metaheuristic optimization methods for predicting daily ST at various depths using an AI-based approach. They employed the Elman neural network (ENN) and its hybrid versions with gravitational search and ant colony optimization. Samadianfard et al. (2018) predicted daily ST at Tabriz station, Iran, using ANN, wavelet neural networks (WNN), and GEP. Their results showed that WNN outperformed both GEP and ANN.

To address the limitations of AI methods, such as uncertainty, many researchers have developed hybrid models. Moazenzadeh and Mohammadi (2019) used support vector regression (SVR) and Elman neural network (ENN) to estimate ST. Additionally, they developed hybrid models combining these techniques with firefly and krill swarm algorithms. These models used meteorological data as inputs to estimate ST at various depths. Their findings demonstrated that hybrid models provided superior accuracy.

Several methods are commonly employed for ST forecasting, and most yield comparable results. However, deep learning algorithms have been relatively underutilized in ST estimation. One of the most promising deep learning techniques is Long Short-Term Memory (LSTM). This method, based on recurrent neural networks (RNN), is designed for sequential data modeling. Unlike standard RNNs, which suffer from vanishing and exploding gradient problems, LSTM mitigates these issues by incorporating additional memory and control mechanisms within each cell. LSTM can learn long-term

dependencies and retain information over extended periods. Unlike typical RNNs, which use a single neural network layer, LSTM consists of four interacting layers that follow a unique communication process.

Despite its potential, only a limited number of studies have employed LSTM for ST prediction. To give examples, Li et al. used the LSTM neural network and GANs-LSTM method to estimate hourly ST at a 5 cm soil depth in China. Their results indicated that the GANs-LSTM method outperformed other approaches in estimating ST at different stations (Li et al., 2020). Geng et al. (2024) employ SHapley Additive exPlanation (SHAP), Permutation Partial Dependence Plot (PDP), and Importance (PI) to analyze and interpret the LSTM model used for global soil temperature prediction. Their findings indicate that the 2-meter air temperature above the land surface is the most influential factor in soil temperature forecasts. Additionally, both PI and SHAP feature values exhibit clear seasonal patterns.

In this study, a deep learning-based LSTM neural network was applied for time-series prediction of hourly soil temperature. For this purpose, hourly ST data from four measurement stations (Adana, Ağrı, Izmir, and Ankara) in different climatic regions of Turkey were used from 2016 to 2019. The key contributions of this study can be summarized as follows:

- The calculations were performed using hourly average ST data over four years (2016–2019) from four provinces representing different climate types in Turkey.
- The proposed methods predicted one-hour-ahead ST values without requiring complex calculations or extensive environmental, topographical, and meteorological data.
- While numerous studies in the literature have used time-series, machine learning, and hybrid methods for ST prediction, relatively few studies have explored ST forecasting using LSTM neural networks.

2. Methods

2.1. Long Short-Term Memory (LSTM) Network

LSTMs process sequential time-series data, similar to RNNs, by utilizing information from different time steps while addressing the issue of long-term dependencies (Ballouch et al., 2021). The primary distinction between LSTMs and RNNs lies in their structural differences. Unlike RNNs, LSTMs incorporate a memory component that enables the retention and transmission of past information. The model is trained to determine which information should be stored or discarded. While not explicitly designed for long-term memory, LSTM networks inherently demonstrate this capability. Both RNNs and LSTMs share a chain-like structure (Temur, 2019).

As illustrated in Figure 1, the LSTM architecture consists of repeating sequential blocks. Typically, the LSTM structure comprises three layers: input, output, and hidden layers. Here, X_t represents both the input data at time t and the output from the previous unit. h denotes the output of hidden units, while h_{t-1} represents their previous output. The purple rectangles in the figure indicate neural network layers (Li et al., 2017).

Purple circles represent element-wise operations such as vector addition. The line segments of the arrows indicate the transfer of data within a node, whereas the arrowheads signify the input flow into other nodes. The mathematical formulas and explanations of LSTM units are provided in Figure 2. Here, b_f, b_i, b_0, and b_g are bias vectors.

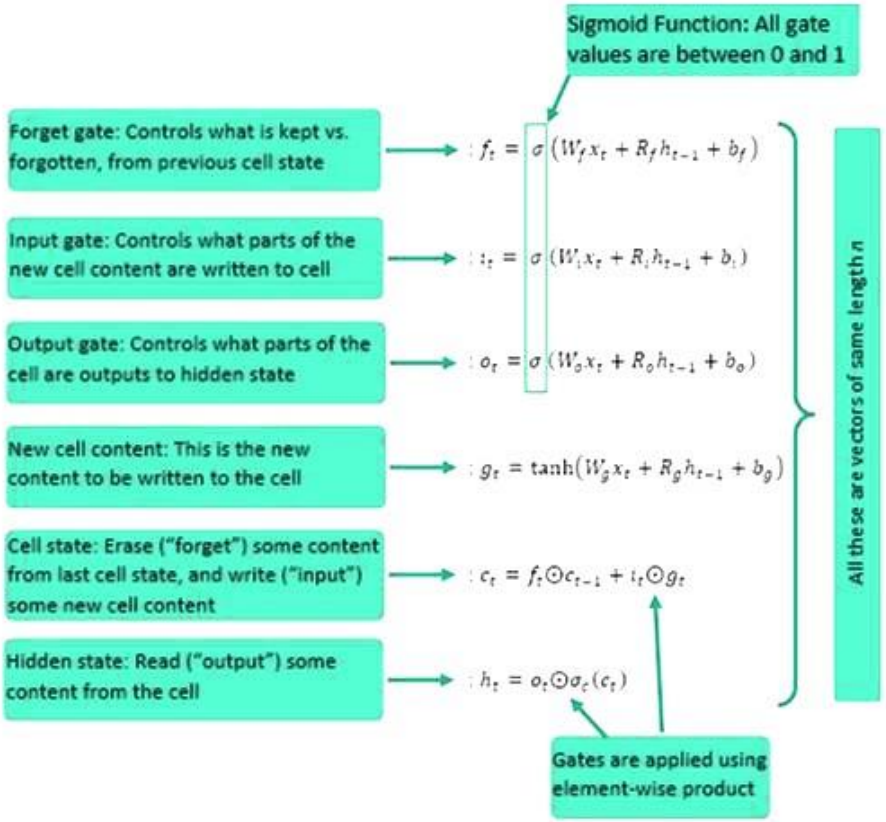


Figure 1. LSTM unit mathematical formulas and explanations (Qing and Niu, 2018)

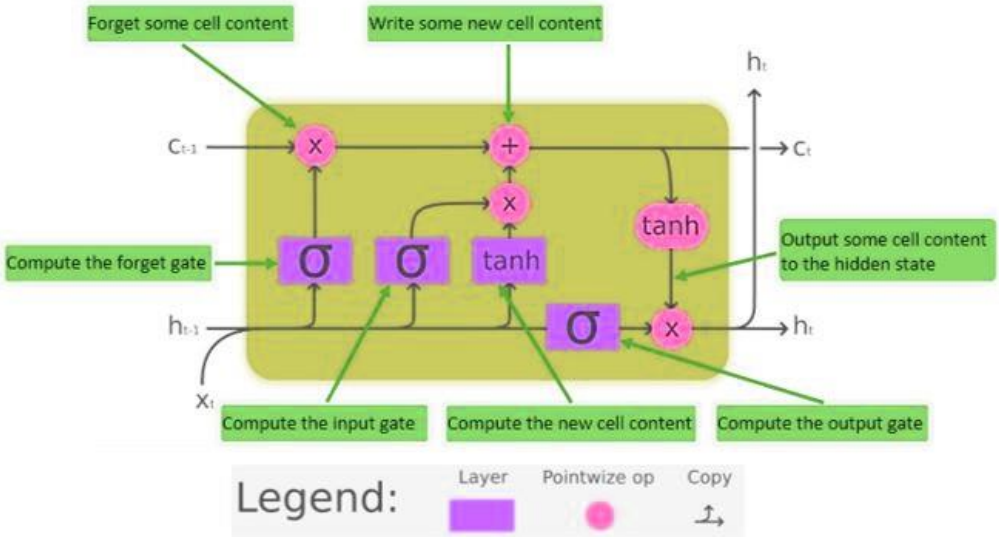


Figure 2. LSTM architectural structure (Yildirim et al., 2023)

2.2. Model Evaluation Metrics

The mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and correlation coefficient (R) were selected to evaluate the forecasting performance of the developed model. Equations (1)–(4) express the relevant formulas:

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

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

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i}\right| \tag{3}$$

$$R = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\bar{y}_i - y_i)^2}\right)^{1/2} \tag{4}$$

where $\hat{y}_i$ depicts the predicted value, y_i is the observed value, and $\bar{y}_i$ is the mean value and n is the total number of observations.

3. Results and Discussion

This study employed a deep learning method based on LSTM to predict ST values one hour ahead, using only historical ST data. The main advantage of this method is that it does not require independent variables. The proposed LSTM-based method was trained solely on historical ST data and a measured dataset. The performance of various algorithms was assessed using four error metrics: RMSE, MAE, MAPE, and R. The LSTM model was designed and implemented in four main steps: defining the architecture, training the model, fitting the parameters, and using the trained model for forecasting. Prediction experiments were conducted by varying the number of neurons in the hidden layer between 5 and 150. The optimal epoch number was determined as 300. Performance metrics were used to identify the most effective LSTM structure, and the best results were achieved when using 10 hidden layers. Although increasing the number of LSTM layers theoretically improves nonlinear fitting, excessive layers may lead to long training times, making efficient architectures more practical. The RMSE loss function was used for all LSTM models.

Additionally, the "Adam" optimizer was employed to iteratively update the network weights using training data. The optimizer's learning rate was set to 0.005, which determined the iterative weight updates. Standard normalization techniques were applied to normalize independent predictors and

variables based on existing literature. Data normalization assigned each variable an equal weight ranging from -1 to 1, while denormalization restored the data to its original distribution.

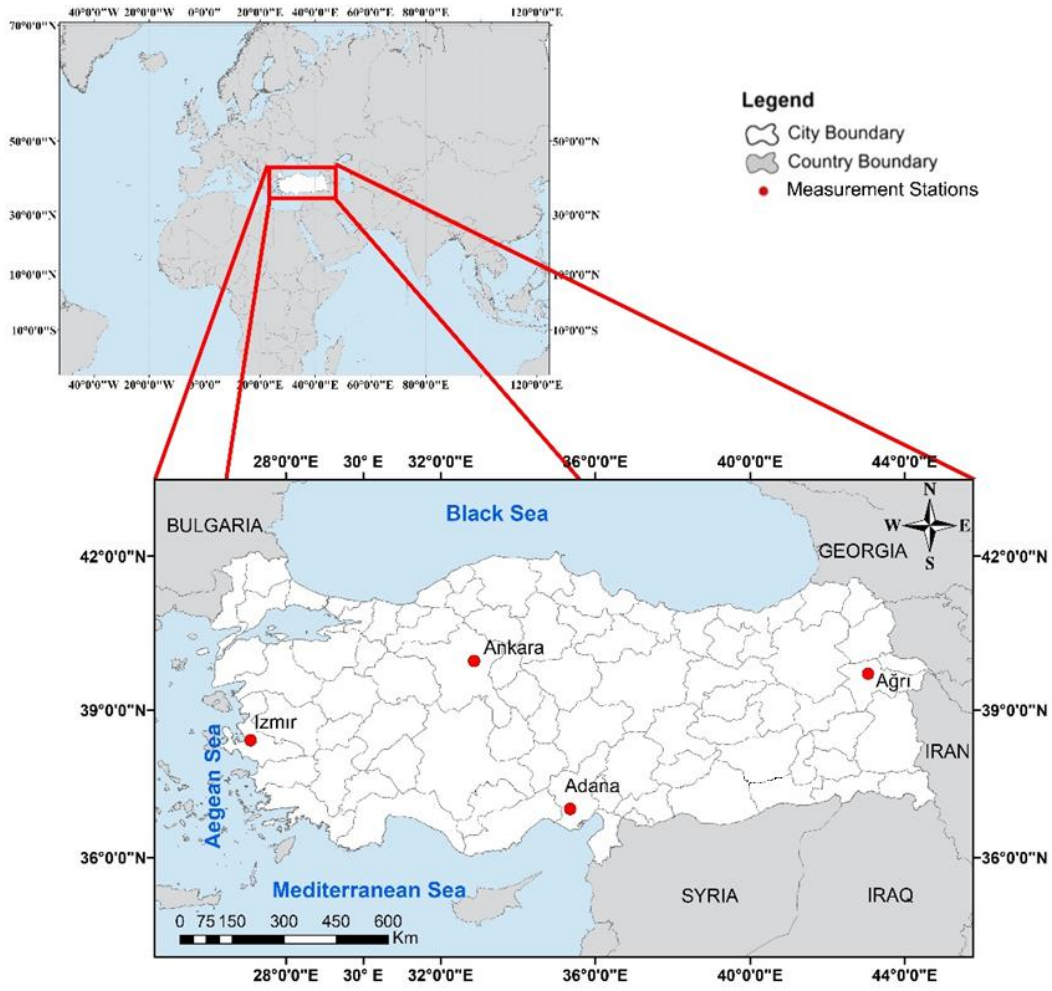


Figure. 3 The regions of the four measuring stations

Figure 3 displays a map showing the geographical locations of the four measurement stations (Adana, Ağrı, İzmir, and Ankara). This map visually presents how the stations are distributed across different regions of Turkey. Stations in coastal areas, such as Adana and İzmir, reflect climate conditions influenced by the sea, while stations in inland areas, like Ağrı and Ankara, represent more continental and high-altitude regions. This geographical diversity indicates that the data collected from each station may be influenced by different environmental factors. Figure 3 serves as an important visual tool for understanding the locations of these stations and assessing regional variations.

Table 1 presents the location information of the observation stations and the statistical properties of the ST values at different depths (5 cm and 100 cm). The table highlights the geographical coordinates (latitude, longitude, and altitude) of each station, along with the minimum, maximum, average, and standard deviation of the temperature measurements. For instance, in Adana, at a depth of 5 cm, the minimum temperature recorded was 2.56°C, while the maximum reached 40.13°C, with an average of 22.64°C and a standard deviation of 10.00°C. In contrast, in Ağrı, at the same depth, the minimum

temperature was much lower at -7.03°C, and the maximum was 28.06°C, with an average of 10.45°C and a standard deviation of 10.26°C. This indicates that Ağrı experiences more extreme temperature variations compared to Adana, likely due to its higher altitude (1646 meters) and more continental climate. As the depth increases to 100 cm, the temperature values become more stable across all stations, as evidenced by the reduced standard deviation. For example, in Adana, the standard deviation decreases from 10.00°C at 5 cm to 5.79°C at 100 cm, while in Ağrı, it drops from 10.26°C to 5.70°C. This trend suggests that deeper soil layers exhibit less temperature variability compared to surface layers, which are more directly influenced by external environmental factors such as air temperature and solar radiation.

Table 2 summarizes the statistical error metrics of the LSTM-based temperature forecasting at various soil depths (20 cm, 50 cm, and 100 cm) across four locations. The metrics include MAE, RMSE, MAPE, and R. Overall, the results demonstrate the high predictive accuracy of the LSTM model, with MAE, RMSE, and MAPE values consistently decreasing as the soil depth increases. A comparative analysis across cities highlights several notable patterns. At 20 cm depth, the highest prediction errors are observed due to stronger environmental fluctuations near the surface. Adana reports the highest MAE (0.3067 °C) and İzmir shows the highest RMSE (0.3689 °C), while Ağrı records the lowest errors (MAE: 0.1609 °C, RMSE: 0.2208 °C, MAPE: 3.36%), suggesting more stable temperature dynamics in this region. At 50 cm depth, model accuracy improves substantially across all locations. Ağrı again achieves the best performance with the lowest MAE (0.0455 °C), RMSE (0.0568 °C), and MAPE (0.75%), indicating higher predictability of subsurface temperature. In comparison, İzmir (MAE: 0.0890 °C, RMSE: 0.1125 °C, MAPE: 0.47%) and Ankara (MAE: 0.0620 °C, RMSE: 0.0777 °C, MAPE: 0.49%) exhibit slightly higher but still acceptable error levels. At 100 cm depth, the model yields its highest performance. Ağrı reports the lowest MAE (0.0385 °C) and MAPE (0.40%), while Ankara attains the lowest RMSE (0.0500 °C), indicating that soil temperature variations are minimal and highly predictable at this depth. Adana also shows a substantial reduction in error values (MAE: 0.0451 °C, RMSE: 0.0612 °C, MAPE: 0.22%), although still marginally higher than the leading cities.

R remains exceptionally high across all depths and locations, ranging from 0.9991 to 0.9999, confirming the strong agreement between observed and predicted temperature values. When comparing the stations, it is evident that the LSTM model performs exceptionally well across all locations, but there are slight variations in prediction accuracy. For instance, Adana and İzmir, which are coastal cities with milder climates, show slightly higher MAE and RMSE values at shallower depths compared to Ağrı and Ankara, which are inland and experience more extreme temperature ranges. However, as the depth increases, the prediction errors decrease significantly across all stations, highlighting the model's robustness in capturing the temporal dynamics of temperature variations in deeper soil layers.

In conclusion, the data presented in Table 1 reveals the spatial and depth-dependent variability of soil temperatures, with deeper layers exhibiting more stable thermal conditions. Table 2, on the other hand, highlights the robustness of the LSTM method in predicting temperature values, especially at greater

depths where the model achieves remarkably low prediction errors. These findings not only enhance the understanding of temperature patterns across different geographical locations and depths but also demonstrate the potential of LSTM as a powerful tool for time-series forecasting in environmental and climatic studies. The comparative analysis underscores the model's adaptability to varying climatic conditions and its high accuracy in predicting soil temperatures, making it a valuable asset for applications in agriculture, hydrology, and climate research.

Figure 4 presents graphs showing observed ST during training (2016–2018) and testing (2019) phases. Approximately 75% of the data was used for training and 25% for testing. This split ensures that the model was evaluated on unseen data, supporting its generalizability. The graphs show consistent patterns between the training and testing phases, indicating that the model was trained on data that accurately reflects real-world conditions. This consistency is crucial for ensuring the model's reliability and its ability to generalize to new data. The seasonal fluctuations in soil temperature are clearly visible, highlighting the model's capacity to capture both short-term variations and long-term trends. Overall, Figure 4 provides a solid foundation for understanding the temporal dynamics of soil temperature and the model's performance in replicating these patterns.

Figure 5 focuses on the testing phase of the ST data for the year 2019. The graphs compare the observed ST values with the predicted ST values generated by the model during the testing phase. The close alignment between the observed and predicted values demonstrates the model's high accuracy in forecasting soil temperatures. The graphs also highlight the model's ability to handle both seasonal changes and sudden fluctuations, further validating its robustness. Figure 5 serves as strong evidence of the model's effectiveness in predicting soil temperatures under real-world conditions.

Figure 6 consists of a series of scatter plots showing the regression analyses between the observed and predicted ST values at different depths. Each plot corresponds to a specific depth, and the regression line indicates the relationship between the observed and predicted values. The scatter plots reveal a strong linear relationship, with the regression lines closely following the 1:1 line, which represents perfect prediction. The high correlation coefficients (R values) suggest that the model's predictions are highly accurate across all depths. This is particularly significant because soil temperature can vary considerably with depth, and the model's ability to maintain high accuracy at different depths underscores its robustness. The tight clustering of data points around the regression line further confirms the model's reliability in predicting soil temperatures under varying conditions. Figure 6 provides strong evidence of the model's precision and its applicability across different soil layers.

Table 1. Observation stations location information and statistical properties of the ST values

Measuring station	Latitude (o)	Longitude (o)	Altitude (m)	Depth (cm)	Minimum ST (°C)	Maximum ST (°C)	Average ST (°C)	Standard deviation (°C)
Adana	37.0041	35.3443	23	5	2.56	40.13	22.64	10.00
				100	12.50	30.00	22.15	5.79
Ağrı	39.7253	43.0522	1646	5	-7.03	28.06	10.45	10.26
				100	2.14	19.90	10.72	5.70
İzmir	38.3949	27.0819	29	5	0.39	43.26	20.67	10.07
				100	10.89	28.90	20.23	5.59
Ankara	37.1932	33.2202	1018	5	-3.98	35.33	15.63	10.02
				100	5.20	26.70	16.08	6.21

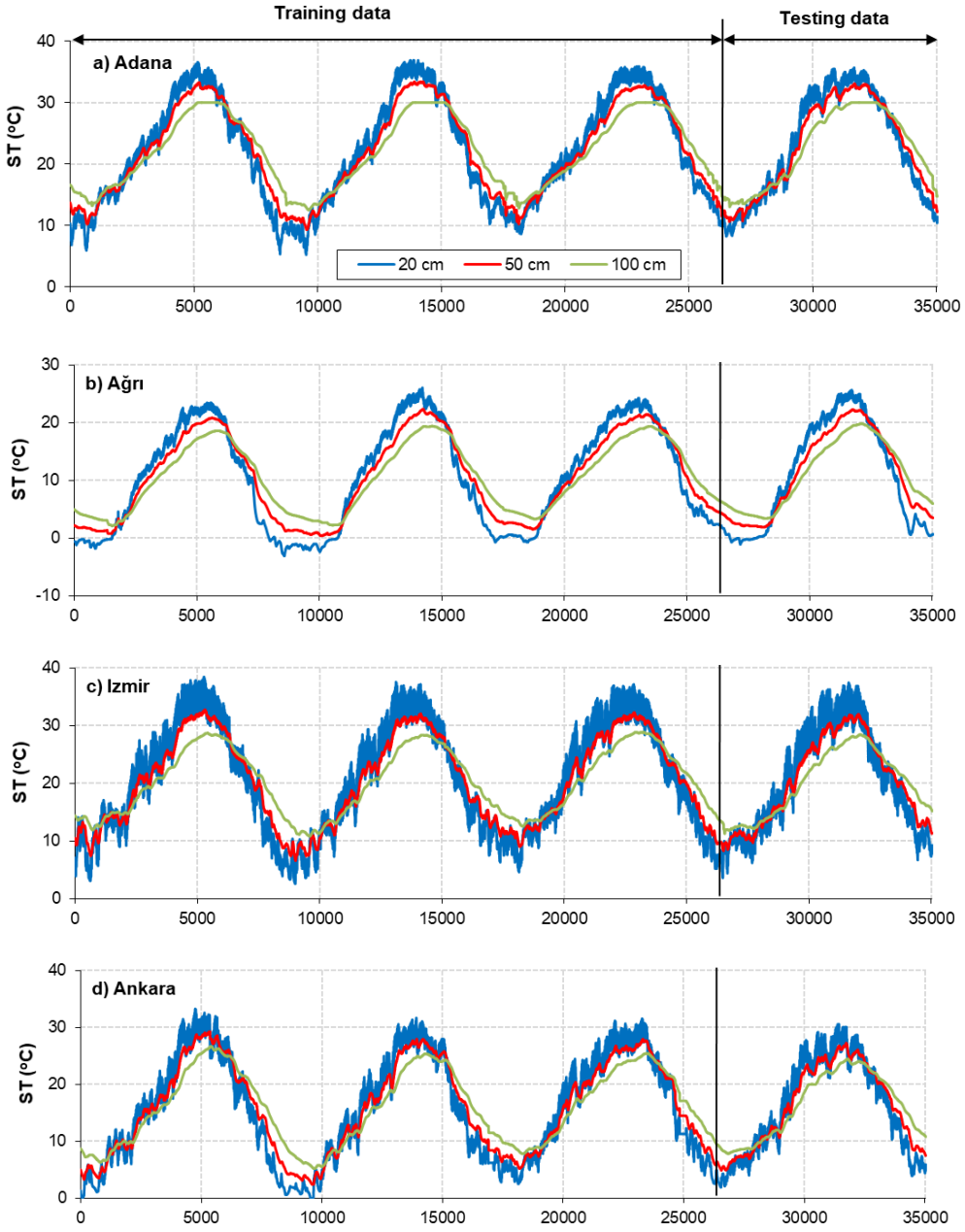


Figure 4. Observed training and testing ST parameters between 2016-2019

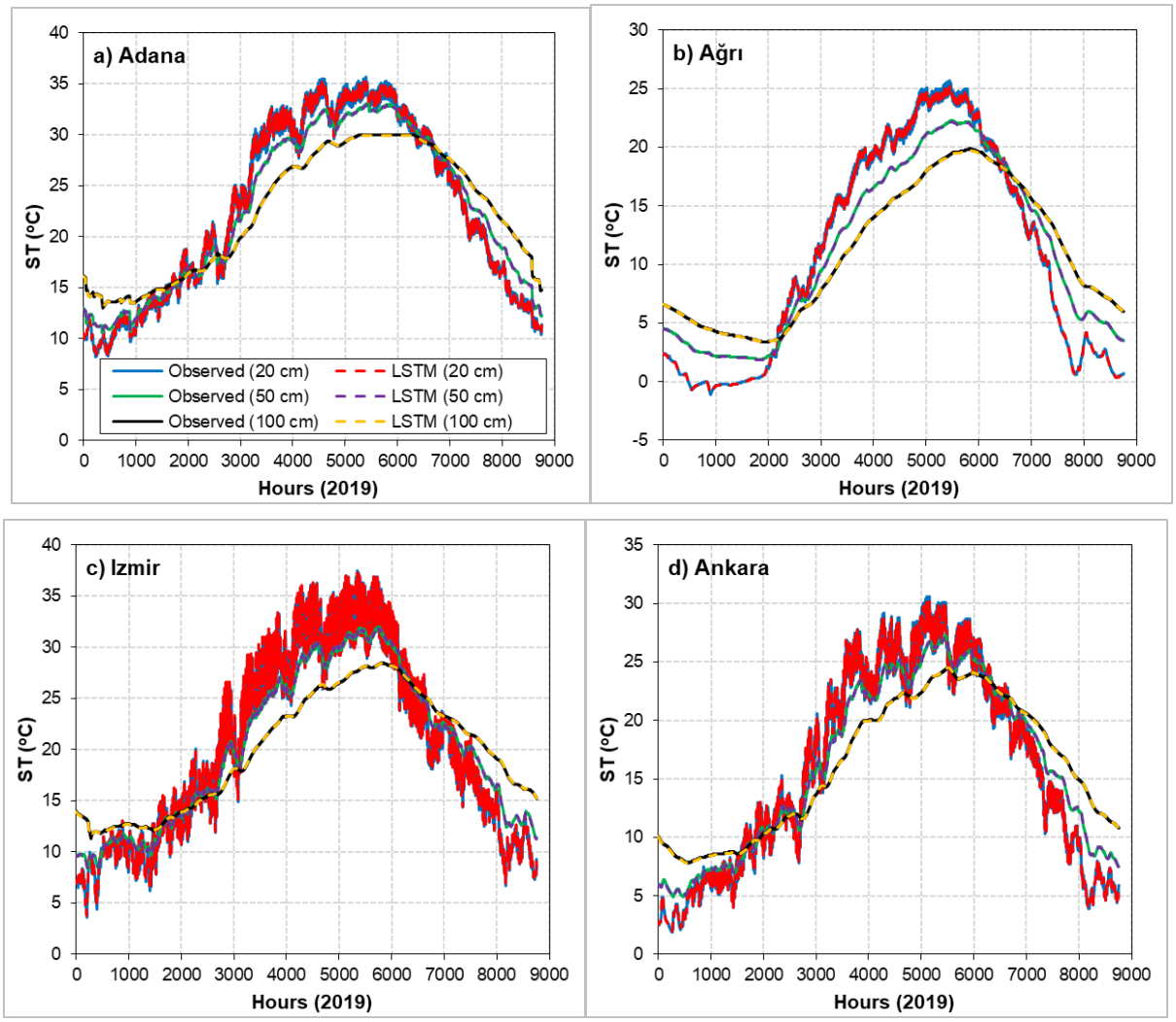


Figure 5. Testing ST parameters between 2016-2019

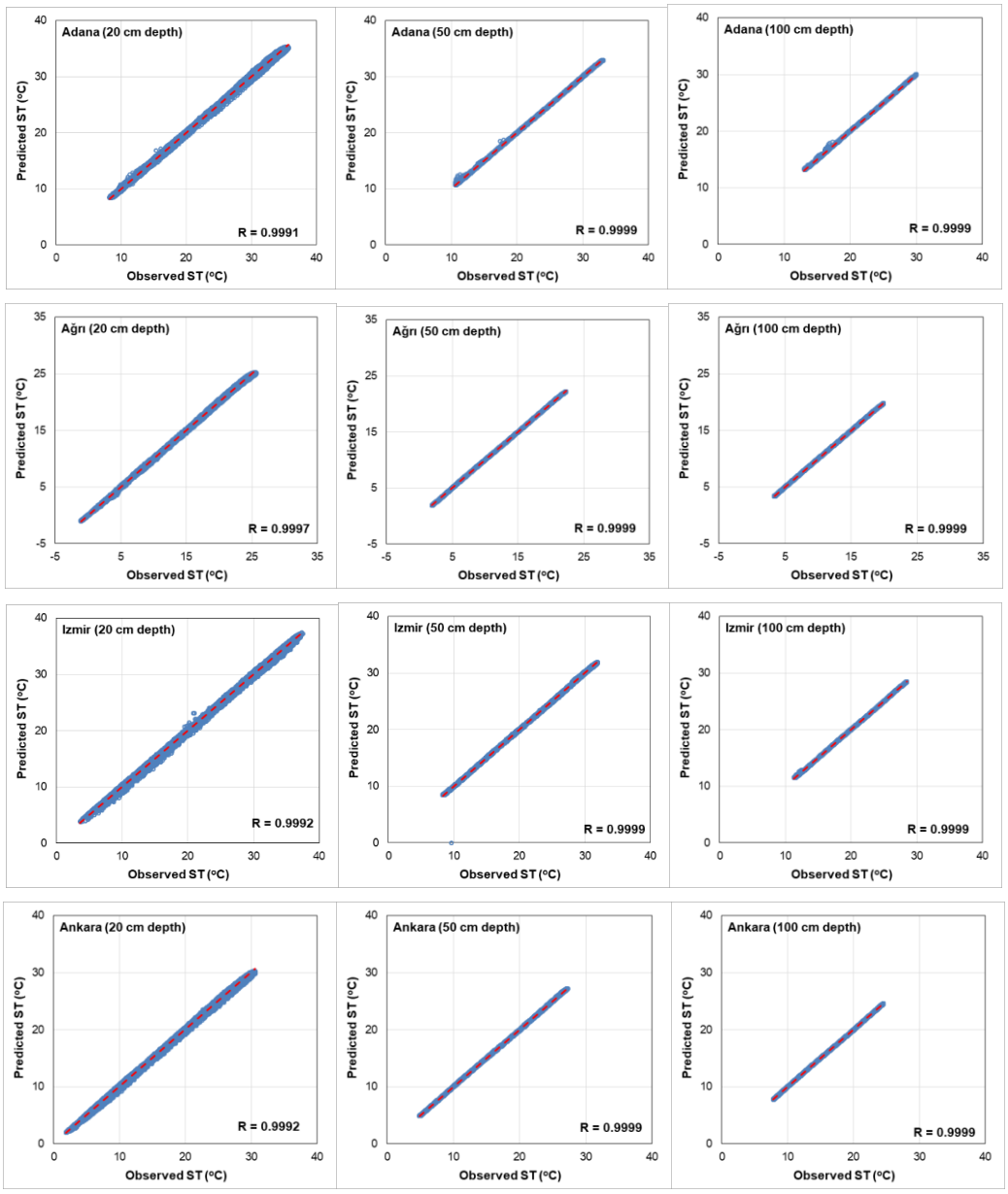


Figure 6. Regression analyses of ST observed and predicted data at various depths

Table 2. Prediction LSTM methods' statistical error results

Site	Depth (cm)	MAE (°C)	MAPE (%)	RMSE (°C)	R
Adana	20	0.3067	1.42	0.3676	0.9991
	50	0.0577	0.29	0.0805	0.9999
	100	0.0451	0.22	0.0612	0.9999
Ağrı	20	0.1609	3.36	0.2208	0.9997
	50	0.0455	0.75	0.0568	0.9999
	100	0.0385	0.40	0.0543	0.9999
İzmir	20	0.2815	1.69	0.3689	0.9991
	50	0.0890	0.47	0.1125	0.9999
	100	0.0412	0.22	0.0535	0.9999
Ankara	20	0.2890	2.15	0.3531	0.9991
	50	0.0620	0.49	0.0777	0.9999
	100	0.0403	0.30	0.0500	0.9999

4. Conclusion

This study applied a deep learning-based LSTM model for predicting ST at three different depths (20 cm, 50 cm, and 100 cm) using historical time-series data. The results demonstrate that prediction accuracy improves as soil depth increases, with shallower depths exhibiting greater variability due to stronger interactions with atmospheric conditions.

At 20 cm depth, prediction errors were generally higher across all sites due to rapid and frequent environmental fluctuations near the soil surface. Among the sites, Adana and Ankara exhibited the largest errors, with elevated MAE, RMSE, and MAPE values indicating reduced model reliability in shallow layers. At 50 cm depth, predictive accuracy improved considerably as the thermal profile became more stable, with Ağrı recording the lowest MAE (0.0455 °C), RMSE (0.0568 °C), and MAPE (0.75%), reflecting enhanced model performance. At 100 cm depth, the model achieved its highest overall accuracy, attributed to minimal short-term temperature variability. In this layer, Ağrı exhibited the lowest MAE (0.0385 °C) and MAPE (0.40%), while Ankara recorded the lowest RMSE (0.0500 °C), indicating robust and reliable temperature predictions at greater soil depths.

These findings confirm that LSTM is highly effective in capturing the temporal dynamics of ST, particularly at greater depths where fluctuations are less abrupt. The model's capability to deliver accurate predictions without relying on additional meteorological data renders it a valuable asset for applications in agriculture, hydrology, and environmental research.

Future research could explore integrating additional climatic variables, such as soil moisture and solar radiation, to enhance prediction accuracy further. Additionally, combining LSTM with hybrid deep learning models, such as attention mechanisms or convolutional neural networks, may further improve performance. Expanding the dataset with longer observation periods and additional geographical regions would also strengthen model generalizability.

Acknowledgments

The data used in this study were provided by the Turkish State Meteorological Service, which the authors gratefully acknowledge.

Funding

No funding was received to support the preparation of this manuscript.

Data Availability

All data generated during this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Code Availability

All codes used in this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Declarations

Ethics Approval: Not applicable.

Consent to Participate: The authors declare their consent to participate in this research and review.

Consent for Publication: The authors consent to the publication of this work.

Conflict of Interest: The authors declare no competing interests.

Credit Author Statement

A.Y.: Conceptualization, Methodology, Writing, Investigation.

M.B.: Conceptualization, Methodology, Writing, Reviewing, Supervision.

References

Ballouch M., Akay F., Erdem S., Tartuk M., Nurdağ TF., Yurdagül HH. Forecasting call center arrivals using machine learning. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 4(1): 96-101.

Bilgili M. Prediction of soil temperature using regression and artificial neural network models. Meteorol Atmos Phys 2010; 110(1): 59-70.

Farhangmehr V., Imanian H., Mohammadian A., Cobo JH., Shirkhani H., Payeur P. A spatiotemporal CNN-LSTM deep learning model for predicting soil temperature in diverse large-scale regional climates. Sci Total Environ 2025; 968: 178901.

Geng Q., Wang L., Li Q. Soil temperature prediction based on explainable artificial intelligence and LSTM. Front Environ Sci 2024; 12: 1-16.

Guleryuz D. Estimation of soil temperatures with machine learning algorithms—Giresun and Bayburt stations in Turkey. Theor Appl Climatol 2022; 147(1-2): 109-125.

Gurlek C. The estimation of monthly mean soil temperature at different depths in Sivas province, Turkey by Artificial Neural Networks. Commun Soil Sci Plant Anal. 2023; 54(3): 408–430.

Hosseinzadeh Talaee P. Daily soil temperature modeling using neuro-fuzzy approach. Theor Appl Climatol 2014; 118(3): 481-489.

Kim S., Singh VP. Modeling daily soil temperature using data-driven models and spatial distribution. Theor Appl Climatol 2014; 118(3): 465-479.

Li Q., Hao H., Zhao Y., Geng Q., Liu G., Zhang Y., et al. GANs-LSTM model for soil temperature estimation from meteorological: a new approach. IEEE Access 2020; 8: 59427-59443.

Li X., Peng L., Yao X., Cui S., Hu Y., You C., et al. Long short-term memory neural network for air pollutant concentration predictions: method development and evaluation. Environ Pollut 2017; 231: 997-1004.

Mehdizadeh S., Ahmadi F., Kozekalani Sales A. Modelling daily soil temperature at different depths via the classical and hybrid models. Meteorol Appl 2020; 27(4): 1-15.

Mehdizadeh S., Fathian F., Safari MJS., Khosravi A. Developing novel hybrid models for estimation of daily soil temperature at various depths. Soil Tillage Res 2020; 197: 104513.

Mehdizadeh S., Mohammadi B., Bao Pham Q., Nguyen Khoi D., Thi Thuy Linh N. Implementing novel hybrid models to improve indirect measurement of the daily soil temperature: Elman neural network coupled with gravitational search algorithm and ant colony optimization. Meas J Int Meas Confed 2020; 165: 108127.

Moazenzadeh R., Mohammadi B. Assessment of bio-inspired metaheuristic optimisation algorithms for estimating soil temperature. Geoderma 2019; 353: 152-171.

Qing X., Niu Y. Hourly day-ahead solar irradiance prediction using weather forecasts by LSTM. Energy 2018; 148: 461-468.

Samadianfard S., Asadi E., Jarhan S., Kazemi H., Kheshtgar S., Kisi O., et al. Wavelet neural networks and gene expression programming models to predict short-term soil temperature at different depths. Soil Tillage Res 2018; 175: 37-50.

Temur A. Comparison of ARIMA, LSTM and hybrid models in establishing sales budgets: A case of production facility. Sakarya University; 2019.

Yildirim A., Bilgili M., Ozbek A. One-hour-ahead solar radiation forecasting by MLP, LSTM, and ANFIS approaches. Meteorol Atmos Phys 2023; 135(1): 1-17.

Zeynoddin M., Bonakdari H., Ebtehaj I., Esmaeilbeiki F., Gharabaghi B., Zare Haghi D. A reliable linear stochastic daily soil temperature forecast model. Soil Tillage Res 2019; 189: 73-87.

Zounemat-Kermani M. Hydrometeorological parameters in prediction of soil temperature by means of artificial neural network: case study in Wyoming. J Hydrol Eng 2013; 18(6): 707-718.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 366-378, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 366-378, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Mafsallı Bomlu Vinçlerin Kaldırma Mekanizmasının Optimizasyonu

Ömer Sinan ŞAHİN[1], Ahmet ÇATAL[2], Oğuzhan TAŞ[3*], Kerem ÇOBAN[4]

[1]Konya Technical University, Dept. of Mechanical Engineering, Konya, Türkiye
[2,3,4]Hidrokon Hydraulic Machinery Co, Dept. of Res. & Development Konya, Türkiye

[1]https://orcid.org/0000-0002-0999-7332
[2]https://orcid.org/0009-0008-9561-4772
[3]https://orcid.org/0009-0003-9081-3952
[4]https://orcid.org/0009-0005-6070-0142
*Sorumlu yazar: oguzhan.tas@hidrokon.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 24.04.2025
Kabul tarihi:25.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Mafsallı bomlu vinç
Kaldırma mekanizması
Parçacık sürü optimizasyonu

ÖZ

Mobil vinçler, ağır yükleri kaldırmak ve taşımak için tasarlanmış özel makinelerdir. Tekerlekli veya paletli bir şasiye sahip olabilirler ve inşaat, ağır sanayi, enerji ve denizcilik gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu vinçler, uzatılabilir kollar ve kaldırma ekipmanları kullanarak hidrolik sistemler ve mekanik kuvvetler aracılığıyla yükleri yüksek veya dar alanlardan kaldırır. Verimli bir çalışma, ağırlık ve kapasitenin optimize edilmesine bağlıdır; aşırı yükler veya dinamik kuvvetler güvenlik risklerine veya mekanik arızalara yol açabilir. Bu araştırma, parçacık sürü optimizasyon yöntemi kullanarak bir mafsallı bomlu vincin kaldırma mekanizmasının boyutlarını optimize etmeye, moment kolunu maksimize etmeye ve ivmeyi minimize etmeye odaklanmaktadır. Bu çalışmada, silindir hızının optimum λ değerinin belirlenmesinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu, optimum lambda değeri için birincil belirleyici faktörün ise (ψ) açısı olduğu gösterilmiştir.

Design Optimization of Knuckle Joint Crane Lifting Mechanism by Using Particle Swarm Optimization

Research Article

Article History:
Received: 24.04.2025
Accepted: 25.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Knuckle joint crane
Lifting mechanism
Particle swarm optimization

ABSTRACT

Mobile cranes are specialized machines designed for lifting and moving heavy loads. They feature either a wheeled or tracked chassis and are widely used in industries such as construction, heavy manufacturing, energy, and maritime operations. These cranes utilize hydraulic systems and mechanical forces to lift objects from elevated or confined spaces by employing extended arms and lifting attachments. Efficient operation depends on optimizing weight and capacity, as excessive loads or dynamic forces can lead to safety risks or mechanical failures. This research focuses on optimizing the dimensions of a knuckle joint boom crane's lifting mechanism to maximize the moment arm and minimize acceleration, by employing the particle swarm optimization (PSO) method. It is shown in this study that cylinder velocity has a negligible impact on the determination of the optimal λ value while the primary determining factor for the optimum value of lambda is the (ψ) angle.

To Cite: Şahin ÖS., Çatal A., Taş O., Çoban K. Design Optimization of Knuckle Joint Crane Lifting Mechanism by Using Particle Swarm Optimization. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 366-378.

1. Introduction

The dimensional optimization of mobile crane lifting mechanisms is crucial for performance, safety, and cost-efficiency. The main goal of optimizing crane mechanism dimensions is to enhance the lifting capacity. This process is critical for properly sizing the mechanism's components, optimizing material use, and ensuring that performance remains within safe limits. Dimensional optimization is generally achieved by physical and operational parameters. Various numerical analysis and simulation techniques are commonly employed to achieve optimal results. In practical engineering applications, various sources of uncertainty frequently arise due to inconsistencies in material properties, manufacturing processes, and measurement techniques (Fang et al., 2015; Sun et al., 2018; Dawood et al., 2020; Xu et al., 2021). Accordingly, the consideration of uncertainties in engineering design has garnered increasing attention in recent years (Yuan et al., 2019; Li et al., 2020; Chen et al., 2021). For example, Xian et al. (2022) introduced a comprehensive analytical framework for stochastic optimization of nonlinear viscous dampers used in energy-dissipating systems, which was successfully applied to uncertainty-based optimization in suspension bridge applications. With the growing complexity of engineering systems, the presence of diverse and interacting uncertainties has become inevitable, often resulting in challenges related to their identification and quantification (Tan et al., 2023). If such uncertainties are not properly accounted for, ensuring the reliability and safety of engineering systems becomes increasingly difficult (Zhu et al., 2020; Bagheri et al., 2021; Xue et al., 2022; Plotnikov, 2023). In this context, the Reliability-Based Design Optimization (RBDO) methodology has been widely employed to enhance the safety and robustness of complex mechanical systems (Zhang et al., 2022). RBDO seeks to maintain system reliability within acceptable bounds while optimizing performance-related objective functions (Dui et al., 2023). In recent years, numerous optimization algorithms have been developed, inspired by nature. One of the most commonly used techniques is Particle Swarm Optimization (PSO), which is frequently applied to solve complex engineering design problems involving multiple parameters, nonlinearity, and continuous variables. PSO is an optimization method widely used in machine learning and artificial intelligence domains. This algorithm involves a group of particles (candidate solution points) moving through a predefined space in search of the best solution. Each particle is located within the solution space, and its velocity vectors are updated by remembering both its own best position and the best position found within the swarm. PSO has gained significant attention over the years, inspired by the social behavior of animals, particularly the flocking patterns of birds (Moravec, 2017). The algorithm was first introduced in 1995 (Kennedy et al., 1995). By simulating a simplified social system, the behavior of PSO can be understood as an optimization process. Compared to other optimization algorithms, PSO requires less computational time. However, it is important to note that not all optimization algorithms are suited for every type of problem (Wolpert et al., 1997; Belot, 2020). Despite this, PSO is known for its ability to find global optimum solutions and offers the advantage of greater computational efficiency, making it highly suitable for nonlinear optimization

problems (Wu and Wu, 2018). In PSO, particle movement is governed by rules that update both speed and position. The cognitive component involves each particle recalling its best position from the past and moving toward that point, while the social component directs the particle to move based on the best solution found by the entire swarm. The interplay of these two factors enables faster and more precise convergence to the optimal solution. In PSO, the process starts by determining the solution space for each parameter, assigning random initial positions, evaluating the objective function, updating the particles' velocities and positions based on their individual best solutions and the best solution in the swarm, and then repeating the process a set number of times. As a result, PSO has been successfully applied to solve various problems (Naka et al., 2003; Arumugam et al., 2009; Wang and Guan, 2013). proposed an optimal design for hydraulic supports using an analytical approach (Oblak et al., 2000). Prebil et al. showed how the synthesis of a four-bar linkage in a hydraulic support could be achieved through a global optimization algorithm (Prebil et al., 2002; Jianguo et al., 2012). Dan et al. applied a multi-objective mathematical model to optimize the four-bar linkage while ensuring the strength requirements were met, based on kinematic and mechanical analysis (Dan et al., 2009). Ye et al. utilized the least squares method to optimize the four-bar linkage of hydraulic supports (Ye et al., 2009) Additionally, some researchers (Fateh et al., 2011; Dong-yun et al., 2013) applied Particle Swarm Optimization (PSO) for the optimal control of hydraulic excavators. Given the highly standardized nature of crane design procedures, the majority of time and effort is often spent interpreting and implementing existing design standards (Erden, 2002). The design characteristics of cranes can differ significantly depending on their primary operational specifications (Abid et al., 2015). Numerous studies have focused on analyzing stress distributions and tip deflection, employing optimization techniques such as the Marine Predator Algorithm and the Search and Rescue algorithm (Mladenović, et al., 2024). Cross-section optimization was explored using the Lagrange multiplier method (Stephen et al., 2018), while the effects of inertial loads were examined by other researchers (Volianiuk et al., 2021). The finite element method was also employed to analyze the performance of work platforms in studies (Zdravković et al., 2010; Guo et al, 2016). This study is focused on optimizing the geometric dimensions of a three-limb mechanism used for positioning the movable arm in mobile cranes, with the goal of obtaining the minimum acceleration and the maximum moment arm using the PSO technique.

2. Materials and Methods

The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm operates by representing the unknown parameters as particles. Starting with a random initialization, the particles move through a search space to minimize an objective function. The parameters are estimated by minimizing the objective function. Each particle's fitness is assessed based on the objective function, which helps update both the particle's best position and the best position among all particles. In each iteration, particles are directed towards both their previous best position and the best position found by the entire swarm. As a result, particles tend

to fly toward the more promising areas of the search space. The velocity of the ith particle, vi, is calculated as follows [2]:

$$V_i^{t+1}=\omega.v_i^t+ c_1.r_1.(x_{best,i}^t-x_i^t)+ + c_2.r_2.(x_{best,g}^t-x_i^t)$$

It is important to note that the inertia weight was not included in the original version of PSO (Ratnaweera et al 2004). The new position of the ith particle is then determined as follows:

$$X_i^{t+1}= X_i^t +V_i^{t+1}$$

Where

v_i^t: Velocity of i^{th} particle at instant t

v_i^{t+1}: Velocity of i^{th} particle at instant t+1

ω: Inertial coefficient

C_1, C_2: Cognitive Coefficient (personal learning factor) and Social Coefficient (global learning factor):

r_1, r_2: Random coefficients selected between [0,1]

$x_{best,i}^t$: Personal best point of i^{th} particle

$x_{best,g}^t$: Global best position

x_i^t: Position of i^{th} particle at instant t

It is reported that the solution of PSO algorithm is highly influenced by weight factors and the acceleration factors. Larger coefficients are beneficial to global search, while smaller coefficients encourage local exploitation. Algorithm parameters are shown in Table 1.

Table 1. Algorithm parameters

Parameter Name	Value
Population Size	30
Number of Iteration	100
Inertial Weight	0.7
c1	1.5
c2	1.5

Table 2. Mechanism design parameters

Parameter Name	Value
θ angle (Deg.)	-15 to +83
ψ angle (Deg.)	+15 to +75
Cylinder velocity (m/s)	0.005 to 0.015
[AB], [AC]=Fixed	
[BC]= Variable	

Figure 1 illustrates the schematic representation of lifting mechanism widely used in knuckle joint boom cranes. The mathematical formulations and numerical solutions were carried out by using parameters presented in Table 2.

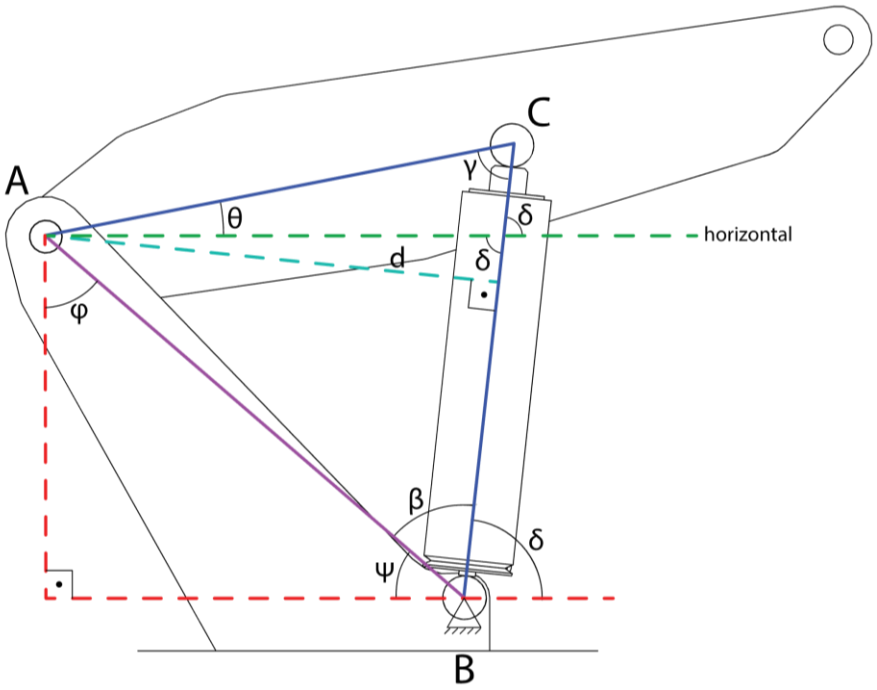


Figure 1. Mechanism design parameters

$$\boldsymbol{\Psi + \theta + \beta + \gamma = 180 = \pi} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma + \theta = \gamma} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\beta + \theta + \gamma = \pi - \Psi = Fixed} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\beta = \pi - \Psi - \gamma - \theta} \quad (4)$$

Applying the Sinus theorem we get equations (5), (6) and (7) as follows;

$$\frac{|\boldsymbol{AB}|}{\boldsymbol{\sin\gamma}} = \frac{|\boldsymbol{AC}|}{\boldsymbol{\sin\beta}} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{|AB|}{|AC|}.\sin\beta\right)} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\beta} + \sin^{-1}\left(\frac{|\boldsymbol{AB}|}{|\boldsymbol{AC}|} . \sin\boldsymbol{\beta}\right) - \boldsymbol{\pi} + \boldsymbol{\Psi} = -\boldsymbol{\theta} \tag{7}$$

In triangle ABC, the length of link BC is variable. Therefore, the remaining lengths are AB and AC. In cranes, the basic length AC determines the moment arm, and therefore the lifting capacity. Therefore, when designing cranes with different capacities, AC is the primary determining parameter. However, this length is related to the crane's horizontal capacity. The amount of space the crane will occupy on the chassis and the length of the moment arm at different angular positions (θ) and the angular velocity and acceleration of link AC depend on length AB. Therefore, a new parameter has been used to represent the required length of AB for a given AC length. Introducing a new parameter as λ=[AB]/[AC], Eq (8) can be obtained;

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\theta} \geq 0 \quad \boldsymbol{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\boldsymbol{\Psi}+\boldsymbol{\theta})}{\boldsymbol{\lambda} - \cos(\boldsymbol{\Psi}+\boldsymbol{\theta})}\right) \\ &\boldsymbol{\theta} \leq 0 \quad \boldsymbol{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin(\boldsymbol{\Psi}-\boldsymbol{\theta})}{\boldsymbol{\lambda} - \cos(\boldsymbol{\Psi}-\boldsymbol{\theta})}\right) \end{aligned} \tag{8}$$

Then, the moments arm (d(θ)) can be expressed as follows

$$\boldsymbol{d(\theta)} = |\boldsymbol{AB}| . \sin\boldsymbol{\beta}$$

This type of mechanism generally operates with a very low acceleration. However, during the optimization process, it should be considered. It is assumed that the hydraulic cylinder moves at a constant velocity (Vr), it still can cause angular acceleration due to variation of angular positions of the members. The angular velocity and angular acceleration are expressed as follows.

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{\boldsymbol{d\theta}}{\boldsymbol{dt}} = \frac{\boldsymbol{V_r} . \sin\boldsymbol{\gamma}}{|\boldsymbol{AC}|} \tag{9}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \frac{\boldsymbol{d^2\theta}}{\boldsymbol{dt^2}} = \frac{\boldsymbol{V_r}}{|\boldsymbol{AC}|} . \cos\boldsymbol{\gamma} \ . \boldsymbol{\gamma'} \tag{10}$$

Where, dγ/dt and dβ/dt are expressed as;

$$\frac{\boldsymbol{d\gamma}}{\boldsymbol{dt}} = \boldsymbol{\gamma'} = \sin^{-1}(\boldsymbol{\lambda} . \sin\boldsymbol{\beta}) = \frac{\boldsymbol{\lambda} . \cos\boldsymbol{\beta} . \left(\frac{\boldsymbol{d\beta}}{\boldsymbol{dt}}\right)}{\sqrt{1 - \boldsymbol{\lambda}^2 . \sin^2\boldsymbol{\beta}}} \tag{11}$$

Where

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = \frac{\boldsymbol{d\beta}}{\boldsymbol{dt}} = \frac{1 - \boldsymbol{\lambda} . \cos(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\Psi})}{1 - 2\boldsymbol{\lambda} . \cos(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\Psi}) + \boldsymbol{\lambda}^2} . \frac{\boldsymbol{Vr}}{|\boldsymbol{AC}|} . \boldsymbol{\lambda}^2 . \frac{\boldsymbol{Vr}}{|\boldsymbol{AC}|} . \boldsymbol{\lambda} . \sin\boldsymbol{\beta}$$

Finally, the angular acceleration of arm member is expressed as follows.

$$\ddot{\theta} = \frac{V_r}{|AC|} \cdot \cos(\sin^{-1}(\lambda \cdot \sin\beta)) \cdot \frac{\lambda \cdot \cos\beta}{\sqrt{1-\lambda^2 \cdot \sin^2\beta}} \cdot \dot{\beta} \quad (12)$$

The objective and constraints of the optimization are summarized in Table 3

Table 3. Objectives and restrictions

Objectives	
#1	Minimum angular acceleration
#2	Maximum β at θ=-15/+83 interval
#3	Minimum variation at β at θ=-15/+83 interval
Constraint	
#1	$\lambda - cos(\Psi + \theta) \neq 0$ (Numerical constraint)
#2	$\lambda - cos(\Psi + \theta) \neq 0$ (Numerical constraint)
#3	$\lvert\lambda . \sin\beta\rvert \leq 1$ (Numerical constraint)
#4	$\lambda_{min} > 0{,}15$ (Manufacturability constraint)

The above-mentioned requirements yield the following type of objective function.

$$F(\psi, Vr) = w\,1 \cdot F\,1 + w\,2 \cdot F\,2 + w\,3 \cdot F\,3 \quad (13)$$

Where, F1, F2 and F3 represents, maximization of the moment arm, minimization of the change in the moment arm and minimization of the angular acceleration respectively. On the other hand, these factors need to be weighting by using weighting factors and the overall objective function is then defined as Eq. (13) under specified constraints. The weights lifted by a crane and operator's interest are depends on fragility of the lifted material and operational costs. So, these relative weights were chosen in such a way that it covers all aspects of the lifting operations in the view of our experience.

Three weighting factors have been defined and a code has been developed by using MS-Excel VBA for solving the above-mentioned problem by using PSO. The final form of objective function is shown in Eqn (14)

$$F(\psi, Vr)=0{,}6*\min(\text{abs}(\text{angular acceleration}))-0{,}2*\max(\beta)+0{,}2*\min(\text{abs}(d\beta/dy)) \quad (14)$$

3.Results and Discussions

The solution to the problem mentioned above was carried out based on the geometric parameters and speed values commonly used in the crane industry. The results obtained are presented in Figure 2. Additionally, the effects of the vr and (ψ) parameters on the lambda value were statistically evaluated and presented in Figure 3. As seen in the figures, depending on the selected (ψ) angle, the lambda value

varies between the dimensional limits of 0,15 and 0,9. On the other hand, as shown in the figure, the primary determining factor for the optimum value of lambda is the (ψ) angle. When considering the selected values for the cylinder speed, it has been evaluated that their effect on the optimum value of lambda is negligible. When the same problem was analyzed based on minimizing the change in the moment arm during the lifting operation, it was observed that the lambda value approaches 1. When examining cranes of different capacities available in the market, it is generally seen that the (ψ) angle is chosen between 40°-50° and the lambda value is typically chosen to be approximately 1. In this case, it can be concluded that the solution was based on minimizing the change in the moment arm during the lifting operation for these products.

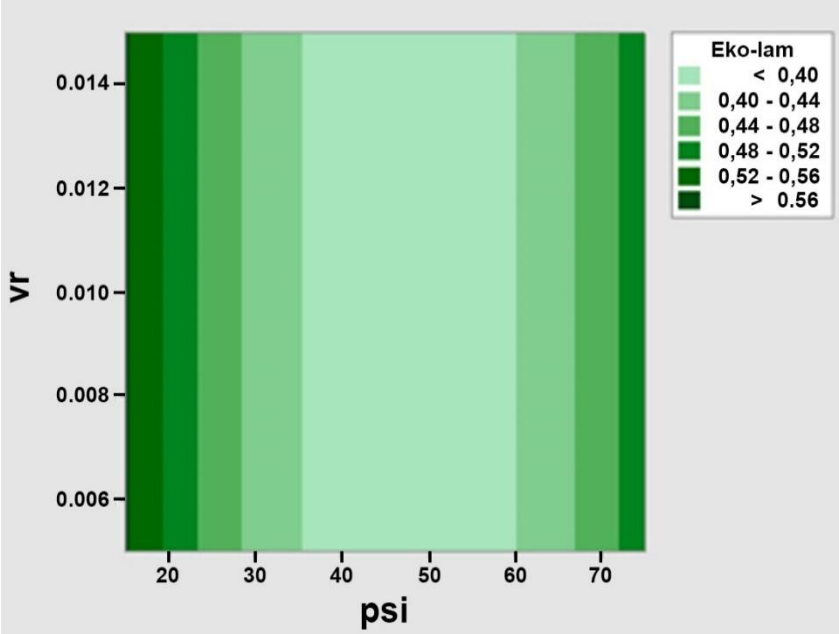


Figure 2. Optimal lambda values for cylinder velocity (vr) and geometry parameter ((ψ))

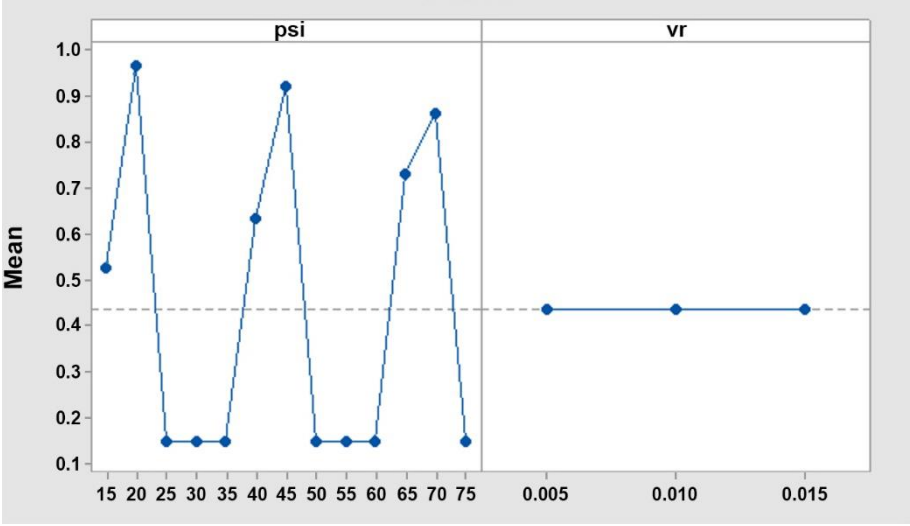


Figure 3. Main effect of cylinder velocity (vr) and geometry parameter ((ψ))

When the Figures 2 and 3 are examined together with the numerical results presented in the appendix, it can be said that the numerical magnitude of the "angular acceleration" term does not have a significant

impact on determining the optimum point, due to its relatively small magnitude. However, considering the capacities and reach distances of cranes in the industry (400 ton.m, >60m), it can be said that the crane itself can reach significant dimensions with its own inertia. Therefore, more detailed studies are planned for high-capacity cranes.

As can be seen in the results, in some cases, optimal value of λ can go as low as 0.15, indicating that it is highly dependent on the selected ψ angle. Therefore, it was concluded that the optimum values obtained in this study are more suitable for use in telescopic cranes where the load is lifted by using pulleys while the boom is kept still.

4.Conclusions

This study primarily focused on the optimization of the lifting mechanism in a knuckle joint boom crane, with the main objective of maximizing the moment arm and minimizing acceleration through the application of the Particle Swarm Optimization (PSO) method. The analysis underscored the critical influence of the (ψ) angle on determining the optimal lambda (λ) value. It was observed that λ varies within the range of 0.15 to 0.9, depending significantly on changes in ψ, highlighting the interdependency between these two parameters in achieving an optimal lifting configuration. Moreover, the results indicated that cylinder speed has a negligible impact on the determination of the optimal λ value. This finding suggests that within the studied operational range, dynamic effects related to speed do not substantially alter the optimal geometrical parameters, thereby simplifying the control requirements for the system. A key conclusion drawn from the study is the importance of minimizing variation in the moment arm throughout the lifting process. Maintaining a consistent moment arm contributes to improved load stability and more efficient energy usage during crane operation. The optimal configuration for effective and stable lifting was found to generally occur when the ψ angle lies between 40° and 50°, with a corresponding λ value approaching 1. This combination provides a favorable balance between mechanical advantage and control stability, which is essential for safe and efficient crane performance.

The focus of the current study is to obtain the geometric dimensions based on bioinspired approach and manufacturers expectations. However, these solutions covers only the lifting mechanism. It is obvious that optimal geometrical dimensions may vary depending on the weighting factors preferred by scenario.

5.Acknowledgement

The authors would like to express their gratitude to Hidrokon Hydraulic Machinery Company for their support.

6.Conflict of Interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

7.Authors' Contributions

All authors contributed to the article and approved the submitted version.

8.References

Abid M., Akmal MH., Wajid HA. Design optimization of box type girder of an overhead crane. Transactions of Mechanical Engineering 2015; 39(M1): 101–112.

Arumugam MS., Rao MVC., Tan AWC. A novel and effective particle swarm optimization-like algorithm with extrapolation technique. Applied Soft Computing 2009; 9: 308–320.

Bagheri M., Zhu SP., Ben Seghier MEA., Keshtegar B., Trung NT. Hybrid intelligent method for fuzzy reliability analysis of corroded X100 steel pipelines. Engineering Computations 2021; 37: 2559–2573.

Belot G. Absolutely no free lunches!. Theoretical Computer Science 2020; 845: 159–180.

Chen Z., Li T., Xue X., Zhou Y., Jing S. Fatigue reliability analysis and optimization of vibrator baseplate based on fuzzy comprehensive evaluation method. Engineering Failure Analysis 2021; 127: 105357.

Clerc M. The swarm and the queen: Towards the deterministic and adaptive particle swarm optimization. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 6–9 July 1999, pages 1951–1957, IEEE, Washington, DC, USA.

Dan ZXW., Yao-Hui W. Improved optimization design of four-linkage mechanism in hydraulic support. Coal Mine Machinery 2009; 1–3.

Dawood T., Elwakil E., Novoa HM., Delgado JFG. Soft computing for modeling pipeline risk index under uncertainty. Engineering Failure Analysis 2020; 117: 104949.

Dong-yun W., Guan C. Optimal control for a parallel hybrid hydraulic excavator using particle swarm optimization. Advances in Mechanical Engineering 2013; Article ID 831564.

Dui H., Song J., Zhang YA. Reliability and service life analysis of airbag systems. Mathematics 2023; 11: 434.

Erden A. Computer automated access to the 'F.E.M. rules' for crane design. Anadolu University Journal of Science and Technology 2002; 3(1): 115–130.

Fang J., Gao Y., Sun G., Xu C., Li Q. Multiobjective robust design optimization of fatigue life for a truck cab. Reliability Engineering & System Safety 2015; 135: 1–8.

Guo J., He H., Sun C. Analysis of the performance of aerial work platform working device based on virtual prototype and finite element method. CUE2016- Applied Energy Symposium and Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Systems, Energy Procedia, 2016, 104: 568–573.

Jianguo W., Bo Q., Wenxing Z., Bin Y. Hydraulic support four-bar linkage optimized design based on particle swarm optimization. 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 2012; IEEE, China.

Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Networks, 27 November–01 December 1995, vol. 4, pages 1942–1948, IEEE, Perth, WA, Australia.

Li W., Gao L., Xiao M. Multidisciplinary robust design optimization under parameter and model uncertainties. Engineering Optimization 2020; 52: 426–445.

Mladenović P., Todorović M., Zdravković N., Marković G. Cross section optimization of an auto crane articulated boom using metaheuristic optimization algorithms. Proceedings of the XXV International Conference MHCL, 18–19 September 2024, Wien, Austria.

Moravec P., Rudolf P. Application of a particle swarm optimization for shape optimization in hydraulic machinery. EPJ Web of Conferences, 12 May 2017, 143: 02076.

Naka S., Genji T., Yura T., Fukuyama Y. A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation. IEEE Transactions on Power Systems 2003; 18: 60–68.

Oblak M., Harl B., Butinar B. Optimal design of hydraulic support. Structural and Multidisciplinary Optimization 2000; 20(1): 76–82.

Plotnikov L. Preparation and analysis of experimental findings on the thermal and mechanical characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine for modelling and machine learning. Mathematics 2023; 11: 1967.

Prebil I., Kragna S., Ciglarič I. Synthesis of four-bar mechanism in a hydraulic support using a global optimization algorithm. Structural and Multidisciplinary Optimization 2002; 24(3): 246–251.

Ratnaweera A., Halgamuge SK. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficient. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 2004; 8: 240–255.

Shi Y., Eberhart RC. A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 4–9 May 1998, pages 69–73 Anchorage, Alaska, USA.

Stephen JDG., Banerjee A., Lahiri A., Mehta I. Optimization of cross section of mobile crane boom using lagrange multiplier's method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018; 402.

Sun G., Zhang H., Fang J., Li G., Li Q. A new multi-objective discrete robust optimization algorithm for engineering design. Applied Mathematical Modelling 2018; 53: 602–621.

Tan Y., Zhan C., Pi Y., Zhang C., Song J., Chen Y., Golmohammadi AM. A hybrid algorithm based on social engineering and artificial neural network for fault warning detection in hydraulic turbines. Mathematics 2023; 11: 2274.

Volianiuk VO., Gorbatyuk I., Mishchuk DO. The inertial loads of a telescopic boom of a truck crane. Common Problems of Automobile Transport, Automobile Transport 2021; 49: 54–62.

Wolpert DH., Macready WG. No free lunch theorems for optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1997; 1(1): 67–82.

Wu J., Wu D. Integrated design of an active heave compensation crane with hydrostatic secondary control. Oceans 2018, pages 409–415 MTS/IEEE Charleston, USA.

Xian J., Su C. Stochastic optimization of uncertain viscous dampers for energy-dissipation structures under random seismic excitations. Mechanical Systems and Signal Processing 2022; 164: 108208.

Xu X., Chen X., Liu Z., Yang J., Xu Y., Zhang Y., Gao Y. Multi-objective reliability-based design optimization for the reducer housing of electric vehicles. Engineering Optimization 2021; 1–17.

Xu X., Chen X., Liu Z., Xu Y., Zhang Y. Reliability-based design for lightweight vehicle structures with uncertain manufacturing accuracy. Applied Mathematical Modelling 2021; 95: 22–37.

Xue Y., Deng Y. Extending set measures to orthopair fuzzy sets. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 2022; 30: 63–91.

Ye TL., Li M., Liu XL. Optimal design of four-bar mechanism in hydraulic support. Coal Mine Machinery 2009; 37–39.

Yuan R., Tang M., Wang H., Li H. A reliability analysis method of accelerated performance degradation based on Bayesian strategy. IEEE Access 2019; 7: 169047–169054.

Zhang D., Zhang J., Yang M., Wang R., Wu Z. An enhanced finite step length method for structural reliability analysis and reliability-based design optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization 2022; 65: 231.

Zdravković N., Gašić M., Savković M., Marković G. Load analysis of the articulating boom sections of the mobile elevating work platform in relation to the operator basket position. 10th International Conference RaDMI, 16–19 September 2010, Donji Milanovac, Serbia.

Zdravković N., Petković Z., Gašić M., Savković M. Research of deflection–payload dependence of the auto crane articulated boom. Proceedings of the XX International Conference MHCL'12, 2012, pages 101–106, Belgrade Serbia

Zhu SP., Keshtegar B., Bagheri M., Hao P., Trung NT. Novel hybrid robust method for uncertain reliability analysis using finite conjugate map. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2020; 371: 113309.

9. Appendix: Numerical results

ψ	vr	λ_{opt}	Ang. acc. $\ddot{\theta}$
15	0,005	0,525321757	7,49956E-12
15	0,01	0,525321524	2,99982E-11
15	0,015	0,525321298	6,7496E-11
20	0,005	0,964966017	2,19442E-11
20	0,01	0,964966006	8,77769E-11
20	0,015	0,964965995	1,97498E-10
25	0,005	0,15	4,05567E-13
25	0,01	0,15	1,62227E-12
25	0,015	0,15	3,6501E-12
30	0,005	0,15	9,68778E-15
30	0,01	0,15	3,87511E-14
30	0,015	0,15	8,719E-14
35	0,005	0,15	-6,88855E-13
35	0,01	0,15	-2,75542E-12
35	0,015	0,15	-6,1997E-12
40	0,005	0,633319041	1,09584E-11
40	0,01	0,633318873	4,38336E-11
40	0,015	0,633318703	9,86256E-11
45	0,005	0,921751243	1,9037E-11
45	0,01	0,92175122	7,61481E-11
45	0,015	0,92175119	1,71333E-10
50	0,005	0,15	7,65808E-13
50	0,01	0,15	3,06323E-12
50	0,015	0,15	6,89227E-12
55	0,005	0,15	-2,77807E-13
55	0,01	0,15	-1,11123E-12
55	0,015	0,15	-2,50026E-12
60	0,005	0,15	-5,04878E-13
60	0,01	0,15	-2,01951E-12
60	0,015	0,15	-4,5439E-12
65	0,005	0,730173454	1,44998E-11
65	0,01	0,730173332	5,79994E-11
65	0,015	0,730173218	1,30499E-10
70	0,005	0,862318825	1,40982E-11
70	0,01	0,862318781	5,63926E-11
70	0,015	0,862318731	1,26883E-10
75	0,005	0,15	1,04273E-12
75	0,01	0,15	4,17094E-12
75	0,015	0,15	9,38461E-12

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 379-390, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 379-390, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Kıyı Kesimlerinde Vandalizmin Değerlendirilmesi: Ordu İli Örneği

Melike ÇAKMAK[1], Eda ŞENTÜRK[2*], Pervin YEŞİL[3]

[1]Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Bölümü Yüksek Lisans öğrencisi, 52200, Ordu
[2]Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Bölümü Yüksek Lisans öğrencisi, 52200, Ordu
[3] Ordu Üniversitesi Ziraat Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 52200, Ordu

[1]https://orcid.org/0009-0007-5739-9330
[2]https://orcid.org/0009-0002-4888-7037
[3]https://orcid.org/0000-0003-4395-6881
*Sorumlu yazar: edasenturk653@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 03.03.2025
Kabul tarihi: 05.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Kıyı parkları
Davranış analizi
Peyzaj donatı elemanları
Bitkisel materyal
Kamusal alan tahribatı

ÖZ

Çağımızın önemli sorunlarından biri haline gelen vandalizm, engellenmediği takdirde çevreye zarar veren, estetik değerleri bozan ve maddi kayıplara yol açan bir eylem olarak karşımıza çıkmaktadır. Kentlerde giderek artan bir sorun hâline gelen vandalizm, kamusal alanlarda hem çevresel hem de sosyal boyutlarıyla ele alınması gereken önemli bir konudur. Bu çalışmada, kullanıcıların kıyı alanlarında yer alan oturma elemanları, aydınlatma direkleri, çöp kutuları, korkuluklar, bitkisel materyaller ve zemin kaplamaları gibi kentsel donatılara hangi şekillerde (çizme, boyama, kırma, bükme vb.) zarar verdikleri analiz edilmiştir. Araştırma kapsamında Ordu ili kent merkezinde yer alan üç farklı kıyı bölgesi (Rıhtım–Teleferik İstasyonu güzergahı, Teleferik İstasyonu–Gazi Köprüsü güzergahı ve Akyazı sahili) seçilmiş ve bu alanlarda doğrudan gözlem ile fotoğraflama yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda vandalizme daha fazla maruz kalan alanlar tespit edilmiş ve zarar gören unsurlar detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Özellikle oturma elemanları, aydınlatma donatıları ve duvar yüzeylerinin en fazla tahrip edilen ögeler olduğu belirlenmiştir. Kullanıcı yoğunluğu ve erişilebilirliğin fazla olduğu alanlarda vandalizmin daha yaygın olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma, kamusal kıyı alanlarında vandalizmin mekânsal dağılımını ortaya koymakta ve benzer alanlarda vandalizm riskini azaltmaya yönelik çözüm önerileri geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Evaluation of Vandalism in Coastal Areas: The Example of Ordu Province

Research Article

Article History:
Received: 03.03.2025
Accepted: 05.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Coastal parks
Behavioral analysis
Landscape reinforcement elements
Plant material
Destruction of public spaces

ABSTRACT

Vandalism, which has become one of the major problems of our time, is an act that damages the environment, destroys aesthetic values, and causes material losses if not prevented. Vandalism, which is becoming an increasingly serious problem in cities, is an important issue that needs to be addressed in public spaces in terms of both its environmental and social dimensions. In this study, the ways in which users damage urban fixtures such as seating elements, lighting poles, trash cans, railings, plant materials, and floor coverings in coastal areas (e.g., scratching, painting, breaking, bending, etc.) were analyzed. Within the scope of the research, three different coastal areas (the Pier–Cable Car Station route, the Cable Car Station–Gazi Bridge route, and the Akyazı coast) located in the city center of Ordu Province were selected, and direct observation and photography methods were used in these areas. Based on the data obtained, areas more exposed to vandalism were identified, and the damaged elements were evaluated in detail. It was determined that seating elements, lighting fixtures, and

wall surfaces were the most damaged elements. It was observed that vandalism was more prevalent in areas with high user density and accessibility. The study reveals the spatial distribution of vandalism in public coastal areas and contributes to the development of solutions aimed at reducing the risk of vandalism in similar areas.

To Cite: Çakmak M., Şentürk E., Yeşil P. Kıyı Kesimlerinde Vandalizmin Değerlendirilmesi: Ordu İli Örneği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 379-390.

1. Giriş

Kentlerin yaşanabilirliğini artırmak ve sürdürülebilirliğini sağlamak, kent ile kentli arasındaki ilişkinin dengeli ve bilinçli bir şekilde kurulmasıyla mümkündür. Bu ilişkinin sağlıklı kurulması, yalnızca fiziksel planlamayla değil, aynı zamanda kullanıcı davranışlarının kamusal mekânlara etkilerinin anlaşılmasıyla da doğrudan ilişkilidir (Baltutar ve Artar, 2022). Kentsel alanların korunması ve kullanıcılar tarafından benimsenmesi, çevresel kalitenin sürdürülebilirliğini destekleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Günümüzün önemli kentsel sorunları arasında yer alan ve etkisini giderek daha fazla hissettiren vandalizm; yalnızca çevre kalitesini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda ciddi maddi kayıplara da yol açmaktadır (Sakıcı, 2022). Kentleşme süreciyle birlikte önemli bir sorun olarak ortaya çıkan vandalizm, kentin ortak kullanım alanlarına yönelik zarar verme eylemleri olarak tanımlanmaktadır. Özellikle doğal ve kültürel değerlere, eşyalara ve sanat eserlerine yönelen bu eylemler, düzensiz ve kontrolsüz bir dürtünün sonucudur. Bu dürtü, "bir yöne doğru hareket etme" anlamına gelen saldırganlık (aggression) dürtüsünden kaynaklanmaktadır (Şahin ve ark., 2019).

Namba ve Dustin (1992), vandalizmi bir nesnenin ya da alanın estetik veya ekonomik değerini kasıtlı olarak düşüren fiziksel hareketler olarak tanımlamaktadır. Öğülmüş (1995), ise vandalizmi tahripçilik olarak ele almakta ve kamu mallarına ya da bireylerin mallarına yönelik saldırganca davranışlar sergileme eğilimi olarak ifade etmektedir. Bu eylemler, başkalarına ait mallara zarar verme amacı taşıyan saldırganca davranışlar biçiminde tanımlanmaktadır. Özellikle doğal ve kültürel değerlere, sanat eserlerine, yapılara, eşyalara ve nesnelere yönelik, yakıcı, yok edici ve kontrolsüz bu dürtü, saldırganlık dürtüsünün bir türevidir (Akyol, 2006; Olgun, 2013).

Vandalizm; sosyolojik, psikolojik ve ekonomik sonuçlar doğuran önemli bir sorun olup, sosyal etmenler, sosyo-psikolojik faktörler ve mekânsal özellikler gibi çeşitli değişkenlere bağlı olarak ortaya çıkmaktadır (Topaloğlu, 2021). Eğitim eksikliği, bireylerin mekâna yönelik aidiyet ve sahiplenme duygusunun eksikliği, nüfus yoğunluğu, yetersiz kent içi aydınlatma ve yoğun kamusal kullanım gibi unsurlar, vandalizmin başlıca nedenleri arasında sayılmaktadır. Vandalizm eylemleri arasında duvarlara yazı yazmak, park mobilyalarına zarar vermek (kazıma, yakma, kırma), park ve bahçelerdeki bitkileri sökme veya ezme, refüjlerdeki bitkileri tahrip etme gibi davranışlar yer almaktadır (Saliyeva ve Juraboyev, 2023). Bu tür eylemler; bireylerin rekreatif ihtiyaçlarını karşılamalarını engellemekte, yapısal ve bitkisel unsurların onarımı ya da yeniden kullanımı kimi zaman imkânsız hale gelmektedir. Bunun yanı sıra, vandalizmin neden olduğu zararlar yüksek onarım maliyetlerine yol açmakta, kazalara ve diğer suçlara zemin hazırlamakta ve kent estetiği açısından ciddi bir görsel kirlilik oluşturmaktadır (Aslan, 2018).

Maslow'un ihtiyaçlar hiyerarşisi, insan ihtiyaçlarını fizyolojik ihtiyaçlardan başlayarak kendini gerçekleştirme ihtiyacına kadar beş temel kategoride sınıflandıran kapsamlı bir model sunmaktadır. Bu modele göre, bireyler temel ihtiyaçlarını karşılayamadıklarında psikolojik ve sosyal sorunlar yaşayabilirler. Vandalizm, bu bağlamda, bireylerin özellikle saygınlık ve ait olma gibi üst düzey ihtiyaçlarını karşılayamamaktan kaynaklanan bir davranış olarak değerlendirilebilir. Stollard (2003), tarafından yapılan çalışmada, vandalizmin genellikle önceden planlanmamış, anlık tepkiler sonucu ortaya çıkan bir davranış olduğunu göstermektedir. Bu durum, vandalizmin altında yatan nedenlerin karmaşık ve çok boyutlu olduğunu ve bireylerin o anki duygusal durumları, çevresel faktörler ve sosyal etkileşimler tarafından şekillendiğini vurgulamaktadır.

Toplumun ortak kullanımına açık alanlar olan kamusal mekânlar, kullanma olgusu aracılığıyla tanımlanmakta ve işlev kazanmaktadır. Ancak, bu alanların ortak kullanımıyla birlikte kötüye kullanım ve zarar verme eğilimleri de gündeme gelmektedir (Akyol, 2006; Onay ve ark., 2024). Kamusal alanlarda sosyal donatı elemanlarına kullanıcılar tarafından verilen zararlar; kırma, çizme, bozma, ezme, sökme ve boyama gibi eylemlerle kendini göstermektedir. Bu zararlar, bireylerin rekreatif ihtiyaçlarını karşılamalarını engellemekte ve kamuya yönelik zararların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca, yapısal ve bitkisel materyallerde değişiklik yapılmasını gerektiren yüksek onarım maliyetlerine yol açmaktadır (Yavuzer, 1998; Olgun, 2013; Sağlık ve ark., 2020).

Kamusal alanlar arasında yer alan kıyı alanları ise estetik, rekreatif ve sosyal yönleriyle kentliler için cazip mekânlar olmakla birlikte, yüksek kullanıcı yoğunluğu nedeniyle fiziksel tahribata en açık alanlardan biridir (Köse, 2024). Özellikle yaz aylarında artan nüfus hareketliliği, bu alanlarda gözlemlenen vandalizm davranışlarını artırmaktadır. Bu nedenle kıyı alanlarında gerçekleşen vandalizm eylemlerinin analiz edilmesi hem mekânsal sürdürülebilirlik hem de çevre bilinci açısından büyük önem taşımaktadır.

Ordu ili Altınordu kıyı kesiminde vandalizmin etkilerinin incelendiği bu çalışmada; alan üç farklı bölgeye ayrılmış, vandalizm etkileri gözlemlenmiş ve fotoğraflanmıştır. Elde edilen veriler tablo haline getirilerek analiz edilmiş ve mevcut vandalizm eylemleri değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı olarak kıyı kesiminin seçilmesinin nedeni, bu alanların yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip olması ve kamusal kullanım açısından büyük öneme sahip olmalarıdır. Kıyı alanları, kentliler için estetik, rekreatif ve sosyal değerler taşırken aynı zamanda vandalizme karşı savunmasız alanlar olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, kıyı kesiminde gerçekleşen vandalizm eylemlerinin incelenmesi, mekânsal sürdürülebilirlik ve çevre bilinci açısından önemli bir gereklilik olarak görülmüştür.

2. Materyal ve Metot

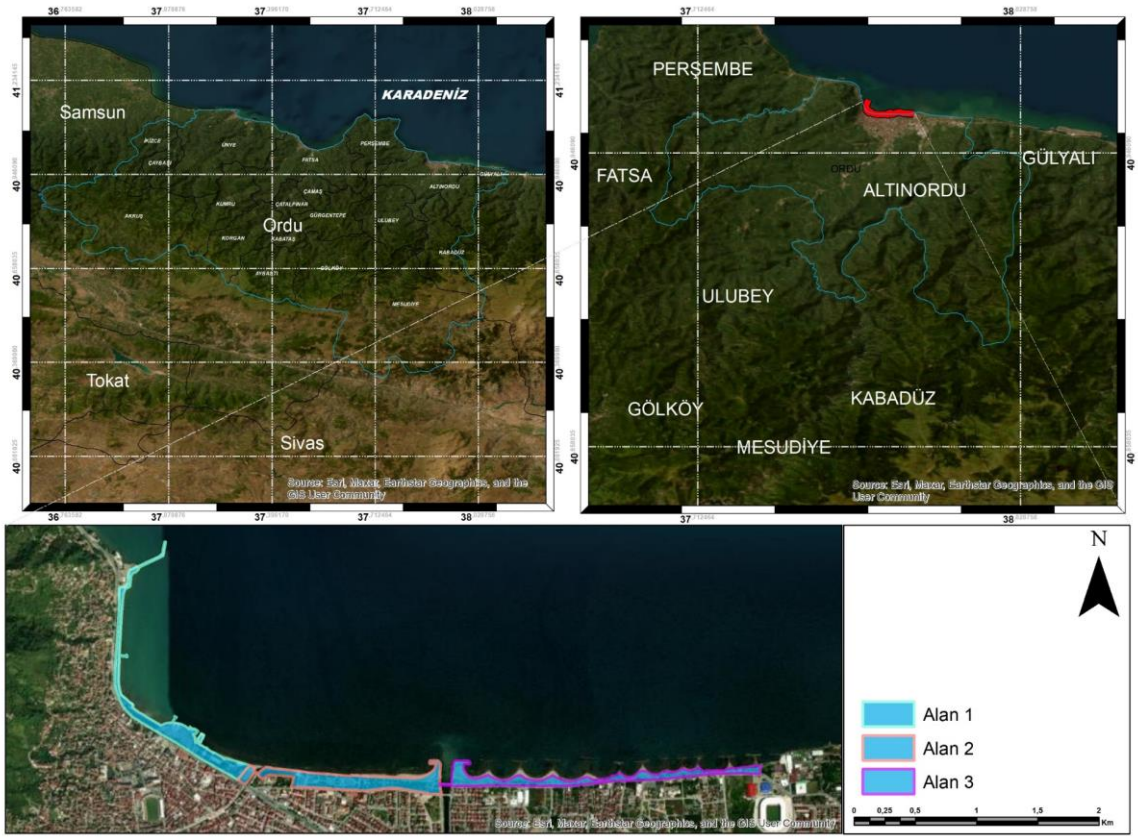
Çalışma alanı olarak seçilen Ordu ili Altınordu ilçesi, Ordu ilinin merkez ilçesi olup, Karadeniz Bölgesi'nde 41°08'-40°20' kuzey enlemleri ile 36°40'-38°06' doğu boylamları arasında bulunmaktadır. 2023 yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine göre, Ordu'nun toplam nüfusu 775.800, Altınordu ilçesinin nüfusu ise 225.349'dur. İlin yüzölçümü 5,861 km²'dir (NVİ, 2023). Çalışma alanı,

Altınordu ilçesi kıyı kesiminde yer almakta olup, toplamda 272,241 m² büyüklükte alan kaplamaktadır. Kent merkezinde tüm kıyı şeridi çeşitli rekreasyonel aktiviteler sunmaktadır. Akarsular doğal sınırlar olarak kıyı şeridini üç farklı bölgeye ayırmakta ve bu bölgeler birbirinden oldukça farklı karakteristikler sergileyen rekreasyon alanları olarak karşımıza çıkmaktadır. Her bir alan, kendine özgü donatı elemanları ve kullanım biçimleri ile kentin farklı kullanıcı ihtiyaçlarına hizmet etmektedir.

Alan 1 (Rıhtım – Teleferik İstasyonu güzergahı): Yürüyüş ve gezinti yolları ile bu yollar üzerinde konumlandırılmış açık ve kapalı oturma mekanlarının yoğunlukta olduğu alan. Başlıca donatı elemanları; korkuluk, yer döşemesi, aydınlatma direği, bank, tel koruyucu, şemsiye direkleri, iskele zemini, oturma grubu, spor aletleri, bilgilendirme tabelası, çöp kutusu, yetişkin ağaçlar, kayalıklar, kaykay pisti, pergola direği ve elektrik panosudur.

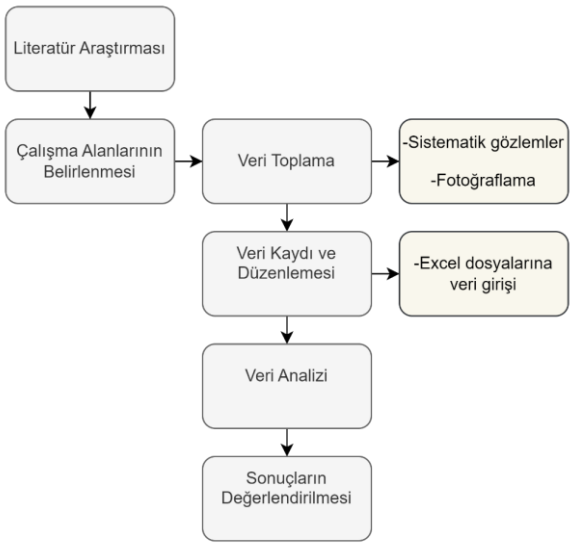
Alan 2 (Teleferik İstasyonu – Gazi Köprüsü güzergahı): Çocuk oyun alanı ve spor aletleri içeren, kentin en büyük park alanı olan Tayfun Gürsoy Parkı'nı da içine alan karma kullanıma sahip alan. Bu alandaki donatılar; duvar, süs salıncağı direği, spor aleti, çocuk oyun alanı, yetişkin ağaç ve bank olarak belirlenmiştir.

Alan 3 (Akyazı sahili): Plaj ve cankurtaran gözlem kulesi, piknik alanları gibi kullanımları barındıran sahil bölgesi. Donatı elemanları; cankurtaran gözlem kulesi, yer döşemesi, aydınlatma direği, bank, tel korkuluk, oturma grubu, ahşap korkuluk, yetişkin ağaçlar, kayalık, pergola direği ve istinat duvarından oluşmaktadır.



Şekil 1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Ordu ili Altınordu kıyı kesiminde vandalizmin etkilerini incelemek amacıyla nitel araştırma yöntemi çerçevesinde yürütülmüştür (Şekil 2). Araştırmanın temel veri toplama aracı olarak saha gözlemleri ve fotoğraflama yöntemi kullanılmıştır. Veriler, 16-26 Aralık 2024 tarihleri arasında üç farklı çalışma alanında toplanmıştır.



Şekil 2. Metot Akış Şeması

Çalışma öncesinde yapılan literatür taramasında, benzer araştırmaların genellikle parklar ve yeşil alanlar gibi kamusal açık mekânlarda gerçekleştirildiği; veri toplama yöntemi olarak ise sistematik gözlem ve fotoğraflamanın tercih edildiği belirlenmiştir (Şahin ve ark., 2019; Sağlık ve ark., 2020). Bu çalışmalarda, vandalizm eylemleri çoğunlukla çizme, boyama, kırma, bükme gibi fiziksel zarar türleriyle tanımlanmış ve ilgili veriler görsel materyallerle belgelenmiştir.

Bu araştırmada da benzer bir yöntem izlenmiştir. Üç farklı kıyı rekreasyon alanında yer alan tüm fiziksel unsurlar (bitkisel ve yapısal öğeler dâhil), vandalizme maruz kalma durumları açısından sistematik biçimde gözlemlenmiş ve fotoğraflarla belgelenmiştir. Her bir alan için ayrı Excel dosyaları oluşturularak, zarar gören ögeler ve zarar türleri detaylı biçimde kaydedilmiş, sınıflandırılmıştır. Elde edilen veriler, çalışmanın amacına uygun şekilde vandalizmin mekânsal dağılımını ve en çok etkilenen öğe türlerini ortaya koymak üzere kategorik analiz yöntemiyle değerlendirilmiştir.

3. Bulgular

Bu çalışmada, Ordu ili Altınordu ilçesi kıyı kesimlerinde yer alan üç farklı çalışma alanında vandalizmin etkileri incelenmiştir. Çalışma alanlarında yapılan gözlemler, mekânsal kullanımların nitelikleri, kullanıcıların davranış biçimleri ve vandalizm eylemlerinin yoğunluk alanları belirlenmiştir. Ayrıca, bu alanların sahip oldukları rekreatif özellikler ve mevcut kullanım şekilleri doğrultusunda vandalizmin etkileri analiz edilmiştir. Her bir alan, fiziksel özellikleri ve rekreatif kullanımları göz önünde bulundurularak detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

3.1. Alan 1: Rıhtım-Teleferik İstasyonu

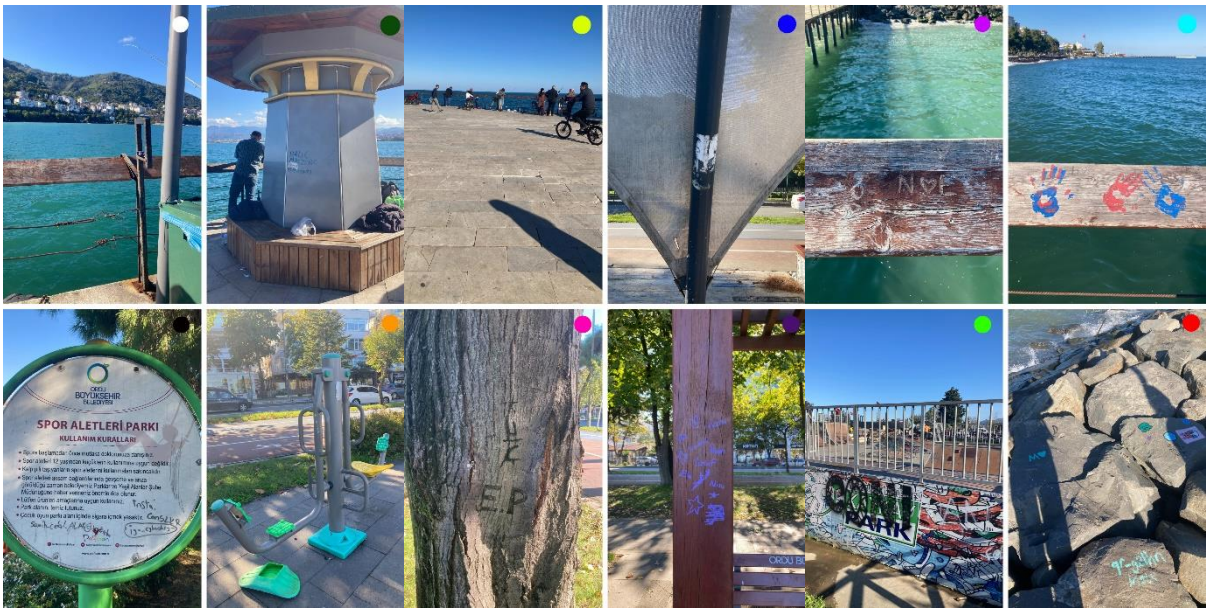
Atatürk Bulvarı sınırı olan bu çalışma alanının toplam yüz ölçümü 90,169 m²'dir. Bu alan daha çok yürüyüş, bisiklet sürme, müze ziyareti, tören gibi rekreatif amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır.

Tablo 1. Alan 1'de görülen vandalizm etkileri

Ziyaret alanı	Peyzaj donatı elemanı/ Bitkisel materyal vb.	Vandalizm eylemi
Alan 1	Korkuluk	Kazıma, boyama
	Yer döşemesi	Çökme
	Aydınlatma elemanı direği	Yazma, çizme
	Bank	Yazma, çizme, kazıma
	Tel koruyucu	Eğme, bükme
	Şemsiye direkleri	Reklam yapıştırma
	İskele zemini	Tekerlek izi bırakma
	Oturma grubu	Reklam yapıştırma
	Spor aletleri	Kırma
	Bilgilendirme tabelası	Boyama
	Çöp kutusu	Boyama, kazıma
	Yetişkin ağaçlar	Kazıma
	Kayalık	Yazma, boyama
	Kaykay pisti	Boyama, kazıma
	Pergola direği	Yazma, kazıma
	Elektrik panosu	Yazma, boyama

Alan 1'de yapılan gözlemler sonucunda vandalizmi daha çok otopark çevresi, rıhtım ve iskelelerde görmekteyiz. Yaygın olarak rastlanılan vandalizm zararlarının başında, yazma, boyama ve kazıma etkileri gelmektedir. Bunun başlıca sebebi bu eylemlerin gerçekleştiği yerler diğerlerine göre daha sık kullanılmakta olmasıdır (Şekil 3).

Şekil 3. Vandalizm örneklerinin alındığı noktalar



Şekil 4. Alan 1'de karşılaşılan vandalizm zararlarına örnekler (*•, •: Yazı Yazılmış ve reklam yapıştırılmış pergola ve oturma grubu; •, •, °: iskele korkuluklarına yazma, kazıma, boyama işlemleri ve tel koruyucuları eğme, bükme; •: yer döşemesine kaldıracağından fazla yük ile zarar vermek; •: zarar görmüş spor aletleri; •: boyama yapılmış pergola direği; •: ağaç gövdesine kazınarak yapılmış yazı ve işaretler; •: kayalıklardaki yazılar ve çizilmiş şekiller •: kaykay pistindeki yazı ve çizimler; •:Bilgilendirme tabelasına yazılan yazılar).*

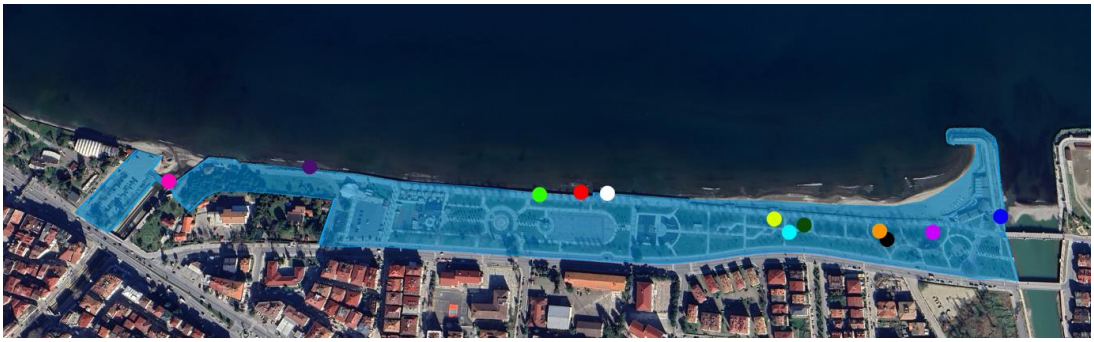
3.2. Alan 2: Teleferik İstasyonu- Gazi Köprüsü

Mehmetçik Bulvarı sınırı olan bu çalışma alanının toplam yüz ölçümü 100,401 m^2'dir. İçerisinde, 2 adet otopark, köprü, camii, spor alanları, savaş uçağı, dalgakıran, büfe ve kafeler bulunmaktadır. Bu alan daha çok yürüyüş, bisiklet sürme, spor yapma, fuar alanı, çocuk oyun alanı ve kumsalı rekreatif amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır.

Tablo 2. Alan 2'de görülen vandalizm etkileri

Ziyaret alanı	Peyzaj donatı elemanı/ Bitkisel materyal vb.	Vandalizm eylemi
Alan 2	Duvar	Yazma, boyama
	Süs salıncağı direği	Yazma
	Spor aleti	Yazma, kırma
	Çocuk oyun alanı	Boyama
	Yetişkin ağaç	Yazma, boyama, yakma, kazıma
	Bank	Çizme, yazma, kazıma, yakma

Alan 2'de yapılan gözlemler sonucunda vandalizmi daha çok çocuk oyun alanı ve yetişkin ağaçların olduğu kesimde görmekteyiz. Yaygın olarak rastlanılan vandalizm zararlarının başında, yazma, boyama ve kazıma etkileri gelmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Vandalizm örneklerinin alındığı noktalar

Şekil 6. Alan 2'de karşılaşılan vandalizm zararlarına örnekler (•, •, •, •: Yazma, kazıma, boyama gibi zararlar gören yetişkin ağaçlar; °, •: banklara yapılan yakma, kazıma, yazma işlemleri; •: yazı yazılan oyun ekipmanı; •, •: kayalıklardaki yazılar ve çizilmiş şekiller; •, •: duvara ve su borusuna yazılan yazılar; •: spor aletlerine verilen zarar).

3.3. Alan 3: Akyazı sahili

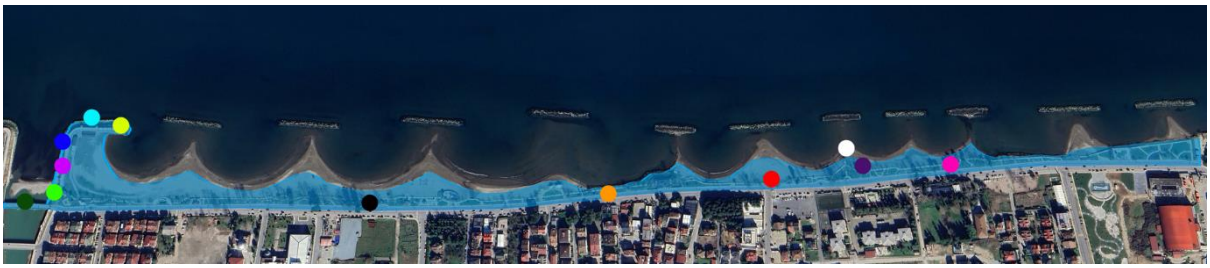
Orgeneral Halil İbrahim Fırtına bulvarına sınırı olan bu çalışma alanının toplam yüz ölçümü 81,671 m^2'dir. İçerisinde, dalgakıranlar, köprü, halk plajı, spor alanları, büfe ve kafe bulunmaktadır. Bu alan daha çok yürüyüş, bisiklet sürme, yüzme, spor yapma ve alanın kumsalı rekreatif amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır.

Tablo 3. Alan 3'te görülen vandalizm etkileri

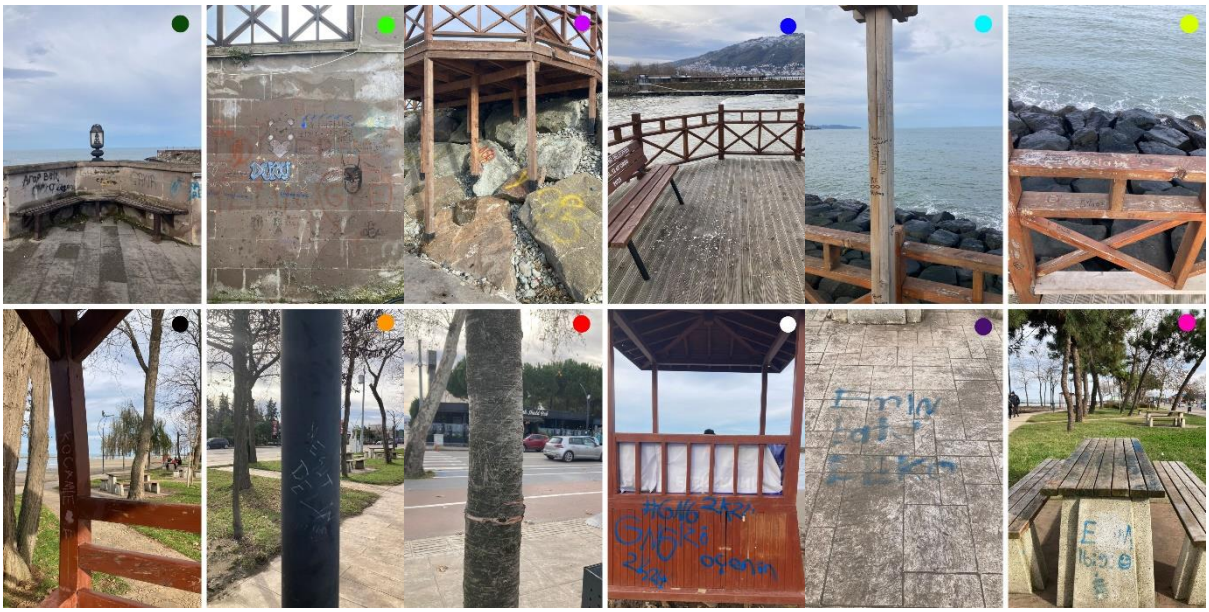
Ziyaret alanı	Peyzaj donatı elemanı/ Bitkisel materyal vb.	Vandalizm eylemi
Alan 3	Cankurtaran gözlem kulesi	Yazma, boyama
	Yer döşemesi	Boyama, yazma, tekerlek izi bırakma, çöp atma
	Aydınlatma elemanı direği	Çizme, kazıma, yapıştırma
	Bank	Yazma, boyama, çizme, çöp atma
	Tel korkuluk	Gevşetme, eğme
	Oturma grubu	Boyama, kazıma, yazma
	Ahşap korkuluk	Kazıma, yazma
	Yetişkin ağaçlar	Boyama, çizme, kazıma
	Kayalık	Boyama

	Pergola direği	Çizme
	İstinat duvarı	Yazma, boyama, çizme

Alan 3'te yapılan gözlemler sonucunda vandalizmi daha çok dalgakıranda, ahşap donatılara ve kumsala yapıldığını görmekteyiz. Yaygın olarak rastlanılan vandalizm zararlarının başında, yazma, boyama, kazıma, çöp atma etkileri gelmektedir. Bunun başlıca sebebi bu eylemlerin gerçekleştiği yerler diğerlerine göre daha sık kullanılması ve manzara noktasına sahip olmasıdır (Şekil 7).



Şekil 7. *Vandalizm örneklerinin alındığı noktalar*



Şekil 8. Alan 3'te karşılaşılan vandalizm zararlarına örnekler (•, •, •: Yazma, boyama ve çöp atılan oturma grupları; •, •: aydınlatma direğine yazı yazma; •: ahşap korkuluğa yazma, kazıma eylemi; •: çöp atma; •: yer döşemesine yapılan yazı yazma eylemi; •: kayalıklara yapılan boyama eylemi; •: yetişkin ağaçlara yapılan kazıma eylemi; •: köprü altındaki duvara yazma, boyama eylemi; °: cankurtaran gözlem kulesine yapılan yazma eylemi).

4. Sonuç ve Tartışma

Vandalizm, kamu veya özel mülkiyete kasıtlı olarak zarar verme eylemi olarak tanımlanmaktadır (Madani ve ark., 2024). Bu eylemler, sadece maddi hasara yol açmakla kalmaz, aynı zamanda kentsel yaşamın birçok boyutunu olumsuz etkileyen bir dizi soruna da neden olmaktadır.

Vandalizm, öncelikle görsel kirliliğe yol açmaktadır. Yazı yazma, karalama, çöp atma gibi vandalizm eylemleri, kentlerin estetik görünümünü bozar ve yaşam kalitesini düşürür. Ayrıca, vandalizm

eylemleriyle erişimin kısıtlandığı alanlar oluşur. Kırılan aydınlatma direkleri, korkuluklara zarar verme gibi durumlar, vatandaşların hareket özgürlüğünü sınırlar ve güvenlik sorunlarına yol açmaktadır (Wu ve ark., 2020). Vandalizmin bir diğer önemli etkisi ise maliyettir. Hasar gören kamu veya özel mülklerin onarımı için büyük miktarda kaynak harcanması gerekir. Bu da zaten kısıtlı olan kamu kaynaklarının verimsiz kullanılmasına neden olur. Son olarak, vandalizm, kentlerde güvensizlik hissini artırır (Yavuz ve Kuloğlu, 2011). Özellikle gece saatlerinde, vandalizmin yoğun olduğu bölgelerde insanlar kendilerini güvende hissetmezler. Bu durum, sosyal etkileşimleri azaltır ve toplumsal dokuyu zayıflatır. Vandalizm sadece bir suç değil, aynı zamanda kentsel yaşamın birçok boyutunu olumsuz etkileyen bir sosyal problemdir. Bu sorunun çözümü için, sadece cezai yaptırımlar değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve kültürel faktörlerin de göz önünde bulundurulduğu kapsamlı bir yaklaşım benimsenmelidir.

Donatı elemanlarının malzeme özellikleri, vandalizm eylemlerinin türlerinin ortaya çıkmasında önemli bir faktördür. Ahşap malzemeden üretilmiş donatı elemanları, diğer malzeme türlerine kıyasla kazıma, yazma, yakma, çizme ve boyama gibi vandalizm eylemlerine daha yüksek oranda maruz kalmaktadır (Olgun ve Yılmaz, 2015).

Çalışmanın bulguları, Alan 1'in yoğun olarak vandalizme maruz kaldığını, bunu sırasıyla Alan 3 ve Alan 2'nin takip ettiğini ortaya koymaktadır. Şahin ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan benzer bir çalışmada da kent merkezine yakın parkların, kırsal alanlara kıyasla daha fazla zarar gördüğü tespit edilmiştir. Bu da mekânsal yoğunluğun vandalizm üzerindeki etkisini desteklemektedir. Bu farkın temel nedenleri arasında, Alan 1'in daha merkezi bir konumda bulunması, yoğun yaya sirkülasyonuna sahip olması ve çok sayıda rekreasyonel donatı elemanı içermesi yer almaktadır. Alanın hem gündüz hem de gece kullanılıyor olması, görece az gözetim ve yüksek kullanıcı çeşitliliği, vandalizm riskini artırıcı unsurlar olarak değerlendirilebilir.

Alan 2'de gözlemlenen vandalizm eylemleri, donatı elemanlarından ziyade bitkisel materyaller üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle ağaç gövdelerinde yakma ve çizme izlerinin bulunması, bitki örtüsünün bu alanda vandalizmin başlıca hedefi hâline geldiğini göstermektedir. Bu zararlar; çalı gruplarının ezilmesi, çiçek parterlerinin tahrip edilmesi gibi diğer eylemlerle birlikte değerlendirildiğinde, alandaki bitkisel peyzajın kullanıcı müdahalesine açık bir biçimde kurgulandığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Sağlık ve arkadaşlarının (2020) yürüttüğü çalışmada, bitkisel öğelerin, vandalizme karşı en savunmasız peyzaj bileşeni olduğunu vurgularken, bu öğelerin peyzaj alanı içerisindeki yerleşim biçiminin kullanıcı davranışları üzerinde belirleyici rol oynadığını belirtmiştir. Bu bağlamda, Alan 2'deki peyzaj tasarımının kullanıcı yönlendirmesi açısından yetersiz kaldığı; gölgelik alanlar oluşturan büyük ağaçların ve kolay erişilebilir çiçek parterlerinin koruma altına alınmaması nedeniyle bitkisel materyale zarar verme eylemlerinin kolaylaştığı söylenebilir.

Hasar görmüş peyzaj donatı elemanları, bitkisel materyaller ve diğer unsurlar, yalnızca peyzaj alanının estetik değerini olumsuz etkileyerek görsel bozulmalara yol açmakla kalmaz, aynı zamanda kullanıcılar için sunulan hizmetlerin çeşitliliği ve kalitesini de sınırlamaktadır. Bu durum, peyzaj alanının belirlenen

amaçlarına ulaşmasını engelleyerek, kullanıcı memnuniyetsizliğine ve çevresel olumsuzluklara yol açabilmektedir.

Vandalizmin azaltılması adına, aktif olarak kullanılan kıyı parkları gibi çalışma alanlarında, insanların bu alanları kullanım alışkanlıklarının gözlemlenmesi, tasarım sürecinde dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biridir. Ayrıca, iklim koşullarına uygun bitki türlerinin seçilmesi, dayanıklı malzemelerin kullanımı ve donatıların yerleşim planlarının dikkatlice yapılması da vandalizmin önlenmesinde etkili olabilecek stratejilerdir.

Peyzaj alanlarının tasarımında, kullanıcı yoğunluğuna ve mekânın kullanım amacına göre uygun mekân sınırlarının belirlenmesi, alanların kullanım sıklığına dair bilgi toplama, uyarı levhalarının yerleştirilmesi ve yönlendirme işaretlerinin varlığı gibi önlemler, vandalizmin engellenmesine yardımcı olabilir. Ayrıca, düzenli periyotlarla gerçekleştirilen alan bakımları da mekânların temiz ve bakımlı kalmasını sağlayarak, kullanıcıların bu alanlara karşı duyduğu saygıyı artırabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Akyol E. Kent mobilyaları tasarım ve kullanım süreci. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 138, İstanbul, Türkiye, 2006.

Aslan H. Vandalizmin azaltılmasında peyzaj tasarım kriterlerinin belirlenmesi. Mesleki Bilimler Dergisi (Mbd) 2018; 7(2): 74-82.

Baltutar B., Artar M. Yaşanabilir bir kent mümkün mü? Bartın örneğinde araştırma. Book of Full Text 2022.

Köse SD. Kentsel dönüşümde kıyı tasarımı ve düzenlemelerinde kullanıcı odaklı yaklaşımların araştırılması. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:217, İstanbul, Türkiye, 2024.

Madani J., Nemati V., Mostafazadeh R., Ashja H. Factors influencing and controlling vandalism by tourists and local indigenous communities at the Fandoghlou forest natural site. Journal of Outdoor Recreation and Tourism 2024; 48: 100830.

Namba R., Dustın D. Towards new definitions of depreciative behavior and vandalism, United States Department of Agriculture Forest Service, General Technical Report PNW-QTR-293 November, pp. 1992; 61-69.

NVİ. T.C. Nüfus ve Vatandaşlık İşleri Genel Müdürlüğü. 2024. Ordu il nüfusu. https://www.nvi.gov.tr/ordu/ordu-nufusu (Erişim Tarihi:18.12.2024)

Olgun R. Kentsel yeşil alanlarda vandalizm ve olası tasarım çözümlerinin Antalya örneğinde incelenmesi. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:130, Antalya, Türkiye, 2013.

Olgun R., Yılmaz T. Kentsel yeşil alanlarda vandalizm ve olası tasarım çözümleri: Antalya kenti örneği. Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi 2015; 12(03): 27-39.

Onay B., Sava B., Şahin C. Parklarda vandalizm etkileri: Tekirdağ Çerkezköy örneği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 15(1): 1-10.

Öğülmüş S. Vandalizm (Tahripçilik) veya toplumda çevreye karşı bir manifesto. İlim ve Sanat Dergisi, 1995; 39: 76-79.

Sağlık A., Uruk Ö., Sağlık E., Kelkit A. Gelibolu tarihi alanı ziyaret noktalarında bulunan peyzaj donatı elemanlarında vandalizm. Turkish Journal of Landscape Research 2020; 3(2): 77-88.

Sakıcı Ç. Kentsel yeşil alanlarda vandalizm ve vandalizmi etkileyen faktörlerin belirlenmesi. İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi 2022; 12(25): 18-28.

Saliyeva D., Juraboyev MO. Smır yoshıdagı bolalarda vandalızımnıng rıvojlanıshı. Namangan Davlat Universiteti Ilmiy Axborotnomasi 2023; (8): 687-693.

Stollard P. Crime prevention through housing design. Taylor & Francis, 2003.

Şahin C., Onay B., Evci A. Kentsel açık ve yeşil alanlarda vandalizmin incelenmesi: Isparta Ayazmana ve Gökçay mesire alanları örneği. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019; (17): 198-205.

Topaloğlu AA. Peyzaj tasarım kriterleri ile vandalizm ilişkisinin kent parkları örneğinde incelenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:195, 2021.

Yavuz A., Kuloğlu N. An experimental study on vandalism: Trabzon Parks. Scientific Research and Essays 2010; 5(17): 2463-2471.

Yavuzer Y. Niğde ilindeki öğretmenlerin okul tahripçiliğine karşı ideolojik yönelimleri. Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Eğitimin Psikolojik Temelleri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 103, Ankara, Türkiye, 1998.

Wu JH., Lin HW., Liu WY. Ulusal Orman Parkı'nda turistlerin çevresel vandalizmi ve bilişsel uyumsuzluğu. Kentsel Ormancılık Ve Kentsel Yeşillendirme 2020; 55: 126845.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 391-415, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 391-415, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Akdeniz Meyve Sineği *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae)'nın Malatya (Türkiye) İli Kurutmalık Kayısı Alanlarındaki Zarar Potansiyeli

Talip YİĞİT[1*], Mehmet SÖNMEZ[2], Mehmet KARACAOĞLU[3], Bennur YİĞİTER[4], Abdullah DEMİR[5], Yusuf KARAKUŞ[6], Ahmet KAVMAZ[7], Özgül İYİGÜN ŞAHİN[8]

[1,3] Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bitki Koruma Bölümü, Malatya
[2,5,6,8] Kayısı Araştırma Enstitüsü, Malatya
[4] Tekirdağ Bağcılık Araştırma Enstitüsü, Tekirdağ
[7] Gap Uluslararası Tarımsal Araştırma ve Eğitim Merkezi Müdürlüğü, Diyarbakır

[1]https://orcid.org/0000-0002-4871-9132
[2]https://orcid.org/0000-0003-3825-0585
[3]https://orcid.org/0000-0003-1837-9381
[4]https://orcid.org/0000-0001-9830-2741
[5]https://orcid.org/0009-0001-0744-2544
[6]https://orcid.org/0000-0002-5992-1926
[7]https://orcid.org/0000-0001-5185-3394
[8]https://orcid.org/0009-0000-0559-9030
*Sorumlu yazar: talip.yigit@ozal.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 23.06.2025
Kabul tarihi:07.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Ceratitis capitata
Kayısı
Kışlama durumu
Malatya
Popülasyon takibi
Zarar potansiyeli

ÖZ

Akdeniz meyve sineği (AMS) *Ceratitis capitata* Wied. adaptasyon yeteneği yüksek polifag bir zararlı olup Türkiye'de yoğun bulunduğu Akdeniz ve Ege Bölgeleri'nden iç bölgelere doğru yayılış alanı genişlemektedir. Bu genişleme iç bölgelerindeki meyvecilik açısından tehdit oluşturmaktadır. Karasal iklimin görüldüğü Malatya ili Türkiye'de kayısı yetiştiriciliğinde önemli bir merkez olup aynı zamanda tek başına dünya kuru kayısı üretiminin yaklaşık %60'ını gerçekleştirmektedir. AMS'nin Malatya ili kayısı alanlarındaki popülasyon takibi ve zarar durumunu belirlemesi çalışmaları, yoğun yetiştiriciliğinin yapıldığı sekiz ilçede birer bahçede iki yıl süreyle (2021- 2022) yapılmıştır. Ayrıca kuru kayısı hasadından sonra olgunlaşan bazı meyve türlerindeki zarar durumları ve mücadele zamanları belirlenmiştir. AMS'nin ildeki kışlama durumunun belirlenmesi için Akçadağ, Battalgazi, Kale ve Yeşilyurt ilçelerinde (745 m, 747 m, 1030 m, 1038 m rakımlı) dört lokasyonda kafesler kurularak kışlama durumu izlenmiştir. Popülasyon takibi sonucu her iki yılda ilk ergin yakalanma Yeşilyurt ilçesinde haziran ayının son haftası olarak belirlenmiştir. Popülasyonun en yoğun olduğu ilçeler sırasıyla Yeşilyurt, Battalgazi ve Kale olmuştur. 2021 yılında tüm ilçelerde zararlı tespit edilirken 2022 yılında Doğanşehir, Kale ve Yazıhan ilçelerinde zararlı tespit edilmemiştir. Tuzaklarda elde edilen ergin sayıları, meteorolojik veriler ve kayısının fenolojik dönemleri birlikte değerlendirilerek AMS'nin kayısı yetiştirilen alanlarda zarar oluşturabilecek popülasyon seviyesine ulaşmadığı ve kuru kayısı yetiştiriciliğinde şu an için ciddi tehdit oluşturmadığı belirlenmiştir. Ancak Battalgazi ve Yeşilyurt ilçelerinde yerleşim yerine yakın bahçelerde hasadın aşırı geciktirildiği durumlarda zarar oluşturma potansiyelinin olduğu tespit edilmiştir. AMS'nin Malatya ilindeki takibi yapılan dört lokasyonda da kışı geçiremediği belirlenmiş olup başlangıç popülasyonunun başka illerden gelen bulaşık meyvelerle olduğu kanısına varılmıştır. AMS'nin Battalgazi ve Yeşilyurt ilçelerinde yılda ortalama üç döl verme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma ile elde edilen sonuçlar AMS'nin bölgede yetiştiriciliği yapılan kayısı ve diğer meyvelerdeki tehlikesine dikkat çekmekte ve önemli bir ihraç ürünü olan kuru kayısıya tehdit oluşturmaması

için karar mercilerine veriler sunmaktadır.

Damage Potential of Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) in Dried Apricot Fields in Malatya (Türkiye)

Research Article

Article History:
Received: 23.06.2025
Accepted: 07.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Ceratitis capitata
Apricot
Overwintering
Malatya
Population monitoring
Damage potential

ABSTRACT

The Mediterranean fruit fly (medfly) *Ceratitis capitata* Wied. is a polyphagous pest with high adaptability and its distribution area is expanding from the Mediterranean and Aegean regions to the interior of Türkiye. This spread poses a threat to fruit cultivation in the inland regions. Malatya province, which has a continental climate, is a significant centre for apricot cultivation in Türkiye and also accounts for about 60% of the world's dried apricot production. Population monitoring and damage assessment in apricot orchards in Malatya province were carried out over two years (2021-2022) in an orchard in eight districts where intensive cultivation is practised. Additionally, the damage conditions of some fruit species that ripen after the harvest of dried apricots were assessed. To determine the overwintering status of medflies in the province, cages were set up at four locations in Akçadağ, Battalgazi, Kale, and Yeşilyurt districts (altitude: 745 m, 747 m, 1030 m, 1038 m). As a result of population monitoring, the first catch of adults in both years was recorded in the last week of June in the Yeşilyurt district. The districts with the highest population density were Yeşilyurt, Battalgazi and Kale respectively. In 2021, pests were detected in all districts, whereas in 2022, no pests were detected in the districts of Doğanşehir, Kale, and Yazıhan. By jointly evaluating the number of adults found in the traps, the meteorological data and the phenological periods of the apricot, it was determined that the medfly has not reached the population level that can cause damage in the apricot growing areas and does not pose a serious threat to the cultivation of dried apricots for the time being. However, in Battalgazi and Yeşilyurt districts, it has been found to have the potential to cause damage if the fruit harvest is excessively delayed in orchards near settlements. The medfly was found to be unable to overwinter in all four monitored sites in Malatya province, and it was discovered that the original population had been introduced with infected fruits from other provinces. It was found that the medfly in Battalgazi and Yeşilyurt districts is capable of producing an average of three offspring per year. The results of this study highlight the danger of medfly in apricots and other fruits grown in the region and provide data for decision makers to prevent medfly from threatening dried apricot, which is an important export product.

To Cite: Yiğit T., Sönmez M., Karacaoğlu M., Yiğiter B., Demir A., Karakuş Y., Kavmaz A., Şahin Öİ. Akdeniz Meyve Sineği *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae)'nın Malatya (Türkiye) İli Kurutmalık Kayısı Alanlarındaki Zarar Potansiyeli. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 391-415.

1. Giriş

Dünyada yaklaşık 562.000 ha alanda üretilen 4 milyon ton civarındaki yaş kayısının 829 bin tonu Türkiye'de olup bu üretim miktarı ile Türkiye %21'lik pay ile birinci sırada yer almaktadır. Türkiye'yi Özbekistan, İran ve İtalya takip etmektedir (FAO, 2022). Türkiye, dünya kuru kayısısının %60'ını üreten ve aynı zamanda kayısı ihracatında öne çıkan bir ülkedir (INC, 2019). Türkiye yaş kayısı üretimi miktarının %54'ünü Malatya ve ilçeleri karşılamakta olup bölge için önemli bir gelir kaynağıdır (TÜİK, 2024). Türkiye'de üretilen kuru kayısının da yaklaşık %85'i Malatya ilinde üretilmektedir (Gunduz ve ark., 2021). Malatya ilinin yanı sıra Elazığ, Kahramanmaraş, Erzincan ve Sivas illerinin bazı bölgelerinde de kurutmalık kayısı üretimi yapılmaktadır. Erkenci sofralık kayısı

yetiştiriciliği bakımından Akdeniz Bölgesi'nde İçel, Hatay, Adana ve Antalya, Ege Bölgesi'nde İzmir ve çevresi; orta mevsim sofralık kayısı yetiştiriciliğinde Doğu Anadolu'da Kars ve Iğdır büyük öneme sahiptir (Demirtaş ve ark., 2006). Kayısı yetiştiriciliğinde üretimi kısıtlayan faktörlerin başında bitki koruma sorunları gelmektedir. Bu zararlılardan biri olan Akdeniz meyve sineği (AMS), *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) Afrika orijinli olup buradan tropik ve subtropik bölgelere yayılmış, diğer meyve sineklerine göre serin iklime sahip bölgelere adaptasyon sağlama yeteneği yüksek, polifag bir zararlıdır. Kuzey ve Güney Afrika (Uganda, Zambia, Kenya, Tanzanya, Zimbabwe), Kuzey, Güney ve Orta Amerika (Brezilya, Hawaii, Florida, California, Arjantin'in batı kesimi, Bermuda, Costa Rica, Uruguay), Batı Avustralya gibi tropik ve subtropik iklime sahip bölgelerde, Asya'da (Filistin, İran, Suudi Arabistan, Irak, Ürdün, Lübnan, Yemen ve Suriye), Avrupa'da (Ukrayna, Rusya, Arnavutluk, Portekiz, Türkiye, Fransa, İspanya, Yunanistan'da ve özellikle Akdeniz'e komşu birçok ülkede) yaygın bir türdür (Papadopoulos ve ark., 1998; Vera ve ark., 2002; Ricalde ve ark., 2012; Szyniszewska, 2014; Gilioli ve ark., 2022; Rao ve ark., 2024; Anonymous, 2025). Daha soğuk bölgelere de yayıldığı ve bu alanlarda ya davranışlarıyla ya da fiziksel mekanizmalarını geliştirerek uyum sağladığı, kışlama biyolojisinin bilinenlerin dışına çıktığı ve normal yaşam alanlarının dışında da rapor edildiği bildirilmiştir (Kaya ve ark., 2017; Kaya ve İpekdal, 2018). Genellikle sıcak iklimlere adaptasyonuyla bilinen AMS iklim değişikliklerinde meydana gelen değişiklikler nedeniyle daha serin alanlara uyum göstermeye başladığı, geniş adaptasyon kapasitesi nedeniyle küresel ölçekte kontrol altına alınması gereken önemli bir zararlı olduğu belirtilmiştir (Hendrichs ve ark., 2021; Gilioli ve ark., 2022). Zararlı, Türkiye'de ise son yıllarda Akdeniz ve Ege sahil bölgelerinde büyük epidemiler oluşturmakta ve hiç beklenmedik yerlerde de önemli ekonomik kayıplar meydana getirmektedir (Satar ve ark., 2016). Dünya üzerinde 350'den fazla konukçusu olduğu bildirilen AMS başta turunçgiller, trabzon hurması, nar, kayısı, şeftali, nektarin, incir ve erik gibi ürünler olmak üzere pek çok üründe zarara neden olan polifag bir karantina zararlısıdır (Weems, 1981; Liquido ve ark., 1991; 2017; Woods ve ark., 2005; Thomas ve ark., 2010; Kılıç, 2015; Anonim; 2022). Konukçu tercihleri bölgelere göre değişiklik gösterebilir (Mau ve Kessing, 2007). Kayısının AMS'ye karşı şeftali, erik ve elmadan daha duyarlı bir meyve olduğunu belirten çalışmalar bulunmaktadır (Darwish, 2016).

Türkiye'de AMS ile ilgili birçok çalışma (Demirdere, 1961; İleri, 1961; Zümreoğlu, 1979; Özkan, 1993; Başpınar ve ark., 2007; Elekçioğlu, 2009; Kasap ve Aslan, 2016; Satar ve Tiring, 2016; Satar ve ark. 2016; Tiring ve Satar, 2017; Atar, 2025) yapılmış olmasına rağmen Malatya ili kayısı alanlarında az sayıda çalışma bulunmaktadır (Buğday ve Keçeci 2020). AMS'nin dış karantinada sıfır toleransı olması ve Malatya'da üretilen kayısıların büyük bölümünün ihracata yönelik olması nedeniyle AMS kayısı yetiştiriciliği için bir risk oluşturmaktadır. Artan ulaşım ve ticaret imkanları nedeniyle zararlı organizmaların yeni bir bölgede ortaya çıkarak epidemiler meydana getirmesi; bitki, çevre ve insan sağlığını aynı anda koruma çalışmalarını güçleştirmektedir (Birişik ve ark., 2018). Tarımsal ürünlerin yurtiçindeki hareketinin artması, uzayan vejetasyon periyodu ve küresel ısınma nedeniyle Akdeniz

meyve sineğinin de yayılış alanı ve tehdidi artmış, mücadelesi daha da zorlaşmıştır. Malatya'da iklimin Akdeniz meyve sineğinin biyolojisine uygun olmadığı düşünüldüğü halde zararlı görülmektedir. Bunun sebebi AMS'nin yılın uzun bir döneminde şehir dışından getirilen bulaşık ürünlerle gelerek geçici popülasyonlar oluşturması (Buğday ve Keçeci, 2020) veya iklimsel değişikliklerin avantajlarından yararlanarak (Laamari ve ark., 2022) adaptasyon sağladığı olarak değerlendirilebilinir. Bu nedenlerden dolayı AMS'nin kuru kayısı yetiştiriciliğindeki risk durumunun belirlenerek oluşabilecek risklere önlem alınması gerekebilir.

Çalışma ile AMS'nin Malatya ilinde kuru kayısıda risk oluşturma durumu araştırılmış olup kayısı yetiştiriciliğinin yoğun olduğu ilçelerde popülasyon takibi yapılarak yoğunlukları belirlenmiş ve döl verimi yorumlanmıştır. Zararlının kışlama durumu ortaya çıkarılarak geleceğe yönelik mücadele metodlarının belirlenmesine katkı sağlanmak amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın materyali AMS larva, pupa ve erginleri, zararlı takibinin yapıldığı Hacıhaliloğlu çeşitli kayısı bahçeleri, kışlama ve popülasyon takibi için kullanılan bulaşık meyve örnekleri (kayısı, alıç, armut, ayva, böğürtlen, dut, elma, hünnap, iğde, kızılcık, kiraz, nektarin, şeftali, trabzon hurması ve üzüm), feromon tuzakları (Delta tipi tuzak + yapışkan tabla + Trimedlure içeren feromon kapsül), kültür kavanozları, tül kafesler, çeşitli laboratuvar aletleri ve sarf malzemeleridir.

2.1. Kayısıda Yapılan Fenolojik Gözlemler

Akdeniz meyve sineği kayısıda ben düşme döneminden başlayarak hasada kadar olan süre içerisinde vuruk yapabilmektedir. Bu nedenle AMS ile mücadele zamanının bitkinin fenolojisi ile birlikte değerlendirilmesi amaçlanmıştır (Anonim, 2025). Malatya'nın Akçadağ, Battalgazi, Darende, Doğanşehir, Hekimhan, Kale, Yazıhan ve Yeşilyurt ilçelerinde kurutmalık Hacıhaliloğlu çeşidi ile kurulu birer bahçede kayısının fenolojik dönemlerinden çiçeklenme başlangıcı, ben düşme ve hasat dönemleri kaydedilmiştir. Ağaçlarda çiçeklerin %5-10'unun açtığı dönem ilk çiçeklenme olarak kabul edilmiştir (Yılmaz, 2008). Meyvede ilk renklenmenin başladığı dönem (ben düşme), meyvenin tüm tadımsal yeme özelliklerini kazandığı dönem ise hasat dönemi olarak kabul edilmiştir (Meier ve ark.,1994; Pérez-Pastor ve ark., 2004).

Geç olgunlaşan sofralık çeşitler üzerinde yapılan fenoloji takibi Malatya Kayısı Araştırma Enstitüsü Müdürlüğünün Battalgazi ve Yeşilyurt'taki gen kaynakları parsellerinde bulunan Levent ve Özal çeşitleri üzerinde yapılmıştır. Malatya ilinde ticari amaçlı geç olgunlaşan kayısı çeşitleri ile kurulu bir bahçe bulunmamaktadır. Bu çalışmadaki amaç geç olgunlaşan çeşitlerle üretim yapılması durumunda AMS'nin etkisini görmek ve buna göre çeşit seçiminde önerilerde bulunmaktır.

2.2. Akdeniz Meyve Sineğinin Kışı Geçirme Durumunun Belirlenmesi

Akdeniz meyve sineğinin Malatya ilindeki kışlama durumunu belirleme çalışmaları farklı rakımlarda bulunan Akçadağ, Battalgazi, Kale ve Yeşilyurt ilçelerinde birer bahçede yürütülmüştür. Çalışmanın yürütüldüğü bahçelerin bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Bu ilçelerde zararlının son neslinin geçirildiği meyve ağaçlarının taç iz düşümleri altında kültür kafesleri hazırlanmıştır. Bu amaçla toprak yüzeyinin 10 cm derinliğine gömülen 1 m (en) × 1 m (boy) × 50 cm (yükseklik) ebatlarında tüm yüzeyleri tül ile kapatılan ve üst tarafı fermuarlı olan kültür kafesleri yerleştirilmiştir (Şekil 1). Her kafes içerisine 40-50 adet enfekteli meyve konulmuştur. Kafesler 2020 yılında ekim ayının son haftasında konulmuş olup iki haftada bir kontrol edilmiştir. 2021 yılının mayıs ayının ilk haftasından itibaren her kafesin içerisine bir adet AMS feromon tuzağı konulmuştur. Bu aşamadan sonra kafesler haftada iki defa kontrol edilerek zararlının var olup olmadığı izlenmiştir (İleri, 1961). Tuzak feromonları ve yapışkan tablalar dört hafta arayla değiştirilmiştir. Çalışmanın yapıldığı bölgenin toprak sıcaklığı (0-10 cm derinlik), hava sıcaklıkları (maksimum, minimum ve ortalama), nisbi nem değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğüne (MGM) ait en yakın iklim istasyonlarından alınmıştır (MGM, 2020; 2021; 2022).

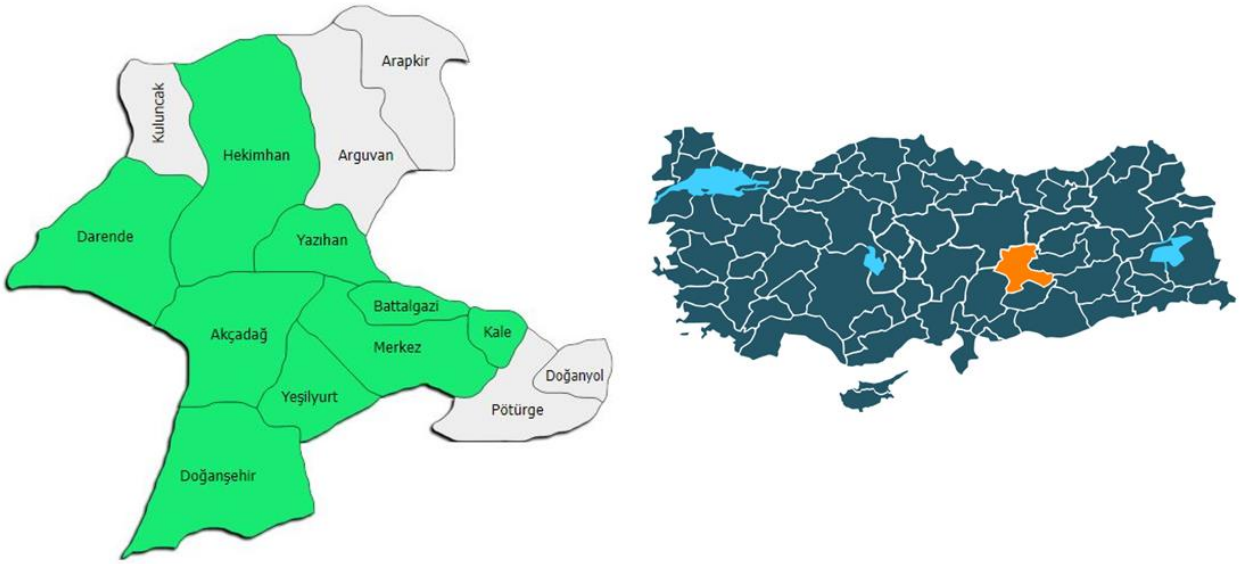
Tablo 1. Akdeniz meyve sineği'nin kışı geçirme durumunun takip edildiği bahçelerin bilgileri

Bahçenin Bulunduğu İlçe	Koordinatları		Rakımı (m)
	N	E	
Akçadağ	38º16'23.026"	38º03'52.673"	1038
Battalgazi	38º27'15.500"	38º21'09.900"	747
Kale	38º25'03.072"	38º45'36.938"	745
Yeşilyurt	38º19'21.285"	38º17'03.734"	1030

Şekil 1. Akdeniz meyve sineği'nin kışlama durumunun takip edildiği kültür kafesi

2.3. Akdeniz Meyve Sineğinin Popülasyon Takibi

Malatya'da kayısı üretiminin yoğun olduğu Akçadağ, Battalgazi, Darende, Doğanşehir, Hekimhan, Kale, Yazıhan ve Yeşilyurt ilçelerinde beş dekardan büyük birer bahçe seçilerek koordinatları, rakımları ve bahçelerdeki kayısı çeşitleri kaydedilmiştir. Bu bahçelere mayıs ayının ilk günlerinde ikişer adet feromon tuzak (Delta tipi tuzak + yapışkan tabla + Trimedlure içeren feromon kapsül) ağaçların güney yönüne yerden 1,5- 2 m yüksekliğe asılmıştır. Tuzaklar, ilk ergin yakalanıncaya kadar haftada iki, ilk ergin yakalandıktan sonra haftada bir defa kontrol edilerek sayımlar kaydedilmiştir (Tiring ve Satar, 2017; Anonim, 2022; 2025). Tuzaklarda son ergin yakalandıktan iki hafta sonrasına kadar (kasım ayı) popülasyon takibine devam edilmiştir. Feromonlar dört hafta arayla, yapışkan tablalar ise üretici firmanın tavsiyesine uygun olarak değiştirilmiştir. Popülasyon takibinin yapıldığı il ve ilçeler haritası Şekil 2'de gösterilmiştir. Popülasyon takibinin yapıldığı bahçelerin bilgileri (koordinat, rakım, çeşit) Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Akdeniz meyve sineği popülasyon takibinin yapıldığı Malatya il ve ilçeleri haritası

Tablo 2. Çalışmanın yürütüldüğü kayısı bahçelerinin bilgileri

İlçe Adı	Koordinatlar		Rakım (m)	Kayısı Çeşitleri
	N	E		
Akçadağ	38°16'23.036"	38°03'52.683"	1038	Hacıhaliloğlu
Battalgazi	38°27'16.273"	38°21'09.776"	765	Hacıhaliloğlu ve Geç olgunlaşan çeşitler (Özal, Levent)
Hekimhan	38°51'19.532"	37°59'04.971"	1439	Hacıhaliloğlu
	38 45 45 588	37 58 33 380	1083	Hacıhaliloğlu
Darende	38°28'05.793"	37°17'59.226"	1547	Hacıhaliloğlu
Doğanşehir	37°56'55.000"	37°58'03.252"	1425	Hacıhaliloğlu
Kale	38°25'03.606"	38°45'36.349"	745	Hacıhaliloğlu
	38 24 03 535	38 39 45 777	768	Hacıhaliloğlu
Yazıhan	38°34'22.034"	38°07'37.144"	881	Hacıhaliloğlu
Yeşilyurt	38°19'24.078"	38°17'07.078"	1033	Hacıhaliloğlu ve Geç olgunlaşan çeşitler (Özal, Levent)

2.4. Akdeniz Meyve Sineğinin Kayısıda Zarar Oranının Belirlenmesi

Akdeniz meyve sineğinin kayısıdaki zarar oranının belirlenmesi çalışmaları, popülasyon takibinin yapıldığı bahçelerde üç yıl boyunca yürütülmüştür. Her bahçeden hasat esnasında numuneler (ağaçların farklı yön, dal ve yükseklikten 5 meyve/ağaç x 20 ağaç = 100 adet meyve) laboratuvara getirilerek makroskobik olarak tek tek incelenmiştir. Yumurta ve larva bulunan meyveler enfekte olarak değerlendirilmiştir. Sağlam görünümlü meyveler kontrol amacıyla 24 ± 2 °C ve %50 nisbi nemde dört gün daha laboratuvarda bekletilip tekrar incelenerek içerisinde larva olanlar enfekte meyve oranına dahil edilmiştir. Enfekte meyveler 24 ± 2 °C %50 nisbi nemde pupa veya parazitoid çıkışları oluncaya kadar üzeri tül ile kaplı, tabanına vermikülit + perlit konulmuş kültür kafeslerine alınmıştır. Elde edilen pupalar topraktan elenerek tabanında 3-5 cm kalınlığında nemlendirilmiş steril kum konulmuş, havalandırma yerleri sineklik tül ile örtülen kültür kavanozlarına aktarılmıştır (Kızılyamaç,

2016). Teşhis için erginler ağız aspiratörü ile ortamdan alınarak %70' lik alkol içeren eppendorf tüplerine konularak konu uzmanlarına gönderilmiştir.

Zarar oranı çalışmaları 2020, 2021 ve 2022 yıllarında kurutmalık (Hacıhaliloğlu) ve geç olgunlaşan sofralık (Levent, Özal) çeşitlerde ayrı ayrı yapılmıştır. Enfekte meyvelerin toplamının kontrolü yapılan meyvelerin toplamına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Zarar oranının belirlenmesinde benzer çalışmalarda kullanılan aşağıdaki formül kullanılmıştır (Mamay ve ark., 2014; 2016; Mamay, 2018; Gahramanova ve Mamay, 2020).

Zarar oranı (%) = (Vuruklu Meyve Sayısı / İncelenen Toplam Meyve Sayısı) * 100

2.5. Akdeniz Meyve Sineğinin Mücadele Zamanının Belirlenmesi

Akdeniz meyve sineğinin kayısı alanlarındaki popülasyon takibinin yapıldığı bahçelerdeki feromon tuzaklarında ilk erginlerin yakalanması, popülasyon yoğunluğunun tepe noktası ile tuzakta son erginlerin yakalanma tarihi belirlenmiştir. AMS'nin biyolojisi, popülasyon yoğunluğu, kayısının fenolojik dönemleri ile meteorolojik veriler dikkate alınarak Malatya'da kayısı alanlarında AMS ile mücadele zamanları tartışılmıştır.

2.6. Akdeniz Meyve Sineği Parazitoitlerinin Belirlenmesi

Akdeniz meyve sineğinin parazitoitlerini tespit etmek için kayısıdaki zarar oranını belirleme çalışmalarında kullanılan enfekteli meyvelerden parazitoit çıkışları da takip edilmiştir. Ayrıca kayısı harici meyveler üzerinde yapılan çalışmalarda Malatya'nın Akçadağ, Battalgazi, Kale ve Yeşilyurt ilçelerinde hasat olgunluğundaki alıç, armut, ayva, böğürtlen, dut, elma, hünnap, iğde, kızılcık, kiraz, nektarin, şeftali, Trabzon hurması ve üzümden alınan örnekler laboratuvarda incelenmiştir. Enfekte meyveler kültüre alınarak parazitoit çıkışları takip edilmiştir (Tiring ve Satar, 2017; Anonim, 2022).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Kayısıda Yapılan Fenolojik Gözlemler

Kayısı ağaçlarında 2020-2022 yıllarına ait fenoljik gözlemler yapılarak Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Kurutmalık kayısıda fenolojik gözlemler

İlçeler	2020 yılı			2021 yılı			2022 yılı		
	Çiçeklenme Başlangıcı	Ben düşme Dönemi	Hasat Tarihi	Çiçeklenme Başlangıcı	Ben düşme Dönemi	Hasat Tarihi	Çiçeklenme Başlangıcı	Ben düşme Dönemi	Hasat Tarihi
Akçadağ	19 Mart	29 Haziran	16 Tem.	13 Mart	23 Haziran	6 Temmuz	24 Mart	21 Haz.	8 Temmuz
Battalgazi	10 Mart	25 Haziran	13 Tem.	7 Mart	18 Haziran	5 Temmuz	17 Mart	*	*
Darende	18 Nisan	1 Ağustos	14 Ağust.	10 Nisan	21 Temmuz	3 Ağustos	23 Nisan	19 Tem.	3 Ağustos
Doğanşehir	8 Nisan	19 Temmuz	5 Ağust.	5 Nisan	1 Temmuz	17 Temmuz	15 Nisan	8 Tem.	2 Ağustos
Hekimhan	11 Nisan	20 Temmuz	7 Ağust.	9 Nisan	1 Temmuz	18 Temmuz	19 Nisan	7 Tem.	25 Temmuz
Kale	6 Mart	8 Haziran	25 Haz.	3 Mart	6 Haziran	22 Haziran	16 Mart	16 Haz.	4 Temmuz

Yazıhan	11 Mart	18 Haziran	7 Tem.	6 Mart	22 Haziran	11 Temmuz	26 Mart	24 Haz.	6 Temmuz
Yeşilyurt	17 Mart	1 Temmuz	17 Tem.	13 Mart	29 Haziran	13 Temmuz	28 Mart	26 Haz.	10 Temmuz

* Çiçeklenmeden sonra yaşanan don zararı nedeniyle ürün hasadı yapılamamıştır.

Tablo 3 incelendiğinde, ağaçlar fenolojik dönemlerine her üç yılda da en erken Kale ilçesinde, en geç Darende ilçesinde girmiştir. Battalgazi ilçesinde 14 Nisan 2022 tarihinde hava sıcaklıklarının -4,8 °C'ye düşmesiyle (MGM, 2022) oluşan don olayı sonucu kayısı ve bazı diğer meyvelerde %100'e varan oranlarda hasar meydana gelmiştir. Bu nedenle Battalgazi'de takip edilen bahçede 2022 yılında meyve hasadı yapılamamıştır.

Geç olgunlaşan çeşitler üzerinde yapılan fenoloji takibinde, Levent ve Özal geç olgunlaşan sofralık çeşitleri yıllara ve çeşide göre değişmekle birlikte Hacıhaliloğlu kurutmalık kayısı çeşidinden 1-1,5 ay sonra hasada geldiği görülmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Geç olgunlaşan sofralık kayısı çeşitlerinde fenolojik gözlemler

İlçeler	Çeşit	2020 yılı			2021 yılı			2022 yılı		
		Çiçeklenme Başlangıcı	Ben düşme Dönemi	Hasat Tarihi	Çiçeklenme Başlangıcı	Ben düşme Dönemi	Hasat Tarihi	Çiçeklenme Başlangıcı	Ben düşme Dönemi	Hasat Tarihi
Battalgazi	Levent	8 Mart	19 Ağust	1 Eyl.	5 Mart	29 Tem.	16 Ağust.	7 Mart	*	*
	Özal	8 Mart	19 Ağust.	2 Eyl.	5 Mart	29 Tem.	15 Ağust.	7 Mart	*	*
Yeşilyurt	Levent	13 Mart	21 Ağust.	5 Eyl.	9 Mart	8 Ağust.	20 Ağust.	10 Mart	10 Ağust.	18 Ağust.
	Özal	13 Mart	21 Ağust.	4 Eyl.	9 Mart	8 Ağust.	19 Ağust.	9 Mart	8 Ağust.	18 Ağust.

* Çiçeklenmeden sonra yaşanan don zararı nedeniyle 2022'de ürün hasadı yapılamamıştır.

3.2. Akdeniz Meyve Sineğinin Kışı Geçirme Durumunun Belirlenmesi

Akdeniz meyve sineğinin kışlama durumunun belirlenmesi için metotda belirtilen çalışmalar yapılmış olup Akçadağ, Battalgazi, Yeşilyurt ve Kale ilçelerindeki hiçbir kültür kafesinde AMS ergin çıkışı olmadığı belirlenmiş ve bu ilçelerde zararlının kışı geçiremediğine karar verilmiştir. Malatya ilinin hava ve toprak sıcaklıklarının ekim-mayıs ayları arasında AMS pupalarının canlılığını koruyabildiği değerlerin altına düştüğü görülmektedir. Yıl içerisindeki meteorolojik verilere bakıldığında hava sıcaklıklarının AMS'nin gelişme eşiği olan 12,4 °C'nin üzerine çıkması en erken Kale ilçesinde nisan ayında gerçekleştiği ve sıcaklığın sonraki aylarda artarak devam ettiği görülmüştür (MGM, 2021; 2022). Meteorolojik verilere bakıldığında normal şartlarda Malatya ilinde AMS'nin nisan, mayıs, haziran, temmuz, ağustos, eylül ve ekim aylarında erginlerinin doğada görülmesi muhtemeldir. Ancak tuzaklarda yakalanan AMS sayılarına bakıldığında ilk yakalanmanın haziranın son haftasında Yeşilyurt ilçesinde ve temmuzun son haftasında Battalgazi ilçesinde olduğu hatta en ılıman iklime sahip olan Kale ilçesinde bile en erken Eylül'ün ikinci haftasında yakalandığı görülmektedir. Bu veriler birlikte değerlendirildiğinde çalışma yapılan ilçelerde AMS'nin arazi şartlarında kışı geçiremediği belirlenmiştir. Malatya ili Akdeniz, Güneydoğu Anadolu ve İç Anadolu Bölgesi iklimlerinin etkisi altındadır. Bu nedenle coğrafi olarak Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer almasına rağmen aynı bölgedeki illere göre daha ılıman bir iklime sahiptir. İlde yaz mevsimi uzun ve sıcak

olurken, kış mevsimi nispeten ılık geçmektedir. Yağışlar genellikle kış ve ilkbahar mevsiminde yoğunlaşırken, yaz mevsimi minimum seviyeye inmektedir. Yıllık sıcaklık ortalaması 14,3 ºC olup, yıllık yağış miktarı ise 365,8 mm kadardır (Tablo 5) (MGM, 2025). Hava sıcaklıklarında meydana gelebilecek değişmeler nedeniyle oluşabilecek iklimsel değişimler gelecekte bazı hastalık ve zararlıların artışına neden olacağı bildirilmektedir (Balcıoğlu ve ark., 2022). Bu nedenle önemli zararlı türlerin veya istilacı türlerin ari alanlardaki varlıkları ve popülasyon takip çalışmaları belirli dönemlerde tekrarlanarak yapılmalıdır. Böylece oluşabilecek risklere karşı daha erken önlem alınabilinir. Buğday ve Keçeci (2020) Malatya ili Battalgazi ilçesi ile Elazığ ili Baskil ilçesinde 2017 ve 2018 yıllarında yürüttükleri çalışmada zararlının arazi şartlarında kışı geçiremediklerini bildirmişlerdir. Çalışmamız ile çalışma alanımıza en yakın bölgede yapılan bu çalışmanın sonuçları paralellik göstermekte ve bölgede zararlının doğa şartlarında kışı geçiremediğini desteklemektedir. Kaya ve İpekdal (2018) yaptıkları çalışmada AMS'nin Kırşehir'de yaz aylarında çeşitli konukçularda popülasyon oluşturduğunu ve kış soğuklarında öldüğünü bildirerek ildeki oluşan geçici popülasyonların bu şekilde oluştuğunu belirtmişlerdir. Bizim çalışmamızda elde edilen sonuçlara bakıldığında AMS'nin Malatya ilindeki varlığı ve popülasyon oluşturması Kırşehir ilindeki duruma benzemektedir. Nitekim Atar (2025) AMS'nin Akdeniz Bölgesi'nden Kuzey Doğu Anadolu'ya göç serüvenini araştırdığı çalışmada zararlının Adana ve Mersin illerinden başlayarak Kuzey Anadolu'ya kadar olan illerdeki varlığını literatür bilgisi ve tarım teşkilatları ile görüşmeler yaparak takip etmişlerdir. Bu güzergahta olan ve zararlının doğal yaşamı olmayan Konya, Niğde, Aksaray, Ankara, Kırşehir, Yozgat (Kasap ve Aslan, 2016) ve Erzincan gibi illerde varlığını bildirirken buralarda kısmen geçici popülasyon oluşturarak bazı ürünlerde zararlı olduklarını bildirmişlerdir. Aynı güzergahta bulunan Nevşehir, Kırıkkale, Sivas, Erzurum ve Kars gibi illerde zararlı varlığına rastlamadıklarını bildirmişlerdir. Sunulan çalışmada zararlının Malatya ilinde zarar oluşturacak popülasyon seviyesine ulaştığı belirlenmiş olup Akdeniz'den başlayıp Kuzey Anadolu'ya uzanan bu güzergaha eklenebilir. Mansour ve Mohamad (2016) Suriye'nin bazı bölgelerinde yazın popülasyon oluşturan AMS'nin kışın görülmediğini bildirmişlerdir. Aynı zamanda çalışmalarımızda elde ettiğimiz veriler Kaya ve İpekdal (2018) ve Mansour ve Mohamad (2016)'nın çalışmalarının sonuçlarıyla paralellik göstererek Malatya ilinde de oluşan popülasyonun geçici olduğu göstermektedir. Nitekim Elekçioğlu (2009) 2-7 cm toprak derinliğindeki sıcaklığın bir haftadan fazla 2 ºC'nin altında seyretmesi halinde AMS pupaların öldüğünü bildirmiştir. Malatya ili meteorolojik verilerine bakıldığında Malatya'nın Kale ilçesi hariç diğer ilçelerinde özellikle ocak ve şubat aylarında toprak sıcaklıklarının bu derecelerin altına düştüğü görülmektedir (MGM, 2021; 2022). Bu durum AMS mücadelesinin kaynağında yapılmasının önemimi göstermektedir. AMS'nin kışı geçirebildiği Akdeniz ve Ege bölgelerinde (Tekeli ve Ağaoğlu, 2019; Tülü ve Özgökçe, 2019; Elekçioğlu, 2020; Yayla ve ark., 2022; Akgül, 2023; Gürbüz, 2024) yapılacak etkin mücadelelerle zararlının Türkiye'nin diğer bölgelerinde geçici popülasyonlar oluşturmasını engelleyebilir veya minimum seviyede kalmasını sağlayabilir.

Tablo 5. Malatya ili uzun yıllar ortalama iklim verileri (1927-2024) (MGM, 2025)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama Sıcaklık (°C)	-0,2	1,6	6,8	13	18	23,1	27,1	27,1	22,5	15,6	8	2,2	13,70
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	3,2	5,6	11,7	18,5	24	29,7	34	34	29,2	21,4	12,6	5,6	19,10
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-3,2	-2	2,3	7,6	11,9	16,3	19,9	20	15,6	10	4	-0,7	8,50
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3,3	4,5	5,7	7,2	9,3	11,5	12,5	11,8	10,1	7,5	5,3	3,2	7,70
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	10,36	10,07	10,51	10,2	9,54	4,52	0,94	0,75	1,97	6,36	8,14	10,33	83,70
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	42,4	41,1	48,8	55	45,6	17,4	3,9	3,5	8,1	35,7	41,7	40,4	383,60

3.3. Akdeniz Meyve Sineğinin Popülasyon Takibi

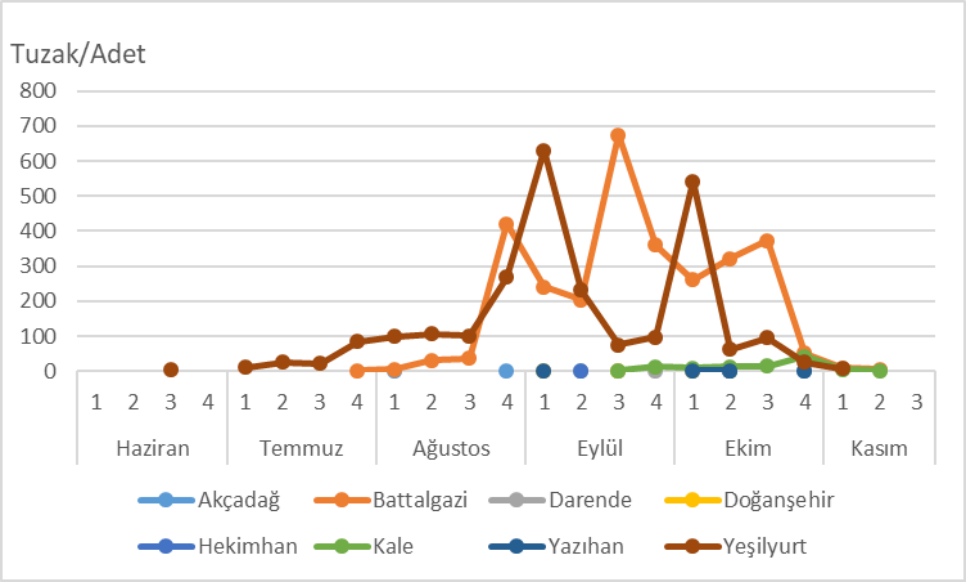
Akdeniz meyve sineğinin popülasyon takibinde, çalışmanın yapıldığı yıllara göre feromon tuzaklarda yakalanma sayıları ve popülasyon değişimleri Tablo 6, 7 ve Şekil 3, 4'te verilmiştir.

Tablo 6. Akdeniz meyve sineği erginlerinin tuzaklarda haftalık yakalanma sayıları (adet) (2021)

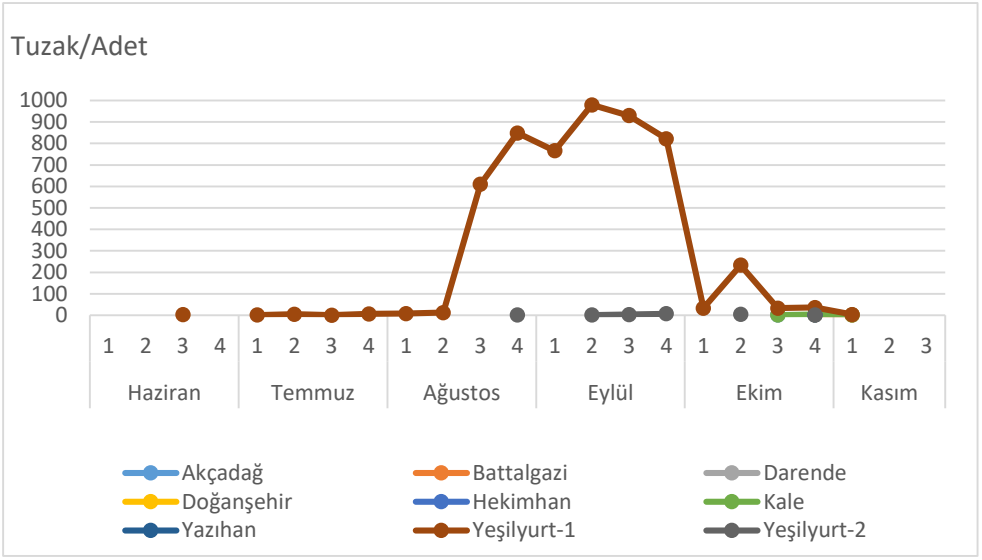
Aylar	Haziran				Temmuz				Ağustos				Eylül				Ekim				Kasım		
Hafta	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Akçadağ									1			2			1			2		1			
Battalgazi								1	5	31	37	421	241	203	675	360	261	321	373	52	9	5	
Darende														1		1		2					
Doğanşehir													1		2		1	1					
Hekimhan														1				1					
Kale															2	13	9	13	14	42	6	2	
Yazıhan													2				1	1		2			
Yeşilyurt			3		10	26	22	84	99	106	101	269	630	231	76	97	543	63	96	25	8		

Tablo 7. Akdeniz meyve sineği erginlerinin tuzaklarda haftalık yakalanma sayıları (adet) (2022)

Aylar	Haziran				Temmuz				Ağustos				Eylül				Ekim				Kasım		
Hafta	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
Akçadağ																			1				
Battalgazi																				2	1		
Darende																			3				
Doğanşehir																							
Hekimhan																							
Kale																			1	3	1		
Yazıhan																				1			
Yeşilyurt1			3		1	5	0	6	8	12	610	849	766	980	930	822	33	233	33	36	3		
Yeşilyurt2												2		1	3	7		5		1			



Şekil 3. Akdeniz meyve sineği'nin popülasyon değişimi (2021)



Şekil 4. Akdeniz meyve sineği'nin popülasyon değişimi (2022)

Tablo 6 ve Şekil 3 incelendiğinde 2021 yılı ilk ergin tespitleri haziran ayının son haftasında (29 Haziran) Yeşilyurt ilçesinde tespit edilmiştir. Buna en yakın tuzakta yakalanma bir ay sonra (28 Temmuz) Battalgazi ilçesinde görülmüştür. Popülasyon yoğunluğuna bakıldığında en yüksek sayı Yeşilyurt ilçesinde eylül ayının ilk haftasında 630 adet/tuzak ve Battalgazi ilçesinde eylül ayının üçüncü haftasında 675 adet/tuzak ile yıl içi en üst seviyelere ulaşmıştır. Çalışmanın yürütüldüğü tüm ilçelerde tuzaklarda AMS erginleri yakalandığından tüm ilçeler bulaşık sayılmıştır. Ancak tuzaklardaki yakalanma sayılarına bakıldığında Battalgazi ve Yeşilyurt ilçeleri haricindeki ilçelerde ciddi bir yoğunluk oluşmamıştır. Her iki ilçede de yıl içerisinde bir birine yakın zamanlarda üç tepe noktası oluşturduğu belirlenmiştir. Bunun sebebi bu ilçelerin merkez ilçe olmaları nedeniyle yerleşim yerlerine yakın olmalarından dolayı evsel atıklardan gelen AMS'lerin başlangıç popülasyonunu tetiklemiş olabileceği gibi kayısı dışında birçok farklı konukçuların bu ilçelerde yoğun olduğu veya

her iki durumun birlikte etkisiyle AMS popülasyonunu artırdığı şeklinde yorumlanabilir. Bu durum hakkında yorum yapabilmek için 2022 yılında yapılan çalışmalarda yerleşim yerlerinden uzakta bir bahçede daha (Yeşilyurt 2) popülasyon takibi yapılmıştır.

Tablo 7 ve Şekil 4 incelendiğinde 2022 yılı ilk ergin tespitleri haziran ayının son haftasında (28 Haziran) Yeşilyurt 1 lokasyonunda tespit edilirken yerleşim yerlerinden uzak olan Yeşilyurt 2 lokasyonunda 28 Ağustos'da yakalanmıştır. Hekimhan ve Doğanşehir ilçelerinde hiç ergin yakalanmazken, Akçadağ, Battalgazi, Darende, Yazıhan ve Kale ilçelerinde tuzaklarda ergin görülmesine rağmen yoğunlukları düşük seviyede kalmıştır. Yeşilyurt-1 parselinde popülasyon yoğunluğu 29 Ağustos, 15 Eylül ve 14 Ekim'de üç tepe noktası oluşturmuştur. Yeşilyurt 2 lokasyonunda ve diğer ilçelerde düzenli popülasyon artışının olmadığı belirlenmiştir.

Çalışmanın yapıldığı her iki yılın verileri birlikte değerlendirildiğinde AMS'nin çalışmanın yürütüldüğü Malatya ilinin bütün ilçelerinde zararlı tespit edilmesine rağmen Merkez ilçeleri olan Yeşilyurt ve Battalgazi ilçeleri haricindeki ilçelerde zarar oluşturacak popülasyon seviyesine ulaşmadığı belirlenmiştir. Merkez ilçeleri olan Yeşilyurt ve Battalgazi ilçelerinde arazide ilk ergin görülmesi haziran sonunda başlayıp kasım ayının ilk haftasında son bulmuştur. Zararlının popülasyon seviyesi ilk ergin görülmesinden itibaren artarak ağustos, eylül ve ekim aylarında birer ay ara ile üç tepe noktası oluşturmuştur. Bodenheimer (1951)'in AMS'nin minimum gelişme eşiği 12.4°C, thermal constant ise 339 gün-derece olarak belirlediği çalışmayı referans alırsak çalışmamızın yapıldığı 2021 yılında zarar verebilecek popülasyonun oluştuğu ilçelerden Battalgazi ilçesinde tüm yılın meteorolojik verileri 1999,3 gün-dereceye, Yeşilyurt ilçesinde ise 903,8 gün-dereceye ulaşmıştır. Tuzaklarda ilk erginin görüldüğü tarihlerden itibaren ise Battalgazi ilçesinde 854,1 gün- dereceye Yeşilyurt ilçesinde ise 633,8 gün-dereceye ulaşmıştır. 2022 yılında ise AMS'nin zarar verebilecek popülasyonunun oluştuğu Yeşilyurt ilçesinde tüm yılın meteorolojik verileri 1888 gün-derece oluşurken tuzaklarda ilk erginin görüldüğü tarihten itibaren 1368,5 gün-derece oluşmuştur (MGM, 2021; 2022). Her iki yılın meteorolojik verileri ve tuzaklardaki ergin sayıları ile gün-derece hesaplamaları yapıldığında Yeşilyurt ilçesinde AMS'nin yaklaşık 3-5 döl verebileceği bir potansiyele sahip olduğunu ancak zararlının bölgede kışı geçiremediği için ergin başlangıç popülasyonunun geç başlamasından dolayı 2-4 arası döl verebileceğini göstermektedir. Battalgazi ilçesinde ise gün-derece hesaplamalarına göre AMS'nin 5,8 döl verme potansiyeli varken başlangıç popülasyonunun geç ortaya çıkmasından dolayı 2,5 döl verebileceği hesaplanmıştır. Her iki ilçedeki tuzaklarda oluşan üç tepe noktası bu hesaplamalarla uyum sağlayarak AMS'nin Yeşilyurt ve Battalgazi ilçelerinde 3 döl verdiği olarak yorumlanabilir.

Zararlının Malatya ilinde kışı geçiremediği, popülasyon takiplerinin yapıldığı bahçelerin konumları, yerleşim yerlerine yakınlıkları, tuzaklarda ilk ergin görülme zamanları gibi veriler değerlendirildiğinde Malatya ilinde AMS'nin başlangıç popülasyonunun başka bölgelerden gelen meyve ve sebzelerden ve bunların evsel atıklarından olduğu olarak değerlendirilebilinir. Papadopoulos ve ark. (1998; 2001), Yunanistan'da karışık meyve bahçelerinde AMS'nin popülasyonunu izledikleri çalışmada ilk erginlerin 24 Haziran'da en erkenci kayısı ağaçlarında asılı tuzaklarda tespit edildiğini belirtmişlerdir.

Çalışmanın yapıldığı Kuzey Yunanistan (Selanik) bölgesinde AMS popülasyonunun çoğunun kışın öldüğünü çok az bir yüzdenin meyve içerisinde larva olarak kışı geçirdiğini, bu bireylerin erkenci konukçu türlerine yumurta bırakarak başlangıç popülasyonunun bu şekilde oluştuğunu bildirmişlerdir. Ancak kışlayan bu çok az popülasyonun ilkbaharla birlikte oluşan ergin bireylerinin yaklaşık üç ay boyunca tuzaklarda görülmediklerini belirterek bunun sebebini kullanılan tuzak türüne ve konukçu bitki türlerine bağlamışlardır. Bu çalışmanın sonuçları bölgemizde yapılan çalışmalarla farklılık göstermekte olup başlangıç polpülasyonunun tespitinde farklı tuzakların kullanılması fikrinin de değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışmanın yapıldığı Yunanistan-Selanikteki bahçe 800 rakımlı olup bizim çalışmamızın yapıldığı rakımdan daha düşüktür. Aynı zamanda her iki bölgenin iklimi arasında farklılıklar bulunmaktadır. Selanik'in iklimi Malatya'ya göre daha ılıman olduğundan sonuçlar farklılık göstermiş olabilir. Buğday ve Keçeci (2020) Elazığ ve Malatya illerinde, AMS'nin bazı biyo-ekolojik özelliklerinin belirlenmesi üzerine yürüttükleri çalışmada, 2017 ve 2018 yıllarında AMS'nin bölgede kışı geçirememesine rağmen Akçadağ, Battalgazi, Kale, Pütürge, Yazıhan ve Yeşilyurt ilçelerinde kayısıdan başka ürünlerde bulaşıklık tespit ettiklerini ifade etmişlerdir. Bu durumun nedeni olarak zararlının dışarıdan bulaşık meyveler ile bölgeye gelerek geçici popülasyonlar oluşturduğu belirtmişler ve çalışmamızla benzer yorumlar yapılmıştır. Tiftikci (2021) Çanakkale ilinde kayısı alanlarında AMS'nin popülasyonunu takip ettiği çalışmada yıllara (2016-2019) göre değişmekle beraber temmuz- aralık ayları arasında zararlının tuzaklarda yakalandığını bildirmiştir. Zararlı popülasyonunun yıllara göre değişkenlik göstermesinin iklim verilerinin farklılığından kaynaklandığı olarak yorumlamıştır. Ayrıca AMS'nin feromon tuzaklarda yüksek seviyelere ulaşmasına karşın meyvelerde zararına rastlamadığını belirtmiştir. Bu çalışmada kullanılan Şekerpare sofralık çeşidi geçci bir çeşit olmayıp orta mevsim sofralık çeşit olduğundan meyve ben düşme dönemi ile AMS nin zarar oluşturacak popülasyon seviyesi ile çakışmamasından dolayı zarar görülmemiş olabilir. Bu noktadan değerlendirilecek olunursa sonuçlar bizim çalışmamızla paralellik göstermektedir. AMS'nin zarar yapacak popülasyonu hasattan sonraki döneme denk geldiğinden meyve zararı oluşmadığı olarak yorumlanabilir.

3.4. Akdeniz Meyve Sineğinin Kayısıdaki Zarar Oranının Belirlenmesi

Kurutmalık kayısı olan Hacıhaliloğlu çeşidinde yapılan çalışmalarda Akçadağ, Battalgazi, Darende, Doğanşehir, Hekimhan, Kale ve Yazıhan ilçelerinde AMS zararına rastlanılmamıştır. Ancak Yeşilyurt ilçesinde kent yerleşim yerine yakın konumdaki lokasyonda (Yeşilyurt 1) hasadın normal zamanında yapıldığı zaman AMS zararına rastlanmazken hasadın geç yapıldığı durumda 2020 yılında %3, 2021 yılında %2 oranında vuruk meyve tespit edilirken 2022 yılında her iki lokasyonda da (Yeşilyurt 1 ve Yeşilyurt 2) meyvelerde zarar tespit edilmemiştir. Vuruk meyve tespiti çalışmaları Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5. Kayısıda zarar oranının belirlenmesi çalışmaları ve vuruk meyvede Akdeniz meyve sineği larvaları

Kayısı Araştırma Enstitüsü gen kaynakları koleksiyon parselinde bulunan geç olgunlaşan sofralık çeşitler olan Özal ve Levent çeşitlerindeki AMS zararı Tablo 8'de verilmiştir. Buna göre 2020 ve 2021 yıllarında Battalgazi ve Yeşilyurt ilçelerinde geç olgunlaşan sofralık çeşitlerde AMS zararının oluştuğu görülmektedir. Battalgazi lokasyonundaki 2 yılın ortalama zarar oranı %24 bulunmuştur. Yeşilyurt lokasyonunda 3 yıllın ortalama zarar oranı %62 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 8. Geç olgunlaşan sofralık kayısılarda hasat tarihleri ve Akdeniz meyve sineği zarar oranları (2020-2022)

Lokasyon/ Yıl	2020		2021		2022		Ortalama Zarar Oranı (%)
İlçe Adı	Hasat Tarihi (Levent/Özal)	Zarar Oranı (%)	Hasat Tarihi (Levent/Özal)	Zarar Oranı (%)	Hasat Tarihi	Zarar Oranı (%)	
Battalgazi	1-2 Eylül	21	16-15 Ağust.	27	*	*	24
Yeşilyurt	5-4 Eylül	73	20-19 Ağust.	44	18 Ağust.	69	62

* 14 Nisan 2022 tarihinde hava sıcaklığının -4,8 ^{0}C'ye düşmesi (MGM, 2022) nedeniyle yaşanan donlarda Battalgazi parselindeki geç olgunlaşan kayısılar dondan zarar gördüğünden bu parseldeki ağaçlarda hasat gerçekleşmemiş, iki yıllık ortalama alınmıştır.

Her üç yılın verileri birlikte değerlendirildiğinde AMS'nin Malatya ilindeki Hacıhaliloğlu kurutmalık kayısı çeşidinde zarar oluşturmadığı belirlenmiştir. Ancak özellikle yerleşim yerlerine yakın ve hasadın geciktirildiği bahçelerde kısmen de olsa zarar oluşturduğu belirlenmiştir. Söz konusu bahçelerde yetiştiricilik tekniklerinin zamanında yapılarak özellikle hasadı geciktirecek durumlardan kaçınmak önemlidir. Malatya ili için geç olgunlaşan sofralık çeşitlerin yetiştirilmesi AMS için ciddi bir risk oluşturduğu belirlenmiştir. Özellikle hasat zamanı ağustos ayını bulan geç olgunlaşan sofralık çeşitlerin yetiştirilmesinde AMS zararının olduğu belirlenmiştir. Üretim planlaması yaparken bu hususa dikkat etmek gerekmektedir. Bu bahçelerde tuzaklarla popülasyon takibi ve meyvelerde vuruk kontrolü yapılarak meyve ben düşme dönemi ile birlikte mücadeleye başlanmalıdır (Anonim, 2025). İklimlerde oluşabilecek değişimler, zararlının yüksek döl verme kabiliyeti, zararlının çok geniş bir konukçu dizisine sahip olması, bölgeler arası taze meyve, sebze alışverişinin artması gibi nedenlerden dolayı AMS'nin zarar oluşturacak popülasyona ulaşması muhtemeldir. Nitekim uzun yıllar iklim verilerine bakıldığında Malatya ili nisan ayı itibariyle AMS'nin gelişme eşiği olan 12.4ºC'nin üzerine çıktığı ve 13 ºC'lere ulaştığı görülmektedir (Tablo 5). Bu nedenle Türkiye'nin önemli ihraç ürünleri arasında olan kuru kayısı yetiştiriciliğinde zararlı ile ilgili oluşabilecek risklerin var olduğu bilinmeli

ve zararlı sürekli takip edilmelidir. Bu bölgede yapılan az sayıda çalışmadan biri olan, Buğday ve Keçeci (2020) Elazığ ve Malatya illerinde AMS'nin kayısıdan başka bazı konukçularda %53,3 oranında zarar yaptığını, Battalgazi'de kurutmalık kayısılarda zarar oluşturmadığını, geç olgunlaşan çeşitlerde ise zarar oluşturduğunu tespit etmişlerdir. Sunulan çalışma bu çalışmanın sonuçlarını destekleyerek zararlının bölgede takibinin önemi anlaşılmaktadır. Öztürk ve Ulusoy (2003), sofralık kayısı üretiminde önemli bir yer olan Mersin ilinde kayısıda zararlıların saptanması için yürüttükleri çalışmada AMS'nin kayısının önemli zararlıları arasında olduğu halde Mersin yöresindeki kayısılarda geç olgunlaşan çeşitler dışında zarar oluşturmadığını bildirmişlerdir. Bunun sebebinin, bölgede kayısının daha çok erkenci ve sofralık olarak yetiştirildiğini, zararlının yumurta bırakmadan hasadın bittiğini, bu nedenle AMS'nin zarar oluşturamadığını ifade etmişlerdir. Benzer bir durum Tiftikci (2021)'in çalışmasında da görülmüş olup tuzaklarda AMS varlığı tespit edilmesine rağmen kayısı meyvesinde zararın oluşmadığını bildirmiştir. Bu durum yapılan çalışmada olduğu gibi bitki fenolojisi ve zararlı varlığının eş zaman uyumsuzluğundan dolayı meyvede zarar oluşturmadığı olarak açıklanabilir. Tamer ve Yıldırım (2023) Iğdır ili meyve bahçelerinde AMS'nin kayısıdan başka bazı meyve türlerinde bulaşıklığını tespit ettikleri çalışmada Iğdır ilinde zararlının erginlerinin tuzaklarda ilk olarak eylül ayı başında gördüklerini ve ekim sonu ile en yüksek popülasyona ulaştıklarını belirlemişlerdir. Iğdır ilinin sofralık kayısı yetiştiriciliğinde önemli bir lokasyon olduğu bilinmektedir (TÜİK, 2024). Çalışmada direk belirtilmese de Iğdır ilinde sofralık kayısıların hasat zamanı yaz aylarında olduğundan dolayı AMS'nin sofralık kayısılarda zarar oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Ancak bölgedeki geç olgunlaşan sofralık çeşitler ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Hashem ve ark. (1987), AMS'nin Mısır'da bazı ürünlerde yaptığı zararı araştırmışlar ve kayısıdaki zarar oranının %74 olarak belirlemişlerdir. Söz konusu çalışma bizim çalışmamızdan daha ılıman bir ekolojik alanda yapıldığından yüksek zarar oranı görülmektedir. Mansour ve Mohamad (2016), Suriye'de 1999-2001 yılları arasında AMS'nin popülasyon dalgalanmalarını inceledikleri çalışmada, kayısıda %3,1 zarar tespit ettiklerini belirtmişlerdir. AMS ile yapılan popülasyon yoğunluğu ve zarar oranı çalışmaları bölgelerin iklim şartlarına ve bitki türüne göre değişmektedir. Özellikle zararlının kışı geçiremediği bölgelerde başlangıç popülasyonu dışarıdan gelen etmenlerle oluştuğundan AMS'nin zarar yapacak popülasyona ulaşması yaz aylarının ortası bazen sonları olabilmektedir. Türkiye'nin iç bölgelerindeki kayısılar genel olarak geç olgunlaşan çeşitler hariç yaz ortalarında hasadı bitmiş olmaktadır. Yetiştiriciliğin tekniğine uygun bir şekilde zamanında yapılmasıyla AMS zararı görülmemektedir. Ancak hasadın geciktirilmesi halinde kayısıda da sorun olabildiği görülmektedir. Geç olgunlaşan çeşitlerle yapılan sofralık kayısı üretiminde AMS ile mücadele yapmak gerekebilir.

3.5. Akdeniz Meyve Sineğinin Mücadele Zamanının Belirlenmesi

Kayısı ağaçlarının fenolojik dönemleri (Tablo 3, 4), AMS'nin popülasyon takibi (Tablo 6, 7 ve Şekil 3, 4), kayısı meyvelerindeki zarar oranları dikkate alınarak kurutmalık kayısının hasat zamanının AMS popülasyonunun zarar oluşturacak seviyesi öncesi olduğundan Malatya ilinde kurutmalık kayısılarda

AMS ile mücadeleye gerek olmadığı tespit edilmiştir. Ancak kurutmalık kayısılarda hasadın uzun süreli geciktirilmesi halinde risk oluşabileceği görülmektedir. Buna karşı sofralık geç olgunlaşan çeşitlerde yoğun bir bulaşıklık görülmüştür ve mücadeleye ihtiyaç duyulmuştur (Tablo 8). Tuzaklarla popülasyon takibi yapılarak meyve ben düşme döneminde uygun mücadele teknikleriyle mücadele yapılmalıdır. Bu dönem, çalışmanın yapıldığı yıllarda (2020-2022) ağustos ayı ile birlikte başlamakta olup iklim şartlarına bağlı olarak yıllara göre 15-20 gün aralığında esneklik göstermiştir (Tablo 4, 8).

3.6. Akdeniz Meyve Sineği Parazitoitlerinin Belirlenmesi

Akçadağ, Battalgazi, Kale ve Yeşilyurt ilçelerinde hasat olgunluğuna gelen meyvelerden alınan örneklerde yapılan incelemelerde dut, böğürtlen, vişne, kiraz ve kızılcıkta AMS tespit edilmezken elma, armut, ayva, şeftali, nektarin, erik, hünnap, alıç (ilk kayıt), nar ve trabzon hurmasında AMS tespit edilmiştir. Parazitoid çıkışı için kültüre alınan larva ve pupalardan herhangi bir parazitoid tür tespit edilememiştir. Ayrıca bazı kuşlar, eşekarıları ve karıncaların vuruk meyvelerde bulunan AMS larvalarını avladığı görülmüştür. Bu durum AMS popülasyonunu düşürmesinde etkisinin olması ile birlikte meyvede oluşturduğu tahribat nedeniyle yetiştiricilikte istenmeyen bir durumdur.

AMS'nin primer parazitoidinin larva ve pupa parazitoidleri olduğu bilinmektedir. Dünyada Hymenoptera takımına bağlı Braconidae, Chalcididae, Diapriidae, Eulophidae, Figitidae ve Pteromalidae familyalarına ait 60'dan fazla türün zararlının parazitoidi olduğuna dair kayıtlar bulunmaktadır (Giunti ve ark., 2023). Bunlar arasında en önemli parazitoitleri *Fopius arisanus, F. ceratitivorus, F. vandenboschi, Diachasmimorpha longicaudata, D. kraussii, D. tryoni, Psyttalia concolor* ve *P. humilis* (Hymenoptera: Braconidae) bulunmaktadır (Purcell, 1998; Ovruski ve ark., 2000; Bokonon-Ganta ve ark., 2019; Wang ve ark., 2021). *Dirhinus giffardii* (Hymenoptera: Chalcididae) ve *Pachycrepoideus vindemiae* (Hymenoptera: Pteromalidae) ise zararlının sekonder parazitoitleri olarak bildirilmiştir (Wang ve Messing, 2004; Rauf ve ark., 2022). Türkiye'de yapılan çalışmalarda ise zararlının parazitoidi olarak *P. vindemmiae* Rondani tespit edilmiştir (Anonim, 2022; 2025; Giunti ve ark., 2023). Farklı coğrafik bölgelerde zararlının parazitoidlerinin belirlenmesi çalışmalarının yapılması önemli olup belirlenen türlerin de biyolojik mücadele kapsamında kullanılma imkanları araştırılması gereken konular arasında olmalıdır.

4. Sonuçlar

Akdeniz meyve sineğinin Malatya ilinde kışı geçiremediği belirlenmiştir. Zararlının, çalışmanın yapıldığı bütün ilçelerde tespit edilmesine rağmen Merkez ilçeleri olan Yeşilyurt ve Battalgazi ilçeleri haricindeki ilçelerde zarar oluşturacak popülasyon seviyesine ulaşmadığı belirlenmiştir. İldeki AMS başlangıç popülasyonunun, diğer bölgelerden taşınan bulaşık meyveler ile bunlara ait atıkların etkisiyle oluştuğu düşünülmektedir. Tuzak takipleri ve thermal constant hesaplamaları sonucu zararlının Malatya ilinde zarar yapacak popülasyona ulaşabilen Yeşilyurt ve Battalgazi ilçelerinde 3 döl verdiği belirlenmiştir. İlde yoğun olarak yetiştiriciliği yapılan Hacıhaliloğlu kurutmalık kayısı

çeşidinde zarar oluşturmadığı, ancak özellikle yerleşim yerlerine yakın ve hasadın çok geciktirildiği bahçelerde kısmen de olsa zarar oluşturduğu belirlenmiştir. Bu nedenle yetiştiricilik tekniklerinin zamanında yapılarak özellikle hasadı geciktirecek durumlardan kaçınmak oluşabilecek riski engelleyebilir. Malatya ilinde şuan için ekonomik olarak yetiştiriciliğinin yapılmadığı geç olgunlaşan sofralık çeşitlerde AMS'nin ciddi bir risk oluşturduğu belirlendiğinden yetiştiricilikte bu hususa dikkat etmek gereklidir. Akdeniz meyve sineğinin alıç meyvelerindeki zararı ilk kayıt olarak belirlenmiş olup parazitoit belirleme çalışmalarında herhangi bir parazitoide rastlanmamıştır.

Sonuç olarak, iklimde yaşanan değişikliğe paralel olarak AMS gibi adaptasyon yeteneği yüksek türlerin doğal yayılış alanlarını artırabileceği muhtemeldir. İleriki çalışmaların, AMS'nin farklı ekolojilerdeki biyoekoloji çalışmalarının yapılarak adaptasyon durumları ve yayılış alanları takip edilmesi ve oluşabilecek risklerin belirlenmesi üzerine yapılması bu istilacı tür ile mücadelede önemlidir. Bu sayede zararlı ile mücadelede karar vericilere yol gösterilebilinir. Nitekim zararlının ülke içerisindeki ilerlemesi takip edilerek özellikle kışı geçirebildiği illerde yani kaynağında sıkı mücadelenin yapılması önem kazanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü tarafından TAGEM/BSAD/B/20/A2/P4/1795 nolu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan ederler.

Kaynaklar

Akgül GM. Hatay ve Osmaniye illerindeki turunçgil çeşitleri üzerinde zararlı Akdeniz meyve sineğine *Ceratitis capitata* (Wiedeman) (Diptera: Tephritidae)'na karşı trimedlure ve cezbedicilerin etkinliğinin araştırılması ve zarar oranının belirlenmesi. Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 97, Hatay, Türkiye, 2023.

Anonim. Turunçgil entegre mücadele teknik talimatı. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü yayını, s: 128 Ankara. 2022. https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/Entegre/Turun%C3%A7gil%20Entegre%20M%C3%BCcadele%20Teknik%20Talimat%C4%B1.pdf, (Erişim tarihi: 15.05.2025).

Anonim. Meyve zararlıları zirai mücadele teknik talimatları 2025. https://www.tarimorman.gov.tr/TAGEM/Belgeler/yayin/Meyve%20Zararl%C4%B1lar%C4%B

1%20Zirai%20M%C3%BCcadele%20Teknik%20Talimatlar%C4%B1.pdf, (Erişim Tarihi:20.05.2025).

Anonymous. EPPO global database 2025. *Ceratitis capitata* distribution, https://gd.eppo.int/taxon/CERTCA/distribution, (Erişim tarihi: 15.05.2025).

Atar D. Türkiye'de Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* Widemann (Diptera: Tephritidae)'nın Akdeniz Bölgesinden Kuzey Doğu Anadolu'ya göç serüveninin araştırılması, Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi sayfa no 85, Kars, Türkiye, 2025.

Balcıoğlu YE., Kaya C., Demircan M. İklim değişikliğinin Malatya ilinde kayısı rekoltesi ve coğrafi dağılışına etkileri. JENAS Journal of Environmental and Natural Studies 2022; 4(2): 119-146. https://doi.org/10.53472/jenas.1136337.

Başpınar H., Çakmak İ., Koçlu T., Başpınar N. Aydın ili meyve bahçelerinde Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae)'nin biyo-ekolojisi, zararı, yayılışı ve turunçgil bahçeleri üzerindeki çalışmaları. Türkiye II. Bitki Koruma Kongresi Bildirileri 27-29 Ağustos 2007, 48 s. Isparta.

Birişik N., Bayram Y., Kılıç M., Mutlu Ç., Öğreten A., Eren S., Kaplan M., Süer İE., Baran B., Duman K., Karaca V., Duman M., Çiftçi O., Türkölmez Ş., Peçen A., Sağır P., Yatkın G., Güler B., Kaya C., Çelik Y., Orak AB., Yaman B., Ateş E. Teoriden pratiğe kültürel mücadele (Ed: Nevzat Birişik). Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı yayınları 2018.

Bodenheimer FS. Citrus entomology in the Middle East. Uitgeverij W. Junk 1951.

Bokonon-Ganta AH., Ramadan MM., Messing RH. Insectary production and synopsis of *Fopius caudatus* (Hymenoptera: Braconidae), parasitoid of tephritid fruit flies indigenous to Africa. Journal of Asia-Pacific Entomology 2019; 22(1): 359-371, https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.01.018.

Buğday M., Keçeci M. Elazığ ve Malatya illerinde, Akdeniz meyve sineği'nin bazı biyo-ekolojik özellikleri ve zarar durumu üzerine çalışmalar. Derim 2020; 37(1): 64-75. https://doi.org/10.16882/derim.2020.692963.

Darwish AA. Relative susceptibility of some fruits to the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) and peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saunders)(Diptera: Tephritidae) in Egypt. Journal of Entomology and Zoology Studies 2016; 4(4): 42-48.

Demirdere A. Çukurova bölgesinde Akdeniz meyve sineği (*Ceratitis capitata* Wied.)'nin biyolojisi ve mücadelesi üzerinde çalışmalar. Tarım Bakanlığı, Zirai Mücadele ve Zirai Karantina Umum Müdürlüğü, Ankara, Ayyıldız Matbaası, 118s. 1961

Demirtaş MN, Öztürk K., Fidan Ş., Çolak S., Şahin S., Yılmaz KU., Gökalp K. Kayısı yetiştiriciliği 2006. Meyvecilik Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Yayın No:2, s.56. https://kutuphane.tarimorman.gov.tr/vufind/Record/18790 (Erişim tarihi: 15.05.2025)

Elekçioğlu NZ. Akdeniz meyve sineği. Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi 2009; 2(1): 61-65.

Elekçioğlu NZ. Efficacy of IPM, Mass trapping and chemical control in the suppressing of *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera:Tephritidae) in citrus. Applied Ecology and Environmental Research 2020; 1(18): 185-199. DOI: http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1801_185199

FAO. Dünya Gıda ve Tarım Örgütü 2022. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC. (Erişim tarihi: 20.12.2022)

Gahramanova G., Mamay M. Population development and infestation rate of Tomato leafminer [*Tuta absoluta* (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae)] in tomato and eggplant greenhouses in Absheron region of Azerbaijan. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi 2020; 24(4): 372-380. https://doi.org/10.29050/harranziraat.790224

Giunti G., Benelli G., Campolo O., Canale A., Kapranas A., Liedo P., ... , Papadopoulos NT. Management of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*: past, present, and future. Entomologia Generalis 2023; 43(6): 1241-1263.

Gilioli G., Sperandio G., Colturato M., Pasquali S., Gervasio P., Wilstermann A., Dominic AR., Schrader G. Non-linear physiological responses to climate change: the case of *Ceratitis capitata* distribution and abundance in Europe. Biol Invasions 2022; 24, 261–279. https://doi.org/10.1007/s10530-021-02639-9

Gunduz O., Aslan A., Ceyhan V., Bayramoglu Z. Measuring the metafrontier efficiencies and technology gaps of dried apricot farms in different agro-ecological zones. Custos E Agronegocio on line 2021; 17(1): 63-87.

Gürbüz T. Antalya ili turunçgil bahçelerinde Akdeniz meyve sineği, *Ceratitis capitata* (Wıedemann) (Diptera: Tephritidae)'ne karşı farklı cezbedicilerin etkinliğinin araştırılması ve zarar oranının belirlenmesi. Doktora Tezi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, sayfa no 211, Hatay, Türkiye, 2024

Hashem AG., Saafan MH., Haris EJ. Population ecology of the Mediterranean fruit fly in the reclaimed area in the western desert of Egypt. Egyptian Journal of Agricultural Research. Annual Agriculture Science 1987; 32: 1803–1811.

Hendrichs J., Vreysen MJB., Enkerlin WR., Cayol EJ. Strategic options in using sterile insects for area-wide integrated pest management. In sterile insect technique 2021; 841-884. CRC press.

INC. Statistical yearbooks of the international nut and dried fruit council 2019. https://www.nutfruit.org/industry/technical-resources?category=statistical-yearbooks, Erişim tarihi: 24/12/2019.

İleri M. Türkiye'de Akdeniz meyve sineği (*Ceratitis capitata* Wied.) durumu ve mücadelesi. Tarım Bakanlığı, Ankara Zirai Mücadele Enstitüsü Md. Yayını 1961; 38s. Ankara.

Kasap A., Aslan M. Akdeniz meyve sineğinin feromon tuzaklarla *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae)'nin nar ve hurmadaki populasyon takibi ve zarar oranının tespiti. KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi 2016; 19(1): 43-50. https://doi.org/10.18016/ksujns.21217.

Kaya T., Ada E., İpekdal K. Modeling the distribution of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Diptera, Tephritidae) in Turkey and its range expansion in Black Sea Region. Turkish Journal of Entomology 2017; 41(1): 43-52. https://doi.org/10.16970/ted.28388.

Kaya T., İpekdal K. Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae)'nın Kırşehir'deki ilk kaydı ve barkodlaması. Mediterranean Agricultural Sciences 2018; 31(2): 101-105. doi: 10.29136/mediterranean.398935.

Kılıç G. Hatay ili Trabzon hurması bahçelerinde Akdeniz meyve sineği, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae)'nin popülasyon yoğunluğu ve zarar oranının belirlenmesi, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 156, Hatay, Türkiye, 2015.

Kızılyamaç S. Farklı yükseltilerdeki Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae) popülasyonlarının biyoekolojisi üzerine araştırmalar. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitki Koruma Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 74, Adana, Türkiye, 2016.

Laamari M., Bouasbana MS., Mahmoudi R. Effect of climate change on the spatio-temporal distribution of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* Wiedemann (1824) in Algeria. European Journal of Environmental Sciences 2022; 12(2): 93-100. https://doi.org/10.14712/23361964.2022.12.

Liquido NJ., Shinoda LA., Cunningham RT. Host plants of the Mediterranean fruit fly (Diptera Tephritidae): an annotated world review. Entomological Society of America. Miscellaneous publications, No. 77, 1991.

Liquido NJ., Mcquate GT., Hanlin MA., Suiter KA. Host plants of the mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann), version 3.5. USDA CPHST Online Database 2017; Available: https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=347486 (Accessed date: 17.06.2025)

Mamay M. Important parameters in mechanical management of Carob moth [*Apomyelois* (= *Ectomyelois*) *ceratoniae* Zeller (Lep.: Pyralidae)] in pomegranate orchards: Determination of overwintering population density and infestation rate. Fresenius Environmental Bulletin 2018; 27(12 B): 9542–9548.

Mamay M., Ünlü L., Yanık E., Doğramacı M., İkinci A. Efficacy of mating disruption technique against Carob moth, *Apomyelois ceratoniae* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) in pomegranate orchards in Southeast Turkey (Şanlıurfa). International Journal of Pest Management 2016; 62(4): 295–299. DOI 10.1080/09670874.2016.1185552.

Mamay M., Yanık E., Doğramacı M. Phenology and damage of *Anarsia lineatella* Zell.(Lepidoptera: Gelechiidae) in peach, apricot and nectarine orchards under semi arid conditions. Phytoparasitica 2014; 42(5): 641-649. https://doi.org/10.1007/s12600-014-0405-6.

Mansour M., Mohamad F. Seasonal occurence of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Diptera: Tephritidae) in Soutern Syria. Polish Journal of Entomology 2016; 85: 311-323.

Mau RFL., Kessing JLM. *Ceratitis capitata* (Wiedemann) 2007. http://www.extento.hawaii.edu/Kbase/crop/type/ceratiti.htm (Erişim Tarihi: 04.01.2023)

Meier U., Graf H., Hack H., Hess M., Kennel W., Klose R., Mappes D., Seipp D., Stauss R., Streif J., Van Den Boom T. Phänologische entwicklungsstadien der kernobsten (*Malus domestica* Borkh. und *Pyrus communis* L.), des steinobstes (PrunusArten) der johannisbeere (Ribes-Arten) und der erdbeere (Fragaria x ananassa Duch.). Nachrichtenblatt Deutsche Phanzenschutzd 1994; 46: 141-153. https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00067136

MGM. TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2020; Malatya/Kayısı Arş. Ens./18353, Battalgazi/Meyvecilik Arş.(Tagem)/18187, Akçadağ/Sultansuyu Tigem/17706, Darende/18185, Doğanşehir/17872, Hekimhan/18183, Kale/17845, Yazıhan/18188 Nolu İstasyonların Meteorolojik verileri.

MGM. TC. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2021; Malatya/Kayısı Arş. Ens./18353, Battalgazi/Meyvecilik Arş.(Tagem)/18187, Akçadağ/Sultansuyu Tigem/17706, Darende/18185, Doğanşehir/17872, Hekimhan/18183, Kale/17845, Yazıhan/18188 Nolu İstasyonların Meteorolojik verileri.

MGM. TC Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü 2022; Malatya/Kayısı Arş. Ens./18353, Battalgazi/Meyvecilik Arş.(Tagem)/18187, Akçadağ/Sultansuyu Tigem/17706, Darende/18185, Doğanşehir/17872, Hekimhan/18183, Kale/17845, Yazıhan/18188 Nolu İstasyonların Meteorolojik verileri.

MGM. TC Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü, resmi iklim istatistikleri 2025. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=MALATYA, (Erişim Tarihi: 15.06.2025).

Ovruski S., Aluja M., Sivinski J. et al. Hymenopteran parasitoids on fruit-infesting Tephritidae (Diptera) in Latin America and the Southern United States: Diversity, distribution, taxonomic status and their use in fruit fly biological control. Integrated Pest Management Reviews 2000; 5, 81–107, https://doi.org/10.1023/A:1009652431251.

Özkan C. Doğu Akdeniz Bölgesi'nde Akdeniz meyve sineği, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae)'nın konukçu değişimi üzerinde araştırmalar. Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bitki koruma Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 54, Adana, Türkiye, 1993.

Öztürk N., Ulusoy MR. Mersin ili kayısılarında saptanan zararlılar. Alatarım 2003; 2(2): 21-26.

Papadopoulos NT., Katsoyannos BI., Carey JR. Temporal changes in the composition of the overwintering larval population of the Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) in Northern Greece. Annals of the Entomological Society of America 1998; 94(4): 430–434, https://doi.org/10.1093/aesa/91.4.430.

Papadopoulos NT., Katsoyannos BI., Kouloussis NA., Hendrichs J., Carey JR., Heath RR. Early detection and population monitoring of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in a mixed-fruit orchard in Northern Greece, Journal of Economic Entomology 2001; 94(4): 971–978, https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.4.971.

Pérez-Pastor A., Ruiz-Sanchez MC., Domingo R., Torrecillas A. Growth and phenological stages of búlida apricot trees İn South-East Spain. Agronomie 2004; 24: 93–100. https://doi.org/10.1051/agro:2004004.

Purcell MF. Contribution of biological control to integrated pest management of tephritid fruit flies in the tropics and subtropics. Integrated Pest Management Reviews 1998; 3, 63–83, https://doi.org/10.1023/A:1009647429498.

Rao J., Zhao H., Guo J., Wan F., Xian X., Yang N., Liu W. Projecting the global potential geographical distribution of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) under current and future climates. Biology 2024; 13(3): 177. https://doi.org/10.3390/biology13030177.

Rauf I., Khuhro NH., Memon RM., Khan IA. Parasitism preference of chalcid hymenopteran *Dirhinus giffardii* (Silvestri) confirms higher parasitism against housefly (*Musca domestica*) (Diptera: Muscidae) pupae. Plos one 2022; 17(1): e0262034. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262034.

Ricalde MP., Nava DE., Loeck AE., Donatti MG. Temperature dependent development and survival of Brazilian populations of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*, from tropical, subtropical and temperate regions. Journal of Insect Science, 2012; 12(1): 33. https://doi.org/10.1673/031.012.3301.

Satar S., Tiring G. Okitsu mandarin çeşidinde *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae)'ya karşı tuzak kullanımının etkinliğinin belirlenmesi ve pomolojik özellikler ile vuruklu meyveler arasındaki ilişkinin saptanması. Derim 2016; 33(2): 221-236. https://doi.org/10.16882/derim.2016.267904.

Satar S., Tiring G., İşpınar D., Algan AR. *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae)'nın altıntop bahçelerinde popülasyon dalgalanması ve sıcaklığın gelişimine etkisi. Bitki Koruma Bülteni 2016; 56(4): 429-440. DOI 10.16955/bkb.00044.

Szyniszewska AM., Tatem AJ. Global assessment of seasonal potential distribution of Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). Plos one 2014; 9(11): e111582. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111582.

Tamer E., Yıldırım E. Iğdır ili meyve bahçelerinde *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824)(Diptera: Tephritida)'nın popülasyon gelişimi, yoğunluğu ve bulaşıklık oranının belirlenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi 2023; 26(3): 560-569.

Tekeli FM., Alaoğlu Ö. Tarsus (Mersin) ilçesi portakal bahçelerinde zararlı Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae)'nin kitle tuzaklama yöntemi ile popülasyon

dalgalanmasının belirlenmesi ve zarar durumu. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 40, Konya, Türkiye, 2019.

Thomas MC., Heppner JB., Woodruff RE., Weems HV., Steck GJ, Fasulo TR. Mediterranean fruit fly, *Ceratitis Capitata* (Wiedemann) (Insecta: Diptera: Tephritidae). University Of Florida, IFAS Extension 2010; EENY-214. https://doi.org/10.32473/edis-in371-2001.

Tiftikci P. Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae)'nın kayısı bahçelerinde popülasyon değişimleri üzerinde araştırmalar. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2021; 4(3): 304-311. https://doi.org/10.47495/okufbed.837185.

Tiring G., Satar S. *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae)'nın bazı meyve bahçelerinde popülasyon dalgalanması. Türk. Entomol. Bült. 2017; 7(3): 239-247. https://doi.org/10.16969/entoteb.381234.

TÜİK. Türkiye İstatistik Kurumu, 2024; https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr, (Erişim tarihi: 15.05.2025)

Tülü S., Özgökçe MF. Akdeniz meyve sineği, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) 'nin Antalya ili, Finike ilçesi'nde turunçgil ve nar bahçelerinde popülasyon yoğunluğunun araştırılması. Y.Y.Ü. Fen bilimleri enstitüsü, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, sayfa no 54, Van, Türkiye, 2019.

Vera MT., Rodriguez R., Segura DF., Cladera JL., Sutherst RW. Potential geographical distribution of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae), with emphasis on Argentina and Australia. Environmental Entomology 2002; 31(6): 1009-1022. https://doi.org/10.1603/0046-225X-31.6.1009.

Wang XG., Messing RH. The ectoparasitic pupal parasitoid, *Pachycrepoideus vindemmiae* (Hymenoptera: Pteromalidae), attacks other primary tephritid fruit fly parasitoids: Host expansion and potential non-target impact. Biological Control 2004; 31(2): 227-236. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.04.019.

Wang X., Ramadan MM., Guerrieri E., Messing RH., Johnson MW., Daane KM., Hoelmer KA. Early-acting competitive superiority in opiine parasitoids of fruit flies (Diptera: Tephritidae): Implications for biological control of invasive tephritid pests. Biological Control 2021; 162: 104725, https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104725.

Weems Jr. HV. Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann). Florida Department of Agriculture and Consumer Services Division of Plant Industry 1981; 1-4. https://thefsca.org/wp-content/uploads/2022/03/ent230.pdf.

Woods B., Lacey IB., Brockway CA., Johnstone CP. Hosts of Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) from Broome and the Broome Peninsula, Western Australia. Australian Journal of Entomology 2005; 44(4): 437–441. https://doi.org/10.1111/j.1440-6055.2005.00484.x

Yayla M., Tolga MF., Helvacıoğlu Ö., Kahya D. The effectiveness of mass trapping of *Ceratitis capitata* (Wiedemann,1824) (Diptera: Tephritidae) in peach orchards in İzmir, Aydın and Mersin. Plant Protection Bulletin Haziran 2022; 62(2): 18-25. doi:10.16955/bitkorb.1022760.

Yılmaz KU. Bazı yerli kayısı genotiplerinin fenolojik, morfolojik ve pomolojik özellikleri ile genetik ilişkilerinin ve kendine uyuşmazlık durumlarının moleküler yöntemlerle belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı, Doktora Tezi, sayfa no 382, Adana, Türkiye, 2008.

Zümreoğlu A. Sterile-male tekniğini mücadelede uygulamak gayesiyle suni ortamlarda Akdeniz meyve sineği *Ceratitis capitata* Wied. (Diptera: Tephritidae)'nın yetiştirme metotları üzerinde araştırmalar. Zirai Mücadele Merkez Atölye ve İkmal Müdürlüğü Ofset Baskı Tesisi, 84s. Ankara, 1979.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 416-438, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 416-438, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Farklı Isı Transfer Akışkanı Boru Konfigürasyonları Altında Termal Enerji Depolama Sistemlerinde Faz Değiştiren Malzemenin Performans Değerlendirmesi

Burak KIYAK[1*]

[1]Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23200, Elazığ

[1]https://orcid.org/0000-0001-9088-9154
*Sorumlu yazar: bkiyak@firat.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 12.08.2025
Kabul tarihi:11.12.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Faz değiştiren malzeme
Gizli ısı depolama
Kabuk-borulu ısı değiştirici
Helisel boru
HAD

ÖZ

Bu çalışma, RT35HC faz değiştiren malzeme ile doldurulmuş bir kabuk-borulu gizli ısı depolama ünitesinde, farklı ısı transfer akışkanı (ITA) boru konfigürasyonlarının erime performansı ve enerji depolama özelliklerine etkilerini üç boyutlu sayısal olarak incelemektedir. Beş farklı ITA boru düzeni (Straight, 1P-1T, 1P-2T, 2P-1T ve 2P-2T) hem yatay hem dikey oryantasyonlarda değerlendirilmiştir. Tek borulu tasarımlarda, boru yüzey alanı eşitlenerek geometrinin erime süreci üzerindeki etkisi tek başına değerlendirilmiştir. Çift borulu/çok turlu helislerde ise artan yüzey alanı ve azalan FDM hacminin birlikte etkisi dikkate alınmıştır. Performans değerlendirmesi; sıvı fraksiyonu, depolanan enerji, ortalama ısı akısı ve ortalama Nusselt sayısı parametreleri üzerinden yapılmıştır. Analizler, dikey oryantasyonda 2P-2T'nin Straight konfigürasyona kıyasla %122.6 daha fazla enerji depoladığını ve erime süresinin belirgin şekilde kısaldığını ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, boru geometrisinin ve sistem oryantasyonunun erime dinamikleri ile enerji depolama verimliliği üzerindeki kritik rolünü vurgulamakta ve gizli ısı termal enerji depolama sistemleri için tasarım optimizasyonuna katkı sunmaktadır.

Performance Assessment of Phase Change Material in Thermal Energy Storage Systems under Different Heat Transfer Fluid Pipe Configurations

Research Article

Article History:
Received: 12.08.2025
Accepted: 11.12.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Phase change material
Latent heat storage
Shell-and-tube heat exchanger
Helical pipe
CFD

ABSTRACT

This study presents a three-dimensional numerical investigation on the melting performance and energy storage characteristics of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage (LHTES) unit filled with RT35HC phase change material (PCM). Five different heat transfer fluid (HTF) tube configurations—Straight, 1P-1T, 1P-2T, 2P-1T, and 2P-2T—were analyzed under both horizontal and vertical orientations. In single-tube designs, the HTF surface area was equalized to evaluate the effect of geometry on the melting process independently. In multi-tube/multi-turn helical designs, the combined influence of increased surface area and reduced PCM volume was considered. Performance evaluation was carried out in terms of liquid fraction, stored energy, average heat flux, and average Nusselt number. The analyses revealed that, in vertical orientation, the 2P-2T configuration stored 122.6% more energy than the Straight configuration, with a significantly shorter melting duration. These findings emphasize the critical role of tube geometry and system orientation in influencing melting dynamics and energy storage efficiency, providing valuable guidance for LHTES system design optimization.

To Cite: Kıyak B. Performance Assessment of Phase Change Material in Thermal Energy Storage Systems under Different Heat Transfer Fluid Pipe Configurations. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 416-438.

1. Introduction

The increasing worldwide demand for energy and the emphasis on environmentally friendly energy alternatives underscore the importance of optimizing thermal energy storage (TES) systems for enhanced efficiency (Kumar et al., 2025). Among the various TES approaches, latent heat thermal energy storage (LHTES) systems incorporating phase change materials (PCMs) have attracted significant interest due to their superior energy storage capacity and capability to absorb and release thermal energy at nearly constant temperatures (Muraleedharan Nair et al., 2024). These characteristics render PCMs particularly advantageous for thermal regulation applications, such as solar energy utilization, waste heat recovery, and HVAC operations in buildings (Said et al., 2025).

Although PCMs offer numerous benefits, their inherently low thermal conductivity restricts the rate of heat transfer during thermal cycling (Izadi et al., 2025). This limitation detrimentally impacts the operational efficiency and practical applicability of LHTES systems (NematpourKeshteli et al., 2024). To mitigate this challenge, a variety of heat transfer enhancement strategies have been explored extensively (Hekmat and Saharkhiz, 2025), such as alterations to heat exchanger geometries (Muraleedharan Nair et al., 2024), the integration of extended surfaces such as fins (Zhang et al., 2023) and the dispersion of nanoparticles to enhance the thermophysical behavior of PCMs (Shen et al., 2024). Shell-and-tube heat exchangers (STHEs) are commonly utilized in LHTES applications due to their mechanical durability, high heat transfer area, and ease of fabrication (Ahmed et al., 2022). In a standard STHE-PCM configuration, PCM is placed in the shell side, while a heat transfer fluid (HTF) circulates through the tubes to facilitate thermal exchange (Harchaoui et al., 2025). The design of these tubes critically influences the heat transfer rate and system efficiency (Saha et al., 2023). For instance, optimizing nano-finned enclosures based on fin geometry and nanoparticle characteristics has been shown to reduce melting times and enhance performance (Rogowski et al., 2025).

Recent studies have highlighted notable progress in enhancing heat transfer by diverse strategies. For instance, Ali et al. (2024) conducted a comprehensive assessment of thermal performance improvements in shell-and-tube LHTES configurations by altering heat transfer pipes using different fin geometries and twisted tape integrations. Their experimental results indicated that the hybrid implementation of helical fins coupled with twisted tapes consistently achieved the most rapid melting performance within the first 29 minutes, whereas vertical fins alone exhibited only a slight improvement in melting duration. Further analysis demonstrated that the utilization of vertical fins, standalone helical fins, and the combined system incorporating helical fins and twisted tapes led to reductions in total melting time by 38.7%, 23.5%, and 32.7%, respectively, in comparison to the baseline scenario, which required approximately 69 minutes in the absence of enhancement. In another investigation, Abdellatif et al. (2025) explored wedge-shaped heat exchanger configurations integrated with PCM, concluding that appropriate geometric design adjustments can substantially elevate latent heat storage performance by increasing the effective heat transfer surface and optimizing fluid flow behavior.

Numerous studies have explored methods to enhance the thermal conductivity of PCMs using various techniques. Zaytoun et al. (2023) analyzed the heat transfer behavior of PCMs within a modified shell-and-tube LHTES system, demonstrating that both the geometric configuration and the flow dynamics of the HTF play a critical role in determining the effectiveness of melting and solidification processes. Similarly, Li et al. (2025) developed an innovative PCM-based heat exchanger that incorporates hemispherical surface protrusions within a tube-and-shell configuration. This design was found to promote heat transfer enhancement by increasing the effective surface area and inducing turbulence. Their results confirmed that such surface irregularities can effectively interrupt thermal boundary layers, thereby improving heat transfer coefficients.

Fin-based enhancement techniques have proven particularly effective in addressing PCM thermal conductivity limitations. Meng et al. (2024) conducted thermal storage performance analysis of shell-and-tube PCM heat exchangers with internal fins, demonstrating that fin configuration and material properties significantly impact heat storage capacity and charging/discharging rates. Bahrami (2024) provided a comprehensive review of thermal optimization in PCM-based heat sinks using fins, highlighting that fin geometry, spacing, and material selection are critical parameters for maximizing heat transfer enhancement. The study emphasized that optimized fin configurations can reduce melting times by up to 50% compared to systems without fins.

The incorporation of nanoparticles presents a promising strategy for enhancing the thermophysical characteristics of PCMs. Perumalsamy et al. (2025) explored the phase transition behavior of hybrid nanocomposites within shell-and-tube type LHTES configurations, indicating that nanoparticle integration can markedly enhance both thermal conductivity and heat transfer efficiency. Their experimental investigations confirmed that hybrid nanocomposite PCMs outperformed conventional pure PCMs in terms of thermal response, offering improved energy storage capacity and reduced durations for thermal cycling processes.

Advanced heat exchanger geometries have shown remarkable potential for performance enhancement. Abdollahi et al. (2025) developed freezing processes of PCM in shell-and-tube heat exchangers with modified shell designs, including elliptical and triangular configurations. Both modified configurations increased the average heat transfer rate by up to 85% and halved the complete melting time of the PCM compared to conventional circular shells. Their research demonstrated that radial fins consistently outperformed longitudinal fins, reducing total freezing time by up to 75.31% and demonstrating a 19.68% efficiency improvement. Gallero et al. (2024) performed computational fluid dynamics modeling of PCM melting in shell-and-tube heat exchangers, observing a significant impact of inlet HTF temperature on the duration of complete phase change processes.

Tube configuration optimization has emerged as a critical factor in LHTES system design. Younis et al. (2024) investigated the improvement of LHTES rate in shell-and-tube heat exchangers using different fin configurations, demonstrating that optimized fin arrangements can significantly boost system energy storage performance. Hai et al. (2025) focused on optimization of nano-finned, enclosure-shaped

LHTES systems for solar thermal applications, showing that combining fin optimization with nanoparticle enhancement can achieve substantial improvements in melting times and overall system efficiency.

Comprehensive reviews have highlighted the importance of design parameter optimization in LHTES systems. Kumar et al. (2025) presented a comprehensive review addressing strategies to enhance latent heat utilization in TES, particularly by analysing the performance of longitudinal versus circular finned heat exchangers. Their findings indicated that circular fin geometries offer superior thermal behavior. Additionally, they reported notable thermal performance improvements when heat sinks were combined with PCM systems incorporating pin fins, which are commonly adopted in thermal energy management applications. Muraleedharan Nair et al. (2024) experimentally examined medium-temperature PCM systems intended for domestic water heating, constructing five different STHEs incorporating various enhancement approaches, including fins, expanded graphite (EG), and their combinations. Among the configurations tested, the EG–circular fin combination delivered the highest efficiency during both charging and discharging phases. Their findings showed that this setup ensured more uniform temperature profiles and resulted in a 109% increase in energy storage and over a 160% improvement in discharge power compared to systems lacking any enhancement.

Experimental investigations have validated theoretical predictions regarding heat transfer enhancement techniques. Izadi et al. (2025) performed performance-oriented assessments on shell-and-coil ice storage systems containing PCM by employing various tube geometries. The results indicated that increasing the non-dimensional fin length from 0 to 0.719 led to a 42.29% reduction in solidification duration, while raising the number of fins from 0 to 6 accelerated the process by approximately 50%. Moreover, horizontal fins slightly outperformed vertical ones, with a performance gap of 3.58% under equivalent heat transfer surface areas. In another study, NematpourKeshteli et al. (2024) investigated thermal performance optimization in lobed triplex-tube heat exchangers integrated with PCM. Their findings demonstrated that structural modifications to the tube geometry could significantly enhance storage efficiency. Specifically, incorporating lobes and fins led to a 30.54% reduction in melting time relative to conventional straight tubes, and this improvement reached 74.26% when combined with metal foam and nanoparticle additives.

Recent advancements in enhanced heat exchange techniques have been comprehensively reviewed by Zhang et al. (2023), who summarized recent progress in enhancing heat exchange measures in phase change heat storage devices from dual perspectives of internal structure enhancement and external enhancement methods. Their review highlighted that combining multiple enhancement techniques can achieve synergistic effects, leading to superior thermal performance compared to individual enhancement methods.

Multi-tube and advanced geometric configurations continue to show promise for further improvements. Shen et al. (2024) experimentally compared thermal characteristics between multiple-tube heat exchangers (MTHE) and single-tube heat exchangers (STHE), demonstrating that multi-tube

configurations can significantly improve heat transfer rates and reduce charging times. Ahmed et al. (2022) conducted numerical studies on melting enhancement of PCM in finned tube LHTES systems, revealing that fin configuration and spacing optimization can substantially improve system performance. Hybrid enhancement techniques combining multiple approaches have demonstrated exceptional performance improvements. Harchaoui et al. (2025) introduced innovative heat exchanger configurations incorporating optimized "I"-shaped copper fins to boost thermal performance. Their results indicated that the I-fin arrangement outperformed other geometries in terms of melting time by 13.94%, 43.39%, and 78.92% relative to honeycomb, longitudinal fin, and circular fin designs, respectively. Additionally, their system achieved average power enhancements of 11.34%, 37.9%, and 51.78% compared to the aforementioned alternatives. Saha et al. (2023) reviewed the application of PCMs in diversely structured tubes and architectural environments for thermal energy storage, emphasizing the broad adaptability and performance potential of PCM-based technologies across different domains.

Advanced computational and experimental studies continue to provide insights into optimal design strategies. Rogowski et al. (2025) investigated melting behavior of coconut oil as PCM in shell-and-tube and shell-and-coil thermal energy storage units, demonstrating that coil configurations can provide enhanced heat transfer compared to straight tube arrangements. Recent studies by Rendall et al. (2024) focused on low-cost fin-tube heat exchanger design for building thermal energy storage, emphasizing the importance of cost-effective solutions for practical applications.

Emerging enhancement techniques continue to show promise for future developments. Moghaddam et al. (2022) investigated metal foam and fin implementation into triple concentric tube heat exchangers for PCM melting enhancement, demonstrating the potential of hybrid enhancement approaches. Chabani and Mebarek-Oudina (2025) focused on optimized thermal storage in heat exchangers with nano-enhanced PCMs, showing significant improvements in thermal performance. Marzouk et al. (2025) studied enhancing melting of PCM in double tube heat exchangers with pin fins, revealing that pin fin configurations can substantially improve heat transfer rates and reduce melting times. These recent developments indicate that combining multiple enhancement strategies can achieve substantial improvements in thermal performance, energy storage capacity, and system efficiency.

Helical and spiral tube configurations have shown particular promise for heat transfer enhancement. Hekmat and Saharkhiz (2025) investigated the impact of helically coiled shell-and-tube configurations on melting and solidification of PCM in LHTES systems, finding that helical coiling expedited both melting and solidification rates. Their study revealed that nanoparticles in PCM had higher impact than in HTF on melting and solidification processes. Unlike their study, where both the shell-and-tube were helically coiled, the present work employs a conventional straight shell with various internal helical and straight HTF pipe configurations, allowing for a more isolated investigation of tube geometry effects on PCM melting and energy storage. Mao et al. (2023) conducted comparative investigations on heat transfer performance of PCM in STHEs with straight and spiral tubes, demonstrating that spiral tube

configurations increased energy storage by 78.8% compared to straight tube arrangements. While their experimental study included both horizontal and vertical orientations, it was limited to a single helical geometry and did not explore variations in coil complexity or multi-pipe configurations. In contrast, the present study provides a systematic numerical investigation of five distinct HTF pipe configurations—including both straight and multi-helical designs—under both orientations. Furthermore, by employing surface-area-equalized comparisons and evaluating multiple performance metrics such as melting performance, energy storage capacity, heat flux distribution and average Nusselt number, the present work offers a more comprehensive and geometry-focused assessment of LHTES performance.

This study presents a structured comparison of shell-and-tube heat exchangers featuring diverse HTF pipe geometries, including both straight and helical tubes, to evaluate their influence on PCM melting behavior and overall energy storage efficiency. Building upon recent research, the work addresses the thermal limitations of PCMs and explores design-based enhancement strategies within STHE systems. RT35HC was selected as the phase change material due to its suitable melting temperature range, high latent heat capacity, and strong thermal cycling stability, which make it a widely preferred paraffin-based PCM for medium-temperature LHTES applications. The outcomes aim to support the optimal design of LHTES systems through geometry-driven performance enhancement.

2. Materials and Methods

2.1. Physical Model and Problem Definition

A schematic presentation of the LHTES system is presented in Figure 1. Although five different HTF pipe configurations are investigated in this study, the geometry shown in this figure is used exclusively to illustrate the applied boundary conditions and coordinate definitions. The PCM (RT35HC), whose thermophysical properties are given in Table 1, surrounds the embedded copper pipe(s) through which water flows as the HTF. The isometric view (a) shows the general configuration of the model, while the side view (b) indicates the inlet and outlet positions as well as the adiabatic conditions applied to the external walls. The front view (c) highlights the spatial relationship between the PCM domain and the internal pipe layout. Gravity is applied in the negative z-direction in all simulations. The coordinate system is defined such that y corresponds to the axial direction of the storage unit, x to the horizontal transverse direction and z to the vertical direction. To assess the effect of natural convection, all cases are analyzed in both horizontal and vertical orientations by rotating the system 90° about the x-axis, while keeping the gravity vector fixed.

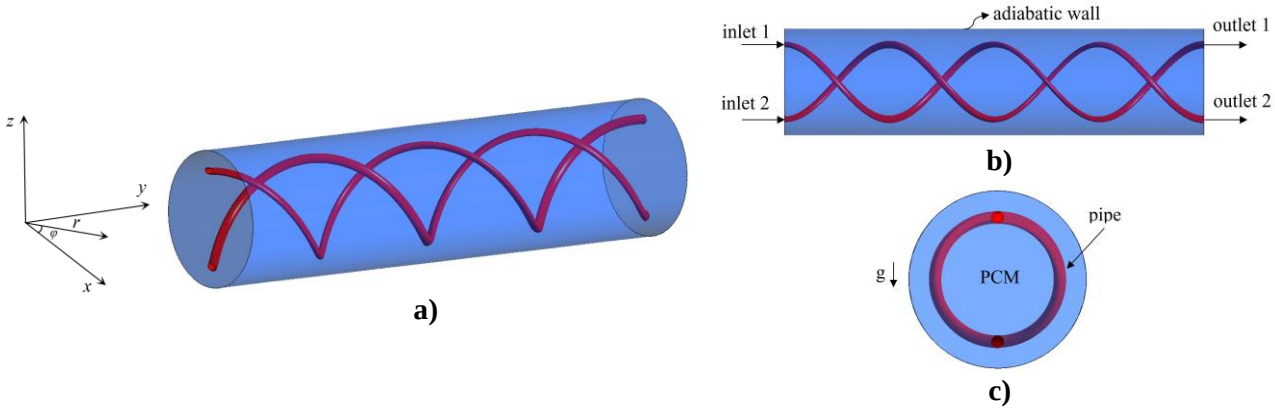


Figure 1. Schematic of the LHTES unit and boundary conditions illustrated for a representative geometry: **a)** isometric view, **b)** side view, **c)** front view

Table 1. Thermophysical properties of RT35HC (Öztop et al., 2024)

ρ [kg/m^3]	C_p [J/kg.K]	k [W/m.K]	T_s [°C]	T_{liq} [°C]	LH [J/kg]	β [K^{-1}]	μ [kg/m.s]
760 (liquid)							
880 (solid)	2000	0.2	34	36	240000	0.000761	0.000271

Table 2 presents the five different HTF pipe configurations evaluated in this study. Each configuration is shown from an isometric and a side view to provide a clear representation of the pipe geometry. Case 1 features a single straight pipe and serves as the reference configuration. Case 2 introduces a single-pipe helical arrangement with one complete revolution. In Case 3, two helical pipes perform one full turn to achieve enhanced radial heat distribution. Case 4 includes a single helical pipe with two full turns, increasing the axial coverage of the PCM domain. Finally, Case 5 consists of two helical pipes, each with two full turns, resulting in the densest pipe network among the designs. These geometrical variations are intended to investigate the relationship between HTF surface distribution, PCM contact area and thermal performance.

Table 2. Geometric configurations of HTF pipe arrangements used in the LHTES system

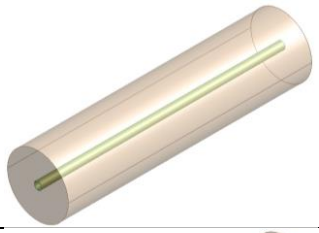
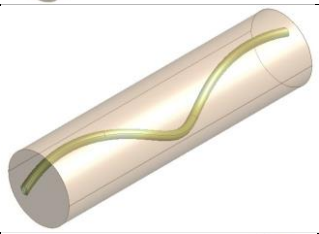
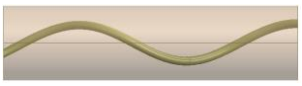
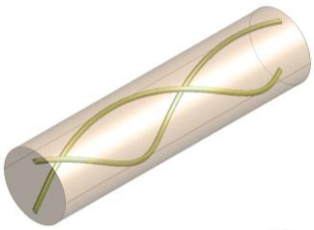
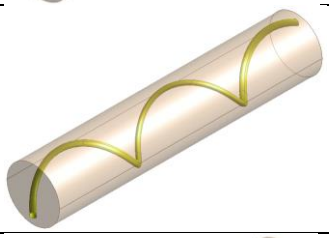
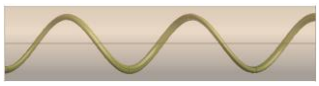
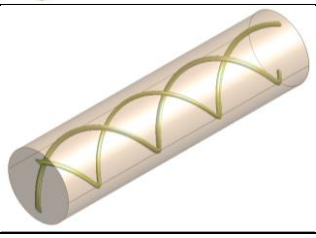
Case	Isometric View	Side View	Case Describtions
Case 1			Straight HTF pipe configuration with an inner pipe adjusted to match the surface area of coiled models.
Case 2			Single-pipe, single-turn (1P-1T) helical coil with an inner pipe provides moderate spatial coverage with one full helical revolution.
Case 3			Double-pipe, single-turn (2P-2T) helical coils each with an inner arranged symmetrically to enhance heat distribution across the PCM volume.
Case 4			Single-pipe, double-turn (1P-2T) helical coil with a pipe introduces extended axial coverage and enhanced contact with the PCM.
Case 5			Double-pipe, double-turn (2P-2T) helical coils, each with a configured to maximize PCM contact through distributed and dense helical flow paths.

Table 3 summarizes the total heat transfer surface area of the HTF pipes and the percentage reduction in the available PCM volume for each configuration. Case 1 is considered the base case, and all PCM volume losses are calculated relative to the PCM volume available in this configuration. Cases 1–3 exhibit nearly identical surface areas (~0.01600 m²), indicating that any performance variations among them stem solely from differences in the spatial arrangement of the tubes, rather than from changes in the heat transfer interface area. This allows for an isolated evaluation of the impact of helical configuration on melting dynamics. On the other hand, Cases 4 and 5 exhibit significantly higher HTF pipe surface areas (~0.02130–0.02162 m²), introducing additional heat transfer potential. However, this enhancement comes at the cost of reduced PCM capacity due to the volumetric occupation of the additional pipe structure. Notably, even though the HTF surface areas in Cases 4 and 5 are similar, Case 5 shows a higher PCM volume reduction (3.0%) compared to Case 4 (1.5%) due to the presence of two

elongated helical pipes occupying more space within the shell. This comparison highlights the trade-off between increasing the heat transfer area and preserving PCM volume in the design of LHTES systems.

Table 3. HTF pipe surface area and reduction in PCM volume

Case	HTF Pipe Surface Area (m²)	PCM Volume Loss (%)
Case 1	0.01600	0.0
Case 2	0.01602	0.05
Case 3	0.01621	0.17
Case 4	0.02130	1.32
Case 5	0.02162	1.41

In this study, the HTF pipe diameters were specifically adjusted to ensure approximately equivalent surface areas among the first three configurations (Cases 1–3), which incorporate single-pipe arrangements. This approach enabled a fair comparison of thermal performance under comparable heat transfer surfaces. For Cases 4 and 5, due to the use of dual-pipe structures with increased helical complexity, maintaining the same surface area would require impractically small pipe diameters. Therefore, although exact equivalence could not be achieved, the pipe dimensions in these two cases were selected to ensure close surface areas relative to each other, allowing for comparative evaluation while maintaining geometric feasibility.

2.2. Governing Equations

The present study utilizes a comprehensive three-dimensional computational framework to investigate the melting behavior of PCM within a shell-and-tube LHTES system featuring various helical and straight HTF pipe configurations. The analysis incorporates the fundamental conservation equations of mass, momentum and energy, integrated with the enthalpy-porosity method to capture the dynamics of the solid–liquid phase transition. The mathematical modeling approach relies on key assumptions to maintain computational efficiency while preserving physical accuracy. The PCM is treated as an incompressible Newtonian fluid undergoing laminar and transient flow during melting. The Boussinesq approximation is applied to model buoyancy-driven natural convection induced by temperature-dependent density gradients. The HTF flow inside the inner copper pipe is assumed to be steady and laminar. Additionally, the outer shell wall is assumed to be adiabatic, eliminating heat exchange with the surroundings.

Based on these assumptions, the governing equations employed to model the system behavior are presented as follows:

Continuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \rho \vec{V} = 0 \tag{1}$$

Momentum

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \left(\vec{V} . \nabla\right) \vec{V} = -\nabla P + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \tag{2}$$

The symbols used in the continuity and momentum equations are defined as follows: ρ refers to the density, P denotes the pressure, t is the time, and g represents the gravitational acceleration. The momentum equation also incorporates a source term that modulates the flow velocity of the PCM based on its liquid fraction and is defined as follows:

$$\vec{S} = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{V} \tag{3}$$

Here, γ denotes the liquid fraction, while ε is a small numerical constant set to 0.001 to prevent division by zero. The mushy zone constant, A_{mush} , a constant associated with the mushy zone, is assigned a default value of 10^5 as used in Ansys Fluent (ANSYS Fluent 18, 2018).

$$\gamma = \begin{cases} 0 & if \quad T < T_s \\ \dfrac{T - T_s}{T_l - T_s} & if \quad T_s < T < T_l \\ 1 & if \quad T > T_l \end{cases} \tag{4}$$

Where, T_l and T_s corresponds to the melting and solidification temperature of the PCM, respectively.

Energy

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho \vec{V} H\right) = \nabla . (k \nabla T) \tag{5}$$

Where, k refers to the thermal conductivity and H denotes the total enthalpy, which is expressed as the sum of the sensible enthalpy h and the latent heat,

$$H = h + \Delta H_{lh} \tag{6}$$

$$h_1 = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T} C_p dT \tag{7}$$

Here, h_{ref} denotes the reference enthalpy corresponding to the baseline temperature, and C_p represents the specific heat capacity of the PCM. Moreover, ΔH_{lh} quantifies the latent heat component, varying continuously from 0 in the fully solid phase to L in the fully liquid phase. The evolution of latent heat during the phase transition is expressed as follows:

$$\Delta H = \gamma L \tag{8}$$

2.3. Mesh Validation

A structured mesh was generated using ANSYS Fluent Meshing, employing the poly-hexcore meshing strategy to efficiently capture both the bulk flow regions and the thermal boundary layers. This method enables high-quality meshing with reduced element count while maintaining solution accuracy (Yousefi et al., 2025). Figure 2 shows the computational mesh structure, where fine resolution is applied around the HTF pipes to resolve steep thermal gradients. The generated mesh contains 453,375 elements and 465,706 nodes, with mesh quality parameters evaluated as follows: maximum skewness of 0.59, average skewness of 0.054, minimum orthogonal quality of 0.63, and average orthogonal quality of 0.93.

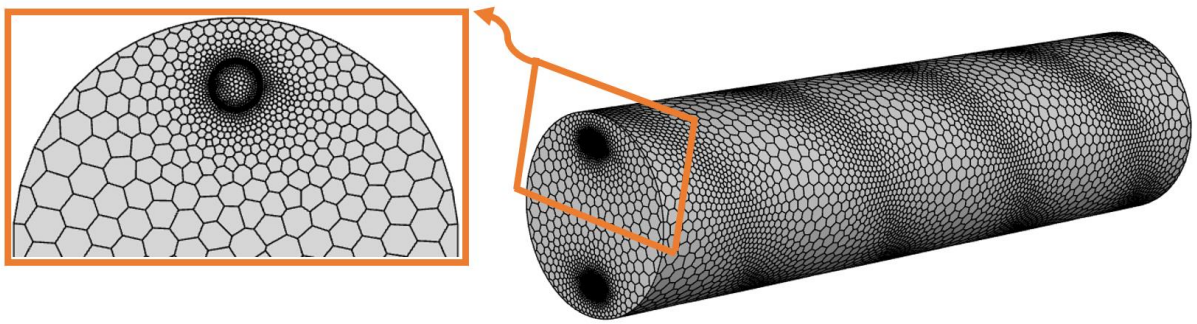


Figure 2. Generated mesh of computational domain

To verify mesh independence, a grid sensitivity analysis was conducted on Case-5, the most geometrically complex configuration due to its multiple and staggered HTF pipe arrangement, which produces tighter PCM domains and more challenging heat transfer characteristics. Four different mesh densities were analyzed: 265,375, 332,625, 453,375, and 675,420 elements. The time-dependent evolution of liquid fraction during PCM melting for each mesh size is presented in Figure 3. The results indicate that mesh refinement leads to reduced variation in the liquid fraction profiles. Although noticeable differences are observed at coarser mesh levels, the results show clear convergence with increasing refinement. In particular, beyond 453,375 elements, further mesh densification leads to only negligible changes in the solution. Therefore, considering both solution accuracy and computational cost, the mesh with 453,375 elements was selected for the main simulations of this study.

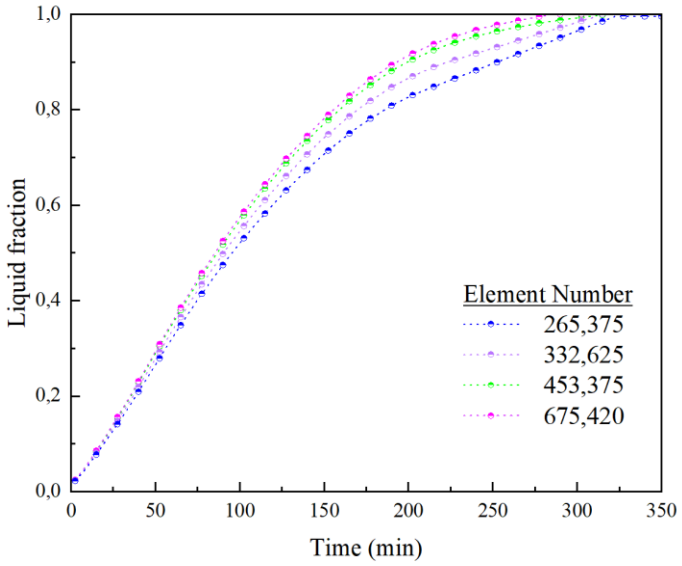


Figure 3. Mesh validation study for horizontal Case-5 (2P-2T)

2.4. Study Validation

A comparison between the present study and a reference study was performed to ensure the accuracy of the numerical model. Figure 4 shows a comparison of the streamlines between the present study and the reference data (Zaytoun et al., 2023). The reference study employed RT44HC as the PCM and the comparison was made for the base case scenario. The streamline patterns in both studies show similar trends and confirm that the model accurately captures the velocity distribution within the PCM. Figure 5 further validates the numerical model by comparing the melting process of the PCM with the reference study for the base case. The similarity in the melting patterns between the two studies underlines the reliability of the present simulation approach.

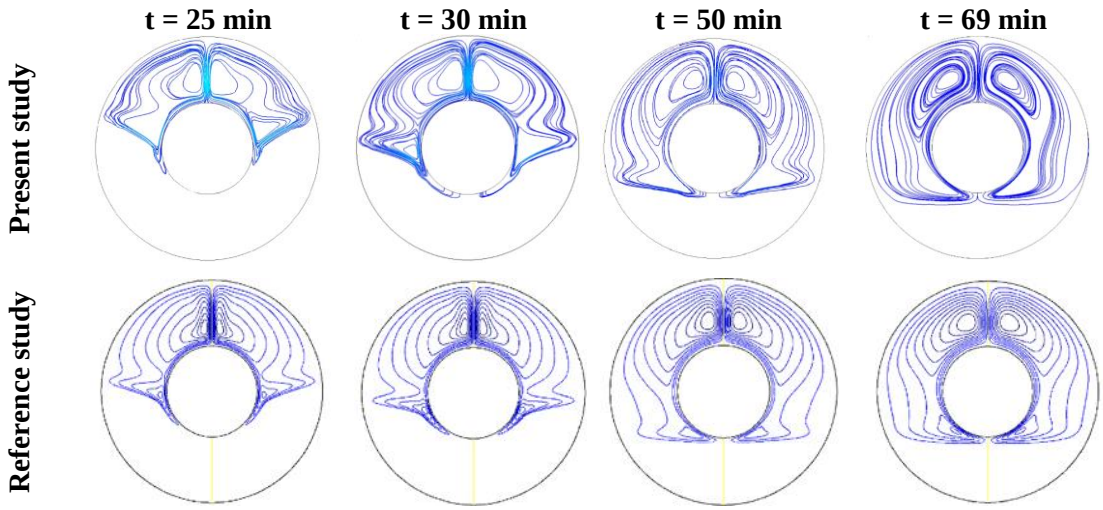


Figure 4. Comparison of streamlines between the present study and reference study (Zaytoun et al., 2023) for base case

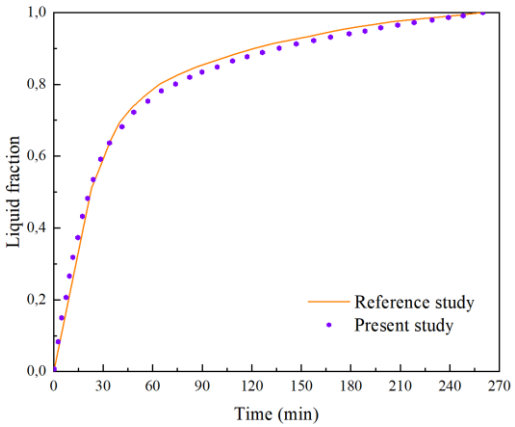


Figure 5. Comparison of melting process between the present study and reference study (Zaytoun et al., 2023) for base case

3. Results

This section presents the numerical results derived from three-dimensional simulations conducted on five different HTF pipe configurations under both horizontal and vertical orientations. The primary objective of this analysis is to evaluate the influence of pipe geometry and system alignment on the thermal behavior of the PCM in a shell-and-tube LHTES system. Key performance indicators including the temporal evolution of liquid fraction, temperature distribution, total energy stored within the PCM and average Nusselt number on the HTF pipe surface are examined to quantify the effectiveness of each design. Among these indicators, the average Nusselt number is particularly important because it quantifies the convective heat transfer intensity at the HTF–PCM interface relative to pure conduction. During the melting process, once the initially conduction-dominated regime is passed, buoyancy-driven natural convection in the liquid PCM governs the overall heat transfer. Therefore, the Nusselt number provides a compact and dimensionless measure of how effectively each HTF pipe configuration promotes convective heat transfer, enabling a fair comparison between geometries with different heat-transfer surface areas. These results offer insights into how geometrical modifications and orientation affect melting dynamics and overall heat transfer performance.

In the horizontal configuration (Figure 6a), all cases demonstrate a gradual increase in the liquid fraction over time, reflecting the progressive melting of the PCM. Among the five examined configurations, 2P-2T exhibits the highest liquid fraction throughout the melting period, indicating the most effective heat transfer. This is followed by 2P-1T, 1P-2T, 1P-1T, and finally the straight configuration, which shows the slowest melting behavior. The superior performance of the 2P-2T geometry can be attributed to its larger heat transfer area and improved internal flow dynamics induced by the complex double-pipe, double-turn configuration, which promotes enhanced thermal dispersion within the PCM domain. While this case incurred the highest PCM volume loss (1.41%), it also provided the largest heat transfer surface area (0.02162 m^2), significantly enhancing the melting rate. This direct correlation between surface area and thermal performance demonstrates that the PCM volume reduction was a justified trade-off for

achieving superior energy storage efficiency. Similarly, the 2P-1T configuration achieved strong melting performance with slightly lower PCM volume loss (1.32%) and a comparable surface area (0.02130 m^2).

Similarly, single-pipe geometries (Cases 1–3) were designed with nearly identical surface areas (~0.016 m^2) to allow for a controlled and fair comparison. Within this group, both 1P–1T and 1P–2T outperformed the straight configuration despite their minimal differences in PCM volume loss (0.05% and 0.17%, respectively). These performance gains can be directly attributed to the helical turns, which increase the complexity of the flow path and enhance convective circulation, thereby improving heat distribution within the PCM domain. This indicates that helical configurations enhance melting performance while maintaining energy storage capacity.

In the vertical configuration (Figure 6b), a similar relative ranking of the configurations is observed; however, overall melting rates are slower compared to the horizontal case. The decline in performance is more pronounced in simpler geometries, such as straight and 1P–1T configurations. This can be attributed to thermal stratification caused by natural convection, which restricts heat transfer to the lower regions of the PCM domain. Nevertheless, advanced configurations such as 2P–2T and 2P–1T maintain superior melting performance by ensuring more uniform heat distribution throughout the PCM domain.

A detailed quantitative evaluation highlights the distinct thermal performance differences among the configurations studied. In the horizontal layout, when the 2P-2T configuration achieves complete melting (liquid fraction = 1.0), the Straight configuration underperforms, exhibiting a 16% lower liquid fraction. This discrepancy becomes even more pronounced in the vertical layout, where the Straight model exhibits a 50.67% lower liquid PCM fraction. Among the single-pipe designs, 1P-2T consistently demonstrates the best thermal performance in both orientations. At the end of the melting process, the Straight configuration records liquid fractions that are 8.58% and 50.56% lower than those of 1P-2T in the horizontal and vertical orientations, respectively. These numerical insights clearly demonstrate the thermal advantage of helical geometries over straight designs.

A direct comparison of Figures 6a and 6b reveals that horizontal orientation consistently leads to faster melting across all geometries. This effect is more prominent in simpler configurations. In contrast, advanced geometries such as 2P-2T are less affected by orientation, thanks to the combined effect of an enlarged heat transfer area and enhanced internal flow dynamics. These geometries mitigate the adverse impact of thermal stratification and maintain superior melting behavior under gravity-affected conditions. Consequently, these findings emphasize the importance of HTF pipe geometry optimization not only from a thermal performance perspective but also in terms of minimizing PCM volume loss, thereby preserving storage capacity while enhancing heat transfer efficiency.

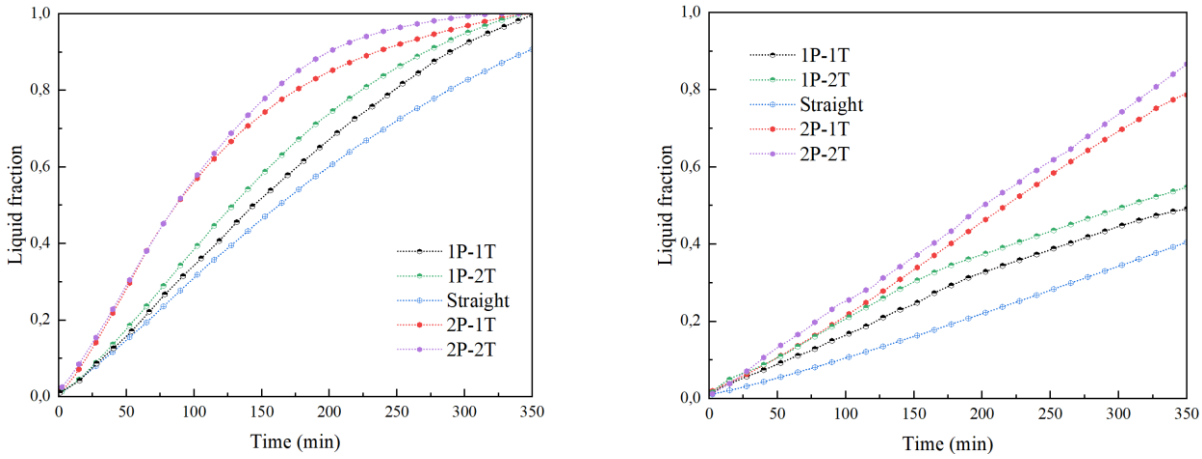
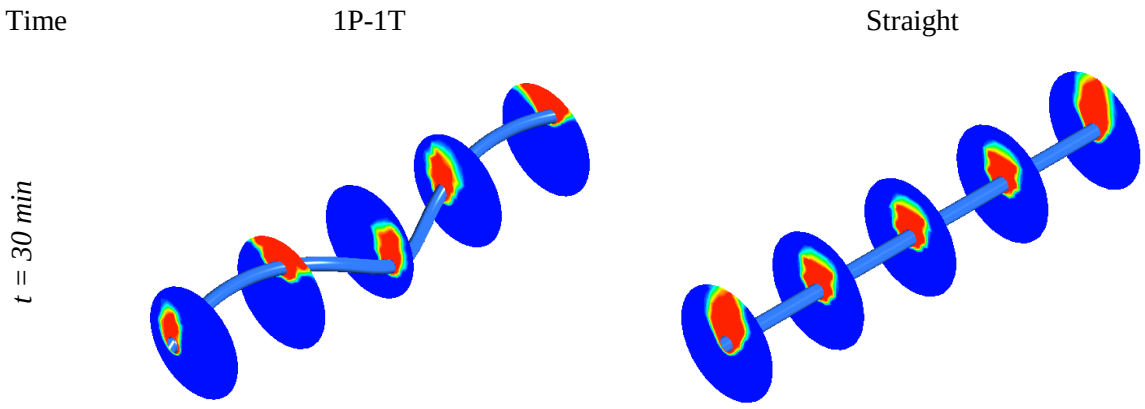
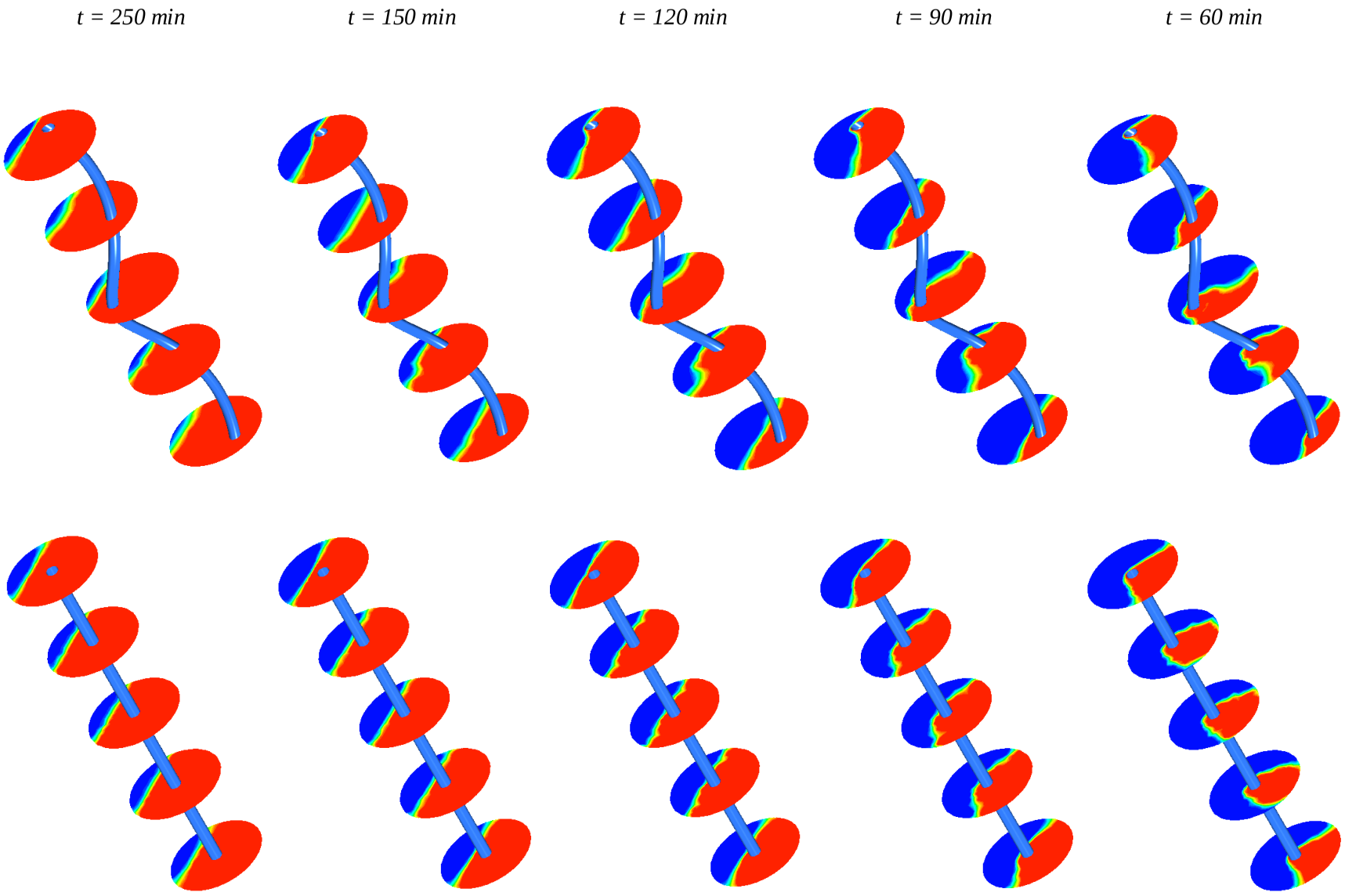


Figure 6. Variation of liquid fraction for different pipe configurations under **(a)** horizontal and **(b)** vertical orientations

Figure 7 illustrates the melting progression of PCM for two different HTF pipe designs: 1P-1T and Straight, under horizontal orientation. In the 1P-1T configuration, the helical pipe follows a coiled path that passes through multiple regions within the PCM domain. This geometry allows direct thermal contact with not only the central area but also the upper, lower and side regions. As a result, melting occurs more uniformly and the heat is delivered more effectively across the storage volume. On the other hand, the straight pipe configuration supplies heat primarily to the central axis of the PCM. While heat transfer toward the top region is supported by natural convection, the lower and corner regions receive limited heat due to the PCM's low thermal conductivity. This leads to slower and incomplete melting, especially near the bottom section. The contour plot results confirm that the helical pipe improves melting coverage by enhancing heat transfer to difficult-to-reach zones. This contributes to a more balanced thermal response and higher PCM utilization, which are critical for improving energy storage performance.




t = 250 min
t = 150 min
t = 120 min
t = 90 min
t = 60 min

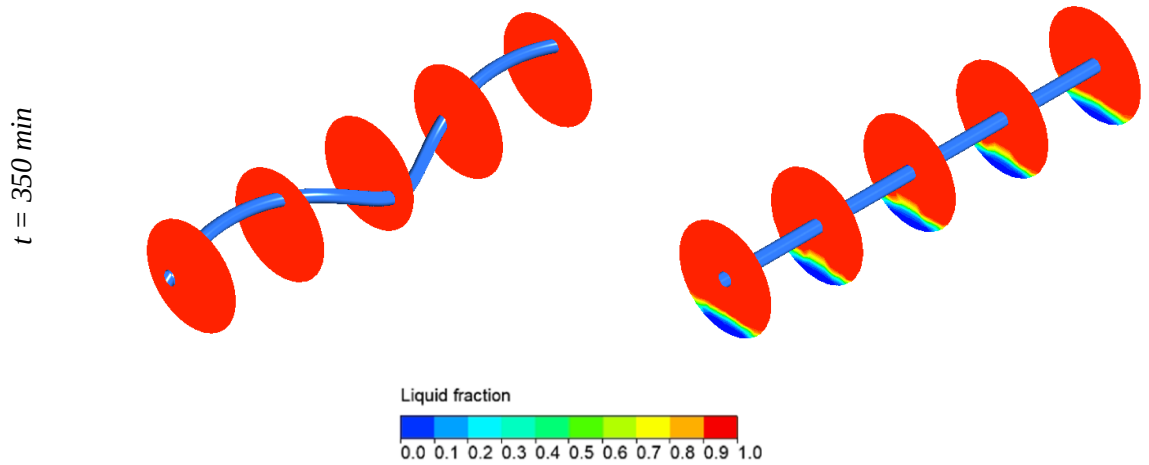


Figure 7. Comparison of liquid fraction evolution at selected time intervals for 1P-1T and Straight configurations in the horizontal orientation

Figure 8 illustrates the variation of stored energy over time for different internal pipe configurations in horizontal and vertical orientations. In both cases, the 2P-2T configuration exhibited the highest energy storage performance. Compared to the Straight configuration, the 2P-2T setup achieved approximately 22.81% higher energy storage in the horizontal orientation and 122.6% higher in the vertical orientation. In the horizontal case, while the differences between configurations decrease toward the end of the charging process due to thermal saturation of the PCM, dual-pipe systems (2P-1T and 2P-2T) demonstrate notably faster energy accumulation during the early stages as a result of enhanced heat transfer from increased surface area induced by the helical geometry. Conversely, in the vertical orientation, the early-stage energy storage rates across configurations are relatively similar; however, performance differences become more pronounced over time. This trend can be attributed to the dominance of buoyancy-driven natural convection in the vertical direction, which amplifies heat distribution in configurations with higher geometric complexity. As a result, the advantage of using multiple helical pipes becomes more significant in vertically arranged systems, where gravitational effects strongly influence the melting and flow of the PCM.

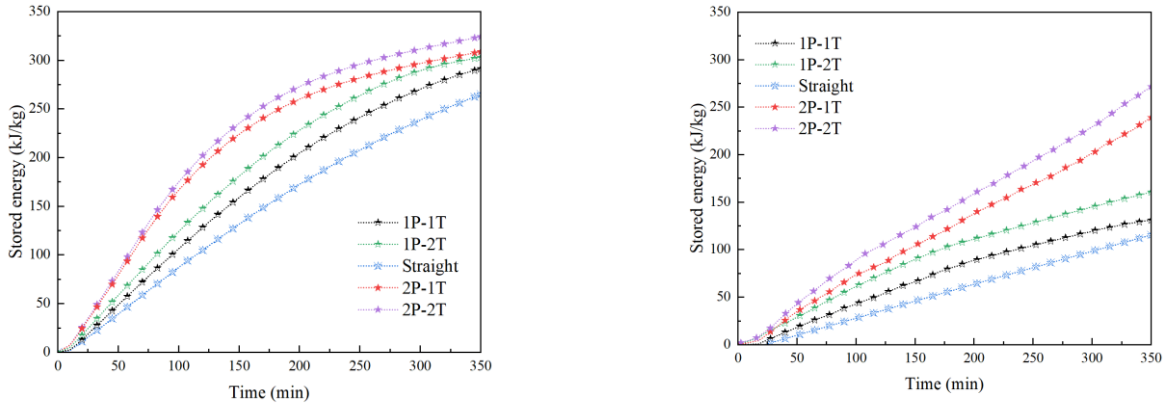


Figure 8. Variation of stored energy for different pipe configurations under **(a)** horizontal and **(b)** vertical orientations

As illustrated in Figure 9, horizontal orientation consistently results in higher stored energy across all configurations. However, the magnitude of this enhancement varies depending on the pipe geometry. The greatest relative improvement is observed in the Straight configuration, where the horizontal setup provides approximately 130.1% more stored energy than the vertical. Conversely, in the 2P-2T case, this difference drops to just 25.3%, indicating that advanced internal geometries significantly mitigate the negative effects of vertical alignment. Notably, the vertically aligned 2P-2T configuration stores nearly the same amount of energy as the horizontally aligned Straight setup, emphasizing the substantial contribution of pipe geometry to thermal performance. These results confirm that system orientation has a strong influence on melting and energy storage, especially in simpler geometries, whereas in more complex designs, such as 2P-2T, the dominant factor becomes the internal pipe layout, which ensures effective heat distribution even under gravity-imposed flow constraints.

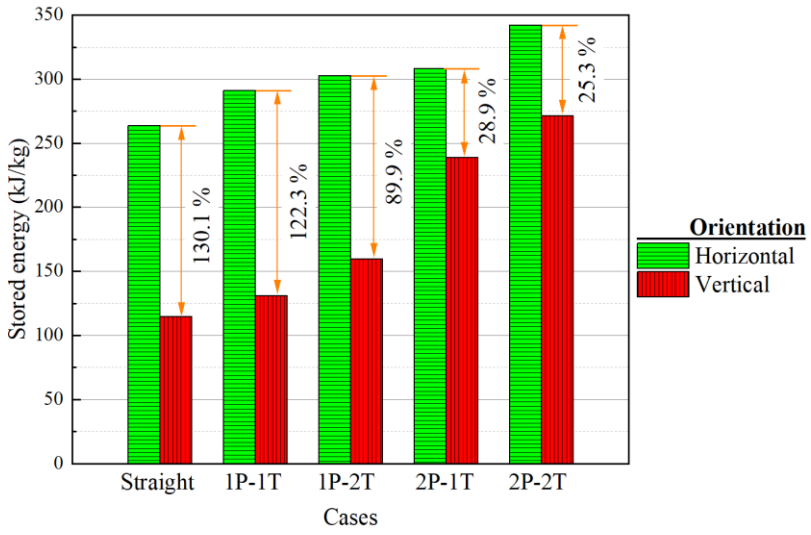


Figure 9. Effect of orientation on stored energy for different HTF pipe configurations

The time-dependent heat flux profiles illustrated in Figure 10 correspond to various HTF pipe geometries in a horizontally oriented LHTES system. Initially, all configurations exhibit a rapid decline in heat flux, which can be attributed to the early thermal adjustment at the pipe–PCM interface. This transient behavior is primarily due to the rapid rise in pipe surface temperature, which temporarily reduces the temperature gradient between the HTF pipe surface and the PCM. Following this initial phase, the heat flux increases and reaches a peak that varies depending on the pipe geometry. Configurations such as 2P-2T and 2P-1T attain the highest peak heat fluxes and maintain superior thermal performance over time, highlighting the benefits of increased internal surface area and enhanced natural convection. The 1P-2T configuration shows an intermediate performance, while the Straight and 1P-1T arrangements display similar peak heat flux levels. However, the Straight case experiences a faster decline after reaching its peak, reflecting less sustained convective enhancement during the later

stages of melting. As the melting process advances, a gradual decline in heat flux is observed across all cases, corresponding to the diminishing temperature gradient. These trends are consistent with the evolution of liquid fraction and stored energy, confirming the enhanced thermal efficiency provided by multi-pipe configurations. Overall, the results emphasize the critical role of internal pipe geometry in governing transient heat transfer characteristics in horizontally oriented latent heat storage systems.

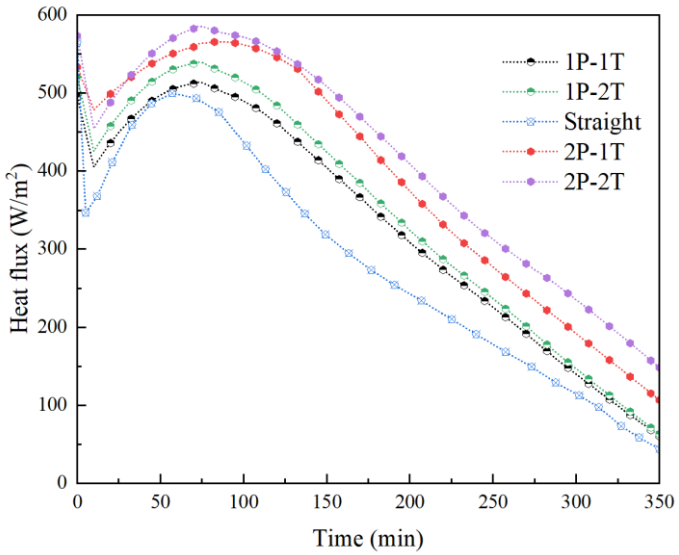


Figure 10. Variation of heat flux over time for different configurations in the horizontal orientation

Figure 11 presents the average Nusselt numbers for various HTF pipe configurations, determined once the Nusselt number distribution along the pipe surface attains a steady state. The results indicate a consistent increase from the Straight geometry to the 2P-2T configuration, demonstrating the clear benefit of increasing both pipe surface area and geometric complexity. Configurations with additional pipes and turns provide larger heat transfer areas and promote stronger convective motion within the molten PCM, leading to more efficient heat transfer. Among all cases, the 2P-2T geometry achieves the highest performance, confirming that appropriate geometric modifications can significantly enhance convective heat transfer in PCM-based thermal energy storage systems. This trend is consistent with the heat flux results, where configurations with greater curvature and more passes sustain higher thermal interaction with the PCM over time.

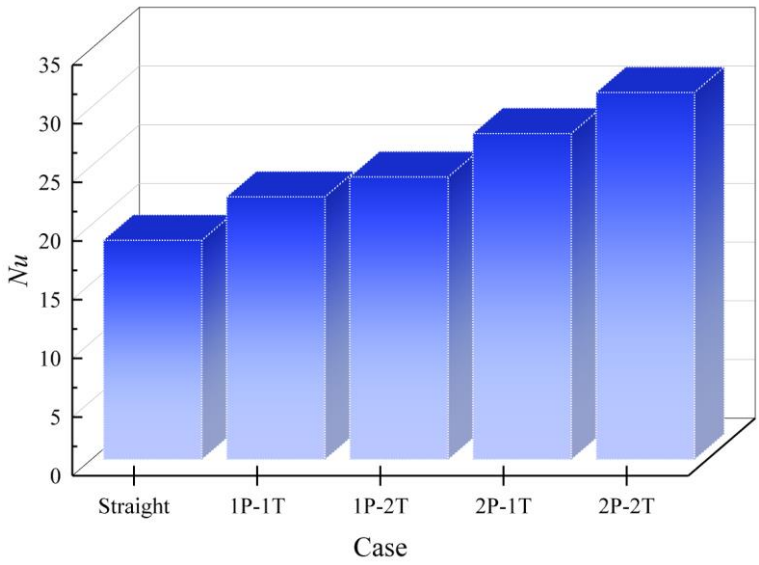


Figure 11. Average Nusselt number for different HTF pipe configurations in the horizontal orientation

4. Conclusion

This study presented a detailed three-dimensional numerical investigation on the melting performance and energy storage characteristics of a LHTES unit filled with RT35HC PCM. Five different HTF pipe configurations—Straight, 1P-1T, 1P-2T, 2P-1T, and 2P-2T—were analyzed under both horizontal and vertical orientations. The performance assessment included liquid fraction evolution, stored energy, average heat flux and average Nusselt number at the HTF–PCM interface, enabling a comprehensive evaluation of the role of tube arrangement and orientation in PCM melting dynamics. The main findings are summarized as follows:

- Among the single-pipe configurations, 1P-2T outperforms 1P-1T and Straight in both orientations. At the end of melting, Straight exhibits 8.58% (horizontal) and 50.56% (vertical) lower liquid fractions than 1P-2T, highlighting the benefit of double-turn helices.
- 2P-2T delivers the highest overall performance in both orientations. At complete melting, Straight exhibits 16% (horizontal) and 50.67% (vertical) lower liquid fractions compared to 2P-2T.
- Horizontal placement consistently improves melting and stored energy. The stored energy of Straight is 130.1% higher in horizontal than in vertical orientation, while for 2P-2T the difference is limited to 25.3%, indicating reduced orientation sensitivity in advanced designs.
- Compared to Straight, 2P-2T stores 22.81% more energy in horizontal and 122.6% more in vertical orientation, with faster accumulation in the early melting stages, particularly in vertical placement.

- All configurations display an initial decline, a geometry-dependent peak, and a gradual decrease in heat flux. 2P-2T and 2P-1T attain the highest peak values and sustain superior thermal performance over time.
- The average Nusselt number increases from Straight to 2P-2T, with helical configurations exhibiting higher values. The 2P-2T configuration records the highest average Nusselt number.

References

Abdellatif HE., Belaadi A., Arshad A., Chai BX., Ghernaout D. Enhancing thermal energy storage system efficiency: Geometric analysis of phase change material integrated wedge-shaped heat exchangers. Applied Thermal Engineering 2025; 262: 125268.

Abdollahi SA., Faramarzi S., Azizi Gheshlaghchaei B., Amin SS. Heidarshenas MH., Majidi H., Talati F. Development of freezing process of phase change materials in cylindrical thermal energy storage tanks with various fin configurations. Scientific Reports 2025; 15(1).

Ahmed S., Abderrahmane A., Saeed AM., Guedri K., Mourad A., Younes O., Botmart T., Shah NA. Melting enhancement of PCM in a finned tube latent heat thermal energy storage. Scientific Reports 2022; 12(1): 1–14.

Ali AM., Bagdanavicius A., Barbour ER., Pottie DL., Garvey S., Rouse J., Baniamerian Z. Improving the performance of a shell and tube latent heat thermal energy storage through modifications of heat transfer pipes: A comprehensive investigation on various configurations. Journal of Energy Storage 2024; 96: 112678.

ANSYS Fluent 18. ANSYS Fluent Tutorial Guide 18. ANSYS Fluent Tutorial Guide 18 2018; 15317: 724–746.

Bahrami H. Thermal optimization of PCM-based heat sink using fins: A combination of CFD, genetic algorithms , and neural networks. The Journal of Engineering 2024; (10): 1–14.

Chabani I., Mebarek-Oudina F. Optimized thermal storage in a heat exchanger with paraffin nano enhanced PCM and rectangular fins. Advances in Mechanical Engineering 2025; 17(5): 1–14.

Gallero FJG., Siles GG., Maestre IR., Blázquez JLF., Pérez-Lombard L. Performance of a simplified computational fluid dynamics model for a Phase Change Material–Water Finned Heat Exchanger Under Different Orientations. Energy Storage 2024; 6(5): 1–14.

Hai T., Omar I., Alizadeh A., Varshney N., Dixit S., Sultan AJ., Anqi AE., Bhatnagar S., Rajab H., Singh Sawaran Singh N. Optimization of nano-finned enclosure-shaped latent heat thermal energy storage units using CFD, RSM, and enhanced hill climbing algorithm. Scientific Reports 2025; 15(1): 1–32.

Harchaoui M., Bendaraa A., Charafi MM. Parametric study of thermal energy storage in shell and tube heat exchanger double tube heat exchanger with I-shaped fins. Journal of Energy Storage 2025; 108, 115094.

Hekmat MH., Saharkhiz S. Impact of helically coiled shell and tube on melting and solidification of PCMs in thermal energy storage systems: A three-dimensional parametric study. Journal of Energy Storage 2025; 108: 115172.

Izadi M., Afsharpanah F., Mohadjer A., Shobi MO., Mousavi Ajarostaghi SS., Minelli F. Performance enhancement of a shell-and-coil ice storage enclosure for air conditioning using spiral longitudinal fins: A numerical approach. Heliyon 2025; 11(4): 42786.

Kumar H., Yadav A., Singh G., Taneja S. A detailed review of the design parameters for augmenting the latent heat in a thermal energy storage system. Energy Harvesting and Systems 2025; 12(1).

Li X., Wang X., Feng G., Li J., Cui Z. Performance impact analysis of shell and tube PCM heat exchanger based on hemispherical rough elements. Journal of Building Engineering 2025; 99: 111521.

Mao QJ., Cao Y., Li T. Comparative investigation on the heat transfer performance of an energy storage system with a spiral tube and straight tube: An experimental approach. Science China Technological Sciences 2023; 66(1): 71–85.

Marzouk SA., Almehmadi FA., Aljabr A., Hamdan MO., Sharaf MA. Enhancing melting of phase change material in double tube latent heat storage system by pin fins. ASME Journal of Heat and Mass Transfer 2025; 147(7): 72401.

Meng F., Che C., Wu Y., Wei J., Rong J., Yang X., Li D., Yang R., Wang Z. Thermal storage performance of a shell and tube phase change heat storage unit with different thermophysical parameters of the phase change material. Processes 2024; 12(1).

Moghaddam MAE., Hassani Soukht Abandani MR., Hosseinzadeh K., Shafii MB., Ganji DD. Metal foam and fin implementation into a triple concentric tube heat exchanger over melting evolution. Theoretical and Applied Mechanics Letters 2022; 12(2): 100332.

Muraleedharan Nair A., Wilson C., Kamkari B., Locke J., Jun Huang M., Griffiths P., Hewitt NJ. Advancing thermal performance in PCM-Based energy Storage: A comparative study with Fins, expanded Graphite, and combined configurations. Energy Conversion and Management 2024; 23(3): 100627.

Nematpour Keshteli A., Iasiello M., Langella G., Bianco N. Optimization of the thermal performance of a lobed triplex-tube solar thermal storage system equipped with a phase change material. Heliyon 2024; 10(16): 36105.

Öztop HF., Kiyak B., Biswas N., Selimefendigil F., Coşanay H. Effects of cooler shape and position on solidification of phase change material in a cavity. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 2024; 163(3).

Perumalsamy J., Punniakodi SBM., Selvam C., Senthil R. Enhancing phase change characteristics of hybrid nanocomposites for latent heat thermal energy storage. Journal of Composites Science 2025; 9(3): 1–21.

Rendall J., Tamraparni A., Shen Z., Hun D., Shrestha., S. Low-cost fin-tube heat exchanger design for building thermal energy storage using phase change material. International Communications in Heat and Mass Transfer 2024; 159(PB): 108098.

Rogowski M., Fabrykiewicz M., Andrzejczyk R. Melting in shell-and-tube and shell-and-coil thermal energy storage: analytical correlation for melting fraction. Energies 2025; 18(11): 1–21.

Saha SC., Ahmed SF., Ahmed B., Mehnaz T., Musharrat A. A review of phase change materials in multi-designed tubes and buildings: Testing methods, applications, and heat transfer enhancement. Journal of Energy Storage 2023; 63, 106990.

Said Z., Mwesigye A., Syam Sundar L., Tiwari AK., Balasubramanian K., Ali HM., Bellos E., Gim C., Ahmed MS., Hwang JY. Sustainable Thermal Solutions: Enhancing Heat Transfer with Turbulators and Nanofluids. Advanced Energy and Sustainability Research 2025; 2400335.

Shen G., Wang X., Yu J., Bin Y., Zhong S., Yang S., Wang J. Experimental investigation of thermal performance of vertical multitube cylindrical latent heat thermal energy storage systems. Environmental Science and Pollution Research 2024; 31(34): 46447–46461.

Younis O., Mozaffari M., Ahmed A., Ghalambaz M. Improvement of latent heat thermal energy storage rate for domestic solar water heater systems using anisotropic layers of metal foam. Buildings 2024; 14(8).

Yousefi E., Ramasamy D., Kadirgama K., Talele V., Najafi H., Olyaei M., Miljkovic N., Panchal S. Electrochemical-thermal modeling of phase change material battery thermal management systems: investigating mesh types for accurate simulations. International Journal of Heat and Mass Transfer 2025; 247(April): 127107.

Zaytoun MM., El-Bashouty MM., Sorour MM., Alnakeeb MA. Heat transfer characteristics of PCM inside a modified design of shell and tube latent heat thermal energy storage unit. Case Studies in Thermal Engineering 2023; 49(July): 103372.

Zhang W., Pan L., Ding D., Zhang R., Bai J., Du Q. Progress in the study of enhanced heat exchange in phase change heat storage devices. ACS Omega 2023; 8(25): 22331–22344.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 439-459, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 439-459, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde Ekstrem İklim Değişikliği İndekslerindeki Değişimlerin İncelenmesi

Arda GÜNGÖREN[1], Evren ÖZGÜR[2*], Muhammed Emir SÜNGER[3], Muhammet SAKINÇ[4]

[1,2,3,4] İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34700, İstanbul

[1] https://orcid.org/0009-0000-4386-6945
[2] https://orcid.org/0000-0002-6112-4539
[3] https://orcid.org/0009-0003-5854-9581
[4] https://orcid.org/0009-0000-9848-6931
*Sorumlu yazar: evren.ozgur@medeniyet.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 02.08.2025
Kabul tarihi:03.10.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Doğu Anadolu Bölgesi
Güneydoğu Anadolu Bölgesi
Mann-Kendall
Sen'in eğim testi
Yenilikçi Şen yöntemi
Trend analizi

ÖZ

İklim değişikliği, günümüzde yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve sosyal alanlarda da ciddi etkiler oluşturan küresel ölçekli bir sorundur. Bu çalışma, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde ekstrem iklim indekslerinde zamanla meydana gelen değişimleri incelemeyi amaçlamaktadır. 1973–2023 yılları arasında 17 meteoroloji istasyonuna ait günlük sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak elde edilen ekstrem iklim değişikliği indeksleri, Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi ve Yenilikçi Şen Yöntemi ile analiz edilmiştir. Her iki bölgede sıcaklık indekslerinde anlamlı artışlar, düşük sıcaklıkları içeren (örn. FD0) indekslerde ise azalışlar tespit edilmiştir. Yağış indekslerinde ise bölgesel farklılıklar öne çıkmakta; bazı illerde anlamlı artış, bazılarında ise azalış eğilimleri gözlemlenmektedir. Mann-Kendall trend testi sonuçlarına göre, incelenen 17 istasyonun 16 tanesinde sıcaklık indekslerinde anlamlı değişimler gözlenmiştir. En az bir yağış indeksinde değişim gözlenen istasyon sayısı ise 9 olarak hesaplanmıştır. Sen'in Eğim Testi sıcaklık indeksleri sonuçlarının, Mann-Kendall testi sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Sen'in eğim testi yağış indeksi sonuçlarına göre Doğu Anadolu Bölgesi'nde indekslerde artış gözlenirken, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde çoğunlukla azalış trendi gözlenmiştir. Yenilikçi Şen yöntemi sıcaklık ve yağış indeksleri sonuçlarının da diğer iki yöntemin sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Investigation of Changes in Extreme Climate Change Indices in the Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia Regions

Research Article

Article History:
Received: 02.08.2025
Accepted: 03.10.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Eastern Anatolia Region
Southeastern Anatolia Region
Mann-Kendall
Sen's slope test
Innovative Sen method
Trend analysis

ABSTRACT

Climate change is a global issue that today has serious impacts not only on the environment but also on economic and social systems. This work aims to examine the changes over time in extreme climate indices in the Eastern Anatolia and Southeastern Anatolia Regions. Extreme climate change indices obtained from daily temperature and precipitation data for 17 meteorological stations between 1973 and 2023 were analyzed using Mann-Kendall, Sen's Slope Test and Innovative Şen Method. Significant increases were detected in temperature indices in both regions, while indices involving low temperatures (e.g., FD0) showed decreases. In precipitation indices, regional differences stand out; in some provinces, significant increases were observed, whereas in others, decreasing trends were detected. According to the Mann-Kendall trend test results, significant changes in temperature indices were observed in 16 out of the 17 stations examined. The number of stations showing changes in at

least one precipitation index was calculated as 9. The results of Sen's slope test for temperature indices were found to be consistent with those of the Mann-Kendall test. Based on Sen's slope test results for precipitation indices, increasing trends were observed in the Eastern Anatolia Region, while mostly decreasing trends were found in the Southeastern Anatolia Region. The results of the Innovative Şen Method for temperature and precipitation indices were also consistent with the findings of the other two methods.

To Cite: Güngören A., Özgür E., Sünger ME., Sakınç M. Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde Ekstrem İklim Değişikliği İndekslerindeki Değişimlerin İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 439-459.

1. Giriş

İklim değişikliği, günümüzde çevresel bir tehdit olmasının yanı sıra; aynı zamanda ekonomik, sosyal ve mühendislik açısından da küresel ölçekte etkileri hissedilen çok boyutlu bir kriz haline gelmiştir. Özellikle sanayi devrimi sonrası dönemde fosil yakıt kullanımının artmasıyla atmosfere salınan sera gazları, küresel ısınma sürecini hızlandırarak iklim sisteminde önemli değişimlere yol açmıştır. Bu değişiklikler; sıcaklık artışları, düzensiz yağışlar, kuraklık, seller, deniz seviyesi yükselmeleri, ekstrem hava olaylarının sıklığındaki artışlar ve su kaynaklarındaki azalmalar gibi pek çok farklı biçimde kendini göstermektedir (Türkeş, 2008).

İklim değişikliği hem doğal değişkenliklerden hem de insan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklanmakta olup, istatistiksel olarak anlamlı ve uzun vadeli atmosferik değişimleri kapsamaktadır. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde bu durum; "Doğal iklim değişikliğine ilave olarak, küresel atmosfere ait bileşimi bozan insan etkinlikleri neticesinde meydana gelen iklim değişimi" olarak tanımlanmaktadır (IPCC, 2022).

Türkiye, iklim değişikliğinin bölgesel etkilerini açıkça hisseden ülkelerden biridir. Coğrafi konumu, topoğrafik çeşitliliği ve farklı iklim tiplerini bünyesinde barındırması nedeniyle, değişen iklim koşullarına karşı kırılgan bir yapıdadır. Özellikle yarı kurak ve kurak iklim bölgelerinde bulunan Güneydoğu Anadolu Bölgesi artan sıcaklıklar ve azalan yağış rejimleri nedeniyle çölleşme riski ile karşı karşıyadır (Biberoğlu, 2011).

Doğu Anadolu Bölgesi ise; yüksek rakımı, sert karasal iklimi ve sınır aşan su kaynaklarına ev sahipliği yapmasıyla birlikte hem iklimsel hem de jeopolitik açıdan özel öneme sahip ve kırılganlığı yüksek bir bölgedir. Fırat Nehri ve kolları gibi önemli su kaynaklarının bu bölgede bulunması, iklim değişikliğine bağlı gelişmelerin sadece çevresel değil, ekonomik ve stratejik boyutlarının da olduğunu göstermektedir (Emek, 2014).

İklim değişikliğinin inşaat sektörü üzerindeki etkileri ise çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Oysa artan sıcaklıklar, yapı malzemelerinin fiziksel özelliklerinde bozulmalara yol açarak dayanıklılıklarını azaltabilirken, ani ve yoğun yağışlar zemin stabilitesini bozmakta ve temel sistemlerinde risk oluşturmaktadır (Younis, 2025).

Yapılan çalışmalarda, artan sıcaklık değişimlerinin asfalt, beton ve çelik gibi yapı malzemelerinin performansını doğrudan etkilediği, bu nedenle tasarım ve bakım süreçlerinin yeniden ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle deniz seviyesi yükselmeleri ve sel riski gibi ekstrem olaylara

karşı, mühendislik projelerinde dayanıklılığın öncelikli kriter olarak ele alınması gerekmektedir (Younis, 2025).

Bu bağlamda iklim değişikliği, yalnızca çevre mühendisliği değil, tüm inşaat mühendisliği uygulamaları açısından da göz önünde bulundurulması gereken temel bir faktördür. Sürdürülebilir yapı tasarımları, iklim projeksiyonlarıyla uyumlu mühendislik çözümleri ve iklim risklerine karşı bölgeye özgü stratejilerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir (Abbass ve ark., 2022).

İklim değişikliğinin Türkiye gibi farklı alt iklimleri barındıran bir ülkede her bölgede farklı bir şekilde kendini göstermesi oldukça normaldir. Bu kapsamda, dünyada ve ülkemizde farklı bölgelerde, farklı trend analizi yöntemleriyle yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar hem mevcut durumu değerlendirme, hem de geleceğe yönelik uyum stratejileri geliştirme açısından bilimsel temeller sağlamaktadır. Örneğin Emek (2014), Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan 46 istasyondan elde edilen aylık ve yıllık toplam yağış verilerini analiz ederek yaptığı çalışmada kuzey kesimlerde artış, güney ve batı kesimlerde ise azalış eğilimleri saptamıştır. Biberoğlu (2011), Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)'nin iklim modellerini kullanarak Türkiye üzerindeki olası etkileri parametrik ve parametrik olmayan testlerle değerlendirmiş ve bölgesel belirsizliklerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır. Çoban (2013), 80 şehirden elde ettiği 1971-2010 dönemine ait verileri Şen'in Trend Yöntemi de dahil olmak üzere farklı analizlerle incelemiş; Karadeniz Bölgesi'nde artış, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ise azalış eğilimleri tespit etmiştir. Akbaş ve ark. (2023) Batman Bölgesi'nde yaptığı çalışmada sıcaklık verilerinde anlamlı artış trendleri gözlemlerken, yıllık yağış verilerinde anlamlı trendler tespit edememiştir. Altunay (2016) Türkiye genelinde 212 istasyondan elde edilen sıcaklık ve yağış verilerini mevsimsel bazda analiz etmiş ve özellikle yaz ile kış mevsimlerinde sıcaklıkların anlamlı şekilde arttığını; yağışlarda ise kuzeydoğuda artış, batıda ise azalma eğilimlerinin öne çıktığını belirtmiştir. Kahramanmaraş özelinde 2009 yılında yapılan iki ayrı çalışmada ise sıcaklık verilerinde anlamlı artışlar belirlenirken, yağışlı gün sayısında dikkat çekici azalmalar saptanmıştır (Cosun ve Karabulut, 2009; Karabulut ve Cosun, 2009).

İklim değişikliğinin analizi için yapılan çalışmalar, bu etkilerin bölgesel düzeyde nasıl farklılaştığını ortaya koymakta ve alınması gereken önlemlere bilimsel zemin sağlamaktadır. Bu çalışmaların çoğunda parametrik olmayan trend analiz yöntemleri tercih edilmektedir. Mann-Kendall, Sen'in Eğimi ve Yenilikçi Şen Yöntemi gibi analizler, normal dağılım varsayımı gerektirmemesi nedeniyle hidrolojik ve iklimsel çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Meals ve ark., 2011).

Özellikle Şen (2012) tarafından geliştirilen Yenilikçi Şen Yöntemi, zaman serilerindeki alt eğilimleri de tespit edebilmesi ve simetrik olmayan dağılımlarda da kullanılabilirliği açısından son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır (Asikoğlu ve ark., 2024).

Bu çalışmada, 1973–2023 yılları arasındaki 51 yıllık dönemi kapsayan; Doğu Anadolu Bölgesi'ne ait 10, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne ait 7 olmak üzere toplam 17 meteoroloji istasyonunun sıcaklık ve yağış verileri kullanılmıştır. Analizlerde trend analizi yöntemleri olarak Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi ve Yenilikçi Şen Yöntemleri uygulanmıştır. Toplamda 27 adet iklim indeksi (16 sıcaklık, 11 yağış)

değerlendirilmiştir. Bulgular, Doğu Anadolu Bölgesi'nde anlamlı sıcaklık artışlarının ve serin gün/gece sayısında düşüşlerin yaşandığını, yağışlarda ise bazı istasyonlarda anlamlı artışlar gözlendiğini ortaya koymaktadır. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ise sıcaklık artışları genel olarak anlamlı bulunmuştur.

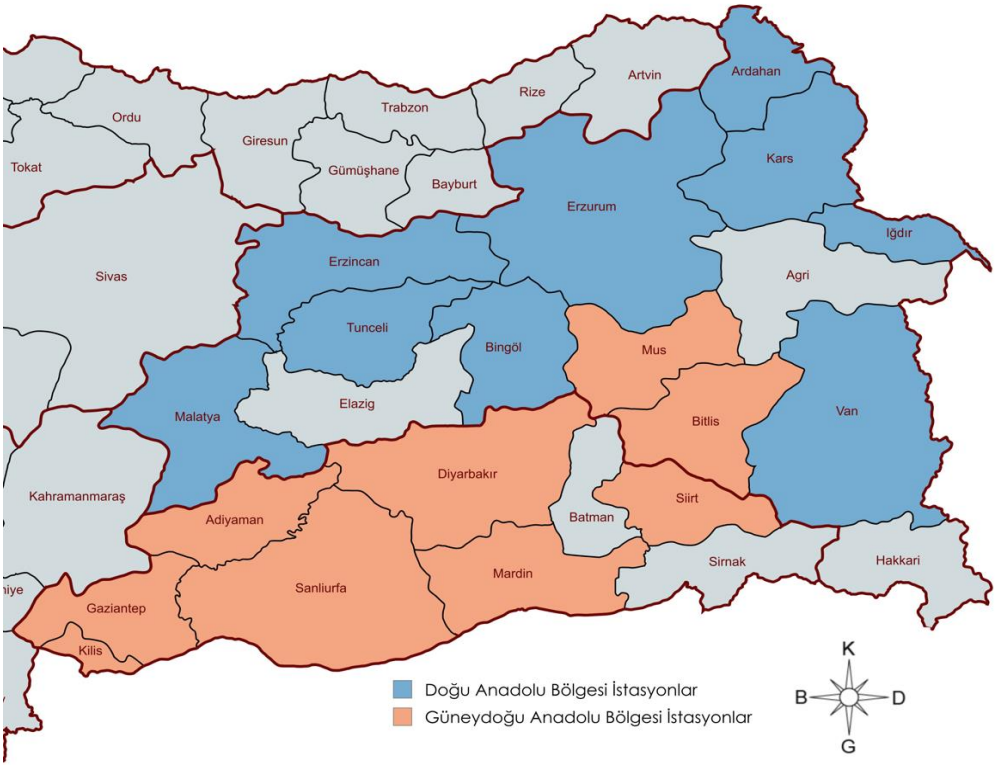
2. Materyal ve Metot

Türkiye coğrafi konumu itibariyle özellikle güney ve batı kıyılarında baskın durumda olan Akdeniz iklimi etkisi altındadır (Deniz ve diğ. 2011). Birçok alt iklim tipini barındırması, ortalama rakım yüksekliği ve etrafının denizlerle çevrili olması ile bağlantılıdır (Kömüşcü ve Aksoy, 2024). Bu sebeple ülkemizin her bölgesinde farklı şekillerde etkiler görmek mümkündür (Biberoğlu, 2011).

Güneydoğu Anadolu Bölgesi yüz ölçümü bakımından ülkemizin en küçük coğrafi bölgesidir. Kış ayları nadir olarak soğuk geçerken, yaz ayları ise çok sıcak geçmektedir. Bitki örtüsü, alçak kesimlerde seyrek otlaklar ve kuraklığa dirençli çalılardan oluşmaktadır. Bölge yağışların büyük bir çoğunluğunu ilkbahar ve kış mevsimlerindeki aylarda almaktadır (Çoban, 2013).

Türkiye'nin en geniş coğrafi bölgesi Doğu Anadolu Bölgesi'dir. Kışları uzun ve sert, yaz ayları ise genellikle serin geçmektedir. Ancak alçak kesimlerde yaz sıcaklıkları önemli ölçüde yüksektir. Kış aylarında bölge genellikle karla kaplıdır ve don olayları oldukça yaygındır. Yüksek kesimlerde doğal bitki örtüsü çayır formasyonlarından, alçak kesimlerde ise bozkırlardan oluşmaktadır. Bölge yağışların büyük bir çoğunluğunu kış ve ilkbahar mevsimlerindeki aylarda almaktadır (Çoban, 2013).

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan "2023 Yılı İklim Değerlendirmesi" raporunun sonucuna göre her iki bölgede de 2023 yılında aylık ortalama sıcaklıklar Ocak, Mart, Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında uzun dönem ortalamalarının (1991-2020) üzerinde gerçekleşmiştir. Bu farklar aylık olarak 1 °C ile 4 °C arasında değişmektedir (MGM, 2024).



Şekil 1. Çalışmada kullanılan istasyonlar

Bu çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi'nde 10 adet, Güney Doğu Anadolu Bölgesi'ndeki 7 adet şehir istasyon olarak belirlenmiş ve bu istasyonların sıcaklık ve yağış analizleri parametrik olmayan Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi ve Yenilikçi Şen Yöntemleri ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan istasyonların konumları Şekil 1'de, istasyonlara ait bilgiler ise Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan istasyonların özellikleri

İstasyon Kodu	İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)	Veri Periyodu
17265	Adıyaman	37,7553	38,2775	672	1973-2023
17046	Ardahan	41,1061	42,7055	1827	1973-2023
17203	Bingöl	38,8847	40,5007	1139	1973-2023
17280	Diyarbakır	37,8973	40,2027	674	1973-2023
17094	Erzincan	39,7523	39,4868	1216	1973-2023
17096	Erzurum	39,9529	41,1897	1758	1973-2023
17261	Gaziantep	37,0585	37,3510	854	1973-2023
17100	Iğdır	39,9227	44,0523	856	1973-2023
17097	Kars	40,6042	43,1073	1777	1973-2023
17262	Kilis	36,7085	37,1123	640	1973-2023
17199	Malatya	38,3367	38,2173	950	1973-2023
17275	Mardin	37,3103	40,7284	1040	1973-2023
17204	Muş	38,7509	41,5023	1322	1973-2023
17270	Şanlıurfa	37,1608	38,7863	550	1973-2023
17210	Siirt	37,9319	41,9354	895	1973-2023
17165	Tunceli	39,1058	39,5408	981	1973-2023
17172	Van	38,4693	43,3460	1675	1973-2023

2.1. İklim Değişiklikleri İndeksleri

17 istasyona ait 1973-2023 yılları arasını kapsayan günlük maksimum sıcaklık, günlük minimum sıcaklık ve günlük toplam yağış verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilip gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Veriler çalışma bölgesinde bulunan tüm istasyonları kapsayacak şekilde ve değişken bazlı olarak ".txt" formatında temin edilmiştir. İlgili veriler istasyon bazlı olarak düzenlenmiş, eksik olan veriler doğrusal regresyon yardımıyla tamamlanmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. Ardından, düzenlenen verilere ücretsiz bir program olan RStudio aracılığı ile aykırı değer analizleri yapılmış ve analiz sonucunda herhangi bir aykırı değere rastlanmamıştır. Düzenlenen ve aykırı değer analizleri yapılan veriler, CLIMDEX programına yüklenerek literatürde en sık kullanılan 27 adet çekirdek iklim indeksi her bir istasyon için elde edilmiştir. CLIMDEX "Climate Extremes Indices" yani "İklim Aşırılıkları İndeksleri", iklim değişikliğinin aşırı uçlar üzerindeki etkilerini ölçmek için geliştirilmiş bir iklim indeksleri setidir ve 27 adet çekirdek iklim indeksi içerir. Program ücretsiz olup, çalışmada kullanılan istasyonlara ait günlük toplam yağış, günlük maksimum sıcaklık ve günlük minimum sıcaklık verilerine ihtiyaç duymaktadır.

Tablo 2. 27 adet iklim indeksi ve indekslerin açıklamaları (Sensoy ve ark., 2013)

İndis Kodu	İndis Adı	Tanımlama	Birim
RX1day	1 Günlük maksimum yağış	Günlük maksimum yağış miktarı	mm
RX5day	5 Günlük maksimum yağış	5 günlük ardışık maksimum yağış miktarı	mm
SDII	Günlük yağış yoğunluk indisi	Yıllık yağış toplamı / yağışlı gün sayısı	mm/gün
R10	Şiddetli yağışlı gün sayısı	Yağış >= 10 mm olduğu günler	Gün
R20	Çok şiddetli yağışlı gün sayısı	Yağış >= 20 mm olduğu günler	Gün
R30	Çok şiddetli yağışlı gün sayısı	Yağış >= 30 mm olduğu günler	Gün
CDD	Ardışık kurak günler sayısı	Yağış < 1 mm olduğu ardışık günler sayısı	Gün
CWD	Ardışık ıslak günler sayısı	Yağış >= 1 mm olduğu ardışık günler sayısı	Gün
R95p	Çok ıslak günler	Yağışın normalinin %95'inden fazla olduğu miktarlar	mm
R99p	Aşırı ıslak günler	Yağışın normalinin %99'undan fazla olduğu miktarlar	mm
PRCPTOT	Yıllık toplam yağış	Yıllık toplam yağış miktarı (P>=1mm)	mm
FD0	Zirai don günleri	Minimum sıcaklık < 0 °C olduğu günler	Gün
SU25	Yaz günleri	Maksimum sıcaklık > 25 °C olduğu günler	Gün
ID0	Buz günleri	Maksimum sıcaklık < 0 °C olduğu günler	Gün
TR20	Tropik geceler	Minimum sıcaklık > 20 °C olduğu günler	Gün
GSL	Büyüme sezonu uzunluğu	T>5 °C olan ilk 6 gün ile T<5 °C olan ilk 6 gün arasındaki günler toplamı	°C
TXx	Max Tmax	Maksimum sıcaklıkların maksimumu	°C
TNx	Max Tmin	Minimum sıcaklıkların maksimumu	°C
TXn	Min Tmax	Maksimum sıcaklıkların minimumu	°C
TNn	Min Tmin	Minimum sıcaklıkların minimumu	°C
TN10p	Serin geceler	Tmin < normalinin %10 olduğu günler	Gün
TX10p	Serin günler	Tmax < normalinin %10 olduğu günler	Gün
TN90p	Sıcak geceler	Tmin > normalinin %90 olduğu günler	Gün
TX90p	Sıcak günler	Tmax > normalinin %90 olduğu günler	Gün
WSDI	Sıcak devre süresi indikatörü	Tmax > normalinin %90 olduğu en az 6 ardışık gün sayısı	Gün
CSDI	Soğuk devre süresi indikatörü	Tmin < normalinin %10 olduğu en az 6 ardışık gün sayısı	Gün
DTR	Günlük sıcaklık genişliği	Tmax - Tmin	°C

Bu indeksler ve indekslerin açıklamaları Tablo 2'de gösterildiği gibidir.

2.2. Trend Analizi

Trend analizi, bir değişkenin bir zaman serisi içinde değerlerinde anlamlı bir azalış veya artış eğilimi (trend) olup olmadığının belirlenmesi amacıyla yapılır. Bu analiz, regresyon ve hipotez testi yöntemlerini temel alır. Zamanla düzensiz değişim gösterebilen hidrolojik değişkenlerin artış veya azalış tespitlerini yapmak için özel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (Helsel ve Hirsch, 2002).

Özellikle iklim verileri gibi çevresel zaman serilerinde, doğrusal varsayımlar genellikle geçerli olmadığından, parametrik olmayan testler olan Mann-Kendall ve Sen'in Eğim Testi gibi yöntemler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemler sıcaklık ve yağış gibi iklim değişkenlerinin yıllık ve mevsimsel eğilimlerini belirlemede etkin araçlar olarak kullanılmakta ve özellikle sıcaklıkta artış, yağışta ise azalış gibi eğilimlerin tespitinde önemli roller üstlenmektedir (Krishna Priya ve Naranammal, 2023).

Bu çalışmada parametrik olmayan yöntemlerden Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi ve Yenilikçi Şen Yöntemi trend analizleri RStudio programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Mann-Kendall Trend Testi

Mann-Kendall (MK) testi, zaman serilerinde anlamlı bir yukarı veya aşağı yönlü eğilim olup olmadığını tespit etmek için kullanılan ve parametrik olmayan bir metottur. Yöntem, ilk olarak Mann (1945) tarafından önerilmiş ve daha sonra Kendall (1975) tarafından geliştirilmiştir.

Bu test, özellikle iklimsel ve hidrolojik zaman serilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü verilerin normal dağılım göstermesi gibi bir varsayımı bulunmaz (Aditya ve ark., 2021).

$$S = \sum_{i=1}^{n=1} \sum_{j=i+1}^{n} sign(x_j - x_i), sign(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$Var[S] = \frac{\{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^{p} t_j(t_j - 1)(2t_j + 5)\}}{18} \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{VAR[S]}} & Eğer\ S > 0 \\ 0 & Eğer\ S = 0 \\ \dfrac{S-1}{\sqrt{VAR[S]}} & Eğer\ S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Testin temel mantığı, her bir veri noktasının kendisinden sonra gelen tüm veri noktalarıyla karşılaştırılarak farklarının hesaplanmasına dayanır. Pozitif farklar +1, negatif farklar -1, sıfır farklar ise 0 olarak değerlendirilir. Bu farkların toplamı "S" istatistiğini verir (Özgür ve Koçak, 2019; Öğ ve ark., 2024).

S değeri elde edildikten sonra varyans hesabına geçilir. Denklemde n değeri veri sayısını ifade ederken, t_j değeri değerlerin tekrar etme sıklığını ifade eder. S ve varyans değerleri hesaplandıktan sonra Z değeri hesaplanır ve bu değer kritik Z değeri ile karşılaştırılır. %95 güven düzeyinde kritik değer ±1,96'dır. Z değerinin +1,96'nın üzerinde sonuç vermesi anlamlı bir artışı ifade ederken, -1,96 değerinin altında sonuç vermesi ise anlamlı bir azalışın olduğunu ifade eder (Ergün ve ark., 2024).

2.2.2. Sen'in Eğim Testi

Sen'in Eğim Testi, zaman serilerindeki eğilimin (trend) varlığını ve bu eğilimin büyüklüğünü değerlendirmek amacıyla geliştirilen parametrik olmayan bir yöntemdir (Sen, 1968).

Özellikle hidrolojik ve meteorolojik çalışmalarda sıkça kullanılan bu yöntem, trend analizlerinde kullanılan diğer yöntemlerle birlikte anlamlı sonuçlar üretir. Trend analizi çalışmalarında sıklıkla kullanılan Mann-Kendall ve Yenilikçi Şen Trend analizleri gibi yöntemlerle beraber uygulandığında, verilerin yorumlanmasında daha güvenilir sonuçlar elde edilir (Kartal ve ark., 2024).

Sen'in Eğim Testi, serideki tüm veri çiftleri arasındaki eğimlerin hesaplanmasına dayanır. Veri serisinde (X_j, X_k), j > k olmak üzere tüm çiftler için eğim (Q_i), aşağıdaki denklem ile hesaplanır (Sen, 1968; Kartal ve ark., 2024):

$$Q_i = \frac{x_j - x_i}{j - k} \tag{4}$$

Elde edilen Q_i değerleri küçükten büyüğe sıralanır ve ortanca (medyan) değeri alınarak serinin genel eğilimi tespit edilir.

$Q_{medyan} > 0$ ise veri serisinde artan bir eğilim

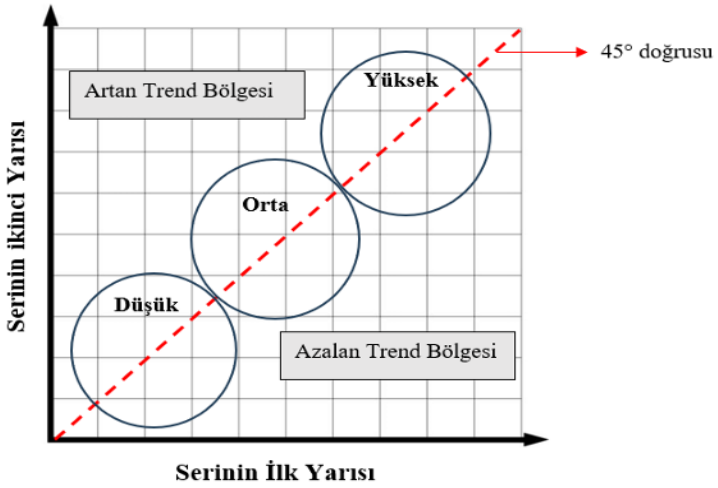
$Q_{medyan} < 0$ ise veri serisinde azalan bir eğilim

$Q_{medyan} = 0$ ise veri serisinde trend olmadığı varsayılır.

Elde edilen trend sonuçlarının istatistiksel güvenilirliği, belirli bir güven aralığında değerlendirilmelidir. Bu bağlamda üst ve alt sınır değerleri hesaplanarak, normal dağılım varsayımı altında iki yönlü Z istatistiği kullanılır (Krishna Priya ve Naranammal, 2023).

2.2.3. Yenilikçi Şen Yöntemi

Şen (2012) tarafından ortaya çıkarılan "Yenilikçi Şen Yöntemi", klasik olan trend analizi yöntemlerine (Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi, vb.) alternatif olarak geliştirilmiş parametrik olmayan analiz yöntemidir. Trendin yönünü detaylı, yenilikçi bir grafik yöntemi ile tespit etmeyi sağlar (Şekil 2).



Şekil 2. Yenilikçi Şen Yöntemi grafiğinin yorumlanması

Şekil 2'de görüldüğü üzere ilk olarak veri kümesi iki adet eşit parçaya bölünür. Ayrılan parçalar kendi içlerinde küçükten büyüğe doğru sıralanır. İlk yarıdaki değerler yatay eksene (X), ikinci yarıdaki değerler dikey eksene (Y) yerleştirilir. Grafiğin üzerine 45° doğrusu çizilir. Eğer veriler doğru üzerinde yer alıyor ise azalan ya da artan bir trend yok demektir. (Çeribaşı, 2019). Doğrunun altında kalan veriler azalan bir trendi ifade ederken, doğrunun üzerindeki veriler ise artan bir trendi ifade eder. Bu yöntemin diğer bir özelliği de trendin büyüklüğü hakkında bilgi verebilmesidir (Akbaş ve ark., 2023).

3. Bulgular

3.1. Mann-Kendall Trend Analizi Sıcaklık İndeksi Sonuçları

17 adet istasyona ait RStudio aracılığıyla elde edilen Mann-Kendall sıcaklık indeksi sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Mann-Kendall trend testi sıcaklık indeksi sonuçları

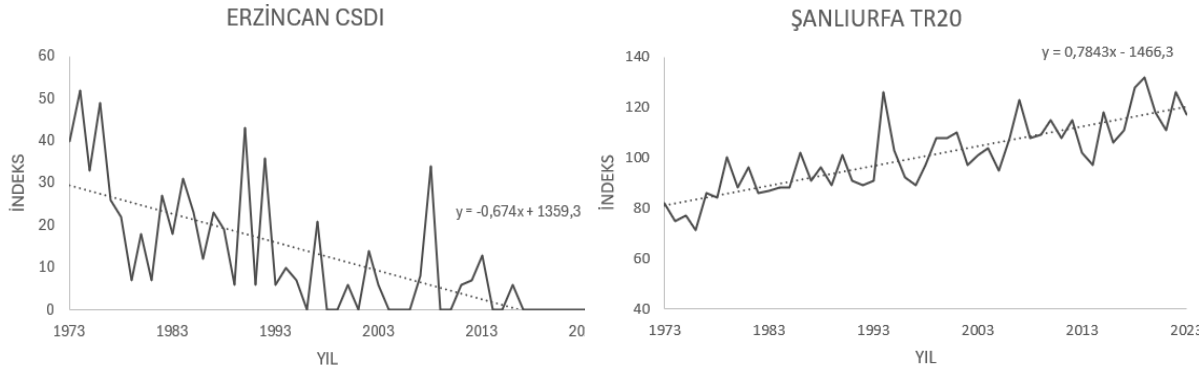
	CSDI	DTR	FD0	GSL	ID0	SU25	TN10p	TN90p	TNn	TNx	TR20	TX10p	TX90p	TXn	TXx	WSDI
Adıyaman	-2.726	2.275	-2.126	2.037	0.313	4.391	-4.919	4.015	1.356	0.888	5.184	-5.956	4.969	0.594	2.713	2.846
Ardahan	-0.545	-1.543	-4.504	2.048	-4.447	3.512	-5.848	6.109	3.300	-6.111	0.917	-4.394	5.166	1.723	0.610	3.312
Bingöl	-3.775	2.372	-2.716	2.926	-2.107	1.962	-3.866	3.793	2.527	1.335	4.020	-3.135	3.038	2.925	-0.374	2.180
Diyarbakır	-1.000	3.558	0.236	2.650	-0.573	2.875	-0.894	1.056	0.098	1.822	2.420	-4.322	4.040	0.512	0.846	1.925
Erzincan	-5.632	-0.660	-3.715	3.812	-3.261	4.448	-6.392	6.003	3.575	3.740	5.129	-5.134	4.882	2.706	4.076	2.749
Erzurum	1.057	3.769	0.772	0.911	-2.657	4.991	1.137	0.739	-1.560	1.179	-0.315	-4.865	5.255	0.285	3.378	2.792
Gaziantep	-5.391	-4.370	-4.397	3.815	-0.221	3.117	-7.270	6.604	3.261	3.756	6.957	-4.898	3.664	0.895	2.570	3.291
Iğdır	-4.794	-5.978	-5.746	3.259	-1.041	2.831	-7.026	6.816	2.015	5.051	6.637	-2.445	3.371	-0.098	1.831	0.896
Kars	-4.268	3.655	-2.789	2.480	-4.454	4.243	-4.411	5.158	2.479	2.043	NAN	-5.539	5.637	3.349	1.610	4.220
Kilis	-3.878	-3.428	-2.588	1.727	-0.490	2.499	-6.628	6.019	2.048	3.023	6.494	-4.435	3.817	0.301	2.921	2.383
Malatya	-4.178	2.908	-3.300	2.909	-2.760	3.821	-5.653	5.395	1.764	4.048	5.568	-5.842	5.312	2.584	3.676	3.210
Mardin	-2.858	-0.977	-3.271	2.562	-1.553	1.790	-4.830	4.853	3.002	2.553	4.398	-5.156	3.606	1.698	3.086	2.556
Muş	-4.447	-3.834	-4.601	2.959	-1.869	3.197	-6.303	6.540	2.113	4.455	6.255	-4.110	3.785	1.057	1.903	1.278
Siirt	-4.564	-2.226	-3.072	3.357	-1.051	3.102	-6.246	6.076	0.999	1.968	6.430	-4.102	4.355	1.016	1.504	1.804
Şanlıurfa	-5.402	-0.32	-2.693	1.708	-0.490	4.889	-6.888	6.417	1.870	4.138	6.962	-5.792	5.264	0.602	3.187	3.436
Tunceli	-3.356	5.231	-2.375	3.284	-4.066	3.457	-3.265	1.909	2.088	-1.609	0.187	-5.824	5.434	3.810	3.318	2.485
Van	-5.521	-0.812	-4.918	4.040	-3.709	4.910	-5.775	5.370	3.039	2.699	2.260	-5.751	4.297	3.470	2.268	2.720

%95 anlamlılık düzeyinde kritik değer olan 1.96 değerinin üzerinde olduğu için işaretlenen istasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğu belirlenmiştir.
%95 anlamlılık düzeyinde kritik değer olan -1.96 değerinin altında olduğu için işaretlenen istasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı bir azalış olduğu belirlenmiştir.
NAN Minimum sıcaklık çalışma periyodu boyunca 20 derecenin üzerine çıkmadığı için bu indeks hesaplanamamıştır.

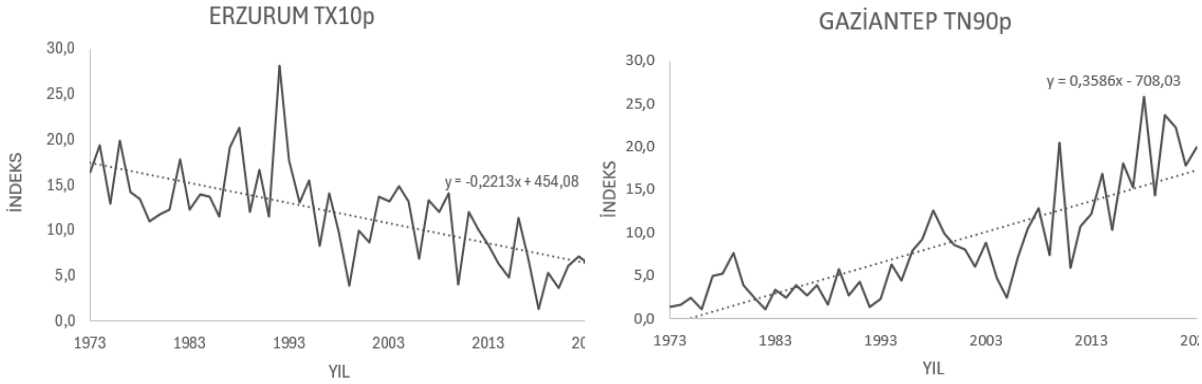
Çalışma alanında yer alan istasyonların büyük bir çoğunluğunda 1973-2023 dönemi için sıcaklıkla ilgili olan indekslerde istatistiksel olarak anlamlı artışlar gözlenmiştir. Soğuklukla ilgili indekslerde ise

(Örneğin, CSDI, FD0, ID0, TN10p ve TX10p) istatistiksel olarak anlamlı azalışlar yaşandığı görülmektedir. Diğer indekslerin (GSL, SU25, TN90p, TNn, TR20, TX90p vb.) büyük bir çoğunluğunda ise istatistiksel olarak anlamlı artışlar olduğu görülmektedir. İklim değişikliği nedeniyle gerçekleşen sıcaklık artışlarının bir sonucu olarak, sıcaklık bazlı indeks değerlerinde en fazla değişim yaşayan istasyonların Erzincan ve Van istasyonları olduğu görülmektedir. Bu iki istasyonda incelenen 17 sıcaklık indeksinin 16 tanesinde istatistiksel olarak anlamlı değişimler gözlenmiştir. Sıcaklık indekslerinde en az anlamlı değişim gözlenen istasyon ise 7 tane indeksinde anlamlı değişim mevcut olan Erzurum istasyonudur.

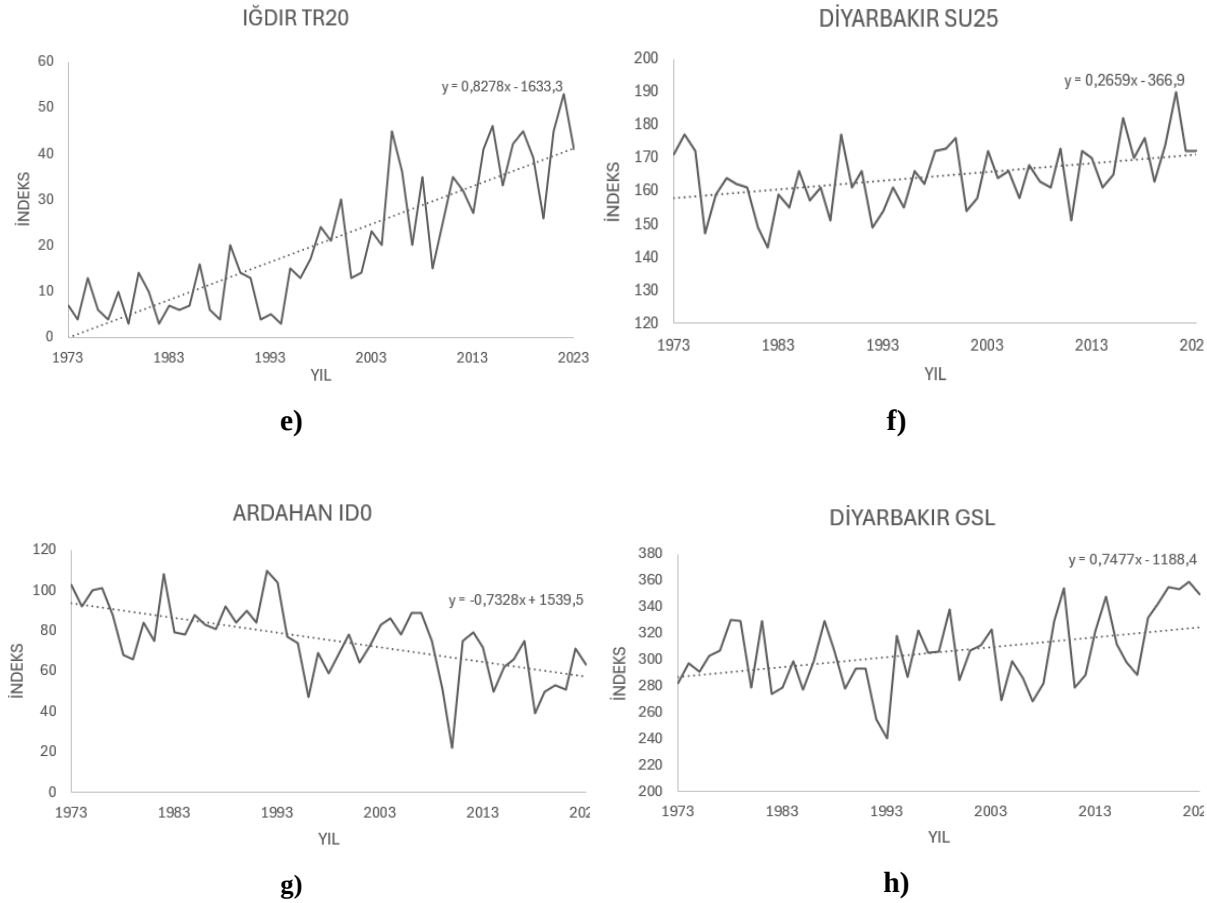
Sıcaklık indekslerine ait Mann-Kendall trend analizi sonucu örneklerinden bazıları aşağıda verildiği gibidir. Erzincan istasyonuna ait CSDI sonucu incelendiğinde, 50 yıllık dönemde azalışın yaklaşık olarak 33 gün olduğu söylenebilir (Şekil 3a). Şanlıurfa istasyonuna ait TR20 indeksi incelendiğinde, çalışma periyodu boyunca artışın yaklaşık 39 gün olduğu görülmektedir (Şekil 3b).



a) **b)**



c) **d)**



Şekil 3. Mann-Kendall testi sıcaklık indeksi sonucu örnekleri

Erzurum istasyonuna ait TX10p indeksi sonucuna göre, 1973-2023 döneminde indeksteki azalışın yaklaşık olarak 11 gün olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 3c). Gaziantep istasyonunun TN90p sonucuna göre, çalışma periyodu boyunca artışın yaklaşık 18 gün olduğu söylenebilir (Şekil 3d). Iğdır istasyonuna ait TR20 indeksi sonucuna göre, çalışma periyodu boyunca artışın yaklaşık 41 gün olduğu görülmektedir (Şekil 3e). Diyarbakır istasyonu SU25 sonucuna göre, çalışma periyodu boyunca artışın yaklaşık 13 gün olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 3f). Ardahan ID0 sonucu incelendiğinde, 50 yıllık dönemde azalışın yaklaşık olarak 37 gün olduğu söylenebilir (Şekil 3g). Diyarbakır istasyonu GSL sonucuna göre, 1973-2023 döneminde indeksteki artışın yaklaşık olarak 37 gün olduğu görülmektedir (Şekil 3h).

3.2. Mann-Kendall Trend Analizi Yağış İndeksi Sonuçları

17 adet istasyona ait RStudio aracılığıyla elde edilen Mann-Kendall yağış indeksi sonuçları Tablo 4'te verildiği gibidir.

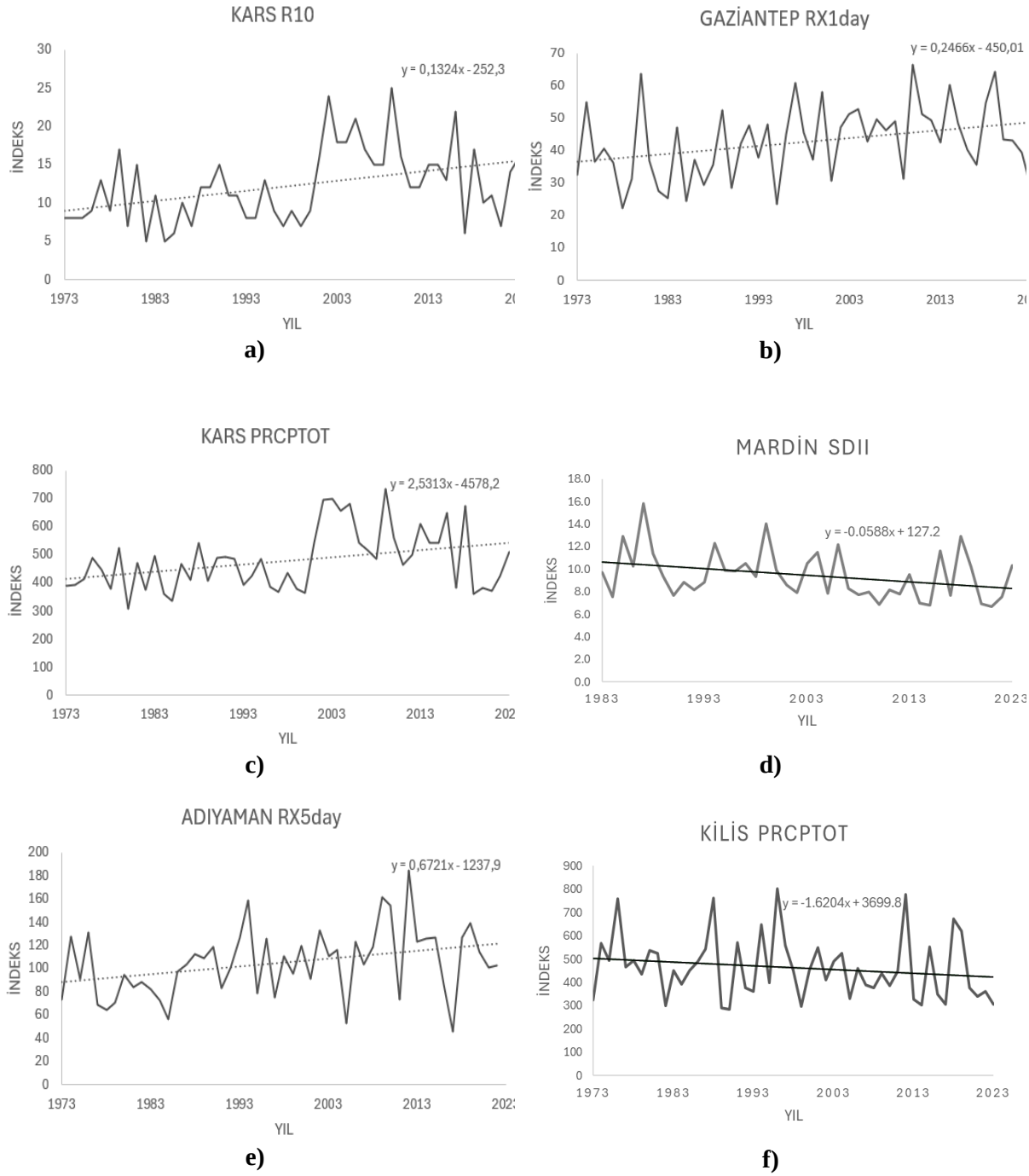
Tablo 4. Mann-Kendall trend testi yağış indeksi sonuçları

	CDD	CWD	PRCPTOT	R10	R20	R30	R95p	R99P	RX1day	RX5day	SDII
Adıyaman	-1.113	0	0.368	0.025	0.816	1.253	0.745	1.187	1.749	2.627	1.573
Ardahan	-0.903	1.357	3.314	2.664	2.365	1.096	2.680	1.213	0.950	2.031	2.420
Bingöl	0.252	1.170	-0.618	-0.562	0.720	-0.066	-0.471	0.017	0.041	2.274	0.942
Diyarbakır	-0.423	0.250	-0.195	0	-0.676	-1.035	-0.804	-0.344	-0.699	-0.024	0.487
Erzincan	-2.341	-2.037	0.008	-0.123	0.152	0.788	0.219	-0.043	0.146	0.414	0.715
Erzurum	-0.691	0.341	-0.504	-0.752	1.090	0.548	0.187	1.261	0.382	-0.187	-0.950
Gaziantep	-0.886	-1.234	0.634	-0.537	0.516	1.130	1.105	1.487	2.283	2.039	1.397
Iğdır	-1.089	-1.693	0.382	0.451	1.732	0.143	1.517	1.376	1.072	1.040	1.088
Kars	-0.431	0,399	2.128	2.788	0.676	0.810	0.958	0.666	0.366	1.267	1.722
Kilis	-0.658	1.539	-1.649	-0.693	-0.808	-0.288	-0.309	0.093	0.772	0.747	-0.098
Malatya	-2.167	0.394	-1.381	-0.679	-1.490	-1.248	-1.178	-1.586	-1.414	-1.999	-1.689
Mardin	0	-0.790	-1.247	-1.127	-1.527	-1.585	-1.461	-1.280	-1.910	-1.134	-2.303
Muş	-0.853	1.593	-0.634	-0.424	-1.202	-1.663	-1.958	-0.657	0.325	1.535	-0.666
Siirt	-1.324	-0.182	-0.382	-0.733	0.613	0.544	0.390	-0.609	0.382	-0.260	0.374
Şanlıurfa	-0.374	0.787	-0.845	-0.815	-0.280	0.345	0.609	-0.250	-0.187	-0.772	0
Tunceli	-1.495	-0.275	0.276	0.506	0.246	-0.783	-0.244	-0.952	-1.015	0.609	0.942
Van	-0.431	-0.204	1.235	1.578	1.488	0.516	0.276	0.570	1.048	0.203	1.056

%95 anlamlılık düzeyinde kritik değer olan 1.96 değerinin üzerinde olduğu için işaretlenen istasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğu belirlenmiştir.
%95 anlamlılık düzeyinde kritik değer olan -1.96 değerinin altında olduğu için işaretlenen istasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı bir azalış olduğu belirlenmiştir.

Yağış indeksleri ile ilgili yapılan analiz sonucunda, Doğu Anadolu Bölgesi'nde Ardahan (PRCPTOT, R10, R20, R95p, RX5day, SDII), Bingöl (RX5day) ve Kars (PRCPTOT, R10) illerinin yağış indekslerinde anlamlı artışlar; Erzincan (CDD, CWD) ve Muş (R95p) illerinde ise anlamlı azalışlar belirlenmiştir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ise Gaziantep'in RX1day ve RX5day indekslerinde anlamlı artışlar, Mardin (SDII) ve Adıyaman (RX5day) illerinde ise anlamlı azalışlar görülmüştür. Her iki bölgenin genelinde diğer illerde gözlemlenen değişimlerin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı sonucuna varılmıştır.

Yağış indekslerine ait Mann-Kendall trend analizi sonucu örneklerinden bazıları aşağıda verildiği gibidir. Kars istasyonuna ait R10 sonucu incelendiğinde, 50 yıllık dönemde artışın yaklaşık olarak 6 gün olduğu söylenebilir (Şekil 4a). Gaziantep istasyonuna ait RX1day indeksi incelendiğinde, çalışma periyodu boyunca artışın yaklaşık 12 gün olduğu görülmektedir (Şekil 4b). Kars istasyonuna ait PRCPTOT indeksi sonucuna göre, 1973-2023 döneminde indeksteki artışın yaklaşık olarak 127 gün olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 4c). Mardin istasyonunun SDII sonucuna göre, çalışma periyodu boyunca azalışın yaklaşık 3 gün olduğu söylenebilir (Şekil 4d). Adıyaman istasyonuna ait RX5day indeksi sonucuna göre, çalışma periyodu boyunca artışın yaklaşık 34 gün olduğu görülmektedir (Şekil 4e). Kilis istasyonu PRCPTOT sonucuna göre, çalışma periyodu boyunca azalışın yaklaşık 81 gün olduğu sonucuna varılabilir (Şekil 4f).



Şekil 4. Mann-Kendall testi yağış indeksi sonucu örnekleri

3.3. Sen'in Eğim Testi Sıcaklık İndeksi Sonuçları

Sıcaklık indeksleri için Sen'in Eğim Testi analizinin sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Elde edilen Sen'in Eğim Testi sonuçlarında, 0'dan büyük olarak hesaplanan değerler artan trendi, 0'dan küçük olarak bulunan değerler azalan trendi, 0'a eşit değerler ise herhangi bir trendin olmadığını göstermektedir. RStudio programından elde edilen ve Tablo 5'te verilen sonuçların, Mann-Kendall testi sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde; tüm istasyonların GSL, SU25, TN90p

ve TX90p indekslerinde artışlar gözlenmiştir. Öte yandan; TX10p indeksi, çalışma bölgesinde yer alan tüm istasyonlarda azalış göstermiştir.

Tablo 5. Sen'in Eğim Testi sıcaklık indeksi sonuçları

	CSDI	DTR	FD0	GSL	ID0	SU25	TN10p	TN90p	TNn	TNx	TR20	TX10p	TX90p	TXn	TXx	WSDI
Adıyaman	-0.161	0.019	-0.277	0.385	0	0.417	-0.241	0.180	0.031	0.012	0.55	-0.296	0.230	0.015	0.039	0
Ardahan	0	-0.11	-0.571	0.313	-0.694	0.435	-0.284	0.256	0.105	-0.2	0	-0.206	0.245	0.05	0.01	0
Bingöl	-0.2	0.013	-0.5	0.8	-0.226	0.188	-0.207	0.176	0.118	0.015	0.333	-0.158	0.163	0.092	-0.003	0
Diyarbakır	0	0.031	0.044	0.714	0	0.286	-0.048	0.048	0.005	0.022	0.272	-0.192	0.185	0.022	0.008	0.049
Erzincan	-0.565	-0.003	-0.571	0.65	-0.42	0.472	-0.460	0.240	0.126	0.061	0.159	-0.253	0.222	0.097	0.054	0
Erzurum	0.167	0.074	0.143	0.118	-0.448	0.675	0.051	0.041	-0.083	0.018	0	-0.212	0.242	0.008	0.05	0.051
Gaziantep	-0.539	-0.023	-0.765	1	0	0.278	-0.499	0.326	0.076	0.047	1	-0.214	0.195	0.02	0.035	0.056
Iğdır	-0.474	-0.047	-0.821	0.6	-0.125	0.261	-0.539	0.366	0.1	0.074	0.818	-0.117	0.156	-0.005	0.030	0
Kars	-0.136	0.025	-0.318	0.371	-0.912	0.7	-0.247	0.183	0.078	0.026	0	-0.351	0.286	0.096	0.031	0.171
Kilis	-0.225	-0.02	-0.231	0.071	0	0.222	-0.382	0.275	0.05	0.063	1.118	-0.182	0.174	0.007	0.042	0.133
Malatya	-0.273	0.015	-0.539	0.625	-0.181	0.438	-0.269	0.247	0.049	0.063	0.833	-0.278	0.257	0.059	0.060	0
Mardin	-0.194	-0.008	-0.563	1.045	0	0.212	-0.295	0.321	0.0821	0.057	0.667	-0.289	0.229	0.058	0.044	0.092
Muş	-0.457	-0.029	-0.769	0.5	-0.391	0.333	-0.445	0.327	0.110	0.064	0.333	-0.235	0.182	0.048	0.024	0
Siirt	-0.375	-0.011	-0.528	0.889	0	0.267	-0.333	0.274	0.037	0.027	0.769	-0.165	0.196	0.036	0.021	0.039
Şanlıurfa	-0.435	-0.001	-0.25	0.039	0	0.474	-0.399	0.298	0.039	0.043	0.783	-0.285	0.238	0.011	0.038	0.143
Tunceli	-0.171	0.046	-0.375	0.688	-0.348	0.429	-0.140	0.071	0.103	-0.025	0	-0.329	0.254	0.131	0.033	0
Van	-0.632	-0.009	-0.643	0.692	-0.455	0.667	-0.549	0.206	0.109	0.05	0.031	-0.313	0.230	0.078	0.04	0

3.4. Sen'in Eğim Testi Yağış İndeksi Sonuçları

Yağış indeksleri için Sen'in Eğim Testi analizinin sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen eğim değerleri, Mann-Kendall testi sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Doğu Anadolu Bölgesi'nde genel olarak yağış indekslerinde artış trendi gözlemlenirken, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ağırlıklı olarak azalış trendi hakimdir. 0'dan büyük değerlerin anlamlı artışı ifade ettiği, 0'dan küçük değerlerin ise anlamlı azalışları gösterdiği Sen'in Eğim Testi sonucunda ortaya çıkan değerlerin de Mann-Kendall trend testindeki sonuçlarla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, istasyonların 16 tanesinde CDD indeksinde azalış olduğu gözlenmiştir. En fazla istasyonda artış gösteren indeks ise, istasyonların 12 tanesinde artış gözlemlenen RX5day ve SDII indeksleridir.

Tablo 6. Sen'in Eğim Testi yağış indeksi sonuçları

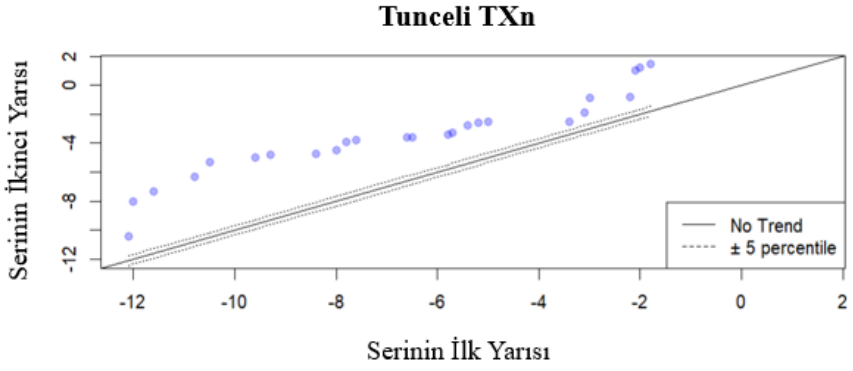
	CDD	CWD	PRCPTOT	R10	R20	R30	R95p	R99P	RX1day	RX5day	SDII
Adıyaman	-0.375	0	0.713	0	0.023	0.026	0.648	0	0.269	0.830	0.026
Ardahan	-0.071	0	3.485	0.143	0.032	0	1.5	0	0.082	0.280	0.013
Bingöl	0.067	0	-0.821	-0.031	0	0	-0.367	0	0.007	0.580	0.011
Diyarbakır	-0.125	0	-0.273	0	0	0	-0.506	0	-0.061	-0.008	0.006
Erzincan	-0.375	0	0.003	0	0	0	0.079	0	-0.017	0.040	0.004
Erzurum	-0.1	0	-0.488	-0.024	0	0	0.079	0	0.028	-0.018	-0.007
Gaziantep	-0.36	0	-0.824	-0.029	0	0	0.813	0	0.270	0.322	0.017

Iğdır	-0.167	0	0.243	0	0	0	0.541	0	0.084	0.092	0.007
Kars	-0.040	0	2.189	0.135	0	0	0.474	0	0.024	0,2	0.014
Kilis	-0.278	0	-2.225	-0.024	0	0	-0.181	0	0.085	0.137	-0.001
Malatya	-0.552	0	-1.12	0	0	0	-0.47	0	-0.083	-0.236	-0.011
Mardin	0	0	-4.021	-0.1	-0.059	-0.043	-2.056	0	-0.422	-0.296	-0.061
Muş	-0.204	0.024	-0.816	0	-0.039	-0.029	-1.638	0	0.024	0.254	-0.010
Siirt	-0.429	0	-0.581	-0.041	0	0	0.207	0	0.037	0.064	0.005
Şanlıurfa	-0.118	0	-1.065	-0.039	0	0	0.3	0	-0.029	-0.171	0.015
Tunceli	-0.364	0	0.538	0	0	0	-0.215	0	-0.086	0.092	0.008
Van	-0.10	0	0.842	0.046	0	0	0.115	0	0.068	0.030	0.008

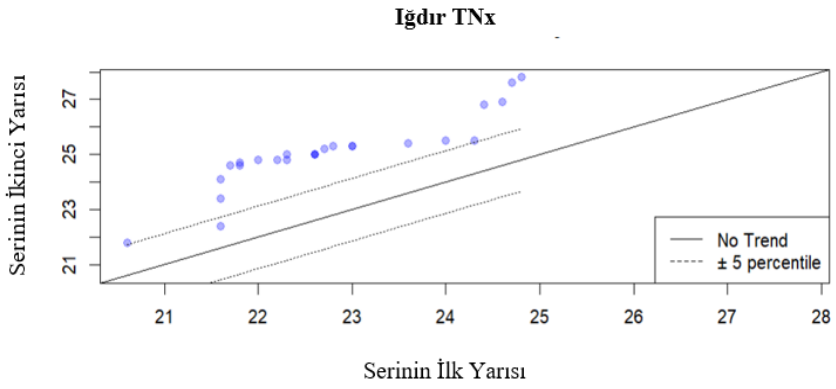
3.5. Yenilikçi Şen Yöntemi Sıcaklık İndeksi Sonuçları

Yapılan analiz sonucunda 17 adet istasyona ait indekslerin Yenilikçi Şen Yöntemi grafikleri elde edilmiştir. Grafikler yorumlanarak verilerin yılın ilk yarısından ikinci yarısına değişimleri incelenip trendin yönü hakkında yorumlar yapılmış ve bu değişimlerin büyüklükleri hakkında bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen grafikler değerlendirildiğinde, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde 1973-2023 yılları arasında sıcaklıklarda genel bir artış trendi gözlemlendiği söylenebilir. Bu sonuçlar, her iki bölge için sıcaklıklardaki artış eğilimini açıkça ortaya koymaktadır. Bu yöntemden elde edilen sonuçlar, diğer iki yöntemle de tutarlıdır.

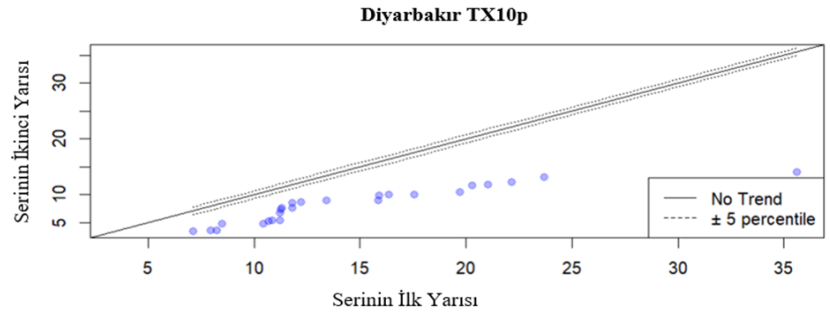
Şekil 5, üç farklı istasyona ait Yenilikçi Şen Yöntemi sıcaklık indeksi sonuçlarını göstermektedir. Tunceli TXn indeksi sonucu değerlendirildiğinde, indekste 50 yıllık çalışma dönemi boyunca anlamlı bir artış gözlendiği ifade edilebilir (Şekil 5a). Iğdır TXn indeksi sonucuna göre, indekste 1973-2023 dönemi boyunca anlamlı bir artış olduğu söylenebilir (Şekil 5b). Diyarbakır TX10p indeksi grafiği incelendiğinde, indekste çalışma periyodu boyunca anlamlı bir azalış olduğu görülmektedir (Şekil 5c).



a)



b)



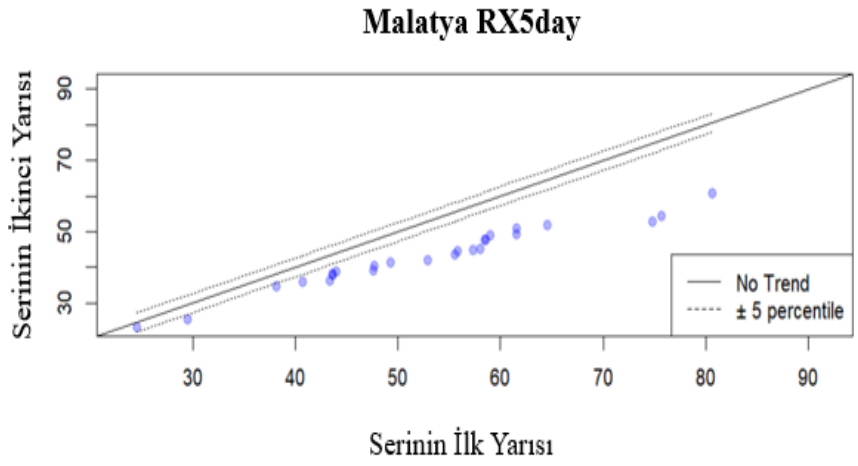
c)

Şekil 5. Yenilikçi Şen Yöntemi sıcaklık indeksi sonucu örnekleri

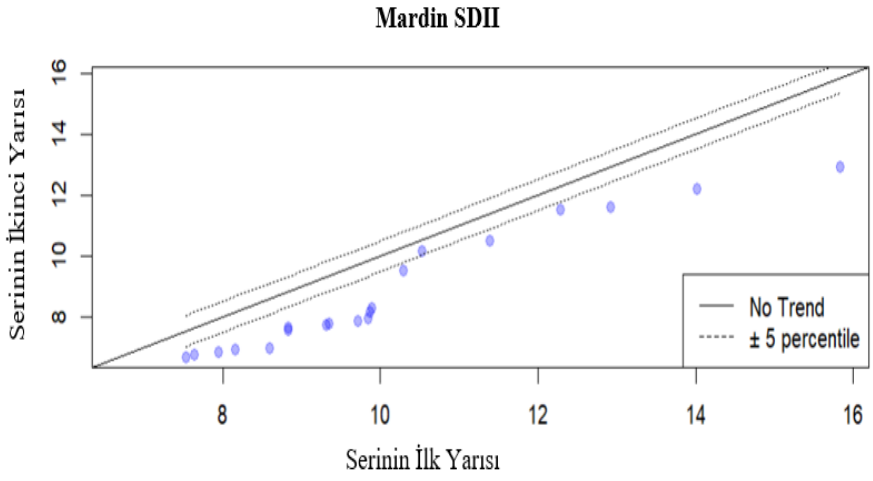
3.6. Yenilikçi Şen Yöntemi Yağış İndeksi Sonuçları

1973-2023 yılları arasında yapılan analizler sonucunda Yenilikçi Şen Yöntemi ile elde edilen grafikler, Doğu Anadolu Bölgesi'nde yağış indekslerinde bazı illerde artış trendi olduğunu, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde ise azalış yönünde bir eğilim gözlendiğini ortaya koymuştur. Bu eğilimler genel olarak anlamsızdır. Elde edilen sonuçlar Mann-Kendall Testi ve Sen'in Eğim Testi Yöntemi ile elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.

Şekil 6, iki farklı istasyona ait Yenilikçi Şen Yöntemi yağış indeksi sonuçlarını göstermektedir. Malatya RX5day indeksi sonucu değerlendirildiğinde, indekste 50 yıllık çalışma dönemi boyunca anlamlı bir azalış gözlendiği ifade edilebilir (Şekil 6a). Mardin SDII indeksi sonucuna göre, indekste 1973-2023 dönemi boyunca anlamlı bir azalış olduğu söylenebilir (Şekil 6b).



a)



b)

Şekil 6. Yenilikçi Şen Yöntemi yağış indeksi sonucu örnekleri

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi'ne ait 10 ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ne ait 7 olmak üzere toplam 17 adet istasyon için 1973-2023 yıllarına ait maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak ekstrem iklim değişikliği indekslerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmada parametrik olmayan Mann-Kendall, Sen'in Eğim Testi ve Yenilikçi Şen Yöntemi analizleri kullanılarak 16 adet sıcaklık, 11 adet yağış indeksi üzerinde incelemeler yapılmıştır. Analizlerde Mann-Kendall testi ile değişimlerin istatiksel anlamlılığı değerlendirilmiş, Sen'in Eğim Testi ile trendin büyüklüğü ve yönü hakkında bilgiler edinilmiş, Yenilikçi Şen Yöntemi ile de trendlerin zaman içindeki yapısı görsel olarak desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar 3 farklı yöntemde de birbirleriyle tutarlı yönde eğilim göstermiştir. Analiz sonuçları hem Güneydoğu Anadolu hem de Doğu Anadolu Bölgesi'nde sıcaklık indekslerinde anlamlı artışlar olduğunu ortaya koymuştur. Yağış indeksleri açısından ise bölgeler farklı şekillerde trend göstermiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre, her iki bölgede de 50 yıllık periyotta iklim indekslerinde ciddi bir değişim gözlenmiştir. Sıcaklıklardaki ciddi artışlar ve yağışlardaki düzensizlikler bölgelerde çevresel tehditlerin giderek artmasının yanı sıra birçok sektörde de olumsuz etkiler bırakacaktır. Bu bölgelerin ekonomisini oluşturan tarım, hayvancılık, enerji gibi sektörler bu değişimlerden olumsuz etkilenecek sektörler arasındadır. Bu sektörler dışında inşaat sektörünün de bu değişimlerden etkileneceği şüphesiz bir gerçektir.

Artan sıcaklıklar, yapı malzemelerinde meydana gelen genleşme ve büzülme olaylarını arttırmakta, bu da malzeme yorgunluğuna ve zamanla meydana gelecek yapısal bozulmalara sebebiyet verebilir. Betonarme yapılarda termal gerilmelerin artışı, çatlak oluşumuna neden olabilir. Özellikle asfalt kaplamalarda yüksek sıcaklıklar nedeniyle deformasyonlar oluşturabilir ve yol yapılarının dayanıklılığını düşürebilir. Öte yandan soğuk gün sayısında meydana gelen azalmalar, donma çözülme döngülerinin de azalmasıyla bazı yapı bileşenlerinin ömrünü uzatabilir. Ancak bu durum beraberinde problemler de yaratabilir. Soğuk gün sayısındaki azalma iç mekânlarda konfor seviyesini azaltarak, binalarda soğutma ihtiyacını arttırmakta bu nedenle de pasif soğutma stratejilerine (Gölgeleme, doğal havalandırma, vb.) ihtiyaç duyulabilmektedir.

Zirai don gözlenen ve buzlu günlerin azalması, kış mevsiminde karla kaplı gün sayısının düşmesine neden olur. Bu durum kar yükünün azalması anlamına geliyor gibi gözükse de, yağışlardaki düzensizlikler de bu durum açısından oldukça kritiktir. Şiddetli yağış indekslerinde (Özellikle R10, R20, R30 gibi) görülecek artışlar yoğun ve kısa süreli yağışların kar olarak gerçekleşmesi halinde çatıların aşırı yüke maruz kalmasına sebep olacaktır.

Yağış indekslerindeki düzensizlikler inşaat faaliyetlerini önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle 5 günlük maksimum yağış (RX5day) indeksindeki anlamlı artışlar, kısa sürede meydana gelecek yağışın zeminde doygunluk oluşturması ve zemin stabilitesini bozması anlamına gelebilir. Bu durum temel sistemlerin taşıma kapasitesini azaltmakta, zemin kayması gibi riskleri arttırmaktadır. Şiddetli yağışlar ayrıca yapı alanlarında su birikmelerine, su baskınlarına ve altyapı yetersizliklerine neden olabilir.

İnşaat süreçleri de bu değişimlerden doğrudan etkilenebilmektedir. Özellikle sıcaklıkların çok yüksek olduğu günlerde iş sağlığı ve güvenliği açısından çalışma saatleri kısıtlanabilmekte, bu da iş programlarının aksamalarına neden olmaktadır

Mevcut yapı yönetmeliklerde yapılacak güncellemeler ile oluşabilecek problemler en az düzeye indirilebilir. Bu kapsamda, iklim değişikliği kaynaklı sıcaklık artışları, aşırı yağışlar, rüzgâr yükleri ve kar yükleri gibi değişkenlerin dikkate alındığı yeni tasarım kriterlerinin belirlenmesi, yapıların uzun ömürlü, güvenli ve çevresel koşullara dayanıklı olmasını sağlayacaktır. Sonuç olarak, elde edilen veriler de göstermektedir ki her iki bölge de bu değişimlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etkiler kendini her alanda göstermekle beraber, yeni iklim koşullarına adapte olabilmesi için bölgeye özgü çözümler getirilmelidir. Ayrıca iklim risklerinin azaltılması adına iyi bir şehir planlaması, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi ve afet dayanıklılığı yüksek sistemlerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Teşekkür

Kullanılan veriler sayesinde çalışmanın hayata geçmesini mümkün kılan Meteoroloji Genel Müdürlüğü çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca çalışmanın ön değerlendirme ve inceleme süreci boyunca vermiş oldukları desteklerden dolayı editör ve hakemlere de teşekkürü bir borç biliriz.

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

Abbass K., Qasim MZ., Song H., Murshed M., Mahmood H., Younis I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. Environmental Science and Pollution Research 2022; 29: 42539–42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Aditya F., Gusmayanti E., Sudrajat J. Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021; 893(1): 012006.

Akbaş E., Çelik R., Eşit M. Mann-Kendall, Spearman Rho ve Yenilikçi Şen yöntemlerinin meteorolojik veriler kullanılarak değerlendirilmesi: Batman Bölgesi örneği. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 28(1): 239-251. https://doi.org/10.53433/yyufbed.1165696

Altunay A. Mann-Kendall-Sen Trend yöntemi ile Türkiye'deki klimatolojik verilerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Coğrafya Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale, Türkiye, 2016.

Asikoğlu OL., Alp H., Temel I. Modified data classification for extreme values in Şen's innovative trend analysis: A comparative trend study for the Aegean and Eastern Anatolia Regions of Türkiye. Theoretical and Applied Climatology 2024; 155: 8415-8434. https://doi.org/10.1007/s00704-024-05129-9

Biberoğlu E. Küresel iklim değişikliğinin Türkiye yağış ve sıcaklıkları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Hidroloji ve Su Kaynakları Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye, 2011.

Cosun F., Karabulut M. Kahramanmaraş'ta ortalama, minimum ve maksimum sıcaklıkların trend analizi. Türk Coğrafya Dergisi 2009; 53: 41–50. https://doi.org/10.17211/tcd.65166

Çeribaşı G. Şen Yöntemi ve Trend Yöntemleri Kullanılarak Doğu Karadeniz Havzasının yağış verilerinin analiz edilmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2019; 9(1): 254–264. https://doi.org/10.21597/jist.439569

Çoban E. İklim değişikliğinin Türkiye genelindeki yağış eğilimlerine etkisinin araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Isparta, Türkiye, 2013.

Deniz A., Toros H., Incecik S. Spatial variations of climate indices in Turkey. International Journal of Climatology 2011; 31(3): 394-403. https://doi.org/10.1002/joc.2081

Emek MF. Doğu Anadolu Bölgesi yıllık ve aylık toplam yağışların trend analizi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, Türkiye, 2014.

Ergün M., Fırat B., Tuncer G., Sönmez O. Küçük Menderes Havzasında Mann Kendall ve Şen'in eğimi yöntemleri kullanılarak meteorolojik değişkenlerin trend analizi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi 2024; 14(2): 1–12. https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1459907

Helsel DR., Hirsch RM. Statistical methods in water resources (Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 4, Chapter A3). U.S. Geological Survey. 96; 2002.

IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2022.

Karabulut M., Cosun F. Kahramanmaraş ilinde yağışların trend analizi. Coğrafi Bilimler Dergisi 2009; 7(1): 65–83.

Kartal V., Yavuz VS., Ariman S., Kaya K., Alkanjo S., Simsek O. Climate change trends in the Southeastern Anatolia region of Türkiye: Precipitation and drought. Journal of Water & Climate Change 2024; 15 (12): 5893-5919. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.503

Kendall MG. Rank correlation methods. Griffin, London; 1975.

Kömüşcü AÜ., Aksoy M. Characterizing variability of spatial patterns of annual and seasonal precipitation of Turkey and identifying the probable driving factors including teleconnection patterns. Water & Climate Change 2024; 15(3): 1392-1416. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.665

Krishna Priya SR., Naranammal N. Trend analysis of climate variables using non-parametric tests. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research 2023; 10(9): 86–93.

Mann HB. Non-parametric tests against trend. Econometrica 1945; 13: 245–259.

Meals DW., Spooner J., Dressing SA., Harcum JB. Statistical analysis for monotonic trends (Tech Notes 6). U.S. Environmental Protection Agency, Tetra Tech, Inc; 2011.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). 2023 Yılı İklim Değerlendirmesi Raporu. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara; 2024.

Öğ B., Gürer T., Cengiz S., Öztürk A., Turan E., Özgür E. Doğu ve Orta Karadeniz Bölgesi yağışlarının aylık, mevsimlik ve yıllık trend analizi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2024; 14(1): 131–148. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1330442

Özgür E., Koçak K. Climatology of snowfall/total precipitation days over Turkey. Theoretical and Applied Climatology 2019; 137: 2487–2495. https://doi.org/10.1007/s00704-018-02753-0

Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, Journal of the American Statistical Association 1968; 63: 1379–1389.

Sensoy S., Türkoğlu N., Akçakaya A., Ekici M., Ulupınar Y., Demircan M., Atay H., Tüvan A., Demirbaş H. Trends in Turkey climate ındices from 1960 to 2010. 6th International Atmospheric Science Symposium 2013; İstanbul.

Şen Z. Innovative trend analysis methodology. Journal of Hydrological Engineering 2012; 17(9): 1042-1046. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556

Türkeş M. Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. İklim Değişikliği ve Çevre 2008; 1(1): 26–37.

Younis RMHA. The impact of climate change on civil engineering projects. International Journal of Civil and Environmental Engineering Research 2025; 12(2): 95-97.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 460-474, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 460-474, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Production and Characterization of Cellulose and Cellulose Nanocrystals From the Moss *Syntrichia ruralis* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr.

Şeyma BOYAR[1*], Yavuz Selim ÇAKMAK[2], Seher KARAMAN[3]

[1]Aksaray University, Graduate School Of Natural and Applied Sciences, Aksaray
[2]Aksaray University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Molecular Biology and Genetics, Aksaray
[3]Aksaray University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Biology, Aksaray

[1]https://orcid.org/ 0000-0003-3687-7480
[2]https://orcid.org/0000-0001-8954-5485
[3]https://orcid.org/0000-0003-1239-8266
*Corresponding author: seymacetin50@gmail.com

Research Article

Article History:
Received: 13.05.2025
Accepted: 26.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Syntrichia ruralis
Cellulose
Cellulose nanocrystal film

ABSTRACT

Cellulose is the most abundant and widespread polymer in nature; it attracts the attention of many researchers as it can replace edible, ready-to-use and developable polymeric materials. However, perennial trees are generally preferred for cellulose production, which causes the destruction of forests and the disruption of the natural balance. The present study aimed to isolate *Syntrichia ruralis* cellulose to develop a new alternative source for cellulose production. Acid hydrolysis was applied to obtain cellulose nanocrystals (CNC). The morphology, topology, crystallinity and thermal properties of the cellulose and CNC obtained in this study were investigated in detail. Hemicellulose and lignin were almost completely removed from cellulose produced by alkali and bleaching processes, as shown by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The significant effects of zeta potential on dispersion stability were investigated using atomic force microscopy (AFM) to determine the resulting roughness. Thermal and mechanical properties of TGA were investigated. In addition, the morphology of CNC films was investigated by Scanning Electron Microscopy (SEM) measurements. As a result, *Syntrichia ruralis* has been shown to be an alternative source of nanocellulose with the potential for use in many fields.

Syntrichia ruralis (Hedw.) F. Weber & D. Mohr. Kara Yosunundan Selüloz ve Selüloz Nanokristal Üretimi ve Karakterizasyonu

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 13.05.2025
Kabul tarihi:26.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Syntrichia ruralis
Selüloz
Selüloz nanokristal film

ÖZ

Selüloz doğada en bol ve yaygın polimerdir; yenilebilir, kullanıma hazır ve geliştirilebilir polimerik malzemelerin yerini alabilmesi nedeniyle birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Ancak, selüloz üretimi için genellikle çok yıllık ağaçlar tercih edilmekte ve bu da ormanların yok olmasına ve doğal dengenin bozulmasına neden olmaktadır. Mevcut çalışmada, selüloz üretimi için yeni bir alternatif kaynak geliştirmek amacıyla *Syntrichia ruralis* selülozunu izole etmek amaçlanmıştır. Selüloz nanokristalleri (CNC) elde etmek için asit hidrolizi uygulanmıştır. Bu çalışmada elde edilen selüloz ve CNC'nin morfolojisi, topolojisi, kristalinitesi ve termal özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile gösterildiği gibi, alkali ve ağartma işlemleriyle üretilen selülozdan hemiselüloz ve lignin neredeyse tamamen uzaklaştırılmıştır. Zeta potansiyelinin dispersiyon kararlılığı üzerindeki önemli etkileri, ortaya çıkan pürüzlülüğü belirlemek için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak araştırılmıştır. TGA'nın termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca,

CNC filmlerinin morfolojisi Scanning Electron Microscopy (SEM) ölçümleriyle incelenmiştir. Sonuç olarak, *Syntrichia ruralis*' in birçok alanda kullanım potansiyeline sahip alternatif bir nanoselüloz kaynağı olduğu gösterilmiştir.

To Cite: Boyar Ş., Çakmak YS., Karaman S. Production and Characterization of Cellulose and Cellulose Nanocrystals From Moss *Syntrichia ruralis* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 460-474.

1. Introduction

Bryopsida include mosses (Bryophyta), liverworts, hornworts and leafy mosses. There are approximately 12,700 species of mosses and 6,000-8,000 liverworts in the world. There are approximately 100-150 species of hornworts (Cenğiz, 2019). In Türkiye, as a result of the studies conducted so far; it is thought that there are a total of ±1030 bryophyte taxa, including approximately ±835 mosses, ±191 liverworts and 4 hornworts (URL 1). Syntrichia ruralis (Hedw.) F. Weber & D. Mohr. it is a moss species with a cosmopolitan distribution in the family Pottiaceae. It is a worldwide genus with about 90 species (Frey and Stech, 2009). It occurs in North America, the Pacific, Europe, Asia, the Middle East, North and South Africa, South America, and Australia. It grows in many climate types, including the Arctic, boreal regions, temperate zones, and deserts. It grows in tundra, coniferous forest, grassland, sagebrush, and other habitat types (Watson, 1981).

Cellulose attracts the attention of many researchers as it is an important natural material that can be developed, ready to use, renewable, can replace synthetic polymeric materials and has a promising future in many areas, especially in medical applications (Tayeb et al., 2018; Özkan Çiçek, 2021). Cellulose is very widespread on earth, from primitive plants (algae, moss, ferns, etc.) to higher organized plants (woods) and some bacteria. Although it is very common in the plant kingdom, it is found in its pure form and mostly in the cotton plant (URL 2). Cellulose has been widely used in textiles, weaving, pottery, ropes, clay bricks and as fuel for thousands of years. Industrial applications of cellulose have spread to a wide area, from paper, construction materials, textiles, modern cellophane films and dietary fibers. However, cellulosic research conducted in the last few decades has exhibited a paradigm shift from macro and micro scale to nano scale. The rapid growth of nanotechnology has increased widespread research on nanocellulosic materials. Cellulose nanomaterials are predicted to be sustainable, safe and cheaper with an impressive strength-to-weight ratio (Wada et al., 1995). These properties have encouraged their use in new technologies (Watson, 1981; Smith, 2004; Alataş, 2012).

Cellulose is the main component of plant cell walls and is the most abundant biopolymer in the world. More than a thousand tons of cellulose are produced on our planet every year (Platnieks et al., 2020). Cellulose, which constitutes a large source for environmentally friendly products, is also a non-toxic, biocompatible, biodegradable and renewable material (Johar et al., 2012). Cellulose is a linear polymer formed by the connection of D-glucopyranose units with β-1,4 glycosidic bonds. Each monomer has three hydroxyl groups and the presence of hydroxyl groups in its structure and their capacity to form hydrogen bonds play an important role in determining the physical and chemical properties of cellulose (Bilek et al., 2019).

Cellulose, an organic molecule with the primary polysaccharide formula, consists of hundreds or even thousands of linked D-glucose units. Cellulose has a contact angle of 20–30◦. It has chirality (depending on concentration) and is biodegradable. It is also insoluble in most organic solvents and water; it is a tasteless, odorless and hydrophilic material (Moud, 2022a). In the impact tests conducted by Dauenhauer and his colleagues, it can be melted at 467 ºC. When treated with mineral acids at high temperatures, it can be easily chemically broken down into structural units (Moud, 2022b).

Other polymers that provide support to the cell wall in plants with cellulose are hemicellulose and lignin (Ramírez et al., 2018). Cellulose is 40-60%, hemicellulose is 20-40% and lignin is 10-25% in the skeletal structure of plants (Lestari et al., 2014; Fernandez et al., 2017). The first most abundant polymer in plant biomass is cellulose. The second most abundant polymer is hemicellulose. Lignin is the third most abundant polymeric substance. In other lignocellulosic plants (wood, agricultural plants and grasses), lignin can be found at a rate of 30-70% together with chemical compounds such as hemicellulose and extractives. In plants that are less developed in morphology such as seaweed and algae, it is found at a much lower rate (10-40%) (URL 2).

Hemicellulose bonds to cellulose by van der Waals and hydrogen bonds, while forming a strong cross-linked structure with lignin. Hemicelluloses are placed between cellulose and lignin and play an important role in the structure of the cell wall. Hemicelluloses are pretreated with alkali and dilute acid to be extracted from lignocellulosic biomass (LB) (Herbaut et al., 2018; Duval and Lawoko, 2014). Natural lignin (protolignin) is a cross-linked macromolecule (Thakur and Thakur, 2015; Klemm et al., 1998). Lignin, an organic polymer found abundantly in the cell walls of plants, primarily provides structural support, rigidity, and water transport throughout the plant (Pang et al., 2025).

Due to its insoluble, non-soluble and hygroscopic character in water and most organic solvents, the use of cellulose in high value-added applications is still rare. Recently, interest in nanocellulose has increased sharply due to the specific physical and chemical properties of such materials. Typically, two main types of nanocellulose are distinguished: (i) cellulose nanocrystals (CNC), obtained by acid treatment, and (ii) cellulose nanofibers (CNF), obtained by mechanical disintegration (Frey and Kürschner, 1995).

A study by Yongyue et al. investigated the iridescence mechanisms and mechanical properties of CNC nanocrystalline films. In this study, CNC film composites were prepared. Based on the various functional properties of these composite films, the usability of CNC-based composite films in anti-counterfeiting, smart labels, and sensors was investigated. The studies revealed that CNC films are the most suitable candidate for biomimetic structural colors due to their exceptional chiral nematic structure, superior properties as a natural polymer, non-toxicity, renewability, and biodegradability (Peng et al., 2024).

In a separate study, a biofilm (CNC) was synthesized from coconut fiber to develop sustainable packaging materials as an alternative plastic source. The developed biofilm exhibits promising properties as a competitive alternative to plastics, including ease of production, superior durability, and

biodegradability. The findings concluded that the synthesized biofilm could be an important polymeric material replacing synthetic polymers (LDPE, HDPE, PE, and PP) in the production of biodegradable and environmentally friendly bags (Islam et al., 2025). The study by Rongjun et al. aimed to extract cellulose nanocrystals (TN-CNC) from tiger nut starch by-products via acid hydrolysis. The study focused on the results and the evaluation of their effects on the properties of starch-based biodegradable packaging (He et al., 2025)

Biomedical materials have been used by people to cure various diseases and protect themselves against diseases since the emergence of humanity. The limited resources needed along with the increase in the world's population have led to an increase in the importance of environmentally friendly, sustainable, renewable biologically derived materials. For this reason, the main subject of many research and applications has been the search for renewable materials (Chen et al., 2011; Cui et al., 2016).

The high temperatures and large volumes of concentrated acid solutions used in the purification processes result in environmentally damaging wastes and increase costs (Sohail, 2009). The purification processes of the cellulose in question are laborious and costly, limiting the wide range of cellulose use. The fact that perennial trees are generally preferred for cellulose production causes the destruction of forests and the disruption of the natural balance. Therefore, today, different sources have begun to be used for cellulose production (Kang, 2004).

A literature review was conducted on cellulose production. It was found that many sources are used for cellulose production. In our study, we chose naturally abundant algae to avoid tree destruction and minimize environmental damage. This aimed to create a new source for cellulose, which has recently attracted considerable attention and demand. For this purpose, cellulose and CNC extracted from Syntrichia ruralis were investigated for their morphological, thermal, and mechanical properties using FTIR (Fourier Transform Infrared Resonance), AFM (Atomic Force Microscopy), Zeta Potential Measurement, TGA (thermogravimetric analysis), and SEM (Scanning Electron Microscopy), respectively. Thus, it was aimed to introduce CNC obtained from algae as a new source and material to the literature.

2. Material and Methods

2.1. Sample Collection and Identification

Syntrichia ruralis samples were collected from in the city center of Nevşehir (38°38'N, 34°43'E) on the soil in 2023. Species identifications were made by taking sections from moss samples and using distinctive characters in species identification by Dr. Seher Karaman and the specimens were deposited at the herbarium of Aksaray University Scientific and Technological Application and Research Center Aksaray University Herbarium (AKSU). Since there is no written Bryophyte Flora of Turkey yet for the prepared species samples, the floras of Spain, Zander, Kürschner, Britain and Ireland (Smith, 2004; Casas et al., 2006; Kürschner and Frey, 2020; Zander, 1993) and were taken as basis in their

identification. The prepared preparations were examined under a light microscope. Distinctive microscopic photographs of the examined samples were taken as show in Figure 2-9.

2.2. Cellulose Extraction

The samples were cleaned, washed and dried. The dried samples were first cut into smaller pieces and then weighed as 25 g. The weighed samples were put into autoclave bottles, 500 ml of pure water and 40 g of NaOH were added and the prepared autoclave bottles were operated at 121 °C for 90 min. The samples taken from the autoclave were washed until the base was neutral. After the washing process, ethyl alcohol 70% was added to the samples and kept for 1 hour. The washing process was carried out again after the alcohol was applied. The samples were placed in 100 ml of 0.5 M hydrochloric acid and stored for 2 days. During this period, sonication was applied to the samples in every 12 hours for 30 minutes periods and totaling 2 hours, to increase the extraction efficiency. After the acid application, the samples were washed until the acid was neutral. The samples were put into the autoclave again at 121 °C for 90 min and the samples taken from the autoclave were washed until the base was neutral. The samples were kept in sodium chlorate and pure water solution for 2-3 days. The samples were washed with pure water until neutral and filtered. The pH was confirmed to be neutral using a pH meter after washing. After the filtration process, the obtained celluloses were dried at room temperature for 3 days (Figure 1). Following the process, 2 g of dry weight cellulose was obtained. Using these results, the percentage of cellulose obtained from moss was calculated. A cellulose yield of 8% was determined.

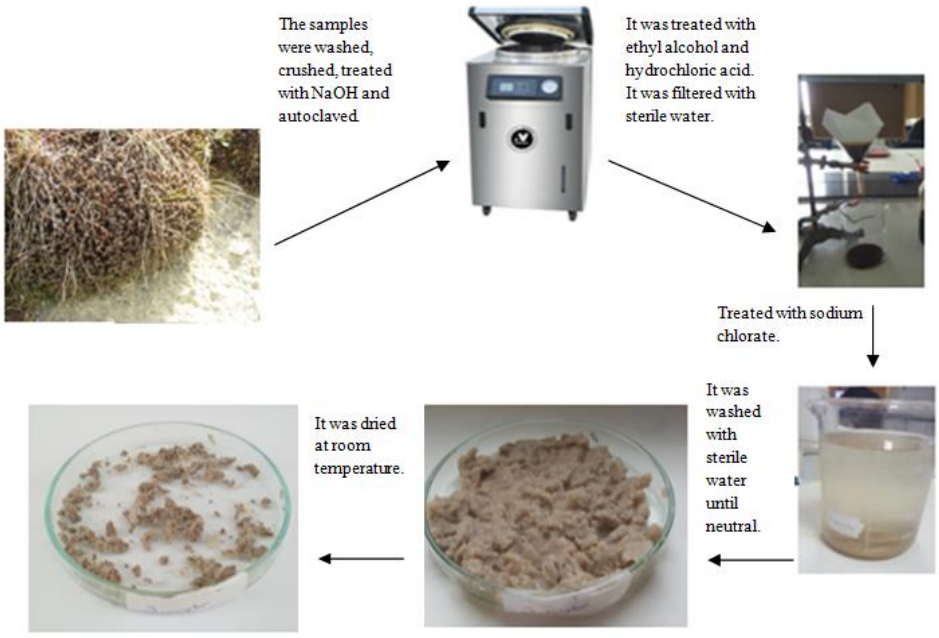


Figure 1. Production cellulose from *S. ruralis* moss.

2.3. Cellulose Nanocrystal Production

The obtained moss cellulose was weighed as two grams and hydrolyzed with sulfuric acid (64% by weight, 56 ml) at 64°C for 30 minutes in a reflux system. Then, the reaction was terminated immediately using ice and water. By centrifuging 4 times at 15000 g for 30 minutes, the acid concentration in the

solution was reduced and at the same time, dissolved cellulose residues were removed. Then, the obtained CNC kept in a dialysis bag for 5 days (changing the water twice a day) until they reached neutral pH. As a result, CNC of the desired purity were obtained.

2.4. Production of Cellulose Nanocrystal Film

Cellulose is a semicrystalline biopolymer material. Acid hydrolysis was applied to obtain cellulose nanocrystals from cellulose. The cellulose nanocrystals in the obtained liquid (at neutral pH value) were brought to a concentration of 2% using a rotary evaporator. Then, 10 ml of the solution was placed in a small plastic petri dish and left to dry at room temperature for 2 days. After 2 days, it was removed from the petri dish by peeling method and CNC film was obtained.

2.5. Characterization

To determine the functional groups of the samples, ATR-FTIR spectroscopy (Perkin Elmer Spectrum Two FT-IR Spectrometer) was performed, scanning spectra in the range of 4000 to 600 cm^{-1} with a resolution of 4 cm^{-1}. FTIR spectra for cellulose nanocrystal film are shown in Figure 10. The produced cellulose nanocrystal film was characterized in AFM (Bruker Nano Surfaces, Santa Barbara, CA, USA, Nanosensors, k = 34 N/m, f = 317 kHz). As can be seen from Figure 11, the produced cellulose crystallites are in nanoscale. Zeta potential (Malvern, Nano ZS90) is a measure of the surface charge of cellulose nanocrystals and this measure is proportional to the ionic strength itself. Since a neutral medium is used, a sudden decrease in the absolute zeta potential of the particles is observed (Figure 12). The amount of suspension changes in two directions as alkaline and acidic. In addition, the decrease in pH leads to the aggregation of the nano-sized cellulose suspension and the decrease in surface charge. Thermal characterization of CNC film was performed using Exstar-TG/DTA 7300 instrument under nitrogen gas. Thermal stability was determined by heating the film sample from 20˚C to 750˚C at 5˚C per minute. Representative TGA curves of CNC films are shown in Figure 13. To visualize the cellulose nanocrystal film surface morphology, FEI Quanta FEG 250 Science SEM device was used. In the SEM device, gold coating (40 mA for 30 s) was applied to the broken section of the cellulose nanocrystal film and the surface morphologies were determined by images taken at different magnifications between 500X-10,000X. The SEM image of the film cross section is shown in Figure 14.

3. Results and Discussion

3.1. Morphoanatomical Charactarization

In the species *Syntrichia ruralis*, the characters that distinguish it from other species in the genus *Syntrichia* are; Hair points found in *S. ruralis* are long, flat and thorny. Hair point lengths and shapes vary in other species. The thorny structure is more pronounced than in other species. Leaf tip cells are more round. In other species, cell shapes are round or rectangular. Base cells are rectangular.

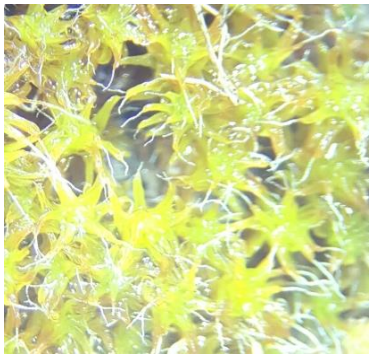


Figure 2. Wet view of *S. ruralis.*

Figure 3. Dry view of *S. ruralis*.

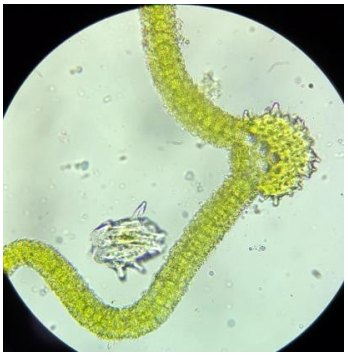


Figure 4. *S. ruralis* leaf cross-section.

Figure 5. *S. ruralis* leaf central cells.

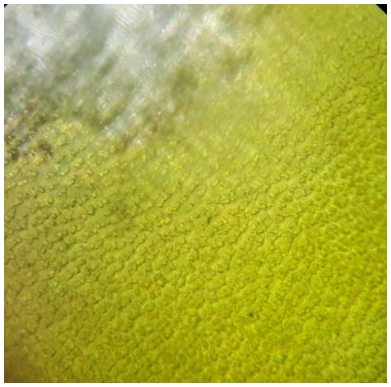


Figure 6. *S. ruralis* leaf tip cells.

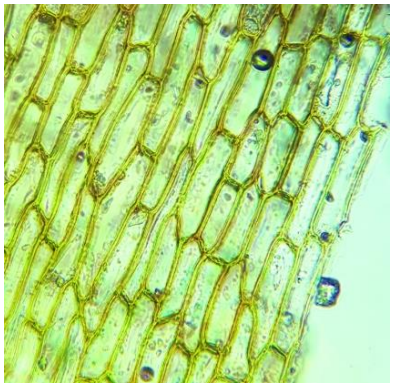


Figure 7. *S. ruralis* leaf base cells.

Figure 8. *S. ruralis* leaf.

Figure 9. *S. ruralis* hair point.

3.2. Physicochemical Characterization

The broad peak observed in the range of 3100-3515 cm^{-1} represents the stretching vibration of –OH groups in cellulose and lignin molecules, the peaks in the region of 2920-2853 cm^{-1} represent the asymmetric C-H stretching of aliphatic -CH_3, =CH_2 groups, and the peak at 1744 cm^{-1} represents the C=O stretching vibration of hemicellulose (Tutuş et al., 2015). The peak at 1630 cm^{-1} represents the stretching vibration of the C=O bond of the carbonyl groups of lignin, and the peak at 1554 cm^{-1} represents the stretching vibration of ethylene (-C=C-) in the aromatic ring structure of lignin (Wang et al., 2019). The peak observed at 1433 cm^{-1} represents the C-H deformation vibration of -CH_3 groups

originating from aliphatic parts of lignin, the peak at 1373 cm^{-1} represents the aliphatic C-H bending vibration of methyl and phenyl alcohols; the peak at 1232 cm^{-1} represents the C-O stretching vibration in the ring structure of lignin and xylan; the peak occurring at 1165 cm^{-1} represents the typical 4-O-methylglucuronoxylan structure (Cai et al., 2018). The peak at 1049 cm^{-1} is the C-OH stretching vibration of cellulose and hemicellulose (Wang et al., 2019). It is also possible to understand from the band intensities that the amount of cellulose increases as a percentage, especially the intensity of the 897 cm^{-1} band is observed to increase. This band originates from the vibration of the glycosidic bond between glucose units in the cellulose molecule. When the FTIR spectra of the obtained CNC film were compared with the literature, it was seen that the results obtained were compatible.

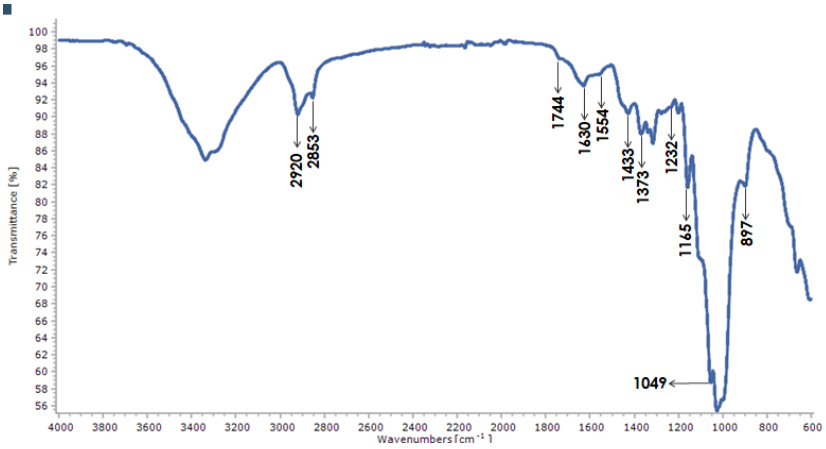


Figure 10. FTIR spectra of *S. ruralis* cellulose nanocrystal film in the range of 4000-600 cm^{-1}

In this study, the repeatability and accuracy of AFM scans performed on CNC film samples are very important. Because the physical area covered by each AFM scan is very small and is in the micrometer range. The visuals of all images taken from the same sample for AFM scanning are similar. As a result of AFM analysis, the dimensions of cellulose nanocrystals produced from moss were measured as 10 ± 4 nm in diameter and 530-78 nm in length (Figure 11). These images show that the AFM scan is repeatable and can properly represent the sample.

Zeta potential values are needed for a stable suspension. Since most nanocelluloses reported in the literature range between -37.7 mV and -60 mV, these values are still at an average level. Peanut shells and other agricultural industrial residues have been recorded at -22.5 mV. (Bano and Negi, 2016), banana stems range between -33.6 and -43.0 mV (Faradilla, 2016), sago seed shells − 37.8 mV, (Naduparambath et al., 2017), pineapple crown -29 mV, (Prado and Spinac, 2018), palm sugar (Arenga Pinnata) was measured as -61.50 mV (Ilyas et al., 2017). The cellulose nanocrystal zeta potential results obtained as a result of our study are -32.59 mV as seen in Figure 12. This shows us that the values obtained are within the cellulose zeta potential range reported in the literature.

Figure 11. AFM images of *S. ruralis* cellulose nanocrystal film

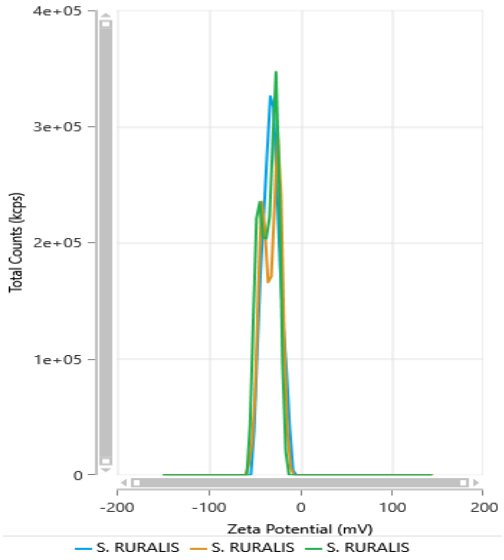


Figure 12. Zeta potential measurements of *S. ruralis* cellulose nanocrystal film.

In the literature, it has been observed that CNCs undergo thermal degradation in three stages. The first region is the region where the first mass loss occurs. It is the cellulosic mass loss due to the evaporation of water that occurs between 25 °C and approximately 200 °C. The second stage starts from 200 °C and continues up to 314 °C. The mass loss in this region is observed due to the depolymerization, dehydration and dissociation of glycosyl units, which results in the formation of volatile substances and then the formation of a char (Faradilla, 2016). The mass loss in cellulosic samples decreases after region II (Naduparambath et al., 2017). The third region is the region starting from 314 °C to 700 °C. The final degradation is the result of oxidation and decomposition of coal into lower molecular weight gas products. In the TGA curve, it was determined that the total mass loss of the CNC film obtained at approximately 750 °C was 20.4%.

Thermogravimetric analysis (TGA) data for a cellulose sample obtained from kelp revealed a total mass loss of 20.4% at temperatures up to 750°C. This indicates that 79.6% of the remaining residue (ash) remained at the end of the analysis. Such a high ash content for organic-based cellulosic materials indicates the presence of significant inorganic components or processing residues in the sample. When these inorganic components are not completely removed during cellulose extraction, they remain as unburned residues during thermal analysis. Therefore, the resulting cellulose is considered to be low in purity and contain a high ash content.

Consequently, the analyzed CNC from kelp showed limited thermal stability due to the presence of inorganic residues. In future studies, neutralization of acid residues and more effective washing and purification processes for the cellulose may contribute to increased thermal stability.

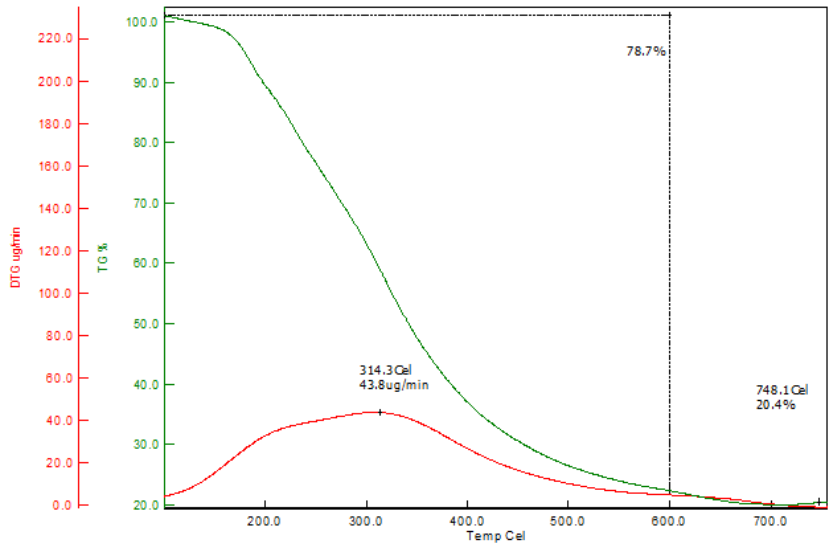
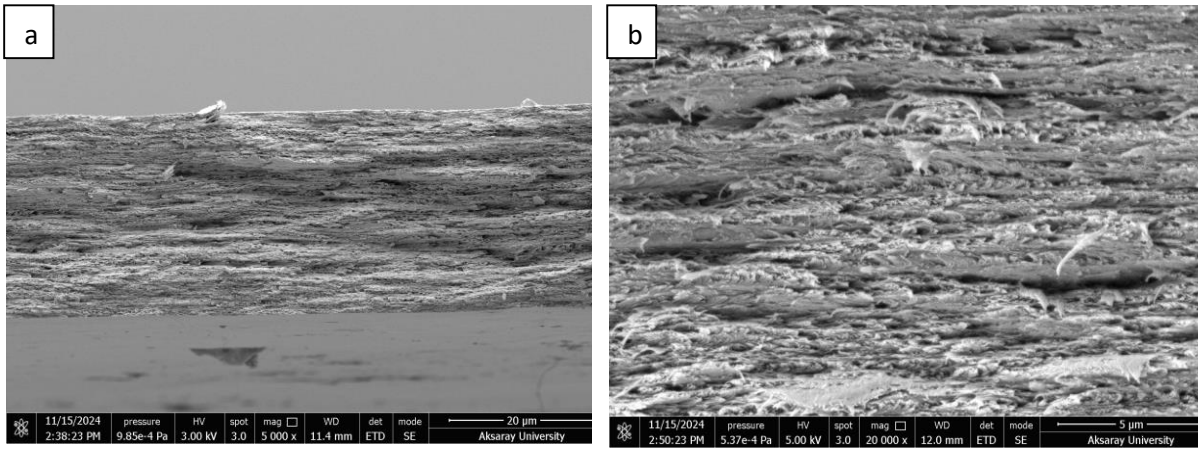


Figure 13. TGA diagram of cellulose nanocrystal film.

These interpretations made along the axis were confirmed with high-resolution images taken in SEM (Figure 14.a, b, c, d). In these images, higher magnification images of the layered structure in the fractured section of the CNC film were taken and the nature of the layers and the orientation of the nanocrystals were clearly seen. The fan-like appearance corresponds to the section of the left-handed helical arrangement of the nanocrystals, and the helical axis is from the top to the bottom of the image. A striking feature of the SEM images in Figures 14.b and 14.c is the array of "holes" that appear to be arranged in the layers of the film section. These holes are oriented perpendicular to the fracture surface of the nanocrystals, indicating that the higher strength of the film along the length direction of the nanocrystals results in the pulling of the nanocrystals oriented in this direction (Majoinen et al., 2012).



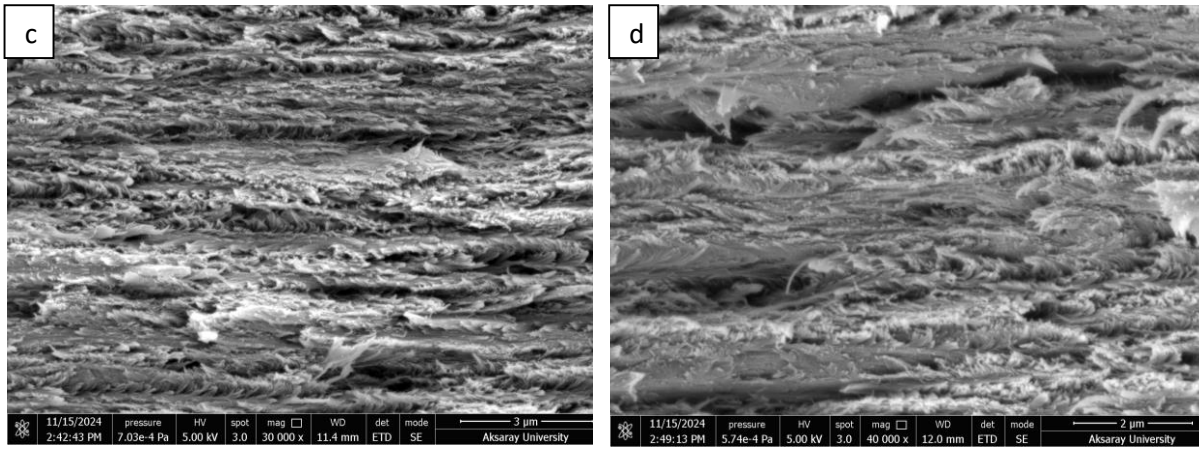


Figure 14. a) SEM images of the fractured surface of the CNC film with a crossection scale of 20 µm, b) SEM images of the fractured surface of the CNC film with a crossection scale of 5 µm, c) SEM images of the fractured surface of the CNC film with a crossection scale of 3 µm, d) SEM images of the fractured surface of the CNC film with a crossection scale of 2 µm.

In this study, cellulose and cellulose nanocrystals (CNC) were obtained from the moss *Syntrichia ruralis* for the first time, and their detailed characterization was performed. The primary objective of the study was to utilize organic wastes, such as *S. ruralis*, which grow naturally and have minimal environmental impact, as biopolymer sources, thus both contributing to the economic recovery of these wastes and providing a new source of cellulose. From an environmentally friendly production perspective, the abundance of *S. ruralis* in natural environments and the fact that its collection does not disrupt the ecological balance provide significant advantages for the sustainable production of such biomaterials. In conclusion, this study, for the first time, produced and characterized cellulose nanocrystals from *S. ruralis* in detail. The obtained data introduce moss-derived cellulose to the literature and demonstrate its suitability for use in advanced applications.

4. Conclusion

In this study, cellulose and CNC were obtained from *Syntrichia ruralis*. It was aimed to evaluate organic wastes, restore them to the economy and provide a new source for cellulose. In the light of the obtained data, it was seen that moss derived biopolymers can be evaluated as promising sources for biomaterials. In order to obtain cellulose nanocrystals from cellulose successfully produced using *S. ruralis* moss, amorphous regions were removed or partially destroyed by sulfuric acid hydrolysis. A cellulose yield of 8% was determined. This yield can be considered moderate for extractions from biomass such as kelp. The reason for the lower yield compared to other sources is that the TGA data showed 79.6% ash residue in the sample. This indicates that a large amount of inorganic material remained in addition to the cellulose. Furthermore, some organic residue may have been lost along with the cellulose during the washing or filtration stages. The current protocol focuses on obtaining high-purity cellulose, so the yield may be slightly lower, but the quality is high. Furthermore, we can say that this protocol is consistent with the 20.4% mass loss observed in the TGA despite the high ash content. The CNC products obtained from the sonication-assisted acid hydrolysis process at different reaction times were characterized.

The obtained FTIR spectra confirmed that lignin and hemicellulose were successfully removed from cellulose. The broad band observed between 3100-3515 cm^{-1} corresponds to –OH groups in cellulose, while the peak at 2920 cm^{-1} indicates C–H stretching vibrations. These findings are consistent with cellulose characterization studies in the literature (Klemm et al., 2011). In addition, the peaks at 1427 cm^{-1} and 897 cm^{-1} indicate the presence of crystalline structure and β-glycosidic bonds, indicating that the structural integrity of cellulose is preserved and is suitable for CNC production. In addition, the dimensions of CNC were measured as 10 ± 4 nm in diameter and 530-78 in AFM results. These results support the structural changes occurring in cellulose as a result of acid hydrolysis. It was understood that the tensile strength can be adjusted by controlling the Zeta Potential and the desired value can be obtained. The zeta potential value was found to be -32.59 in the breaking strength. The total mass loss of the CNC film obtained in the TGA curve was determined as 20.4% at approximately 750 °C. SEM images showed that CNCs have a regular morphology and the CNC structures are needle-like. This structure is important for its potential use in applications such as composite materials, drug delivery systems and biodegradable packaging technologies. The natural occurrence of *S. ruralis* in ecological environments and its harvesting with minimal environmental impact support the sustainable production of such biomaterials.

In conclusion, for the first time, this study contributes to the existing literature by presenting the detailed extraction and characterization of CNC from *S. ruralis*. The results show that cellulose obtained from moss has the quality required for use in advanced technological applications. Future studies can further expand the potential applications of these biomaterials by focusing on their mechanical properties, surface modifications and interactions in composite systems.

Acknowledgments

We would like to thank Prof. Dr. Murat Kaya for her valuable comments and contributions to this study.

Statement of Conflict of Interest

Authors have declared no conflict of interest.

Author's Contributions

The contributions of the authors are equal.

References

Alataş M. Abant dağları epifitik bryofit flora ve vejetasyonunun araştırılması. Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 32-59 Zonguldak, Turkey, 2012.

Bano S., Negi YS. Studies on cellulose nanocrystals isolated from groundnut shells. Carbohydrate Polymers 2016; 157: 1041–1049.

Bilek S., Yalçın Melikoğlu A., Cesur S. Tarımsal atıklardan selüloz nanokristallerinin eldesi, karakteristik özellikleri ve uygulama alanları. Akademik Gıda 2019; 17: 140-148.

Cai Q., Fan Z., Chen J., Guo W., Ma F., Sun S., Zhou Q. Dissolving process of bamboo powder analyzed by FT-IR spectroscopy. Journal of Molecular Structure 2018; 1171: 639-643.

Casas C., Brugués M., Cros MR., Sérgio C. Handbook of mosses of the iberian peninsula and the balearic islands. Spain: Institut d'Estudis Catalans, 2006.

Cenğiz A. Balya orman işletme şefliği (Balıkesir) karayosunu florası. Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1, Çankırı, Türkiye, 2019.

Chen W., Yu H., Liu Y., Chen P., Zhang M., Hai Y. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments.Carbohydrate Polymers 2011; 83(4): 1804-1811.

Cui S., Zhang S., Ge S., Xiong L., Sun Q. Green preparation and characterization of size-controlled nanocrystalline cellulose via ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis. Industrial Crops and Products 2016; 83: 346-352.

Duval A., Lawoko M. A review on lignin-based polymeric, micro-and nanostructured materials. React. Funct. Polym 2014; 85: 78-96.

Faradilla RHF., Lee G., Rawal A., Hutomo T., Stenzel MH., Arcot J. Nanocellulose characteristics from the inner and outer layer of banana pseudostem prepared by TEMPO-mediated oxidation. Cellulose 2016; 3023-3037.

Fernandez Nunez EG., Barchi AC., Ito S., Escaramboni B., Herculano RD., Mayer CRM., de Oliva Neto P. Artificial intelligence approach for high level production of amylase using *Rhizopus microsporus* var. *oligosporus* and different agro-industrial wastes. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 2017; 92: 684-692.

Frey W., Kürschner H. Bryosoziologische untersuchungen in jordanien, lebens-strategienanalyse der terrestrichen und epilithischen Moosgesellschaften. Fragmenta Floristica et Geobotanica 1995; 40: 491-511.

Frey W., Stech M. Bryophytes and seedless vascular plants. Stuttgart: 13th ed. Berlin: Gebrüder Borntraeger; 2009.

Herbaut M., Zoghlami A., Habrant A., Falourd X., Foucat L., Chabbert B., Paës G. Multimodal analysis of pretreated biomass species highlights generic markers of lignocellulose recalcitrance. Biotechnol Biofuels 2018; 11: 1–17.

He R., Gai L., Zhu Z., Gu H., Sun P. Industrial by-products of tiger nut starch as a source of cellulose nanocrystals for biodegradable packaging materials. International Journal of Biological Macromolecules 2025; 306: 141422.

Ilyas RA., Sapuan SM., Ishak MR. Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from sugar palm fibres (Arenga pinnata). Carbohydrate Polymers 2018; 1038–1051.

Kang SW., Park YS., Lee JS., Hong SI., Kim SW. Production of cellulases and hemicellulases by Aspergillus niger KK2 from lignocellulosic biomass. Bioresource Technology 2004; 91: 153-156.

Klemm D., Philipp B., Heinze T., Heinze U., Wagenknecht W. Comprehensive cellulose chemistry. Fundamentals and Analytical Methods. 1998; 1: 1-7.

Klemm D., Kramer F., Moritz S., Lindström T., Ankerfors M., Gray D., Dorris A. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. Green Nanomaterials. 2011; 50: 5438-5466.

Kürschner H., Frey W. Liverworts, mosses and hornworts of Southwest Asia (Marchantiophyta, Bryophyta, Anthocerotophyta) second enlarged and revised edition. J. Cramer. 2020; 149: 267.

Lestari P., Elfrida N., Suryani A., Suryadi Y. Study on the production of bacterial cellulose from Acetobacter xylinum using agrowaste. Jordan Journal of Biological Sciences 2014; 7(1): 75-80.

Majoinen J., Kontturi E., Ikkala O., Gray DG. SEM imaging of chiral nematic films cast from cellulose nanocrystal suspensions. Cellulose 2012; 19: 1599-1605.

Md. Islam H., Ara MH., Khan MA., Naime J., Md. Khan AR., Md. Rahman L., Ruhane TA. Preparation of cellulose nanocrystals biofilm from coconut coir as an alternative source of food packaging material. ACS Omega 2025; 10: 8960−8970.

Moud AA. Chiral liquid crystalline properties of cellulose nanocrystals: fundamentals and applications. ACSOmega 2022a; 30673–30699.

Moud AA. Advanced cellulose nanocrystals (CNC) and cellulose nanofibrils (CNF) aerogels: Bottom-up assembly perspective for production of adsorbents. International Journal of Biological Macromolecules 2022b; 222: 1-29.

Naduparambath S., Jinitha TV., Shaniba V., Sreejith MP., Balan AK., Purushothaman E. Isolation and characterisation of cellulose nanocrystals from sago seed shells. Carbohydrate Polymers 2018; 13–20.

Özkan Çiçek B. Investigation of swelling behavior of cross-linked chitosan/cellulose/graphene composite. Firat University Journal of Engineering 2021; 33(1).

Pang T., Wang G., Sui W., Xu T., Wang D., Si C. Lignin-based support for metal catalysts: Synthetic strategies, performance boost, and application advances. Coordination Chemistry Reviews 2025; 528: 216426.

Peng Y., Wei X., Liang Y., Wang X., Chen S., Niu X. Advances in structural color composite films based on cellulose nanocrystals. Industrial Crops and Products 2024; 221: 119294.

Prado KS., Spinac´e MAS. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from pineapple crown waste and their potential uses. International Journal of Biological Macromolecules 2018; 410-416.

Ramírez CM., Castro C., Zuluaga R., Gañán P. Physical characterization of bacterial cellulose produced by Komagataeibacter medellinensis using food supply chain waste and agricultural by products as alternative low cost feedstocks. Journal of Polymers and the Environment 2018; 26: 830-837.

Smith AJE. The moss flora of Britain and Ireland. Second Edition. Cambridge Univ. Press. Cambridge, England 2004; 1012.

Sohail M., Siddiqi R., Ahmad A., Khan SA. Cellulase production from Aspergillus niger MS82: effect of temperature and pH. New Biotechnology 2009; 25: 437-441.

Tayeb AH., Amini E., Ghasemi S., Tajvidi M. Binding properties and applications: A review. Molecules Cellulose Nanomaterials 2018; 23(10): 2684.

Thakur VK., Thakur MK. Recent advances in green hydrogels from lignin: a review. Int. J. Biol. Macromol 2015; 72: 834–847.

Tutuş A., Kazaskeroğlu Y., Çiçekler M. Evaluation of tea wastes in usage pulp and paper production. BioResources 2015; 10(3): 5407-5416.

URL-1<http://www.bryoecol.mtu.edu. Erişim tarihi: 15.05.2022

URL-2<Chaplin, M., 2006. http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html. Erişim tarihi: 11.04.2022

Wada M., Okano T., Sugiyama J., Horii F. Characterization of tension and normally lignified wood cellulose in populus *maximowiczii*. Cellulose 1995; 2: 223-233.

Wang K., Wang B., Hu R., Zhao X., Li H., Zhou G., Song L., Wu A. Characterization of hemicelluloses in Phyllostachys edulis (moso bamboo) culm during xylogenesis. Carbohydrate Polymers 2019; 221: 127-136.

Watson EV. British mosses and liverworts: An ıntroductory work. British Mosses and Liverworts. Cambridge University Press 1981; 0-521-28536-4.

Zander RH. Genera of The pottiaceae: mosses of harsh environments. Buffalo, Bulletin of the Buffalo Society. 1993; 32, New York, USA.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 475-490, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 475-490, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Halopteris scoparia'dan Sentezlenen Gümüş Nanopartiküllerin Lipozomal Enkapsülasyonu: Antibakteriyel Aktivite Geliştirme için Sürdürülebilir Yaklaşım

Ayşe Sinem YILDIRIM[1], Kübra BEZİR[2], İnci TÜNEY[3], Münevver Müge ÇAĞAL[4*]

[1,2,4]Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Bioengineering, 16310, Bursa, Türkiye
[3]Ege University, Faculty of Sciences, Department of Biology, 35100, İzmir, Türkiye

[1]https://orcid.org/0009-0004-0029-6718
[2]https://orcid.org/0000-0002-4276-1559
[3]https://orcid.org/0000-0003-0293-6964
[4]https://orcid.org/0000-0002-1786-1216
*Corresponding author: munevver.cagal@btu.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 22.04.2025
Kabul tarihi:19.09.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Makroalg
Lipozom
Antibakteriyel
Yeşil sentez
Gümüş nanopartikül

ÖZ

Gümüş nanopartiküller (AgNPs) üretmek için kullanılan geleneksel fiziksel ve kimyasal yöntemler genellikle karmaşık, maliyetli ve çevreye zarar veren süreçler içerir. Bu yöntemler yerine yeşil sentez olarak bilinen daha sürdürülebilir bir yaklaşım bulunmaktadır. Bu çalışmada, *Halopteris scoparia*'dan elde edilen özütler kullanılarak yeşil sentez ile gümüş nanopartiküller (AgNPs) elde edilmiştir. AgNP'lerin oluşumu UV-vis ve FTIR ile gözlemlenmiş, boyut ve zeta potansiyeli DLS kullanılarak belirlenmiş ve morfolojileri STEM ile incelenmiştir. UV-vis, AgNP'lerin karakteristik bir özelliği olan 425 nm'de bir yüzey plazmon piki göstermiştir. Fourier transform infrared spektroskopisi (FTIR) analizi, *H. scoparia*'daki fonksiyonel biyomolekülleri ve AgNP'ler arasındaki etkileşimleri tanımlamak için kullanılmıştır. Bu çalışma, *H. scoparia* özütlerinden yeşil sentez yöntemiyle elde edilen AgNP'lerin lipozomal enkapsülasyon yoluyla antibakteriyel özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Kullanılan AgNP'ler farklı sıcaklık ve pH aralıklarında sentezlenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimal koşullar altında üretilen hem serbest AgNP'lerin hem de lipozomal AgNP'lerin (L-AgNPs) antimikrobiyal aktiviteleri çeşitli bakteri suşlarına karşı değerlendirilmiştir. *H. scoparia* özütlerinden elde edilen en küçük AgNP'ler 61,21 ± 1,537 nm olarak ölçülürken, L-AgNP'ler 84,32 ± 2,181 nm olarak kaydedilmiş ve sentez 9 pH ve 90°C sıcaklıkta gerçekleşmiştir. Nanolipozomlar, nanometrik partikül boyutu ve dar polidispersite ile birlikte %87'yi aşan bir kapsülleme etkinliği göstermiştir. Serbest AgNPs ve L-AgNPs için minimum inhibitör konsantrasyon (MİK) değerleri *E. coli*'ye karşı sırasıyla 48,5 µg/µL ve 24,5 µg/µL olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, *S. aureus*'a karşı MİK değerleri AgNPs için 48,5 µg/µL ve L-AgNPs için 24,5 µg/mL'dir. Tüm deneysel sonuçlar, yenilikçi lipozomal sistemin AgNP'lerin antibakteriyel etkinliğini önemli ölçüde artırdığını kesin olarak göstermektedir. Bu ön bulgular, lipozomların kozmetik ve farmasötik uygulamalarda AgNP'ler için etkili taşıyıcılar olarak hizmet edebileceğini göstermektedir.

Liposomal Silver Nanoparticles Synthesized from *Halopteris scoparia*: A Sustainable Approach to Enhanced Antibacterial Activity

Research Article

ABSTRACT

Article History:
Received: 22.04.2025
Accepted: 19.09.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Macroalgae
Liposome
Antibacterial
Green synthesis
Silver nanoparticle

The conventional physical and chemical methods for producing silver nanoparticles often involve complex, costly, and environmentally detrimental processes. To address these challenges, researchers have explored a more sustainable approach known as green synthesis. This study focuses on the biosynthesis of silver nanoparticles (AgNPs) utilizing extracts from *Halopteris scoparia*. The formation of AgNPs was observed through UV–vis and FTIR and characterized by size and zeta potential were determined using DLS, and their morphology was examined with STEM. The UV–vis displayed a surface plasmon peak at 425 nm, a characteristic feature of AgNPs. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis was used to identify the functional biomolecules in *H. scoparia* and the interactions between the AgNPs. The primary objective is to enhance the antibacterial properties of these nanoparticles through liposomal encapsulation. In this context, we investigated the effects of temperature and pH on the synthesis of nanoparticles. The antimicrobial activities of both AgNPs and liposomal AgNPs (L-AgNPs), produced under optimal conditions, were assessed against various bacterial strains. The smallest AgNPs derived from *H. scoparia* extracts measured 61.21 ± 1.537 nm, while the L-AgNPs were recorded at 84.32 ± 2.181 nm, with synthesis occurring at a pH of 9 and a temperature of 90 °C. The nanoliposomes exhibited an encapsulation efficiency greater than 87%, while maintaining a nanometric particle size and a narrow polydispersity index. The minimum inhibitory concentration (MIC) values for AgNPs and L-AgNPs were found to be 48.5 µg/µL and 24.5 µg/µL against *E. coli*, respectively. Similarly, the MIC values against *S. aureus* were 48.5 µg/µL for AgNPs and 24.5 µg/mL for L-AgNPs. All experimental results conclusively illustrate that the innovative liposomal system has significantly enhanced the antibacterial efficacy of AgNPs. These preliminary findings suggest that liposomes could serve as effective carriers for AgNPs in cosmetic and pharmaceutical applications.

To Cite: Yıldırım AS., Bezir K., Tüney İ., Çağal MM. Liposomal Silver Nanoparticles Synthesized from *Halopteris scoparia*: A Sustainable Approach to Enhanced Antibacterial Activity. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 475-490.

1.Introduction

Antibiotic resistance in bacteria has emerged as a critical challenge in the development of infectious diseases. This issue presents significant concerns for the effective diagnosis and treatment of such conditions. In response, there is an increasing focus on the potential of nanotechnology-based formulations to address multidrug resistance in microorganisms.

Nanotechnology, a rapidly developing area within nanoscience, focuses on the synthesis and application of nanoscale materials across various interdisciplinary fields, including physics, chemistry, biology, medicine, and agriculture (Albrecht et al., 2006). Silver is frequently chosen for the creation of nanoparticles due to its potent antimicrobial properties among metals (Wennersten et al., 2008; Mody et al., 2010; Markowska et al., 2013).

Silver nanoparticles (AgNPs) are primarily synthesized using chemical and physical methods. However, these conventional techniques pose significant challenges, as they often require toxic chemicals and various target molecules or substances, such as surfactants. In response to these challenges, researchers have started exploring alternative approaches, particularly the potential of synthesizing nanoparticles using biological resources, which present numerous opportunities for application in advanced technological fields (Iravani et al., 2014; Yavuz et al., 2023).

Green synthesis represents a promising method for nanoparticle production that employs a bottom-up approach. This process involves the reduction of metal salts via biological structures, including flavonoids, carotenoids, pigments, enzymes, and proteins (Hussain et al., 2016; Srikar et al., 2016; Hasanin et al., 2022). This approach not only facilitates the rapid and straightforward synthesis of AgNPs in very small sizes and specific shapes but also offers a cost-effective and safer alternative, thereby broadening the application of these nanoparticles across a wide range of disciplines (Abdelghany et al., 2018)

The shape, stability, size, and physicochemical properties of silver nanoparticles (AgNPs) can be greatly affected by the choice of capping agents. Selecting an appropriate capping agent enhances the interaction of nanoparticles with their environment, thereby improving both their cytotoxicity and biocompatibility. Biomass derived from plants, fungi, bacteria, and seaweeds is employed in the green synthesis of silver nanoparticle (Sundararaju et al., 2020). This environmentally sustainable approach harnesses natural resources to produce nanoparticles while considerably minimizing ecological impact. Secondary metabolites present in these biomass sources can serve effectively as both capping and reducing agents in the synthesis of AgNPs (Kannan et al., 2013; de Aragão et al., 2019; Bhuyar et al., 2020). In addition, these secondary metabolites exhibit a range of beneficial properties, including antimicrobial, anti-inflammatory, antioxidant, anti-apoptotic, anti-cancer, and enzyme inhibitory effects. Numerous research studies have demonstrated that silver nanoparticles have been synthesized from a variety of seaweed species, including *Codium capitatum* P.C. Silva, *Padina tetrastromatica* Hauck, *Spirogyra insignis* (Hassall) Kützing, *Turbinaria conoides* (J. Agardh) Kutzing, and *Sargassum plagiophyllum* C.Agardh, which serve as effective antimicrobial agents (Fawcett et al. 2017; Viswanathan et al. 2024). Seaweeds are frequently referred to as bio-nano factories owing to their exceptional capping and reducing properties in nanomaterial synthesis. They are also considered less toxic and are utilized as targeted drug delivery carriers (Khalifa et al. 2019).

Seaweed serves a significant role in the synthesis of metallic nanoparticles, such as silver, iron oxide, and gold. These primitive organisms possess photosynthetic pigments and have uncomplicated reproductive systems. They fulfill numerous essential ecological functions and can be utilized as soil amendments, animal feed, and food. Various types of seaweeds are extensively cultivated for the cosmetics and food industries (Hassaan et al., 2018; Koçer and Özçimen, 2022).

Despite their numerous benefits, the consumption of green synthesis AgNPs from seaweeds is often limited due to their poor solubility and low bioavailability. AgNPs can be incorporated into suitable encapsulation systems to reduce toxicity and enhance their bioavailability. Akter et al. (2020) reported the successful synthesis of Ag-NPs with the encapsulation of biomolecules that enhances the particle stability and reduce cytotoxicity.

Liposomes are regarded as an effective carrier system for their encapsulation. Liposomes and nanoliposomes, which are lipid-based carriers, offer protection and enable the controlled release of

various active agents, including food and pharmaceutical compounds, at the right time and location (Tometri et al., 2020; Ak et al., 2025; Cagal et al., 2025).

Preparation methods for liposomal systems differ greatly among various algal species, especially in technique, particle characteristics, and functional performance. The predominant method employed involves thin-film hydration, subsequently followed by probe sonication. This method is well-known for its scalability, efficiency, and simplicity in the production of liposomes with specific physicochemical properties (Savaghebi et al., 2020; Ak et al., 2025). When combined with a chitosan coating, it enhances antioxidant and antimicrobial properties. Although liposomal formulations containing chitosan demonstrate enhanced bioactivity, they require additional procedures. (Rigi et al., 2022; Gharehbeglou et al., 2024). Alternatively, easier techniques like homogenization have been used to prepare nanoliposomes for *Melissa officinalis* Linnaeus, *Ulva lactuca* Linnaeus, and *Codium fragile* subsp. *fragile* (Suringar) Hariot extracts (Nizam et al., 2024; Ak et al., 2025). These techniques result in liposomal formulations with high encapsulation efficiencies of 70–80%, particle sizes approximately 140–150 nm, and low polydispersity indices. Liposomal systems that are reliable and reproducible can be developed through straightforward methodologies, thereby obviating the need for complex or resource-intensive procedures. This study represents the first comprehensive analysis of nanoliposome-encapsulated silver nanoparticles (AgNPs) derived from *Halopteris scoparia*. The primary objective is to evaluate the influence of nanoliposomes, prepared using the homogenization method on their antibacterial efficacy.

2. Material and Methods

2.1. Materials

Analytical-grade chemicals were utilized in the experiments. L-α-phosphatidylcholine (soybean lecithin, ≥30% enzymatic) was purchased from Sigma-Aldrich (Missouri, USA), and $AgNO_3$ (99.5%) from Fluka (Seelze, Germany). Nutrient agar (NA) and Nutrient broth (NB) were purchased from Merck.

2.2. Sampling and identification of the H. scoparia

H. scoparia samples used in this study were freshly collected from the Izmir Bay (38˚ 21.921' N- 26˚ 46.915' E) in June 2023. The collected seaweeds were prepared for analysis following the method of Ak et al. (2025).

2.3. Preparation of extracts

The extraction of algae was performed using a water extraction method (Koçer et al., 2022). Weighed 2.5 g of dried algae was placed on precision scales and extracted in 100 mL of distilled water at a temperature of 80°C for 20 minutes under magnetic stirring. Once the extraction process was complete and the solution had cooled to room temperature, it was filtered using filter paper. Any unwanted

materials were removed as pellets through centrifugation at 4500 rpm for 20 minutes. The samples were stored at 4°C for later analysis.

2.4. Synthesis and optimization of silver nanoparticles

For the green synthesis of silver nanoparticles (AgNPs), the prepared algal extracts were added dropwise to a 1 mM $AgNO_3$ solution at a 1:9 (v/v) ratio under stirring. Nanoparticle formation was confirmed visually by observing color changes and by taking UV spectral images at specific time intervals.

To evaluate the effect of different parameters on nanoparticle formation, the synthesis process was carried out at various temperatures (80, 90, and 100°C) and pH levels (9, 10, and 11). The resulting nanoparticles were filtered using a 0.22 μm syringe filter and stored at 4°C for further characterization.

2.5. Preparation of nanoliposomal formulations

A homogenization technique was utilized to prepare nanoliposomes. A dispersion of soy lecithin at 1% (w/v) was created using an ultrasonic homogenizer (Optic Ivymen System - CY-500, Spain), set to operate at 60% amplitude for a duration of 10 minutes, while maintaining a constant pH. The lipid vesicles encapsulating the silver nanoparticles were prepared by combining them through a straightforward physical mixing method in a 1:1 (v/v) ratio, following the protocol established by Yılmaz et al. (2023). An AgNP solution (200 μL) was then mixed with 200 μL of the nanoliposomes and thoroughly vortexed.

2.6. Characterization of silver nanoparticles and nanoliposomal formulations

The initial characterization of the synthesized silver nanoparticles involved measuring their absorption spectra within the 200–800 nm range, using a UV–Vis spectrophotometer (VWR/UV-1600PC, Wayne, PA, USA). Their physicochemical properties were further analyzed with Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy (Perkin Elmer, ABD) in the mid-infrared range (400–4000 cm−1) (Acar et al., 2023). All samples were tested in triplicate, with three measurements each to ensure accuracy.

The average particle size and polydispersity index (PDI) of both silver nanoparticles (AgNPs) and L-AgNPs were determined utilizing a Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, UK) via dynamic light scattering (DLS). Moreover, the surface charge of the formulations was evaluated through Zeta Potential (ZP) measurements, employing electrophoretic light scattering (ELS) with the same instrumentation. All measurements were performed in triplicate (Macit et al., 2021). Additionally, morphological characterization of the synthesized nanoparticles and liposomal vesicles was conducted using a field emission scanning electron microscope (FESEM/STEM) (Zeiss GEMINI 500, ZEISS, Germany).

The efficiency of liposome encapsulation was quantified utilizing a Varian AA 280Z Zeeman flame atomic absorption spectrophotometer (Varian Inc., Australia). In this process, 10 mL of a dilute

solution (10 [1]) of L-AgNPs was injected into the apparatus (Eid and Azzazy, 2014). The encapsulation efficiency (EE) was computed using the subsequent formula:

EE (%): [NT-NF / NF] x 100

In this context, NT refers to the total amount of silver nanoparticles introduced into the liposomes, while NF represents the fraction of unencapsulated silver nanoparticles (AgNPs) found in the supernatant after centrifuging the liposomal silver nanoparticles (L-AgNP) at 12,000 revolutions per minute for 15 minutes at a temperature of 4°C.

2.7. Antibacterial activities of free and encapsulated algal AgNP

Laboratory strains used in this study included *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 and *Escherichia coli* ATCC 25922. Bacterial cultures were obtained from our culture collection unit (Ak et al. 2025).

For the antibacterial bioassays, formulations of liposomal encapsulated algal silver nanoparticles (AgNPs) (1:1 v/v) and algal silver nanoparticles (AgNPs) were diluted with sterile ultra-distilled water (1:1) to ensure consistent concentrations. The Minimum Inhibitory Concentration (MIC) represents the lowest concentration of both unencapsulated and liposome-encapsulated extracts that effectively inhibit microbial growth. In contrast, the Minimum Bactericidal Concentration (MBC) is defined as the minimum concentration of an antibacterial agent required to inactivate over 99.99% of the bacteria present. The MIC and MBC were determined using a broth microdilution method per CLSI (2018) guidelines. NA and NB served as bacterial culture media. MBC values were obtained by transferring 100 µL of sample from the clear MIC wells onto nutrient agar for subsequent bacterial analysis. Each assay was conducted in triplicate to ensure accuracy and reliability. Following the incubation period, the microplates were evaluated using a microplate reader calibrated to measure absorbance at 600 nm, providing insight into bacterial presence (Biotek EPOCH microplate spectrophotometer, Vermont, USA).

Data analysis was performed using RStudio Software (Version 2023.12.1 + 402). To assess the impact of treatment group (AgNP vs. L-AgNP) and bacterial species (*S. aureus* vs. *E. coli*) on MIC and MBC values, two separate two-way ANOVAs were conducted for each parameter.

3. Results and Discussion

The synthesis of silver nanoparticles (AgNPs) from an $AgNO_3$ solution of *H. scoparia* (HS) was evidenced by a distinct change in the color of the solution (see Figure 1 inset). Initially colorless, the solution transitioned to a brown hue, indicating the formation of AgNPs. This color change suggests the reduction of silver ions to silver nanoparticles. Furthermore, the synthesis of AgNPs was confirmed through UV–Visible spectroscopy, where the absorption spectra revealed a prominent peak at 425 nm (Figure 2). The UV–Vis spectra presented in Figures 2, 3, and 4 display a sharp absorbance around 425 nm, characteristic of AgNPs. The UV–Vis absorption band observed in the range of 420–450 nm serves as evidence of the AgNPs formation (Bhakya et al., 2016).

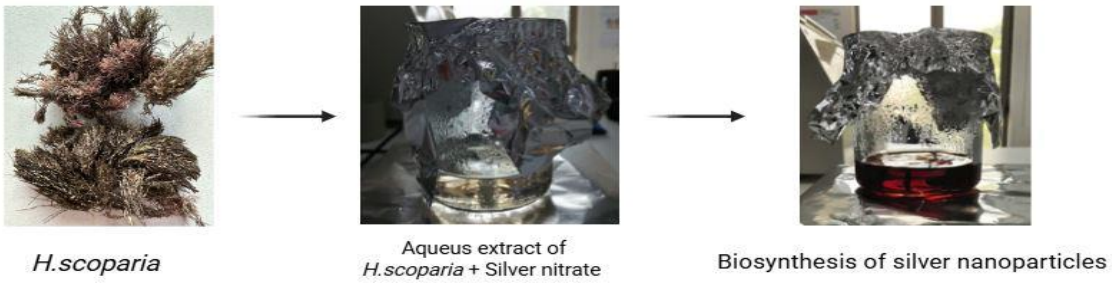


Figure 1. Green synthesis of AgNP from *Halopteris scoparia*.

Optimization studies were conducted to improve the yield of silver nanoparticles (AgNPs). The parameters of pH, temperature, and time directly influence productivity and were systematically optimized to enhance results. To assess the impact of temperature on the production of silver nanoparticles (AgNPs) using algal extract (pH 9) containing 1 mM $AgNO_3$, we incubated the mixture at varying temperatures ranging from 80 to 100 °C, with increments of 10 °C. The synthesis of AgNPs was monitored throughout this process. The highest level of AgNPs synthesis was detected at 90 °C, where stability was maintained over an extended period, indicating a sustained production process (Figure 2). The nanoparticles formed more efficiently at lower temperatures, so the reaction was conducted at 90°C instead of 100°C to prevent evaporation. Elevated temperatures provide increased kinetic energy, which accelerates the rate of synthesis (Birla et al., 2013). Following the optimization process, the synthesis was conducted for a duration of 6 hours, as illustrated in Figure 4. However, the analysis of the UV-Vis spectra indicated that the reaction reached completion within 3 hours (Figure 3).

Koilparambil et al. (2016) noted that a significant consumption of silver ions occurs during the nucleation phase, as higher temperatures lead to an increase in the reaction rate. As a result, the secondary reduction process on the surfaces of the preformed nuclei comes to a halt. A review of the relevant literature indicates that at high temperatures, most reactants are utilized, resulting in the formation of small-sized AgNPs. However, as these nanoparticles interact with one another and with the functional groups present in the extracts, their size tends to increase, leading to the formation of aggregates. Sun et al. (2014) also noted that the size of AgNPs grows with the enhancement of the reaction rate as temperature rises. In another study, at temperatures between 30 and 40 °C, the observed change required a duration of 10 minutes to take place. In contrast, the same change was achieved much more rapidly, within approximately 5 minutes, at higher temperatures ranging from 60 to 100 °C. This significant difference in time underscores the impact of temperature on the rate of the reaction (Ibrahim, 2015).

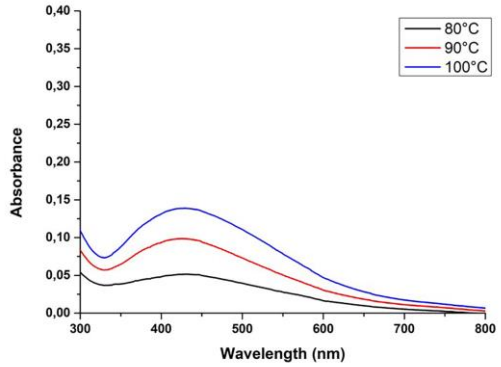


Figure 2. Effects of temperature on AgNP formation.

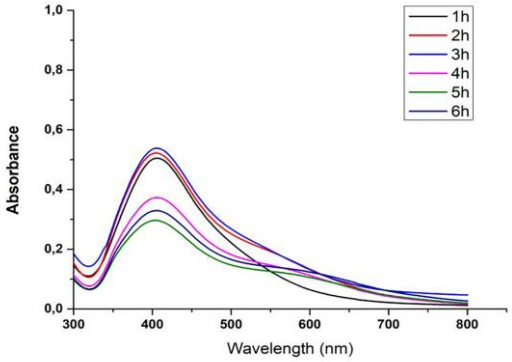


Figure 3. Effects of time on AgNP formation.

pH is a critical factor influencing the production of silver nanoparticles (AgNPs). To identify the optimal pH for AgNP synthesis, $AgNO_3$ was introduced to algal extract at varying pH levels of 9, 10, and 11 (90°C). The highest yield of AgNPs was observed at pH 9, as evidenced by a significant change in color and confirmed by the UV-visible absorption spectra (Figure 4). Anigol et al. (2017) explain this observation by highlighting the reduction in aggregation due to the complete loading of clusters, along with the nucleation and growth of smaller particles, which is driven by an increased reaction rate at elevated pH levels. Similar results were reported by Dubey et al. (2010) and Philip (2010), who found that higher pH values led to the production of smaller, uniform, and spherical nanoparticles. Furthermore, Vanaja et al. (2013) examined silver nanoparticles (AgNPs) synthesized from leaf extracts of *Coleus aromaticus* and discovered that larger nanoparticles formed at lower pH levels, whereas smaller, spherical nanoparticles emerged at higher pH levels. They also concluded that alkaline pH values are optimal for the synthesis of AgNPs.

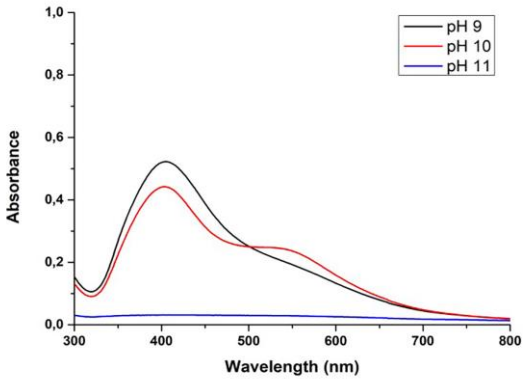


Figure 4. Effects of pH on AgNP formation.

The functional groups involved in the reduction and stabilization of silver nanoparticles were identified through FTIR analyses. The observed shifts in peak values indicated the binding of these functional groups to the silver nanoparticles. In the FTIR spectrum of silver nanoparticles synthesized

from the algal extract, three prominent peaks were observed at 3306, 2121, and 1632 cm^{-1}, as illustrated in Figure 5. The broad peak within the range of 3400 to 3200 cm^{-1}, evident in both AgNP spectra, corresponds to the -OH stretch associated with moisture or phenolic compounds. The peak at 2121 cm^{-1} is attributed to asymmetric -CH stretches, while the peak at 1632 cm^{-1} represents C=O stretches (Bhakya et al., 2016; Koçer and Özçimen, 2018). According to Bhakya et al. (2016), these peaks originated from the extracts, suggesting that the proteins within the extracts may bind to Ag+ ions through carboxylate ions or free amine groups.

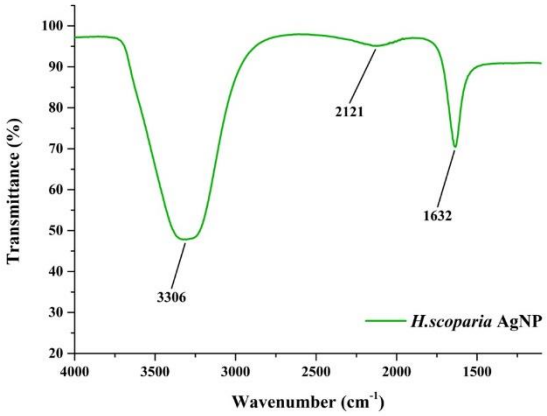


Figure 5. Characterization results of AgNPs with FTIR.

Size distribution curves for AgNPs and encapsulated silver nanoparticles (L-AgNPs), as presented in Figures 6a and 6c, respectively, indicate that the diameters of AgNPs synthesized from *H. scoparia* extracts ranged approximately from 61 nm. In contrast, the average diameters of liposomal AgNPs were measured at 84 nm, as detailed in Table 1. The size distribution and polydispersity index (PDI) of the liposomes suggest their physical stability; a PDI value below 0.5 reflects a population of uniformly sized liposomes with a narrow size distribution (Singh et al., 2015).

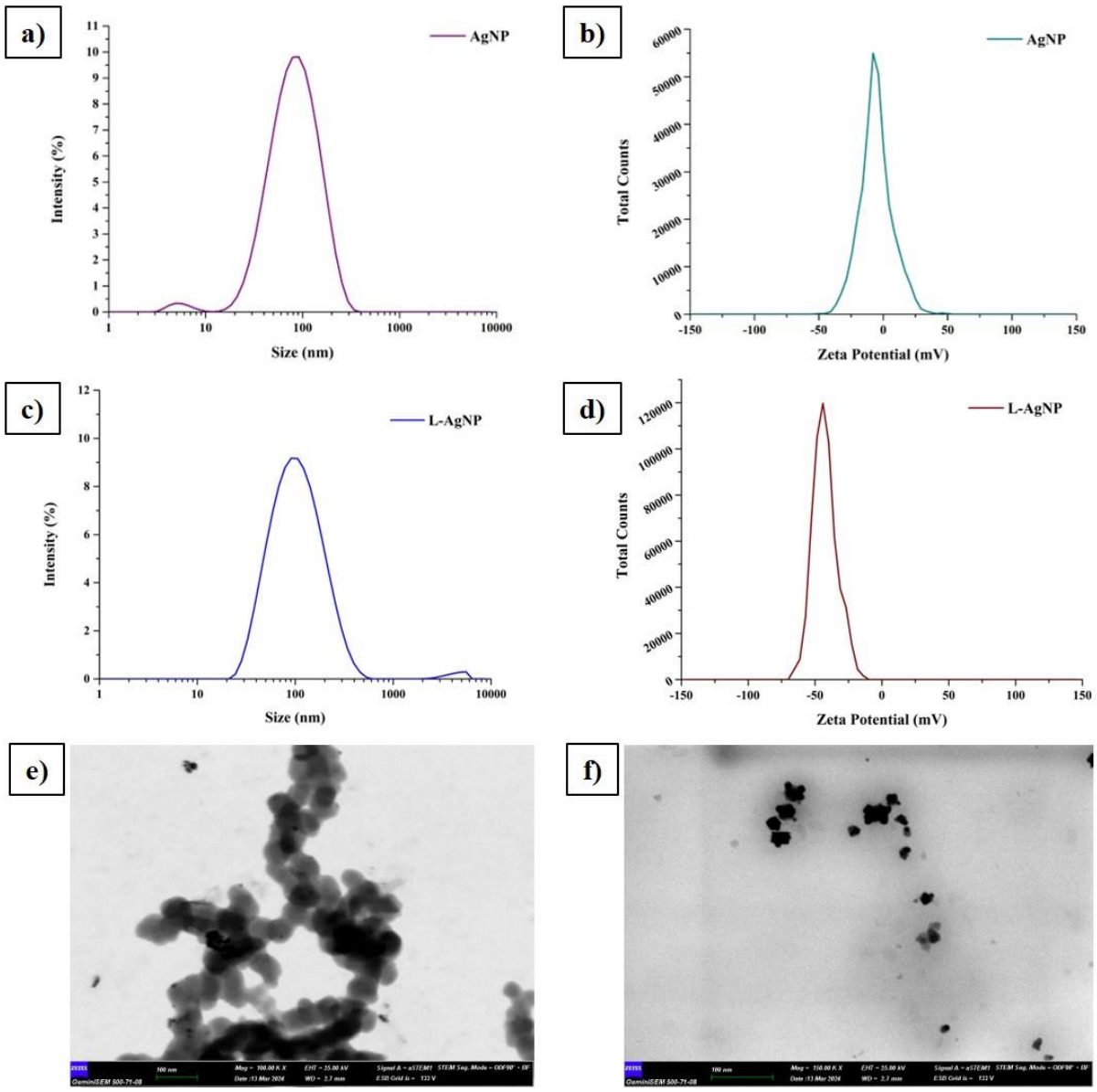


Figure 6. Characterization results of AgNPs a. Size, b. Zeta-potential; and encapsulated AgNPs (L-AgNP) c.Size, d. Zeta-potential; e. STEM image of AgNPs, f. STEM image of encapsulated AgNP (L-AgNP).

Zeta potential in colloidal systems refers to the average electrostatic potential at the slipping plane of particles. It serves as an important indicator of colloidal stability, with values greater than or equal to ±30 mV generally indicating monodisperse formulations characterized by high stability and an absence of aggregation. Particles with a high surface charge effectively prevent aggregation and facilitate redispersion through electrostatic repulsion (Samimi et al., 2019; Németh et al., 2022). Figures 6b and 6d present the zeta potential graphs of AgNPs and L-AgNPs, respectively. As shown in Table 1, encapsulation of the silver nanoparticles results in an increase in their zeta potentials from -27.7 ± 1.62 mV to -41.2 ± 1.23 mV, indicating enhanced colloidal stability of the synthesized particles.

Morphological studies were conducted using STEM to confirm the formation of nanoparticles and liposomal vesicles and to elucidate their shape and structure (Singh et al., 2015). STEM images show that the AgNPs synthesized from algae extracts (Figure 6e) and liposomal AgNPs formed by the

homogenization technique (Figure 6f) are spherical in shape. The encapsulation efficiency of the liposomal system was determined as 87.731%.

Table 1. Size, PDI and ZP Values

Samples	Size (nm)	PDI	Zeta Potential (mV)
AgNP	61.21 ± 1.537	0.340 ± 0.047	-27.7 ± 1.62
L-AgNP	84.32 ± 2.181	0.280 ± 0.004	-41.2 ± 1.23

* AgNP: Silver nanoparticles from *H. scoparia*.

L-AgNP: Liposome encapsulated silver nanoparticles.

We determined the minimum concentration values of silver nanoparticles (AgNPs) and liposomal silver nanoparticles (L-AgNPs) using the broth microdilution method to identify the lowest concentration that effectively killed the microorganisms. To assess for survivors, suspensions were subcultured onto agar plates. The minimum bactericidal concentration (MBC) was defined as the absence of microbial growth. As detailed in Table 2, the minimum inhibitory concentration (MIC) values of AgNPs and L-AgNPs against *E. coli* and *S. aureus* were evaluated. The MIC results indicated that L-AgNPs exhibited a higher antibacterial efficiency compared to AgNPs against both tested bacteria. Notably, the MBC values were consistent with the MIC values for the bacteria examined. Our findings demonstrated that L-AgNPs inhibited the growth of *E. coli* and *S. aureus* at a concentration of 24.5 µg/µl, while AgNPs required a higher concentration (48.5 µg/µl) for similar inhibition.

Studies in the literature clearly highlight the impact of liposomal systems. The association of liposomal formulations with bacterial membranes promotes the uptake of active compounds, triggering cell death and resulting in potent antibacterial action at comparatively low concentrations (Olatunde et al., 2019). Rukholm et al. (2006) found that gentamicin-loaded liposomes had lower MIC values than free gentamicin. These results might be attributed to the fusion of liposomes with the bacterial outer membrane, potentially enhancing the penetration of the bioactives into the bacterial cells.

These results suggest that L-AgNPs are potentially more effective in preventing the growth of gram-positive and gram-negative bacteria than AgNPs. The use of liposomal formulation allowed for a significant reduction in dosage while maintaining high antibacterial activity. The application of liposomes has significantly improved the antibacterial activity of silver nanoparticles (AgNPs), positioning them as effective preservatives for food, cosmetics, and medicine. These findings align with existing literature.

Table 2. MIC and MBC (μg/μl) values of AgNPs, L-AgNPs.

Test Samples	MIC (μg/mL) (Mean) by microorganisms		MBC (μg/mL) (Mean) by microorganisms	
	E.coli	*S.aureus*	*E.coli*	*S.aureus*
AgNP	48.5[a]	48.5[a]	48.5[a]	48.5[a]
L-AgNP	24.5[b]	24.5[b]	24.5[b]	24.5[b]

*The MBC values were defined as killed 99.9% of the final inocula after 24 h incubation at 37 °C.
* Different superscript letters (a–b) denote statistically significant differences among the groups tested ($p < 0.05$). The statistical analysis involved two-way ANOVA, with Tukey's post hoc test used for comparisons.

The research conducted by Yilmaz et al. (2023) indicates that nanoliposomes exhibit comparable antibacterial effectiveness. Significantly, the study showed that although there was a decrease in the quantity of the active ingredient during the encapsulation process, this did not affect its efficacy; instead, it improved the antibacterial activity.

Furthermore, another study showed that the nanoliposomal extract of *Melissa officinalis* (MEL) proved to be substantially more effective than its free extract (ME) against the tested bacteria. MIC for the free extract (ME) against *S. aureus* was 9.375 μg/mL, whereas the nanoliposomal extract (MEL) achieved a MIC of 4.687 μg/mL against the same bacteria (Cagal et al., 2025). These research findings suggest that liposomal systems significantly augment the antibacterial properties of active substances.

4. Conclusions

This study demonstrated that aqueous extracts of *H. scoparia* can reduce and stabilize Ag nanoparticles under various conditions pH, temperature, and time which significantly influence their size, shape, and distribution. Additionally, nanoliposomal encapsulation enhances the antibacterial potential of *H. scoparia* derived AgNPs. The nanoliposomal formulations produced through homogenization exhibited improved physicochemical properties and increased biological activity compared to traditional AgNPs. The smallest AgNPs from *H. scoparia* extracts measured 61.21 ± 1.537 nm, while L-AgNPs were 84.32 ± 2.181 nm, with synthesis at pH 9 and 90 °C. These findings provide a foundation for additional studies on nanoliposomal AgNPs derived from seaweed extracts for pharmaceutical and biotechnological applications. Future research should focus on assessing in vivo cytotoxicity and long-term stability to establish safety and therapeutic effectiveness.

Data Availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

We thank to TUBİTAK 2209-B programme under the grant number 1139B412202622 for the financial support.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Authorship Contribution Statement

A.S.Y: Project administration, Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **K.B.:** Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **I.T.:** Investigation, Visualization, Project administration, Writing- review & editing, Formal analysis, Supervision, Conceptualization. **M.M.C.:** Investigation, Project administration, Visualization, Writing- review & editing, Writing- original draft, Supervision, Funding acquisition, Conceptualization, Formal analysis.

References

Ak E., Guven P., Tuney İ., Cagal MM. Targeted delivery of seaweed bioactives: liposomal encapsulation of *Ulva lactuca* and *Codium fragile* for antibacterial enhancement. 3 Biotech 2025; 15(7): 217.

Akter M., Ullah AA., Rahaman MS., Rahman MM., Sikder MT., Hosokawa T., Kurasaki M. Stability enhancement of silver nanoparticles through surface encapsulation via a facile green synthesis approach and toxicity reduction. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials 2020; 30(6): 1956-1965.

Anigol LB., Gurubasavaraj PM., Charantimath JS. Effect of concentration and pH on the size of silver nanoparticles synthesized by green chemistry. Organic and Medicinal Chemistry International Journal 2017; 3(5): 1-5.

Bhakya S., Muthukrishnan S., Sukumaran M., Muthukumar M. Biogenic synthesis of silver nanoparticles and their antioxidant and antibacterial activity. Applied Nanoscience 2016; 6: 755-766.

Birla SS., Gaikwad SC., Gade AK., Rai MK. Rapid synthesis of silver nanoparticles from *Fusarium oxysporum* by optimizing physicocultural conditions. The Scientific World Journal 2013; 1: 1-12.

Cagal MM., Taner G., Kalaycı S., Duman G. Enhanced antibacterial and genoprotective properties of nanoliposomal *Satureja hortensis* L. essential oil. Drug and Chemical Toxicology 2025; 48(1): 180-186.

Dubey SP., Lahtinen M., Sillanpää M. Tansy fruit mediated greener synthesis of silver and gold nanoparticles. Process Biochemistry 2010; 45: 1065–1071.

Eid KA., Azzazy HM. Sustained broad-spectrum antibacterial effects of nanoliposomes loaded with silver nanoparticles. Nanomedicine 2014; 9(9): 1301-1310.

Fawcett D., Verduin JJ., Shah M., Sharma SB., Poinern GEJ. A review of current research into the biogenic synthesis of metal and metal oxide nanoparticles via marine algae and seagrasses. Journal of Nanoscience 2017; 1: 1-15.

Gharehbeglou P., Sarabandi K., Akbarbaglu Z. Chitosan-coated nanoliposomes: exploring the impact on physicochemical properties, stability, antioxidant activity, and molecular characterization of chlorella-peptide fractions. Journal of Polymers and the Environment 2024; 32(10): 5387–5405.

Hasanin M., Al Abboud MA., Alawlaqi MM., Abdelghany TM., Hashem AH. Ecofriendly synthesis of biosynthesized copper nanoparticles with starch-based nanocomposite: antimicrobial, antioxidant, and anticancer activities. Biological Trace Element Research 2022; 1-14.

Hassaan MA., Hosny S. Green synthesis of Ag and Au nanoparticles from micro and macro algae-review. International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences 2018; 2(1): 10-22.

Hussain I., Singh NB., Singh A., Singh H., Singh SC. Green synthesis of nanoparticles and its potential application. Biotechnology Letters 2016; 38: 545-560.

Ibrahim HMM. Green synthesis and characterization of silver nanoparticles using banana peel extract and their antimicrobial activity against representative microorganisms. Journal of Radiation Research and Applied Sciences 2015; 8(3): 265-275.

Iravani S., Korbekandi H., Mirmohammadi SV., Zolfaghari B. Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. Research in Pharmaceutical Sciences 2014; 9(6): 385-406.

Khalifa SA, Elias N, Farag MA, Chen L, Saeed A, Hegazy MEF, Moustafa MS, Abd El-Wahed A, Al-Mousawi SM, Musharraf SG, Chang FR. Marine natural products: a source of novel anticancer drugs. Marine Drugs 2019; 17(9): 491.

Koçer AT., Özçimen D. Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles from macroalgae: optimization, characterization and antimicrobial activity. Biomass Conversion and Biorefinery 2022; 15(2): 1995-2006.

Koçer AT., Özçimen D. Investigation of the biogas production potential from algal wastes. Waste Management & Research 2018; 36(11): 1100-1105.

Koilparambil D., Kurian LC., Vijayan S., Shaikmoideen JM. Green synthesis of silver nanoparticles by *Escherichia coli*: analysis of antibacterial activity. Journal of Water Environment Nanotechnology 2016; 1: 63–74.

Markowska K., Grudniak A., Wolska K. Silver nanoparticles as an alternative strategy against bacterial biofilms. Acta Biochimica Polonica 2013; 60(4): 523-530.

Mody V., Siwale R., Singh A., Mody H. Introduction to metallic nanoparticles. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences 2010; 2(4): 282-289.

Németh Z., Csóka I., Jazani RS., Sipos B., Haspel H., Kozma G., Kónya Z., Dobó DG. Quality by design-driven zeta potential optimisation study of liposomes with charge imparting membrane additives. Pharmaceutics 2022; 14(9): 1798.

Nizam N., Taner G., Cagal MM. Nanoliposomal system for augmented antibacterial and antiproliferative efficacy of *Melissa officinalis* L. extract. Toxicology Research 2024; 13(6): 198.

Olatunde OO., Benjakul S., Vongkamjan K., Amnuaikit T. Liposomal encapsulated ethanolic coconut husk extract: Antioxidant and antibacterial properties. Journal of Food Science 2019; 84(12): 3664-3673.

Philip D. Rapid green synthesis of spherical gold nanoparticles using *Mangifera indica* leaf. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 2010; 77(4): 807–810.

Rigi M., Ojagh SM., Alishahi A., Hasani S. Characterizing and developing the antioxidant and antimicrobial properties of the nano-encapsulated bioactive compounds of spirulina platensis in liposome. Journal of Aquatic Food Product Technology 2022; 31(6): 591–598.

Rukholm G., Mugabe C., Azghani AO., Omri A. Antibacterial activity of liposomal gentamicin against *Pseudomonas aeruginosa*: a time–kill study. International Journal of Antimicrobial Agents 2006; 27(3): 247-252.

Samimi S., Maghsoudnia N., Eftekhari RB., Dorkoosh F. Lipid-based nanoparticles for drug delivery systems. Characterization and Biology of Nanomaterials for Drug Delivery 2019; 47-76.

Savaghebi D., Barzegar M., Mozafari MR. Manufacturing of nanoliposomal extract from *Sargassum boveanum* algae and investigating its release behavior and antioxidant activity. Food Science & Nutrition 2020; 8(1): 299–310.

Singh K., Mishra A., Singh A. Preparation and *in vitro* characterization of chitosan nanoparticles containing amphotericin B as a drug delivery system. Advanced Science Letters 2015; 21(8): 2606–2608.

Srikar SK., Gir DD., Pal DB., Mishra PK., Upadhyay SN. Green synthesis of silver nanoparticles: a review. Green and Sustainable Chemistry 2016; 6(1): 34.

Sun Q., Cai X., Li J., Zheng M., Chen Z., Yu CP. Green synthesis of silver nanoparticles using tea leaf extract and evaluation of their stability and antibacterial activity. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2014; 444: 226-231.

Sundararaju S., Arumugam M., Bhuyar P. *Microbacterium* sp. MRS-1, a potential bacterium for cobalt reduction and synthesis of less/non-toxic cobalt oxide nanoparticles. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences 2020; 9: 1-9.

Tometri SS., Ahmady M., Ariaii P., Soltani MS. Extraction and encapsulation of *Laurus nobilis* leaf extract with nano-liposome and its effect on oxidative, microbial, bacterial and sensory properties of minced beef. Journal of Food Measurement and Characterization 2020; 14: 3333-3344.

Vanaja M., Rajeshkumar S., Paulkumar K. Kinetic study on green synthesis of silver nanoparticles using *Coleus aromaticus* leaf extract. Advances in Applied Science Research 2013; 4(3): 50–55.

Viswanathan S., Palaniyandi T., Shanmugam R. et al. Synthesis, characterization, cytotoxicity, and antimicrobial studies of green synthesized silver nanoparticles using red seaweed *Champia parvula*. Biomass Conversion and Biorefinery 2024; 14(6): 7387-7400.

Wennersten R., Fidler J., Spitsyna A. Nanotechnology: a new technological revolution in the 21st century. Handbook of Performability Engineering 2008; 943-952.

Yavuz H., Çağal MM., Çalık H., Koc RC., Türker M. Fesleğenden (*Ocimum Basilicum* L.) sentezlenen gümüş nanopartiküllerin insan akciğer kanseri hücrelerinde antikanser aktivitesinin araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(3): 2234-2246.

Yılmaz A., Nizam N., Macit M., Duman G., Çağal MM. The preparation, characterization, and antibacterial activity evaluation of nanoliposomes incorporated with terebinth extract. Biotech Studies 2023; 32(2): 41-48.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 491-522, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 491-522, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Söylemez Barajı Havzasında Meteorolojik ve Hidrolojik Kuraklığın Çok Ölçekli SPI ve SSFI Analizleri ve İndisler Arasındaki İlişki

Bünyamin ÇAKUR[1], İlteriş TAŞKOLU[2], Reşat ACAR[3], Burak ÇIRAĞ[4*]

[1]Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum
[2]İstanbul Esenyurt Üniversitesi Meslek Yüksekokulu İnşaat Teknolojisi Programı, İstanbul
[3]Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum
[4]Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum

[1]https://orcid.org/0009-0002-5322-0018
[2]https://orcid.org/0000-0002-6230-9148
[3]https://orcid.org/0000-0002-0653-1991
[4]https://orcid.org/0000-0002-7721-5128
*Sorumlu yazar: burak.cirag@atauni.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 01.09.2025
Kabul tarihi:15.12.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Hidrolojik kuraklık
Mann-Kendall
Meteorolojik kuraklık
Söylemez Barajı
SPI
SSFI

ÖZ

Dünyayı ciddi anlamda tehdit eden iklim değişikliğinin etkileri, özellikle kuraklık olaylarında belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Kuraklık, genellikle yağıştaki azalma sonucunda ortaya çıkmakta ve su kaynaklarının azalmasıyla birlikte insanlar çoğunlukla su stresinin hissedilmesiyle bu durumun farkına varmaktadır. Kuraklığı basit bir yağış eksikliği olarak tanımlamak doğru olmamakla birlikte uzun yıllar ortalamasının altına düşen nemlilikle birlikte bölgede yağış, sıcaklık ve buharlaşmanın dengeli bir şekilde devam etmemesi yağış azlığı, sıcaklık anomalileri, iklim, toprak koşulları arazi örtüsü gibi parametrelerde kuraklıkta etkili olur. Kuraklığın belirlenmesi, etkilerinin ortaya konması ve gerekli tedbirlerin alınması havzanın detaylı olarak incelenmesiyle mümkün olmaktadır. Kuraklığın matematiksel modeli ve anlamını ortaya konması için çok sayıda indis geliştirilmiştir. Standartlaştırılmış yağış indisi (SPI) ve Standartlaştırılmış akış indisi (SSFI) kuraklığı hem şiddet hem de süre bakımından değerlendiren önemli indislerdendir. Bu çalışmada Aras Havzası'nın memba kısmında Aras havzasının alt havzası olan Söylemez barajı havzasında 1992-2023 dönemi için havzaya düşen yağış ve havza çıkış akımları (1992-2023) SPI ve SSFI 1,3,6,9,12 ve 24 aylık farklı zaman dilimlerinde kuraklık analizleri yapılarak her iki indis arasındaki ilişki araştırılmıştır. Mann-Kendall yöntemi ile yapılan trend analizleri sonucunda yağış ve akım verilerinde istatistiksel olarak anlamlı azalan eğilimler belirlenmiştir. SPI serilerinde 2012-2016 dönemi en uzun ve en şiddetli meteorolojik kuraklık dönemi olarak öne çıkarken, SSFI serilerinde 2013-2015 yılları hidrolojik kuraklığın en yoğun görüldüğü dönem olmuştur. Her iki indeksin uzun dönemli (12 ve 24 aylık) zaman ölçeklerinde güçlü ilişki düzeyleri göstermesi, yağış azlıklarının akımlar üzerinde doğrudan ve belirgin etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, havzanın gelecekteki su yönetimi stratejilerinde kuraklık risklerinin dikkate alınması gerektiğini ve uzun vadeli dirençlilik planlarının önemini vurgulamaktadır.

Multi-Scale SPI and SSFI Analyses of Meteorological and Hydrological Drought and the Relationship Between Indices in the Söylemez Dam Basin

Research Article

ABSTRACT

Article History:
Received: 01.09.2025
Accepted: 15.12.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Hydrological drought
Mann-Kendall
Meteorological drought
Söylemez Dam
SPI
SSFI

The effects of climate change, which seriously threaten the world, are particularly evident in drought events. Drought generally occurs as a result of decreased rainfall, and people often become aware of this situation when they experience water stress due to the depletion of water resources. Although it is not accurate to define drought as a simple lack of rainfall, when humidity falls below the long-term average and rainfall, temperature, and evaporation are not balanced in the region, parameters such as rainfall deficiency, temperature anomalies, climate, soil conditions, and land cover become effective in drought. Identifying drought, revealing its effects, and taking necessary measures is possible through a detailed examination of the basin. Numerous indices have been developed to reveal the mathematical model and meaning of drought. The Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Runoff Index (SSFI) are important indices that evaluate drought in terms of both severity and duration. In this study, precipitation falling in the basin and basin outflow (1992-2023) for the period 1992-2023 in the Söylemez dam basin, which is a sub-basin of the Aras Basin, were analyzed for the SPI and SSFI 1,3,6,9, 12, and 24-month intervals. Trend analyses conducted using the Mann-Kendall method revealed statistically significant decreasing trends in precipitation and runoff data. The 2012-2016 period stands out as the longest and most severe meteorological drought period in the SPI series, while the 2013-2015 period was the most intense period of hydrological drought in the SSFI series. The strong level of association observed in both indices over long-term (12- and 24-month) time scales reveal that rainfall deficits have direct and significant effects on runoff. These findings underscore the need to consider drought risks in future water management strategies for the basin and highlight the importance of long-term resilience planning.

To Cite: Çakur B., Taşkolu İ., Acar R., Çırağ B. Söylemez Barajı Havzasında Meteorolojik ve Hidrolojik Kuraklığın Çok Ölçekli SPI ve SSFI Analizleri ve İndisler Arasındaki İlişki. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 491-522.

1. Giriş

Kuraklık ve taşkın özellikle meteorolojik anomalilerden kaynaklanan, havza süreçleri ve insan faaliyetleri tarafından değiştirilen ekstrem hidrolojik olaylardır (Wilhite ve Glantz, 1985). Son yıllarda kentleşme ve yağış rejimindeki düzensizlikler nedeniyle taşkın olaylarının sıklığının artması beklenmektedir (Guan ve ark., 2021; Çirağ ve Firat, 2023). Bununla birlikte özellikle kuraklık etkisi gittikçe artan henüz tam anlamıyla anlaşılamamış ve etkileri yeterince değerlendirilememiş en tehlikeli hidrolojik ekstremlerdendir (IPCC, 2014). Suyun canlılar için hayati önemi dikkate alındığında su kaynaklarının geliştirilmesi, suyun; sulama, içme suyu ve enerji imkanlarının ortaya konması bunlarla ilgili su yapıları tasarımları tarihin her döneminde ekonomik gelişim, sosyal gelişim, medeniyet ve kültür için suya güvenli erişimde esas olmuştur. Kuraklığın yalnızca yağış eksikliği ile açıklanması yetersiz kalmaktadır. Nemliliğin uzun dönem ortalamalarının altına düşmesiyle birlikte yağış, sıcaklık ve buharlaşma süreçlerindeki dengesizlikler; buna ek olarak sıcaklık anomalileri, iklim koşulları, toprak özellikleri ve arazi örtüsü gibi çevresel parametreler kuraklığın ortaya çıkışında belirleyici rol oynamaktadır (Vicente-Serrano ve ark., 2010). Kuraklık süreç olarak yavaş olmakla birlikte geniş alanları etkiler. Tahmini zor olduğu için önlenmesi ve yönetimi de zordur. Olası ekonomik etkisi yavaş olup potansiyel etkisi büyüktür (Mishra ve Singh, 2010). Kuraklığın süresi, şiddeti ve frekansı dikkate alınarak değişik sektörlerdeki etkileri dikkate alındığında genel anlamda ortaya çıkan önemli kuraklık çeşitleri olarak meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal kuraklık olarak sayılabilir. Kuraklığın matematiksel

modeli ve anlamını ortaya koyacak çok sayıda indis geliştirilmiştir; Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI), Keşif Kuraklık İndeksi (KKİ), Palmer Kuraklık Şiddeti İndisi (SPDI), Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (SPEI), Etkili Yağış İndisi (EPI) , akarsu akımına ve yeraltı suyu seviyelerine dayanan Yüzey Suyu Tedarik İndisi (SWSI), Akarsu Kuraklık İndisi (SDI), Yeraltı Suyu Kaynak İndisi (GRI), Ardışık Kuru Günler İndisi (CCD), tarımsal kuraklık açısından Ürün Nem İndisi ve nem bulunulabilirlik indisleri bulunmaktadır (McKee ve ark.,1993). Bu ve benzeri yöntemlerle ortaya konulmuş literatürde bir dizi bilimsel çalışma mevcuttur. Taşkolu ve Güngör (2025) Güneydoğu Anadolu Bölgesi kuraklık risk analiz çalışmasında 18 farklı istasyon meteorolojik ve hidrojeolojik parametreleri dikkate alınarak SPI ve KKİ yardımıyla kuraklığın şiddet ve büyüklük hesabı yapılmış kuraklık ekstremleri ortaya konulmuştur. Beden ve diğerleri (2025) Samsun İli Meteoroloji gözlem istasyonunun 1960-2015 tarihleri aralığında ölçülen yağışların aylık toplam değerlerini kullanarak SPI ve Normalin Yüzdesi İndeksi (PNI) olmak üzere kuraklık indisleri hesaplanmış, ikinci aşamada kuraklık indeks değerlerine trend analizi (Mann-Kendall yöntemi) uygulanmıştır. Normal ve normale yakın kuraklık belirtisinin izlendiği çalışmada eğilimin istatistiksel anlamının olmadığı belirlenmiştir. Ablak ve diğerleri (2025) Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan Bartın ili için 1970-2020 tarihleri aralığında 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemlerde meteorolojik kuraklığı SPI, SPEI ve Standartlaştırılmış Yağış ve Sıcaklık İndisi (SPTI) yöntemleriyle incelemiştir. Farklı zaman dilimlerinde tüm kuraklık sınıflarının gözlemlendiği tespit edilmiş, 12 aylık kuraklıkların karakteristik özellikleri gidişler teorisiyle değerlendirilmiş ve en şiddetli kuraklık döneminin 1981-1982 yılları arasında gerçekleştiği bulunmuştur. Gümüş (2017) Asi havzasında bulunan dört adet akım gözlem istasyonuna (AGİ) ait 52 yıllık (1954-2005) aylık akım verilerini kullanılarak SDI yöntemiyle hidrolojik kuraklık analizi yapılmış, farklı zaman dilimlerinde (3, 6 ve 12 aylık) AGİ değerleri ile Asi havzasının nemli ve kurak dönemlerinin karakteristiklerini (şiddet, büyüklük dağılımı) belirlemiştir. Çalışma sonucunda 1980-2005 tarihleri arasındaki kurak geçen yıl sayısının, 1954-1979 tarihleri arasındaki kurak geçen yıl sayısından daha fazla olduğunu ayrıca havza bazında aşırı kurak yıl alarak 2000 ve 2001 yıllarının olduğunu belirlemiştir. Şarlak ve ark., (2024) Diyarbakır ili sınırlarında bulunan Devegeçidi baraj gölü kuraklık analizleri değerlendirmiş olup, baraj gölündeki su seviyesi azalımına kuraklığın etkisini ortaya koymak için 2008-2021 yılları arasında baraja gelen ve barajdan çıkan akımları Mann-Kendall (MK) trend analiziyle irdelenmiş, PDSI, SPI ve ayrıca Kendinden Kalibreli Palmer Kuraklık İndisleri (sc-PDSI) yardımıyla havzadaki hidrolojik kuraklık incelenmiş ayrıca tarımsal kullanımlarda değerlendirilerek baraj gölündeki su bütçe eksikliğinin meteorolojik, hidrolojik ve tarımsal sebeplere bağlı olduğu ortaya konmuştur. Özgün ve ark., (2020) Bursa Doğancı baraj havzası hidrolojik kuraklık analizini 1982-2013 yılları arasında SPI indisiyle analiz etmiş aynı dönemde baraja gelen akımlarla (AGİ istasyon değerleri kullanılarak) korelasyon çalışmaları yapılarak her iki argüman arasındaki ilişki araştırılmıştır. Sonuçta baraj gelen akımların yağışla birlikte havza bitki örtüsü, kar durumu, zemin özellikleri ve yeraltı suyu gibi parametrelerden etkilendiği sadece yağışın etkili olmadığını belirlenmiştir. Bozkurt (2024) çalışmasında Ardahan ilinde kuraklık özelliklerinin belirlenmesini

amaçlamıştır. Bu kapsamda, 17046 numaralı Ardahan meteoroloji istasyonunda 1980-2022 dönemine ait aylık yağış ve sıcaklık verileri kullanılmış ve farklı zaman periyotlarında SPI ile SPEI indisleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, özellikle son altı yılda yağışların azalması ve sıcaklıkların artmasına bağlı olarak kuraklığın artış eğiliminde olduğu, ayrıca SPI'nin uzun dönemlerde daha kararlı sonuçlar verirken SPEI'nin tüm zaman periyotlarında kuraklığı daha etkili bir biçimde değerlendirebildiği bulunmuştur. Aktürk ve ark., (2024) yaptıkları çalışmada, Kızılırmak Havzası için 22 meteoroloji istasyonundan alınan verilerle bir kuraklık analizi çalışması yapmışlardır. Yaptıkları araştırmada SPI dahil birçok indeks kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, en uygun bölgesel dağılımlar SPI ve ZSI için Pearson-Tip 3 (PE3), CZI için genelleştirilmiş aşırı değer (GEV) ve MCZI için genelleştirilmiş lojistik dağılım (GLO) şeklindedir. Yetmen ve Özcanlı (2024) Harran Ovasının kuraklık analizini 1975-2012 tarihleri aralığındaki rasat verilerini kullanılarak Harran ovasının kuraklık özelliklerini SPI ve Thornthwaite yöntemiyle incelenmiş sonuçta kuraklığın şiddet, olasılık ve genliğini, kurak dönemlerin sayısıyla birlikte, özellikle kış yağışlarını etkileyen Kuzey Atlantik Salınımı'nın (NAO), Harran Ovası ve çevresindeki yağış ve kuraklıkla ilişkisini ortaya koymuştur. Şimşek ve diğerleri (2024) Çoruh havzasının kuraklık analiz çalışmasında havza içerisinde 5 farklı meteoroloji istasyonunda 1969-2020 yılları arasında ölçülen 52 yıllık yağış verileri kullanılarak SPI yönteminden yararlanılarak 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman periyotlarında 5 istasyon için kuraklığın süre, şiddet ve büyüklükleri ortaya konulmuş, havzada en kurak dönemin 2010 yılından sonra yaşandığı ayrıca kuraklık açısından en riskli istasyonunun tortum meteoroloji istasyonu olduğu belirlenmiştir. Citakoglu ve ark., (2025) yaptıkları çalışmada, Ağrı ili için 1965-2022 yılları arasındaki aylık yağış ve sıcaklık serileri kullanılarak hibrit makine öğrenimi modelleriyle kuraklık tahmininde bulunmuşlardır. Literatürde benzer şekilde, makine öğrenimi tekniklerinin hidrometeorolojik değişkenlerin tahmininde etkin olduğu bulunmuş ve özellikle hibrit modellerin klasik istatistiksel yaklaşımlardan daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Sarış ve Gedik (2021) yaptıkları çalışmada, Konya Kapalı Havzası için 1930-2019 yılları arasındaki verileri kullanarak kuraklık analizi çalışması yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) kullanmışlardır. Analiz sonucunda; Konya Kapalı Havzası'nda meteorolojik kuraklık, farklı zamansal ölçeklerde SPI analizine göre orta, şiddetli ve özellikle uzun dönemlerde belirgin olup, kuraklık eğilimleri yaklaşık on yıllık aralıklarla tekrarlamakta ve havzanın su yenilenmesi açısından kırılganlığını artırmaktadır olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada, Erzurum ili sınırları içerisinde yer alan Aras Havzası'nın alt havzalarından Söylemez Barajı Havzası çalışma alanı olarak seçilmiş ve 1992-2023 dönemine ait güncel meteorolojik ile 1992-2023 dönemine ait hidrolojik veriler kullanılarak havzanın kuraklık özelliklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Yağış ve akış verileri üzerinde Mann-Kendall (MK) yöntemi uygulanarak istatistiksel olarak anlamlı bir değişim bulunup bulunmadığı ve eğilimlerin yönü araştırılmıştır. SPI ve SSFI indislerinin farklı zaman ölçeklerinde kullanılmasıyla meteorolojik ve hidrolojik kuraklıklar arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Söylemez Barajı Havzası'nda 1992-2023 dönemi güncel verilerini kullanarak meteorolojik (SPI) ve 1992-2023 dönemine ait

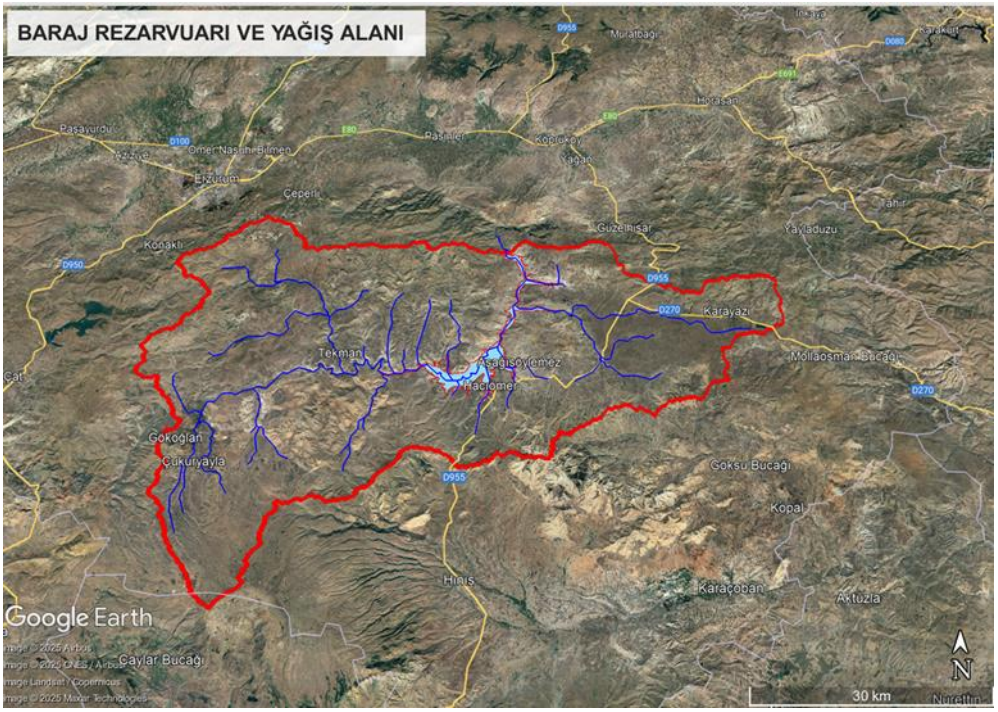
hidrolojik (SSFI) kuraklıklar arasındaki etkileşimi çok ölçekli olarak incelemesi yönüyle özgün bir katkı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

Söylemez Barajı Aras havzasının memba kısmında yer almaktadır. Baraj, Erzurum İli Pasinler İlçesi ile Horasan İlçeleri sınırlarında yer alan Yukarı Pasinler ve Aşağı Pasinler Ovalarını kapsamaktadır. Söylemez Baraj aksı Aras nehri üzerinde, Erzurum İline bağlı Karayazı ilçesi sınırları dahilinde ve Erzurum-Muş-Varto karayolunun yaklaşık 89.km'sindedir. Söylemez Barajı Aras Nehrinin 1733 m talveg kotunda, talvegden 105 m yüksekliğinde silindirle sıkıştırılmış beton gövde tipindedir. Baraj aks yerinde yağış alanı 2.700 km^2 olup yıllık ortalama akımı 673 hm^3 ve ortalama debisi 22,2 m^3/s'dir. 1.838 m kret kotuna sahip olan barajın ölü hacmi 589,50 hm^3, aktif hacmi 705,46 hm^3 olup toplam depolama hacmi 1.294,96 hm^3'dür. Sulama ve enerji amaçlı çalışması planlanan barajla; Yukarı ve Aşağı Pasinler Ovasında 39.391 ha tarım arazisinin sulanması ve 220,57 Gwh elektrik enerjisinin üretilmesi planlanmıştır. Söylemez Barajı'nın ana fonksiyonlarından biri olan sulama potansiyeli dikkate alındığında, çalışma alanı olan Yukarı ve Aşağı Pasinler Ovaları, bölge ekonomisi için büyük ölçüde tarıma dayalı bir yapıya sahiptir. Bölgede yaygın olarak buğday, arpa ve özellikle sulanabilen alanlarda şeker pancarı gibi suya bağımlı ürünler yetiştirilmektedir. Havzada yaşanan meteorolojik ve hidrolojik kuraklık olayları, doğrudan bu tarımsal üretim desenini etkileme potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, SSFI analizlerinden elde edilen düşük akım dönemleri, gelecekteki tarımsal kuraklık risk yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Söylemez Barajı inşaat aşamasında olup çalışmalar devam etmektedir (DSİ, 2025).

Bu çalışmada Devlet Su İşleri 8.Bölge Müdürlüğünden (Erzurum) temin edilen Söylemez Barajı giriş akımlarını temsil eden D24A096 akım gözlem istasyonunun 1992-2023 akım verileri ve Devlet Meteoroloji 12. Bölge Müdürlüğünden temin edilen Erzurum, Horasan ve Hınıs meteoroloji gözlem istasyonuna ait 1992-2023 aylık toplam ortalama yağış verileri kullanılmıştır. Söylemez Barajı yağış ve rezervuar alanı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Söylemez Barajı Rezervuarı ve Yağış Alanı

Aşağıda çalışmalarda kullanılan meteoroloji ve akım gözlem istasyonuna ait karakteristik bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AGİ ve MGİ istasyonları karakteristikleri

İstasyon Adı	Kayabaşı AGİ	Horasan DMİ	Erzurum DMİ	Hınıs DMİ	Bingöl DMİ
İstasyon Numarası	D24A096	17690	17095	17740	17203
İstasyon Durumu	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif	Aktif
İstasyon Kotu	1642 m	1540 m	1860 m	1718 m	1139 m
İstasyon Koordinatı	41^0 50' 19,36" 39^0 50'16,10"	42^0 10' 22,84" 40^0 02' 29,54"	41^0 15' 16,01" 39^0 54'21,03"	41^0 41' 43,84" 39^0 22' 08,15"	40^0 30' 02,40" 38^0 53' 04,80"

Bu analizde kullanılan akım verileri serisi (1992-2023), Söylemez Barajı'nın henüz işletmeye alınmadığı dönemi temsil etmektedir. Bu nedenle, çalışmadaki SSFI analizleri, havzanın doğal akım rejimine ait hidrolojik kuraklık durumunu yansıtmaktadır ve elde edilen sonuçlar barajın işletme etkisi bağlamında değil, havzanın doğal hidrolojik tepkisi çerçevesinde değerlendirilmelidir. Bu durum, meteorolojik kuraklığın (SPI) doğal akım üzerindeki etkileşiminin incelenmesi amacıyla kritiktir.

2.2. Mann-Kendall Testi

MK testi ilk olarak Mann (1945) tarafından geliştirilmiştir. MK testi, veri setlerinin eğilimlerini tespit edebilmek için kullanılan parametrik olmayan bir istatistiksel testtir (Coccia ve Roshani, 2024). Bu test yöntemi, özellikle uzun dönemli meteorolojik gözlemlerin analizinde, iklimsel olayların trend analizlerinin belirlenmesinde oldukça fazla kullanılan bir yöntemdir. Gözlemsel zaman serileriyle çalışmanın yaygın olduğu hidroloji ve klimatoloji alanlarında, MK testi sayesinde anlamlı eğilimlerin varlığı sorgulanabilmektedir. MK testi hem elde edilen veri değerlerinin hem de zamansal sıralaması arasındaki korelasyonu test etmektedir (Marrone, 2020). Bu yönüyle, verilerin dağılımına dair varsayımlar gerektirmemesi, testi farklı iklimsel parametreler üzerinde uygulamaya elverişli kılmaktadır. Mevcut çalışmada MK testi MKS Trend Analysis Tools programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

MK testinde değerlere karşılık gelen Z-skoru değerleri, özdeş ve bağımsız dağılımlı bir zaman serisinin H_0 hipotezinin reddedilmesine ilişkin bir ölçü sağlamaktadır (Marsick ve ark., 2024). Zaman serilerine bağlı elde edilen sonuçlar koordinat sistemine işlenir ve Sen'in eğim çizgisi çizilir. Bu eğim çizgisi, eğilimin yönü ve büyüklüğü hakkında nicel bir değerlendirme yapılmasına olanak tanır. MK testinin sonuç değeri (S) sıfırdan küçükse azalan, sıfırdan büyükse de artan eğilim olduğu söylenebilir. Çizginin eğim yönüne göre artan/azalan trend yorumlaması yapılabilir. Eğilimin anlamlı olup olmadığının belirlenmesi ise Z-skorunun belirli bir güven düzeyinde kritik değeri aşıp aşmadığına bağlıdır.

Yağış, sıcaklık, nem gibi birçok iklim olaylarının kullanıldığı kuraklık indekslerinde, elde edilen sonuçları destekler nitelikte olan bu trend analiz yöntemi, literatürde oldukça önemli bir yere sahiptir. Özellikle iklim değişikliğinin yerel ölçekteki etkilerinin ortaya konmasında MK testi, karar vericiler ve araştırmacılar açısından değerli bilgiler sunar. Güçlü istatistiksel formüllere dayandırılan MK testi sonuçları, elde edilen kuraklık indeks değerlerinin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Bu bağlamda MK testi, hem geçmiş eğilimlerin tespitinde hem de geleceğe yönelik tahminlerin sağlam bir zemine oturtulmasında etkili bir araç olarak öne çıkmaktadır.

2.3. Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI)

Kuraklık; şiddeti, süresi ve mekânsal dağılımı olmak üzere üç ana boyutta ele alınabilir. Bunlara ek olarak frekans, büyüklük ve öngörülebilirlik gibi kavramlar da ikincil unsurlar olarak değerlendirilmektedir (Bloomfield ve Marchant, 2012). Dünya genelinde yürütülen kuraklık araştırmalarında, kuraklık analizleri için çok sayıda farklı indeks ve analiz yöntemi geliştirilmiştir. Dünya Meteoroloji Organizasyonu (WMO) tarafından yayımlanan Kuraklık El Kitabı'nda literatürde yer alan tüm bu indekslere yer verilmiştir (Fuchs ve Svoboda, 2016). Bu indekslerden bazıları yalnızca bölgesel düzeyde kullanılırken, bazıları ise küresel ölçekte uygulanmaktadır. SPI, kuraklık olaylarını hem şiddet hem de süre bakımından değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş ve dünya çapında geçerliliği kabul edilmiş önemli iklim göstergelerinden biridir (NCAR, 2021). SPI, bir istasyondaki yağış verilerinin kümülatif olasılığına dayalı bir analiz yöntemiyle hesaplamaktadır (Topçu ve ark., 2025). Bu

indeks, 1993 yılında McKee ve ark. tarafından tasarlanmış olup yalnızca yağış verilerine dayalı olarak hesaplanmaktadır (McKee ve ark., 1993). Diğer bir deyişle, sıcaklık, evapotranspirasyon gibi diğer meteorolojik değişkenler dikkate alınmadan, doğrudan yağış miktarlarının istatistiksel dağılımı üzerinden kuraklık analizi yapılmaktadır. Kısa vadeli SPI hesaplamaları, özellikle yüzey toprak nemi ile güçlü korelasyon gösterirken; hesaplama süresi uzadıkça, yer altı suyu seviyeleri, baraj rezervuarları ve akarsular gibi daha büyük ölçekli hidrolojik sistemlerle ilişkilendirilebilir hale gelmektedir. Bu kapsamda, SPI genellikle 1, 3, 6, 12 ve 24 aylık periyotlarla analiz edilse de daha uzun süreli hidrolojik kuraklıkların izlenmesi amacıyla 36, 48 ay hatta daha uzun zaman dilimlerini kapsayan uygulamaları da yapılabilmektedir. SPI'nın küresel ölçekte bu denli yaygın kullanılmasının temel nedenlerinden biri, farklı iklim bölgeleri arasında objektif karşılaştırmalara imkân tanımasıdır. İndeksin normalize edilmiş yapısı sayesinde, farklı coğrafi ve iklimsel koşullarda bile aynı metodolojiyle kuraklık derecesi değerlendirilebilmekte ve bu da uluslararası karşılaştırmalar açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Bu özelliği dolayısıyla WMO, 2009 yılında yayınladığı resmî belgelerde, SPI'nın küresel ölçekte kuraklık izleme ve değerlendirme faaliyetlerinde temel bir araç olarak kullanılmasını tavsiye etmiştir. Böylece SPI, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak benimsenen ve çeşitli zaman ölçeklerinde güvenilir sonuçlar sunan bir izleme aracı haline gelmiştir.

γ dağılımına dayalı SPI formülü (McKee ve ark., 1993) Denklem 1'de verilmiştir.

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (1)$$

Burada, x_i, i yılı boyunca seçilen dönemin yağış miktarını; $\bar{x}$, uzun vadeli ortalama yağışı; σ ise seçilen döneme ait standart sapmayı ifade eder.

2.4. Standartlaştırılmış Akış İndeksi (SSFI)

Standartlaştırılmış Akış İndisi (SSFI), akarsu debisi verilerine dayalı olarak hesaplanan ve hidrolojik kuraklığın nicel değerlendirilmesinde kullanılan bir indekstir. SSFI, tıpkı SPI gibi, belirli zaman ölçeklerinde (örneğin 1, 3, 6, 12 ay gibi) hesaplanan kayan toplam akış miktarlarının, uzun dönemli tarihsel veri serileriyle karşılaştırılması yoluyla elde edilir. SSFI'nin temel amacı, hidrolojik sistemlerde su kıtlığı koşullarını, yani akarsular, yerüstü su kaynakları ve rezervuarlar üzerindeki düşük akış koşullarını tanımlamaktır. SSFI zaman ölçekleri uzadıkça (örneğin 12 ay ve üzeri), indeks daha çok yeraltı suyu beslenmesi, toprak su içeriği ve rezervuar doluluk oranları gibi bileşenlerle ilişkilendirilebilir. Böylece SSFI, hem kısa vadeli düşük akım olaylarının izlenmesinde hem de uzun süreli hidrolojik kuraklıkların değerlendirilmesinde kapsamlı bir analiz imkânı sunar. SSFI, Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) metodolojisini takip eder. Bu metodolojinin ana adımı, ham akım verisini alıp, onun kümülatif olasılığını hesaplamak ve bu olasılığı Standart Normal Dağılımın Z-puanına dönüştürmektir. Bu süreçte karşılaşılan en büyük zorluk, akım verisinin genellikle sağa çarpık (pozitif eğimli) bir dağılıma sahip olmasıdır. Yani, düşük akım değerleri sık görülürken, çok yüksek

akım değerleri nadirdir. Ham akım verileri, bir olasılık dağılımına (örneğin Gama Dağılımı) uymuyorsa veya dağılımı aşırı derecede çarpıksa, SSFI hesaplamasından önce genellikle bir ön işleme adımı olarak logaritmik dönüşüm uygulanır. Hidrolojik veriler için yaygın olarak İki Parametreli Gama Dağılımı kullanılır. Gama dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu g (x) olmak üzere;

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x\alpha - 1e^{-x/\beta} \quad (2)$$

x>0 birikimli akış miktarı, α; şekil parametresi, β; ölçek parametresi, Γ(α); gama fonksiyonudur. Bu dağılımın α ve β parametreleri, uzun dönem akım verileri kullanılarak Maksimum Olabilirlik yöntemi ile tahmin edilir. Bu yoğunluk fonksiyonu kullanılarak, birikimli akım miktarı (x) için Kümülatif Dağılım Fonksiyonu F(x) hesaplanır. F(x), akım miktarının x'ten küçük veya eşit olma olasılığını verir.

$$F(x) = \int_0^x g(x)dx \quad (3)$$

Daha sonra kümülatif olasılık değeri F(x) standart bir Normal Dağılıma dönüştürülür (normalize edilir). Her bir birikimli akım değeri (x), karşılık gelen F(x) olasılığı kullanılarak, ortalaması (μ) 0 ve standart sapması (σ) 1 olan Standart Normal Dağılımın (Φ^{-1}) tersine dönüştürülür. Buna göre SSFI değerleri;

$SSFI=\Phi^{-1}(F(x))$ olarak hesaplanır. (4)

Burada;

SSFI; Standardize Yağış İndeksi değeri.

F(x); Gözlemlenen birikimli akışın (x), Gamma Dağılımı'ndan elde edilen kümülatif olasılığı.

Φ^{-1};Standart Normal Dağılımın ters kümülatif fonksiyonudur.

2.5. İndekslerin Karşılaştırılması

Kuraklık analizi çalışmalarında ayrıca indisler hem kendi aralarında hem de diğer indis grubu ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada determinasyon katsayısı kullanılmıştır. Determinasyon katsayısı aşağıdaki Denklem 5'te ki gibi karakterize edilmektedir:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(SPI_i - \overline{SPI_\iota}) \times (SRI_i - \overline{SSFI_\iota})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(SPI_i - \overline{SPI_\iota})^2 \times \sum_{i=1}^{n}(SSFI_i - \overline{SSFI_\iota})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

Burada SPI_i i ayındaki SPI İndeksi sonucunu, SRI_i i ayındaki SSFI İndeksi sonucunu, $\overline{SPI_\iota}$ ve $\overline{SSFI_\iota}$ belirtilen periyottaki sırasıyla ortalama SPI ve SSFI indeksi sonuçlarını temsil etmektedir. Determinasyon katsayısı r^2 (açıklanan varyans) aralarında korelasyon bulunan değişkenlerden birindeki değişimin ne kadarının diğer değişken ile açıklanabileceğinin, diğerinden kaynaklanabileceğinin yüzde

olarak ifadesidir ve korelasyon katsayısının karesine eşittir. Determinasyon katsayısı 0 ile 1 arasında değer alan bir istatistiksel ölçüttür. Bu katsayının 1'e yakın olması, iki verinin birbirleri ile yüksek uyumlu olduğunu; 0'a yakın olması ise verilerin uyumunun zayıf olduğunu gösterir.

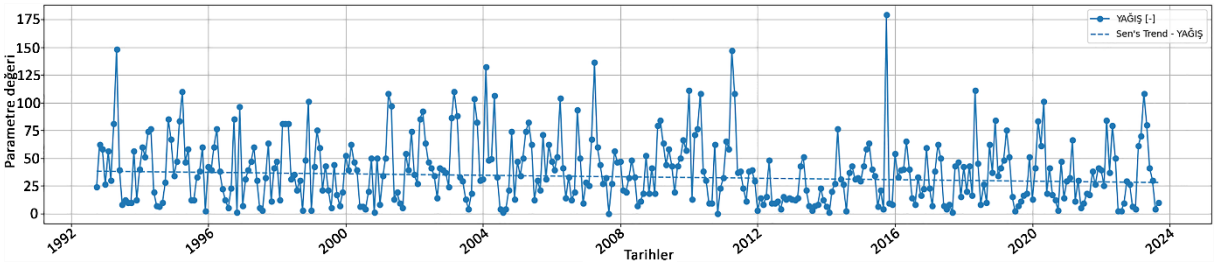
2.6. Thiessen Poligonu

Thiessen poligon yöntemi, Thiessen (1911) tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem belirli bir alandaki meteoroloji ölçüm istasyonlarının ölçümlerini bölgesel bir ortalamayı temsil edecek bir biçimde ağırlıklandırmak için kullanılan pratik ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntemin temel prensibi şu şekildedir; her istasyonun çevresinde, o istasyona yakın noktaları kapsayan poligonlar oluşturulur bu sayede her poligonun alanı istasyonun etki alanı bulunmuş olur. Bölgesel ortalama yağış, sıcaklık, buharlaşma gibi iklimsel parametrelerin değerleri hesaplanırken her istasyonun ölçümü kendi poligon alanının toplam alana oranı kadar ağırlıklandırılır. Thiessen Poligon yöntemi istasyonların düzensiz dağıldığı alanlarda pratik ve kullanışlı olsa da topoğrafya, yükselti vb. iklimsel faktörleri dikkate baz almadığından bazı sınırlamalara sahiptir.

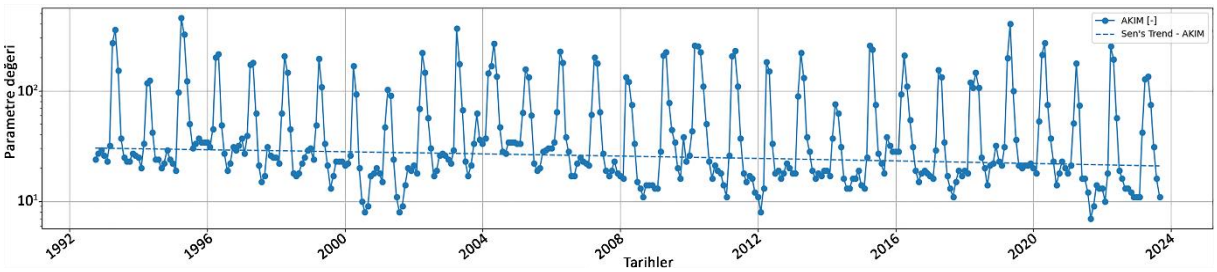
3. Bulgular

3.1. Mann-Kendall Testi Sonuçları

Bu çalışmada, Erzurum Söylemez Barajı yağış alanını temsil eden istasyonlardan alınan yağış ve akım değerinin trend analizleri yapılmıştır. Bölgedeki hidrolojik ve meteorolojik dinamiklerin zaman içerisindeki değişimini ortaya koymak amacıyla yapılan bu analizler, uzun dönemli gözlem verilerine dayanmaktadır. Eğilimlerin ölçülmesinde ve grafikleri oluşturulmasında parametrik olmayan Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim çizgisi yöntemleri kullanılmıştır. Her iki yöntem de verinin normal dağılım göstermesi gibi istatistiksel varsayımlar gerektirmemesi nedeniyle iklim ve akım analizlerinde sıkça tercih edilmektedir. Elde edilen analiz sonuçları, eğilimin yönü ve büyüklüğünü gösteren matematiksel gösterimleriyle birlikte Tablo 2'de sunulmuştur. Söz konusu tabloda pozitif ve negatif S değerlerine göre artan ya da azalan eğilimler net biçimde görülebilmektedir. Test sonuçları ve Sen'in eğilimlerinin sonuç grafikleri yağış ve akım değerleri için sırasıyla Şekil 2'de sunulmuştur. Grafikler aracılığıyla zaman serilerindeki eğilimler görsel olarak da değerlendirilmiş, böylece yorumların hem nicel hem de görsel açıdan desteklenmesi sağlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2. Sen'in eğim çizgisine göre trend grafikleri; (a) yağış, (b) akım

Tablo 2. Yağış ve akış değerleri için Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim yönteminin istatistiksel sonuçları

	Yağış	Akım
Mann-Kendall İstatistiği (S)	-5620	-9239
Mann-Kendall Z-skoru (Z)	-2.35	-3.86
p-değeri (iki taraflı)	0.019	0.0001
Güven Faktörü (NC)	98,1%	100%
Sen'in eğimi	-0,0009033	-0,0008294
Ortalama	38,21	56,411
Standart Sapma	29,714	71,203
Varyasyon Katsayısı (CV)	0,778	1,262
Trend	Azalan	Azalan

Çalışmada kullanılan yağış ve akım verilerinin istatiksel parametre verileri ise aşağıdaki Tablo 3'te verilmiştir ve analizler yapılırken herhangi bir eksik veriye rastlanılmamıştır.

Tablo 3. Yağış ve akış değerlerinin istatistiksel sonuçları

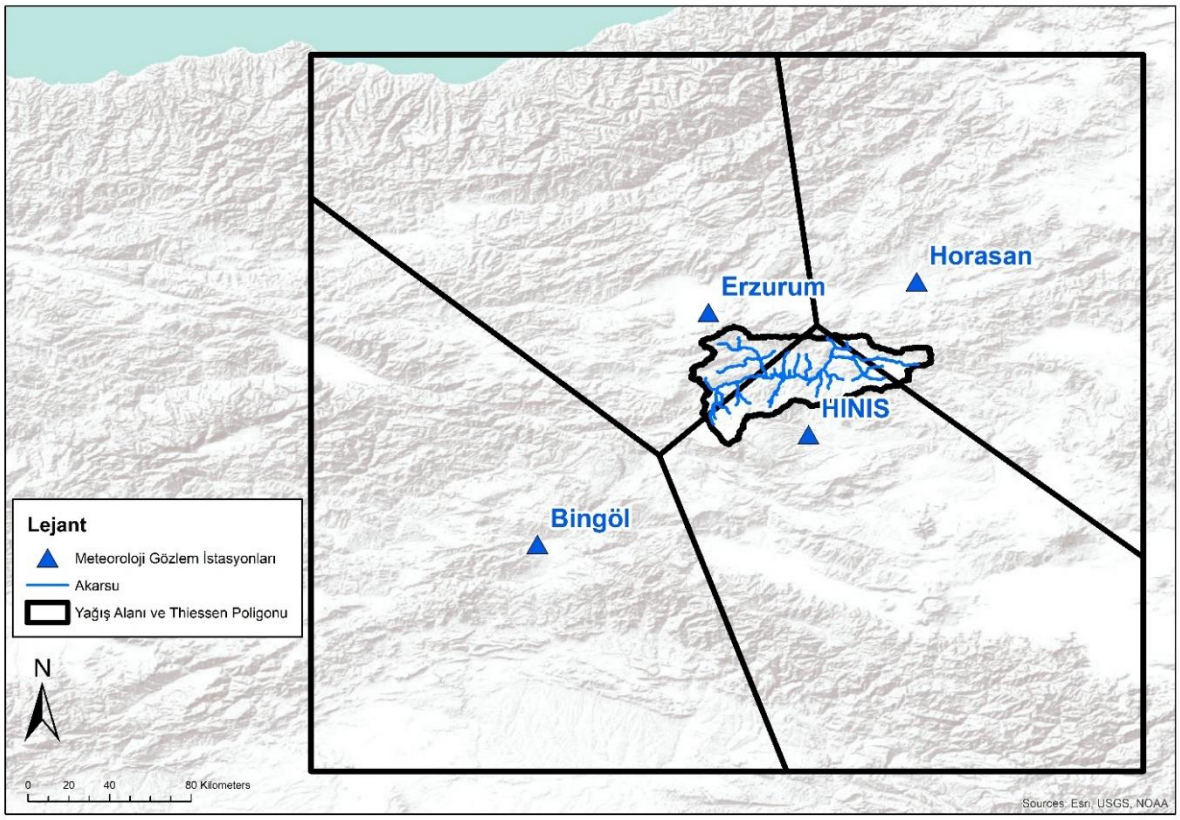
	Yağış	Akım
Ortalama	38	56
Minimum	0	7
Maksimum	179	453
Standart Sapma	29,67	71,11
Çarpıklık	1,20	2,42
Basıklık	1,86	6,32

Analizlerde kullanılan yağış ve akım serileri, değerlendirmeye alınmadan önce temel veri bütünlüğü açısından incelenmiştir. Serilerde herhangi bir eksik gözleme rastlanmamış, ani kopmalar ya da veri akışını etkileyebilecek belirgin bir düzensizlik görülmemiştir. Bu durum, Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim yönteminden elde edilen eğilim yorumlarının veri yapısıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, sonuçların güvenilirliğini etkileyebilecek bir veri sorunu tespit edilmemiştir.

3.2. Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) Sonuçları

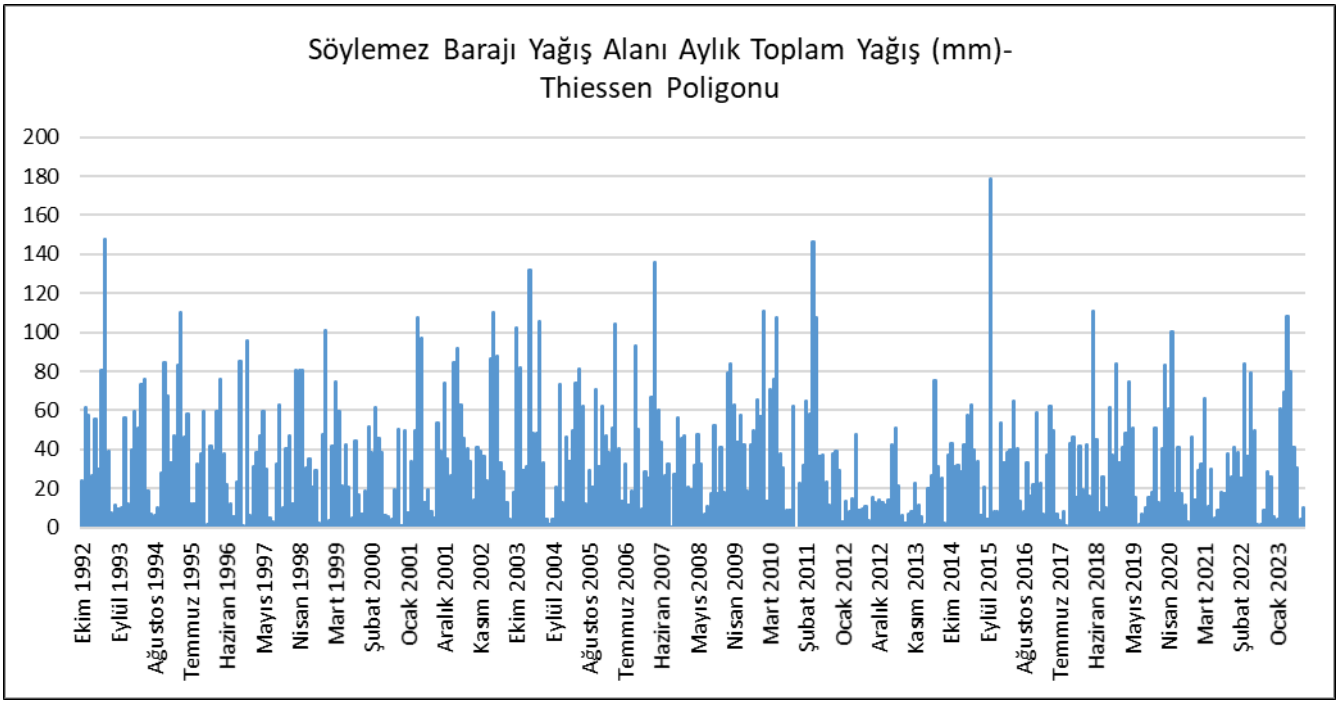
Söylemez Barajı Yağış Alanı'nda kuraklık analizi çalışmaları, yağış alanı içerisinde veya çevresinde yer alan meteoroloji gözlem istasyonlarının çıkarılması ile başlamıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmalar neticesinde yağış alanı çevresinde yer alan ve uzun dönem sürekli veriye sahip olan 17740 Hınıs, 17095 Erzurum, 17690 Horasan ve 17203 Bingöl meteoroloji gözlem istasyonları analizde kullanılmak üzere seçilmiştir.

Noktasal meteorolojik verilerin yağış alanına alansal olarak dağıtmak amacıyla Thiessen Poligonu yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan Thiessen Poligonu, meteoroloji gözlem istasyonları ve yağış alanı aşağıda yer alan harita ile verilmektedir. Oluşturulan Thiessen Poligonu sonucunda toplam 2.700 km²'lik yağış alanına sahip olan Söylemez Barajı'nda, 17740 Hınıs Meteoroloji Gözlem İstasyonu (MGİ)'nun 1.544 km²'lik alan ile %57 temsil oranına, 17095 Erzurum MGİ'nin 803 km²'lik alan ile %30 temsil oranına ve 17690 Horasan MGİ'nin 353 km²'lik alan ile %13 temsil oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 17203 Bingöl MGİ'nin Thiessen Poligonu'nda Söyleme Barajı yağış alanına düşen bir kısmı bulunmadığı da tespit edilmiştir (Şekil 3).



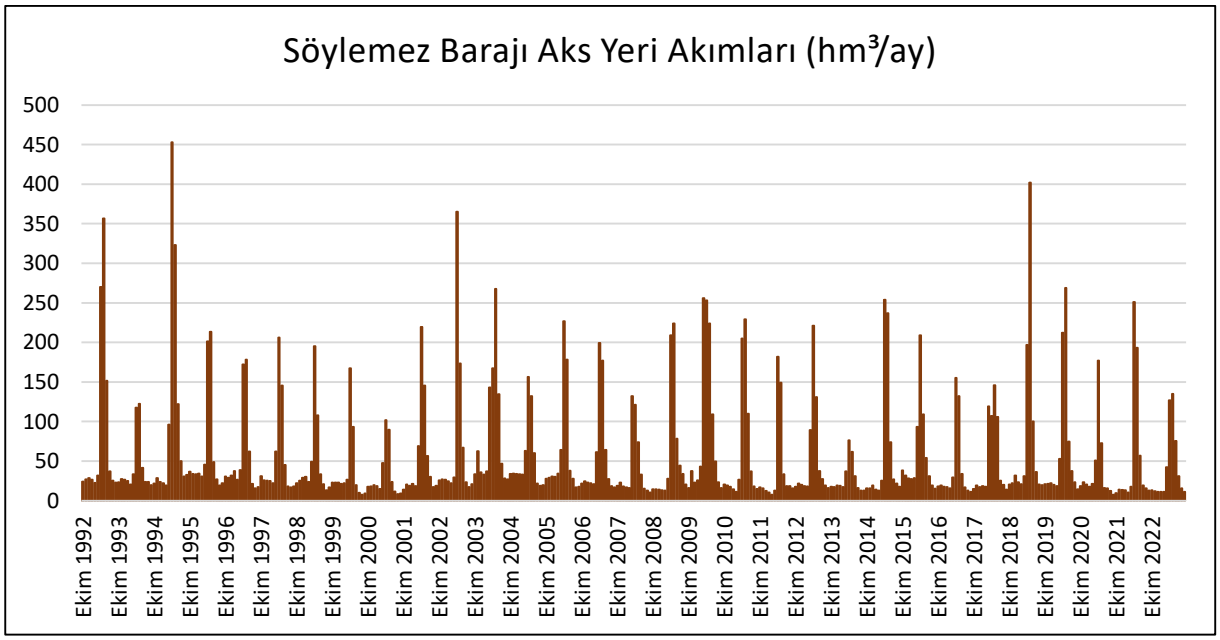
Şekil 3. Söylemez barajı yağış alanı Thiessen Poligonu

Şekil 4'de, oluşturulan Thiessen Poligonu yardımıyla elde edilen Söylemez Barajı yağış alanı aylık toplam yağış verileri gösterilmiştir. Analizler kapsamında değerlendirilen 1992-2023 yıllık dönemde yağış alanının ortalama 439,56 mm/yıl olarak hesaplanmıştır.

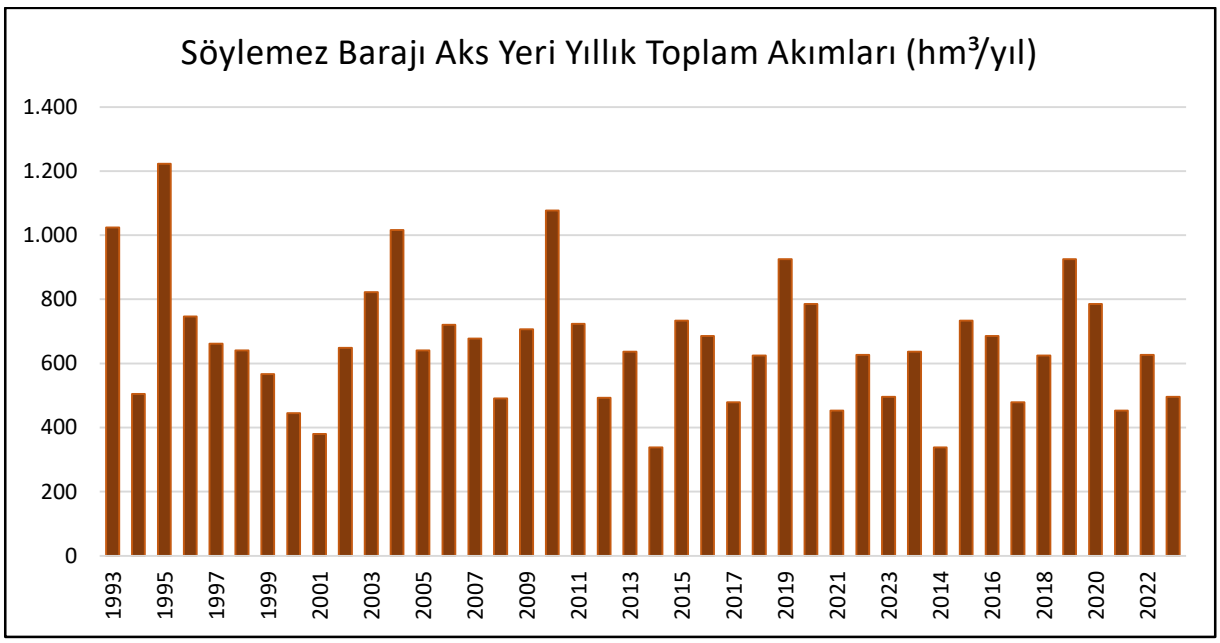


Şekil 4. Söylemez barajı yağış alanı aylık toplam yağışları (mm)

Şekil 5'de ise sırasıyla; SSFI analizi için değerlendirilecek Söylemez Barajı Aks Yeri akım değerleri hem aylık hem de yıllık toplam olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)

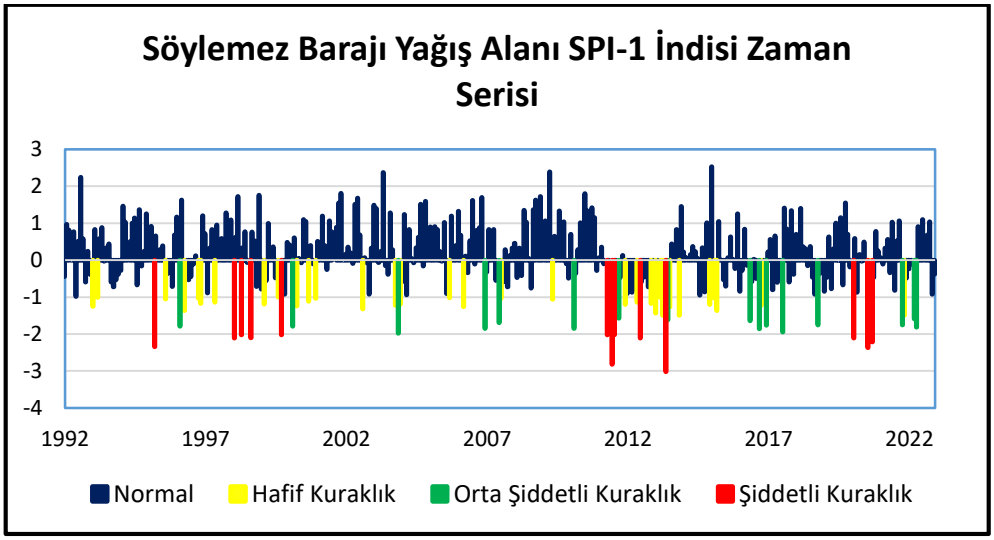
Şekil 5. Söylemez barajı aks yeri; (a) aylık toplam akımları ve (hm^3/ay) (b) yıllık toplam akımları (hm^3/yıl)

Söylemez Barajı Yağış Alanı için SPI analizi, farklı zaman ölçeklerini içerecek şekilde SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 ve SPI-24 olarak uygulanmıştır. Bu periyotlar, belirli dönemlerdeki yağış miktarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. SPI, her zaman dilimi için ilgili ay ve önceki ayları kapsayan toplam yağış değerlerine dayanır. Örneğin SPI-3, her ay için o ay ve önceki iki ayın toplam yağışını dikkate alır; bu değer, uzun dönem yağış kayıtlarına göre istatistiksel olarak normalize edilerek standartlaştırılır.

SPI-1, yalnızca bir aylık toplam yağışı esas alır ve kısa süreli, ani gelişen meteorolojik kuraklıkları belirlemede kullanılır. SPI-3 ise mevsimsel ölçekli yağış eksikliklerinin değerlendirilmesinde önemlidir; bu ölçek özellikle tarımsal faaliyetler, toprak nemi ve bitki gelişim dönemleriyle ilişkilidir. SPI-6, altı aylık periyodu kapsayarak daha uzun süreli nem eksikliklerini ve mevsimler arası geçişlerdeki kuraklık etkilerini ortaya koyar. SPI-9 ve SPI-12 gibi daha uzun süreli indeksler, akarsu debileri, baraj seviyeleri ve genel yüzey suyu kaynaklarının durumunu yansıtmak için tercih edilirken; SPI-24 ise yeraltı suyu seviyeleri ve havzanın genel hidrolojik dengesine dair uzun vadeli kuraklık koşullarını izlemek için uygundur. Bu çok ölçekli analiz yaklaşımı sayesinde, kuraklığın farklı zaman aralıklarındaki etkileri ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilmekte ve bölgedeki su kaynakları yönetimi açısından önemli veriler elde edilebilmektedir.

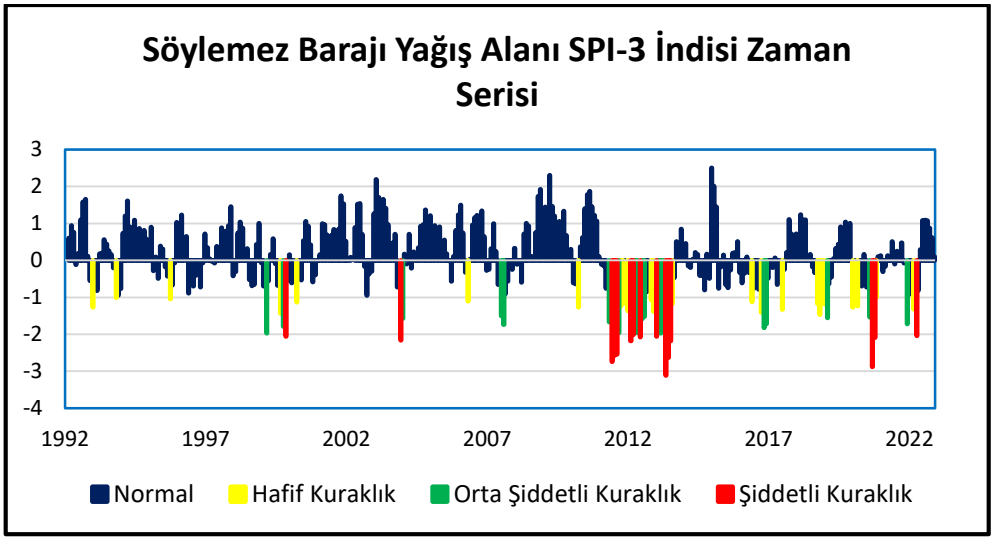
SPI-1 indisi analiz sonuçlarına göre 1997-1998 döneminde hafif ve orta şiddetli kuraklık dönemleri gözlemlenmekle birlikte, özellikle 1998'in sonlarına doğru şiddetli kuraklık eğilimleri başlamıştır. 2007-2008 döneminde 2007'nin sonlarında başlayan ve 2008'in başlarına kadar devam eden belirgin bir şiddetli kuraklık dönemi göze çarpmaktadır. 2012-2015 dönemi, incelenen periyottaki en şiddetli ve sürekli kuraklık olaylarını barındırmaktadır ve özellikle 2013 yılı boyunca ve 2014'ün başlarında ardışık ve yoğun şiddetli kuraklık ayları yaşanmıştır. 2017'de kısa süreli orta şiddetli kuraklıklar yaşanmış,

2020'nin sonlarından 2021'in ortalarına kadar ise tekrar eden şiddetli kuraklık periyotları kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre Söylemez Barajı Yağış Alanı özellikle 2012-2015 yılları arasında aylık bazda çok ciddi kuraklık baskısı altında kalmıştır. Şekil 6'da sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SPI-1 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



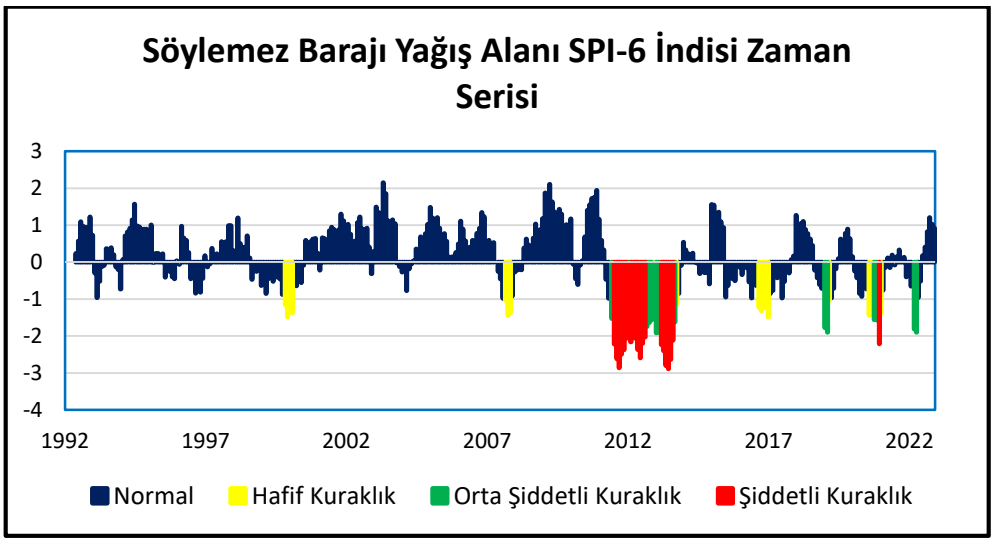
Şekil 6. Söylemez barajı yağış alanı SPI-1; Kuraklık Şiddet Grafiği

SPI-3 indisi analiz sonuçlarına göre 1998 sonlarından 1999 başlarına uzanan, SPI-1'e kıyasla daha belirgin ve uzun süreli şiddetli kuraklık periyodu dikkat çekmektedir. 2007 sonundan 2008 ortasına kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık yine belirginleşmiştir. 2012-2015 dönemi, SPI-1'de de görülen bu dönem, SPI-3'te daha da uzun ve kesintisiz şiddetli kuraklık olarak ortaya çıkmaktadır ve özellikle 2013-2014 yılları ardışık ve derin kuraklık değerleri sergilemiştir. 2020 sonundan 2021 ortalarına kadar devam eden ve yer yer şiddetlenen kuraklık koşulları gözlenmiştir, ayrıca 2022 başında da kısa süreli şiddetli kuraklık yaşanmıştır. SPI-3 grafiği, 2012-2015 dönemindeki kuraklığın sadece kısa periyotlar halinde değil, 3 aylık periyotlar halinde de şiddetli geçtiğini vurgulamaktadır. Aşağıda Şekil 7'de yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SPI-3 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



Şekil 7. Söylemez barajı yağış alanı SPI-3; Kuraklık Şiddet Grafiği

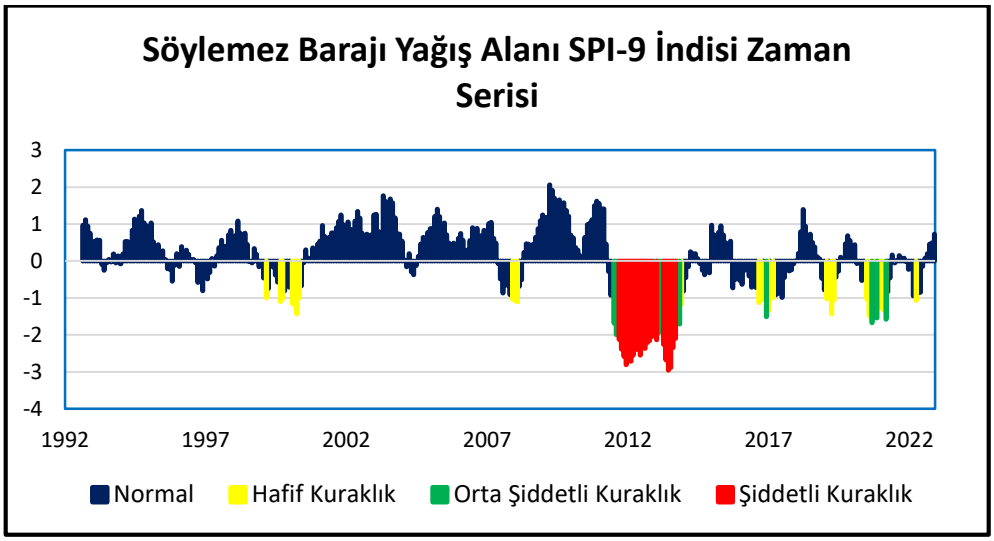
SPI-6 indisi analiz sonuçlarına göre 1999 yılında yılın başlarında orta şiddetli kuraklık yaşanmıştır. 2007 sonlarından 2008 ortalarına kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık periyodu izlenmektedir. 2012-2015 dönemi, en uzun süreli ve en şiddetli kuraklık dönemi olarak açıkça ortaya çıkmaktadır ve özellikle 2013'ün ortalarından 2014'ün sonlarına kadar olan süreçte kesintisiz ve yoğun şiddetli kuraklık koşulları hakimdir. Bu durum, uzun süreli su kaynakları üzerindeki baskıyı açıkça göstermektedir. 2020 sonlarından 2021 ortalarına ve 2022 başlarına doğru yine orta ve şiddetli kuraklık eğilimleri mevcuttur. SPI-6, 2012-2015 dönemindeki kuraklığın hidrolojik boyutta da şiddetli etkiler yarattığını güçlü bir şekilde işaret etmektedir. Aşağıda Şekil 8'de yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SPI-6 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



Şekil 8. Söylemez barajı yağış alanı SPI-6; Kuraklık Şiddet Grafiği

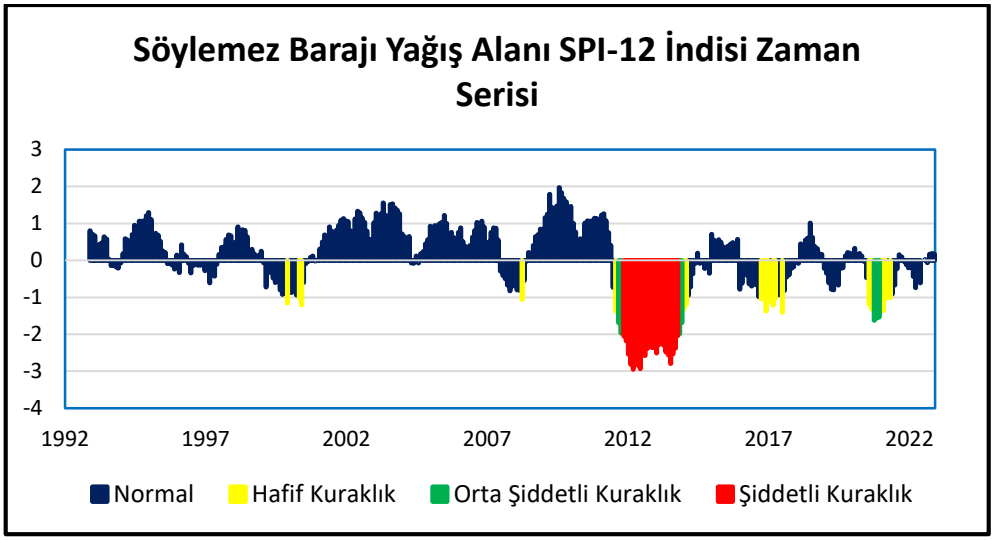
SPI-9 indisi analiz sonuçlarına göre 1999 yılında yılın ortalarına doğru orta şiddetli kuraklık gözlemlenmiştir. 2008 yılında yılın ilk yarısında orta ve şiddetli kuraklık koşulları yaşanmıştır. 2012-

2015 dönemi, SPI-6'da görülen uzun süreli şiddetli kuraklık, SPI-9'da daha da pekişmektedir ve 2013'ün sonlarından 2014'ün sonlarına kadar aralıksız ve derin şiddetli kuraklık değerleri bu dönemin baraj ve yağış alanı üzerindeki uzun vadeli etkilerini vurgulamaktadır. 2021 yılında yılın ortalarına doğru başlayan ve yıl sonuna kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık eğilimi bulunmaktadır. Bu sonuç, özellikle 2012-2015 kuraklığının, havzanın uzun dönemli hidrolojik döngüsü ve su rezervleri üzerinde ciddi ve kalıcı bir stres yarattığını göstermektedir. Aşağıda Şekil 9'da Söylemez Barajı yağış alanına ait SPI-9 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



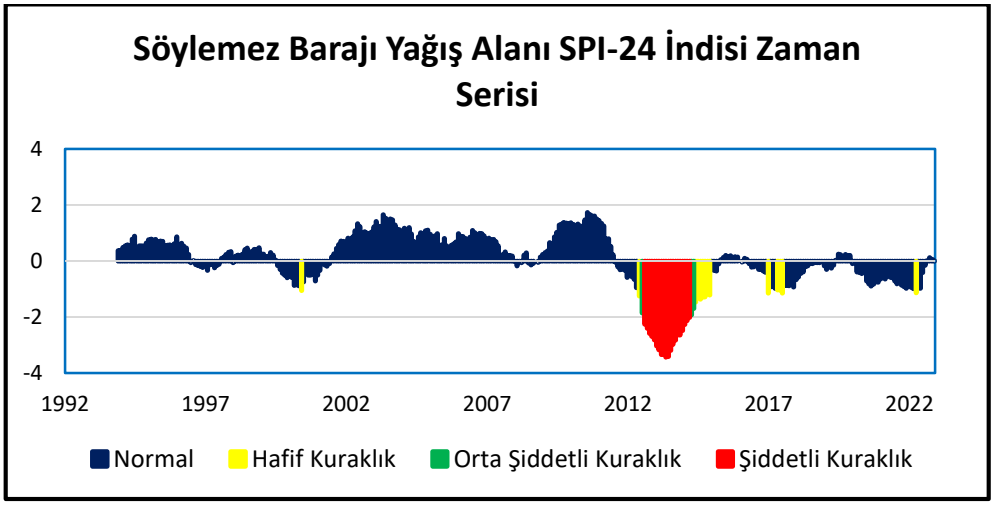
Şekil 9. Söylemez barajı yağış alanı SPI-9; Kuraklık Şiddet Grafiği

SPI-12 indisi analiz sonuçlarına göre; 1999 sonlarından 2000 başlarına kadar hafif ve orta şiddetli kuraklık görülmektedir. 2008 ortalarından 2009'un başlarına kadar orta şiddetli kuraklık eğilimi mevcuttur. 2012-2015 dönemi, tüm zaman serilerindeki en uzun ve en şiddetli kuraklık dönemidir ve özellikle 2013'ün sonlarından 2015'in sonlarına kadar devam eden, neredeyse kesintisiz şiddetli kuraklık periyodu dikkat çekmektedir. Bu durum, yıllık bazda çok ciddi bir yağış açığına işaret etmekte ve Söylemez barajı işletme çalışmalarında kritik periyot olarak ifade edilecek aralıkta baraj su seviyesinin minimum seviyelere düşürmüş olabileceğini düşündürmektedir. 2021'in ortalarından itibaren başlayan ve 2022'ye kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık eğilimi gözlemlenmektedir. SPI-12 grafiği, 2012-2015 yılları arasındaki kuraklığın, Söylemez Barajı havzasında yıllık bazda çok büyük bir su stresi yarattığını ve bu durumun uzun vadeli su kaynakları üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Aşağıda Şekil 10'da yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SPI-12 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



Şekil 10. Söylemez barajı yağış alanı SPI-12; Kuraklık Şiddet Grafiği

SPI-24 indisi analiz sonuçlarına göre 2000'in ortalarından 2001'in başlarına kadar hafif kuraklık yaşanmıştır. 2009'un sonlarından 2010'un başlarına kadar orta şiddetli kuraklık eğilimi vardır. 2012-2016 dönemi, incelenen periyottaki en derin ve en uzun süreli kuraklık olarak öne çıkmaktadır. 2012'nin ortalarından itibaren başlayan ve 2016'nın başlarına kadar süren kesintisiz ve yoğun şiddetli kuraklık koşulları gözlenmektedir. Bu, 2 yıllık bir periyotta dahi ortalamanın çok altında yağış alındığını ve havzanın çok ciddi bir su açığı yaşadığını göstermektedir. Bu tür uzun vadeli kuraklıklar, yeraltı suyu seviyeleri, baraj doluluk oranları ve ekosistemler üzerinde yıkıcı etkilere neden olabilir. 2021'in sonlarından 2022'nin başlarına kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık eğilimi mevcuttur. SPI-24 grafiği, özellikle 2012-2016 dönemindeki kuraklığın havza genelinde çok uzun vadeli ve sistemik bir su kıtlığına yol açtığını ve bunun geri dönüşünün daha zor olabileceğini ortaya koymaktadır. Aşağıda Şekil 11'de yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SPI-24 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.

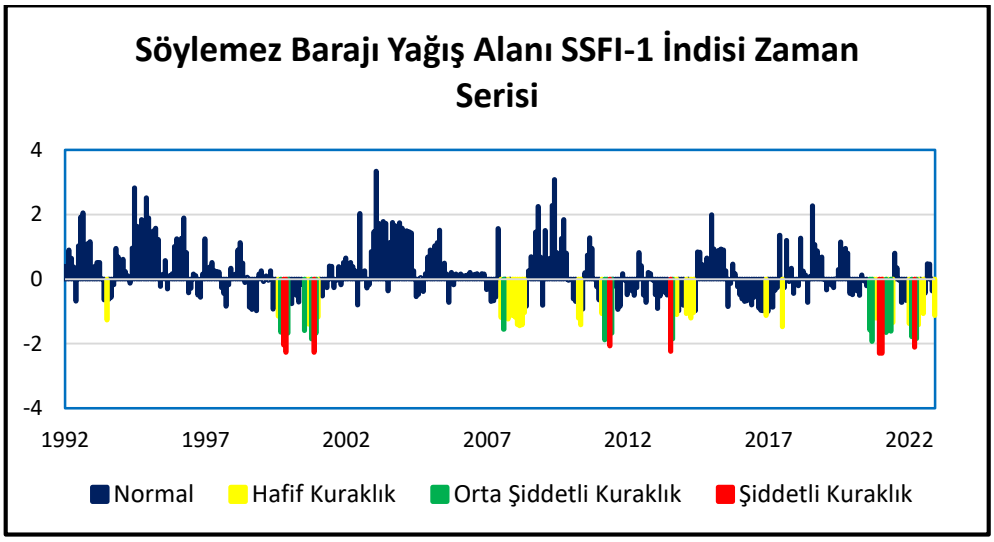


Şekil 11. Söylemez barajı yağış alanı SPI-24; kuraklık şiddet grafiği

3.3. Standartlaştırılmış Akış İndisi (SSFI) Sonuçları

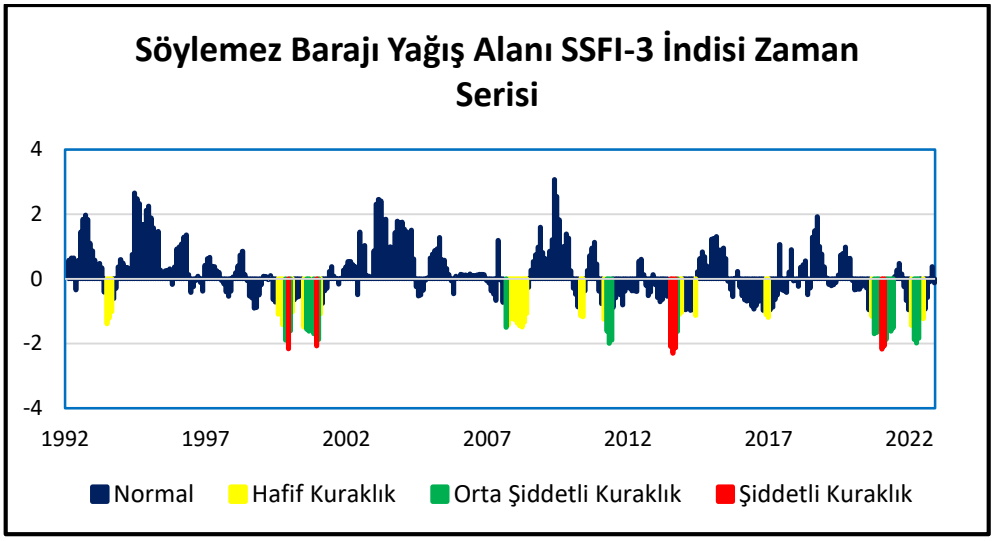
Daha öncede ifade edildiği üzere Standartlaştırılmış Akış İndisi (SSFI), akarsu debisi verilerine dayalı olarak hesaplanan ve hidrolojik kuraklığın nicel değerlendirilmesinde kullanılan bir indekstir. Standartlaştırılmış akış indisi (SSFI) tıpkı Standartlaştırılmış Yağış İndisi (SPI) gibi, belirli zaman ölçeklerinde (örneğin 1, 3, 6, 12 ay gibi) hesaplanan kayan toplam akış miktarlarının, uzun dönemli tarihsel veri serileriyle karşılaştırılması yoluyla elde edilir.

Söylemez barajı aks yeri için elde edilen 1992-2023 yılları arasındaki aylık toplam akım değerleri için farklı periyotlarda hesaplanan SSFI indis ve kuraklık analizleri aşağıda verilmiştir. SSFI-1 indisi analiz sonuçlarına göre 2000-2001 yıllarında belirgin bir orta şiddetli kuraklık dönemi göze çarpmaktadır. 2013 yılında ise oldukça şiddetli ve sürekli bir kuraklık periyodu yaşanmıştır. 2017'de kısa süreli hafif kuraklıklar görülürken, 2020 sonlarından 2022'ye kadar uzanan dönemde, özellikle 2021 ve 2022 başlarında tekrarlayan şiddetli kuraklık koşulları gözlemlenmektedir. Bu grafik, baraj havzasında aylık akışlarda 2013 ve 2020-2022 dönemlerinde ciddi düşüşler yaşandığını göstermektedir. Aşağıda Şekil 12'de yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SSFI-1 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



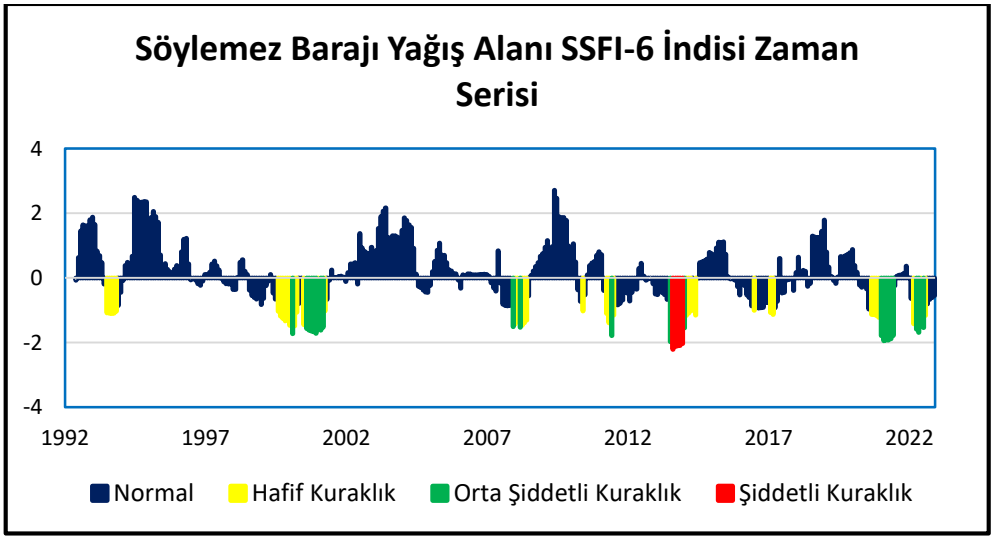
Şekil 12. Söylemez barajı yağış alanı SSFI-1; kuraklık şiddet grafiği

SSFI-3 indisi analiz sonuçlarına göre 2000-2001 döneminde belirgin ve uzun süreli orta ve yer yer şiddetli kuraklık periyotları izlenmektedir. 2013 yılında görülen şiddetli kuraklık, bu 3 aylık periyotta da oldukça belirgin ve derin bir etki yaratmıştır. 2020 sonlarından 2022'ye kadar olan süreçte ise tekrarlayan orta ve şiddetli kuraklık dönemleri mevcuttur. Bu grafik, özellikle 2000-2001 ve 2013 yıllarındaki kuraklıkların akış rejiminde şiddetli düşüşlere yol açtığını göstermektedir. Aşağıda Şekil 13'te yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SSFI-3 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



Şekil 13. Söylemez barajı yağış alanı SSFI-3; kuraklık şiddet grafiği

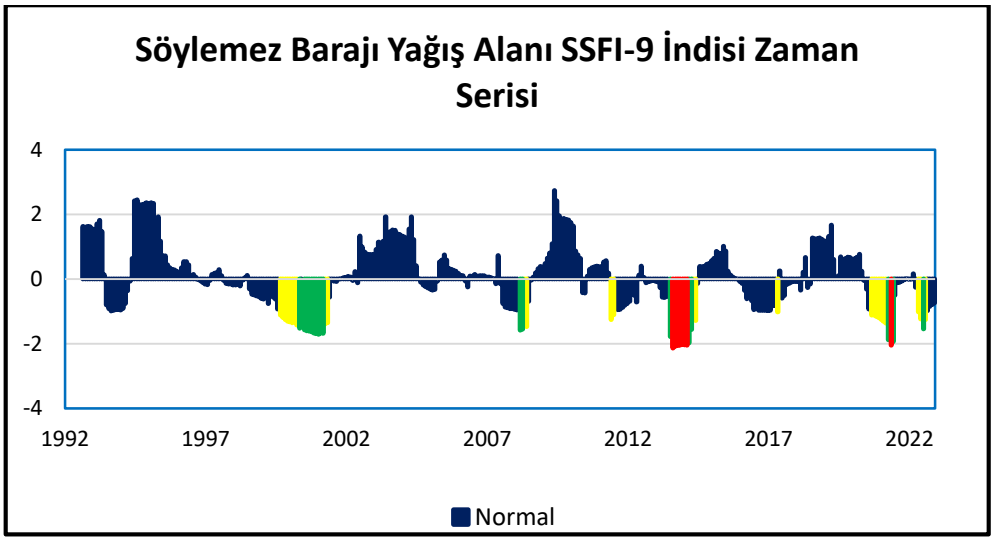
SSFI-6 indisi analiz sonuçlarına göre 2000-2001 döneminde yılın ortalarından itibaren başlayan ve uzun süren bir orta ve şiddetli kuraklık yaşanmıştır. 2013 yılında da oldukça derin ve uzun soluklu bir şiddetli kuraklık periyodu gözlemlenmektedir. 2020 sonlarından 2022'ye kadar olan dönemde ise orta ve şiddetli kuraklık eğilimleri devam etmektedir. Bu sonuç, özellikle 2000-2001 ve 2013 yıllarındaki kuraklıkların baraj havzasının akış düzeni üzerinde önemli ve orta vadeli olumsuz etkiler yarattığını vurgulamaktadır. Aşağıda Şekil 14'te yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SSFI-6 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



Şekil 14. Söylemez barajı yağış alanı SSFI-6; kuraklık şiddet grafiği

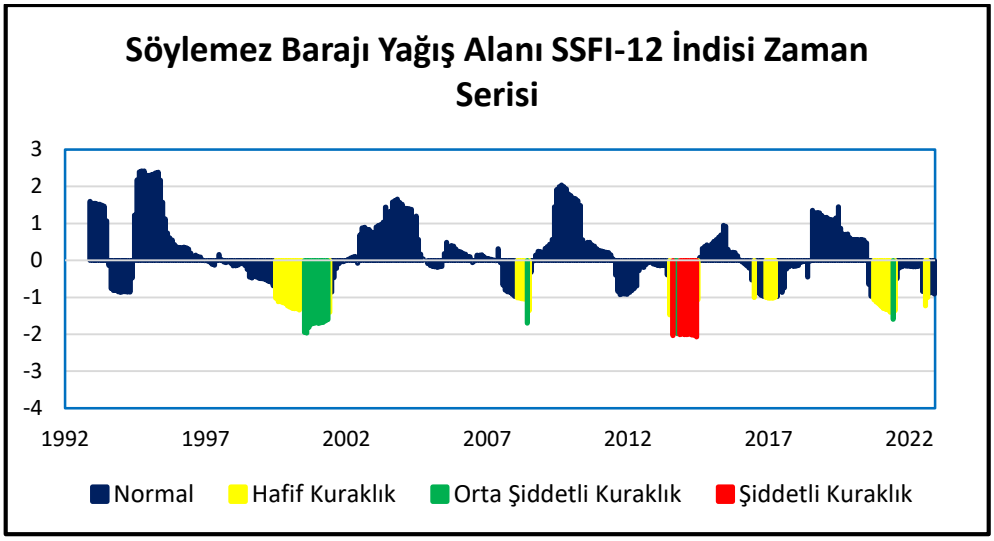
SSFI-9 indisi analiz sonuçlarına göre 2000'in sonlarından 2001'in ortalarına kadar devam eden güçlü bir orta ve şiddetli kuraklık dönemi dikkat çekmektedir. 2013 yılında ise çok derin ve sürekli bir şiddetli kuraklık gözlemlenmektedir. 2021'in ortalarından 2022'ye kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık eğilimi de mevcuttur. Bu grafik, özellikle 2000-2001 ve 2013 kuraklıklarının havzanın uzun dönemli

hidrolojik döngüsü ve su rezervleri üzerinde ciddi bir stres yarattığını göstermektedir. Aşağıda Şekil 15'de yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SSFI-9 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



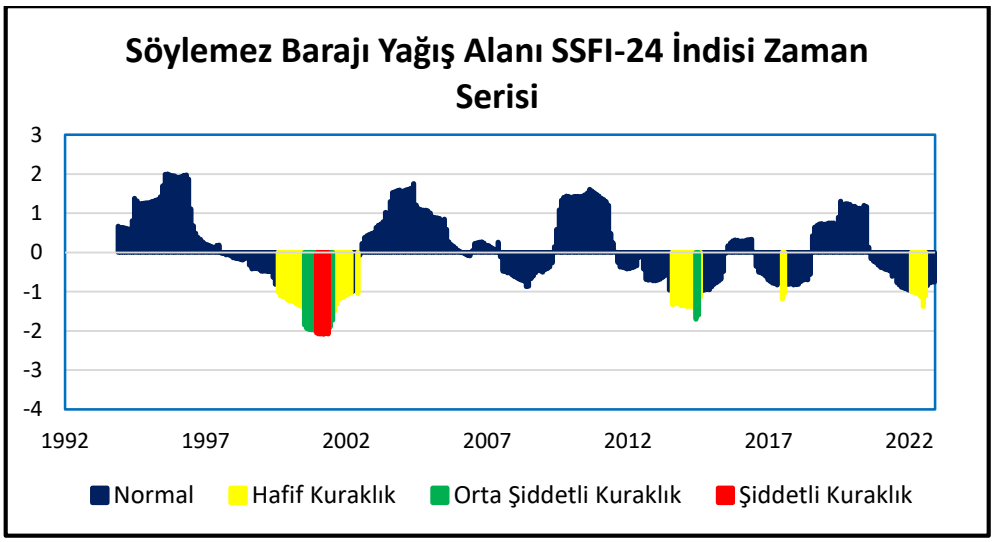
Şekil 15. Söylemez barajı yağış alanı SSFI-9; kuraklık şiddet grafiği

SSFI-12 indisi analiz sonuçlarına göre 2000'li yılların başlarında (özellikle 2001 civarında) orta şiddetli kuraklıklar yaşanmıştır. 2013-2014 dönemi, incelenen periyottaki en şiddetli ve en uzun süreli kuraklık dönemi olarak öne çıkmaktadır. Özellikle 2013 ortalarından 2014 ortalarına kadar devam eden kesintisiz şiddetli kuraklık periyodu dikkat çekmektedir. Bu durum, yıllık bazda akışlarda çok ciddi bir düşüşe işaret etmektedir. 2021'in sonlarından 2022'ye kadar devam eden orta ve şiddetli kuraklık eğilimi de gözlemlenmektedir. SSFI-12 grafiği, 2013-2014 yılları arasındaki kuraklığın, Söylemez Barajı havzasında yıllık bazda çok büyük bir su stresi yarattığını ve bu durumun uzun vadeli su kaynakları üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır. Aşağıda Şekil 16'da yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SSFI-12 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



Şekil 16. Söylemez barajı yağış alanı SSFI-12; kuraklık şiddet grafiği

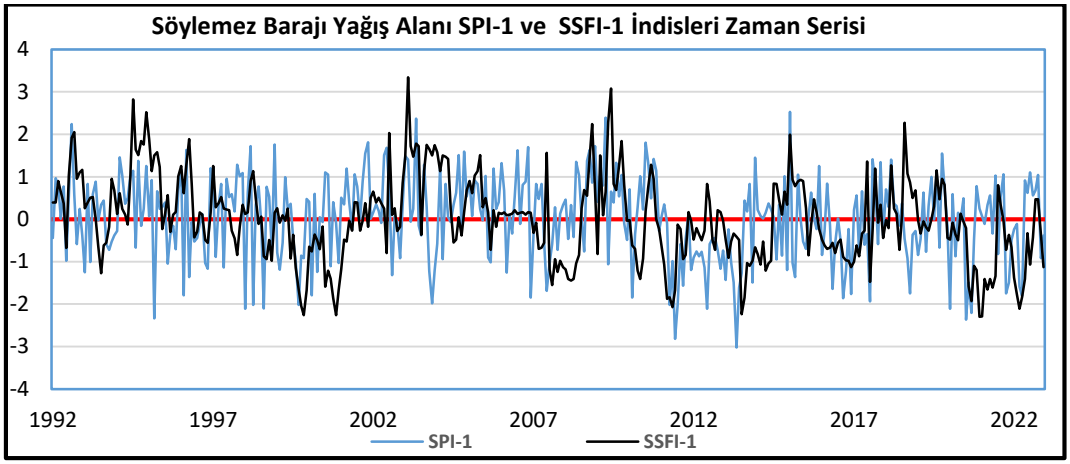
SPI-24 indisi analiz sonuçlarına 2001-2002 döneminde hafif ve orta şiddetli kuraklıklar gözlemlenmektedir. 2013-2015 dönemi, incelenen periyottaki en derin ve en uzun süreli kuraklık olarak öne çıkmaktadır. Özellikle 2013'ün ortalarından 2015'in başlarına kadar süren kesintisiz ve yoğun şiddetli kuraklık koşulları gözlenmektedir. Bu, 2 yıllık bir periyotta dahi ortalamanın çok altında akış alındığını ve havzanın çok ciddi bir hidrolojik açık yaşadığını göstermektedir. Bu tür uzun vadeli kuraklıklar, yeraltı suyu seviyeleri ve baraj doluluk oranları üzerinde yıkıcı etkilere neden olabilir. 2022 başında kısa süreli hafif kuraklık eğilimi de mevcuttur. SSFI-24 grafiği, özellikle 2013-2015 dönemindeki kuraklığın havza genelinde çok uzun vadeli ve sistemik bir su kıtlığına yol açtığını ve bunun geri dönüşünün daha zor olabileceğini ortaya koymaktadır. Aşağıda Şekil 17'de yer alan grafiklerde sırasıyla Söylemez Barajı yağış alanına ait SSFI-24 indisi kuraklık şiddet grafiği verilmektedir.



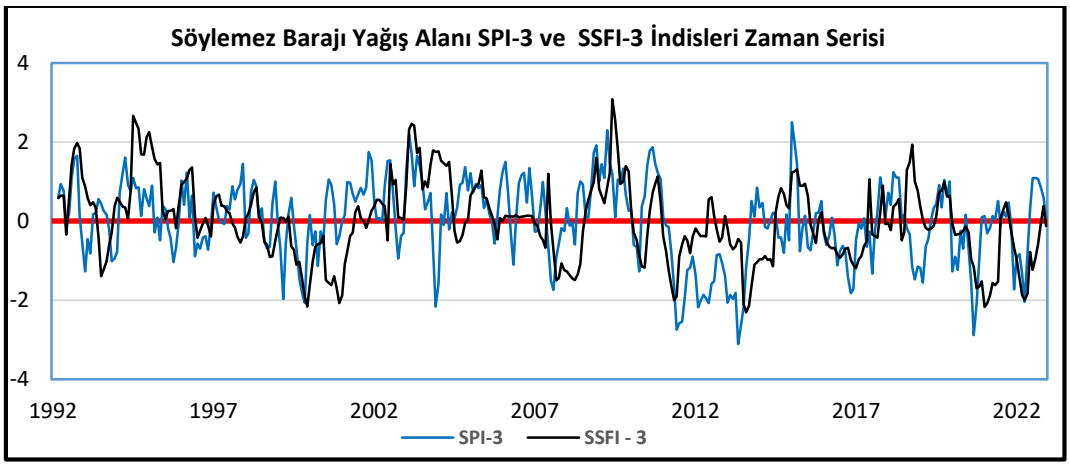
Şekil 17. Söylemez barajı yağış alanı SSFI-24; kuraklık şiddet grafiği

3.4. İndeks Sonuçlarının Karşılaştırılması

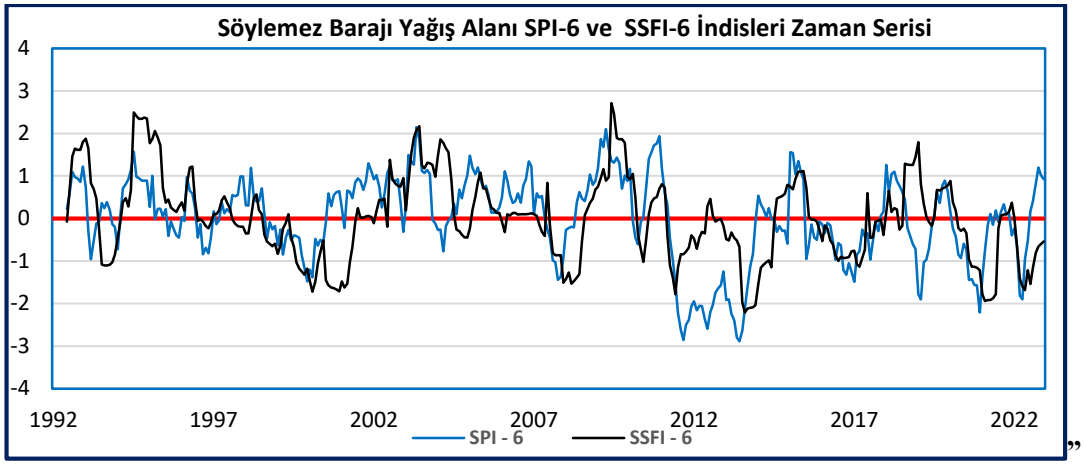
Şekil 18,19,20,21,22,23 numaralı grafiklerde eş zamanlı SPI ve SSFI indislerinin kuraklık şiddet grafikleri birbiri ile kıyaslanmış olup grafikler incelendiğinde indisler arasında gecikmeli olarak belirgin uyumluluk dikkat çekmektedir. Özellikle uzun peryotlu (SPI-9, SSFI-9) (SPI-12, SSFI-12), (SPI-24, SSFI-24) indislerde uyum daha belirgin olup buda uzun süreli yağış eksikliklerinin uzun süreli akış eksikliğine olan etkisinin daha belirgin bir yansımasıdır.



Şekil 18. Söylemez barajı yağış alanı 1 aylık SPI, SSFI indislerinin zamana bağlı değişim grafiklerinin karşılaştırılması

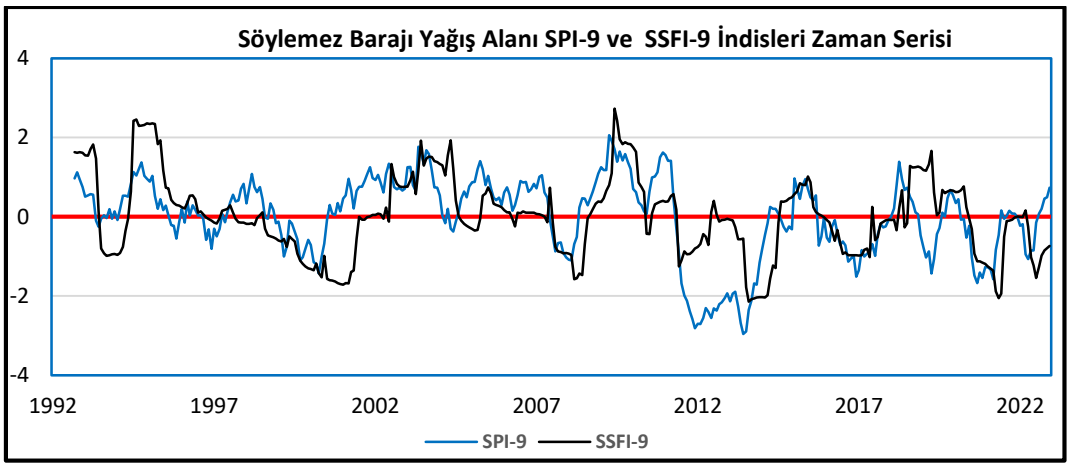


Şekil 19. Söylemez barajı yağış alanı 3 aylık SPI, SSFI indislerinin zamana bağlı değişim grafiklerinin karşılaştırılması

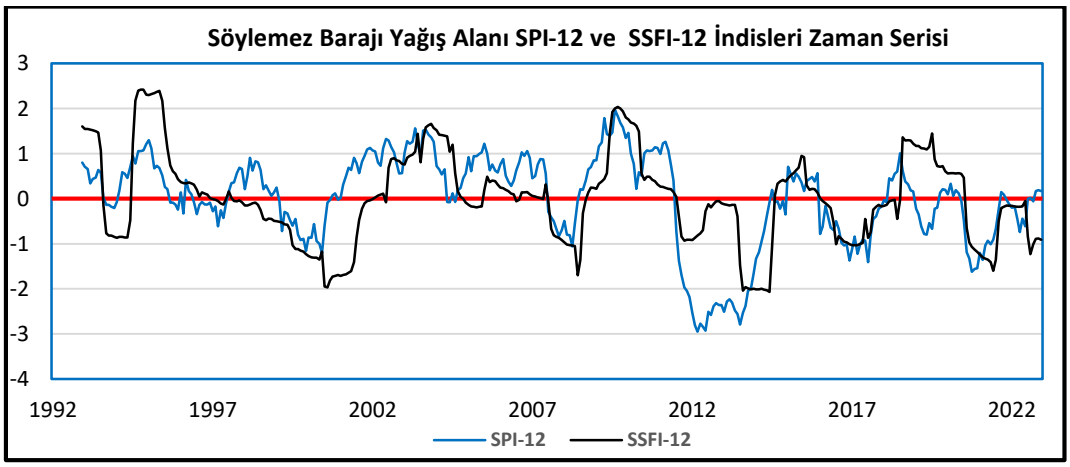


”

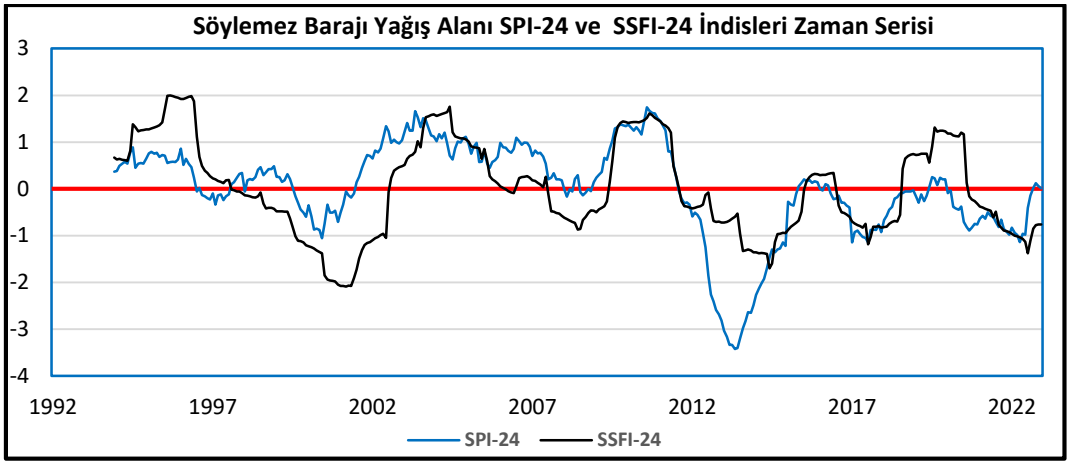
Şekil 20. Söylemez barajı yağış alanı 6 aylık SPI, SSFI indislerinin zamana bağlı değişim grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 21. Söylemez barajı yağış alanı 9 aylık SPI, SSFI indislerinin zamana bağlı değişim grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 22. Söylemez barajı yağış alanı 12 aylık SPI, SSFI indislerinin zamana bağlı değişim grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 23. Söylemez barajı yağış alanı 24 aylık SPI, SSFI indislerinin zamana bağlı değişim grafiklerinin karşılaştırılması

Tablo 3'te yer alan SPI indisleri determinasyon matrisi ile Söylemez Barajı Yağış Alanı'ndaki farklı zaman ölçeklerindeki SPI indislerinin kendi aralarındaki ilişki düzeyini gösterilmektedir. SPI-1 ile SPI-3 arasındaki determinasyon katsayısı (r^2) 0,38658 gibi orta düzeyde pozitif bir değerdir. Bu, aylık ve 3 aylık yağış anormalliklerinin belirli bir uyum içinde olduğunu gösterir. SPI-1'in diğer uzun ölçeklerle (SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24) r^2 değeri daha düşüktür. Bu durum, kısa vadeli yağış durumunun uzun vadeli yağış birikimini her zaman doğrudan yansıtmadığını göstermektedir SPI-3'ün diğer ölçeklerle r^2 değeri SPI-1'e göre daha güçlüdür. En yüksek ilişki düzeyi değeri 0,88026 ile SPI-9 ve SPI-12 arasındadır. Bu, 9 aylık ve 12 aylık yağış anormalliklerinin birbirini çok iyi yansıttığını gösterir. Zaman ölçeği arttıkça, indisler arasındaki r^2 değeri genellikle artmaktadır. Örneğin, SPI-3'ten SPI-6'ya, SPI-9'a ve SPI-12'ye geçişte r^2 değeri değerleri yükselmektedir. SPI-24 ile olan r^2 değeri ise diğer uzun ölçeklerle (SPI-9 ve SPI-12) hala güçlüdür.

Tablo 3. Söylemez Barajı Yağış Alanı SPI indisleri r^2 tablosu

	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12	SPI-24
SPI-1	1,0000	0,3866	0,2365	0,1833	0,1338	0,0850
SPI-3	0,3866	1,0000	0,6475	0,4958	0,3926	0,2171
SPI-6	0,2365	0,6475	1,0000	0,8126	0,6826	0,3798
SPI-9	0,1833	0,4958	0,8126	1,0000	0,8829	0,5274
SPI-12	0,1338	0,3926	0,6826	0,8829	1,0000	0,6469
SPI-24	0,0850	0,2171	0,3798	0,5274	0,6469	1,0000

Aşağıda Tablo 4'te yer alan SSFI determinasyon matrisi ile, Söylemez Barajı aks yer akımlarının farklı zaman ölçeklerindeki SSFI indislerinin kendi aralarındaki ilişkiyi açıklama gücü gösterilmektedir. SSFI-1'in diğer indislerle r^2 değeri SPI'dakine benzer şekilde düşüktür. Örneğin, SSFI-1 ile SSFI-3 r^2 değeri orta-yüksek bir değerdir. SSFI-1'in daha uzun ölçeklerle (SSFI-6'dan SSFI-24'e kadar) r^2 değeri daha

düşüktür. SSFI-3'ün diğer ölçeklerle r^2 değeri SSFI-1'e göre daha güçlüdür. SPI tablosuna benzer şekilde, en güçlü r^2 değeri birbirine yakın zaman ölçekleri arasında görülmektedir. Özellikle SSFI-6 ile SSFI-9, SSFI-9 ile SSFI-12 ve SSFI-12 ile SSFI-24 arasında oldukça yüksek pozitif r^2 değeri mevcuttur. En yüksek ilişki düzeyi değeri SSFI-9 ve SSFI-12 arasındadır. Bu, 9 aylık ve 12 aylık akış anormalliklerinin birbirini çok iyi yansıttığını gösterir. SPI tablosundaki eğilime benzer şekilde, SSFI'da da zaman ölçeği arttıkça, indisler arasındaki r^2 değeri genellikle artmaktadır. Özellikle orta ve uzun vadeli SSFI indisleri arasında güçlü bir ilişki vardır.

Tablo 4. Söylemez Barajı Yağış Alanı SSFI indisleri r^2 tablosu

	SSFI-1	SSFI-3	SSFI-6	SSFI-9	SSFI-12	SSFI-24
SSFI-1	1,0000	0,7900	0,6286	0,4685	0,3563	0,1855
SSFI-3	0,7900	1,0000	0,8282	0,6524	0,4981	0,2528
SSFI-6	0,6286	0,8282	1,0000	0,8567	0,6970	0,3524
SSFI-9	0,4685	0,6524	0,8567	1,0000	0,8720	0,4504
SSFI-12	0,3563	0,4981	0,6970	0,8720	1,0000	0,5618
SSFI-24	0,1855	0,2528	0,3524	0,4504	0,5618	1,0000

Aşağıda Tablo 5'e yer alan SPI ve SSFI determinasyon matrisi ile, SPI (yağış) indisleri ile SSFI (akış) indisleri arasındaki r^2 değeri gösterilmektedir. Bu tablo, yağışa bağlı kuraklık indisleri ile akışa bağlı kuraklık indislerinin bu yağış alanında ne ölçüde bir ilişkisi olduğunu anlamak açısından kritik öneme sahiptir. SPI-1'in tüm SSFI ölçekleriyle ilişki düzeyi oldukça düşüktür. Bu durum, aylık yağış anormalliklerinin akış üzerinde anlık veya kısa vadede çok güçlü bir belirleyici olmadığını, akışın daha çok birikimli yağış ve havza özelliklerine bağlı olduğunu gösterir. Genel olarak, SPI zaman ölçeği arttıkça (yatayda ilerledikçe) ve SSFI zaman ölçeği arttıkça (dikeyde ilerledikçe) ilişki düzeyi değerleri artmaktadır. Örneğin, SPI-12'nin tüm SSFI ölçekleriyle r^2 değeri, SPI-1'e göre belirgin şekilde daha yüksektir. En yüksek r^2 değeri, genellikle uzun vadeli SPI indisleri ile uzun vadeli SSFI indisleri arasında görülmektedir. Özellikle SPI-12 ile SSFI-24, SPI-9 ile SSFI-24, SPI-12 ile SSFI-12 ve SPI-24 ile SSFI-24 arasında yüksek pozitif ilişki düzeyleri mevcuttur. Bu yüksek pozitif r^2 değerleri, 1 ila 2 yıllık yağış koşullarındaki anormalliklerin, benzer zaman ölçeklerindeki akış anormalliklerini güçlü bir şekilde etkilediğini ve aralarında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yani, uzun süreli yağış eksiklikleri, uzun süreli akış azalmalarına yol açmaktadır. Tablodaki en yüksek r^2 değeri 0,85973 ile SPI-24 ve SSFI-24 arasındadır. Bu, 2 yıllık yağış birikiminin 2 yıllık akış birikimi ile çok güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu ve uzun vadeli hidrolojik kuraklığın esasen uzun vadeli meteorolojik kuraklıktan kaynaklandığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Yağış ve akış arasındaki ilişki düzeyi bir gecikme etkisi ile gözlemlenebilir. Örneğin, SPI-12'nin SSFI-24 ile olan r^2 değeri, kendi zaman ölçeğindeki SSFI-12 ile olan r^2 değeri oldukça yakındır, hatta bazı durumlarda daha uzun SSFI

ölçekleriyle daha güçlü r^2 değerleri görülebilir. Bu, yağışın yeraltı suyu ve havza depolaması yoluyla akışa yansımasının belirli bir zaman gecikmesiyle gerçekleştiğini düşündürmektedir.

Tablo 5. Söylemez Barajı Yağış Alanı SPI, SSFI indisleri r^2 tablosu

	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12	SPI-24
SSFI-1	0,064	0,186	0,237	0,239	0,238	0,161
SSFI-3	0,023	0,149	0,262	0,287	0,294	0,206
SSFI-6	0,015	0,084	0,220	0,307	0,334	0,251
SSFI-9	0,004	0,045	0,142	0,264	0,335	0,272
SSFI-12	0,002	0,021	0,091	0,195	0,302	0,293
SSFI-24	0,000	0,009	0,040	0,092	0,153	0,360

4. Tartışma

Kuraklık, su kaynaklarının azalması, tarımsal verimliliğin düşmesi, ekosistemlerin zarar görmesi ve toplumların su temininde sorunlar yaşaması gibi çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri olan küresel ölçekte önemli bir doğal afettir (Gümüş ve ark., 2016; Taşkolu ve ark., 2025). Bu çalışmanın sonuçları, Söylemez Barajı havzasındaki kuraklığı hem meteorolojik hem de hidrolojik olarak incelenmesine olanak sunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre; akış ve yağış verilerinde azalan trend olduğunu görülmektedir. Bu durumda iklim değişikliğinin bölgedeki su kaynakları üzerindeki olumsuz etkileri desteklemektedir. Topçu ve Karaçor (2021), yaptıkları çalışmada, Erzurum istasyonunun verilerini kullanarak SPEI ve bütünleşik kuraklık indeksi (BKİ) kullanarak Erzurum için kuraklık analizi yapmışlardır. Elde ettikleri sonuca göre; SPEI sonuçlarında kurak ve sulak dönemler gözlemlenirken, BKİ sonuçlarında kuraklık seviyesinde artış olduğu ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bu çalışmayı destekler niteliktedir. Özdemir ve Aksoy (2022), yaptıkları çalışmada; kuraklığın Erzurum tarımına etkisini araştırmışlardır. Erzurum merkez ve ilçelerinde traktör sahibi olan vatandaşlarla bir anket çalışması yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kuraklığın etkisiyle bitkisel üretimde verim kaybı yaşanmış olup, maliyetlerde artış gözlenmiştir. Kuraklığın tarımdaki olumsuz etkilerini konu alan bu çalışma, yaptığımız çalışma ile paralellik göstermiş. Çelik ve ark., (2018), yaptıkları çalışmada Doğu Anadolu Bölgesi için kuraklık analizi çalışması yapmışlardır. Erzurum ili için yaptıkları analiz sonuçlarına göre; hem SPEI hem de BKİ yöntemlerine göre sulak ve kurak dönemler gözlemlenmiştir fakat BKİ sonuçlarında kuraklık durumu daha da dikkat çekmektedir. Elde edilen sonuçlar, yaptığımız bu çalışmayı daha da anlamlı kılmıştır. Kuraklık indisleri arasındaki karşılaştırmalar, zaman ölçeğine bağlı olarak r^2 değerlerinin değiştiğini göstermektedir. Özellikle kısa vadeli SPI ve SSFI değerleri arasındaki r^2 değerinin düşük olması, meteorolojik kuraklığın akışa anlık olarak yansımadığını; uzun vadeli indisler arasındaki güçlü ilişki düzeylerinin ise yağış eksikliklerinin belirli bir gecikmeyle

hidrolojik kuraklığa dönüştüğünü ortaya koymaktadır. Bu sonuç, havza ölçeğinde kuraklık süreçlerinin çok ölçekli ve gecikmeli etkilerle ilerlediğini göstermesi bakımından önemlidir.

Bu çalışmada yağış ve akım serileri üzerinde uygulanan Mann-Kendall testi ve Sen'in eğim yöntemi, bölgedeki hidrolojik ve meteorolojik eğilimlerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermiştir. Negatif eğilim değerleri, uzun dönemde yağış ve akış miktarlarında azalma yönünde tutarlı bir değişimi işaret etmektedir. Güven seviyelerinin %90'ın üzerinde bulunması, elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, iklim değişikliğine bağlı olarak Doğu Anadolu Bölgesi'nde kuraklığın şiddetinin artış eğiliminde olduğunu desteklemektedir.

Risk yönetimi, risk değerlendirme işleminin sonucuna bağlı olarak ortaya çıkmakta ve kısaca problemler hakkında neler yapılacağına karar verme işlemi olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle; kabul ve ihmal edilebilir risk düzeylerine karar vermek ve buna göre risklerin azaltılması ya da kabul edilmesi için gerekli seçeneklerin oluşturulması ve yürütülmesi gerekmektedir (Uzunçubuk, 2005). Elde edilen bulgular, havzanın su kaynakları yönetiminde kuraklık risklerinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 2012-2016 döneminde gözlemlenen uzun süreli ve şiddetli kuraklık, barajın işletme stratejilerinin ve su tahsis planlarının bu tür ekstrem koşullara göre gözden geçirilmesini zorunlu kılmaktadır. Kuraklık yönetiminde risk azaltma stratejilerinin geliştirilmesi, erken uyarı sistemlerinin kurulması ve suyun etkin kullanımına yönelik önlemler alınması bölgedeki dirençliliği artıracaktır.

Yağış ve akış arasındaki ilişki düzeyinin incelenmesi, hidrolojik kuraklıkta sıklıkla gözlemlenen bir gecikme (lag) etkisinin varlığını düşündürmektedir. Bu durum, yağışın yüzey akışına, toprak nemine ve nihayetinde yeraltı suyu beslenmesine yansımasının belirli bir zaman almasından kaynaklanır. Örneğin, Tablo 4'teki verilere bakıldığında, SPI-12'nin kendi zaman ölçeğindeki SSFI-12 ile olan determinasyon katsayısı (r^2=0,302) iken, SSFI-24 ile olan katsayısı daha yüksektir (r^2=0,360). Benzer bir şekilde, SPI-9'un SSFI-9 ile olan katsayısı (r^2=0,264), SSFI-12 ile olan katsayısından daha düşüktür (r^2=0,335). Bu bulgular, havza ölçeğinde, meteorolojik kuraklığın hidrolojik sisteme yansımasının ortalama olarak 3 ila 6 ay arasında bir gecikmeyle gerçekleştiğini ve havzanın depolama kapasitesinin (toprak nemi ve yeraltı suyu) uzun vadeli yağış açıklarını bir süre tolere edebildiğini göstermektedir. Bu gecikme etkisi, kuraklık erken uyarı sistemlerinin tasarlanmasında ve su tahsis planlarının optimize edilmesinde kritik bir öneme sahiptir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, Erzurum ili sınırlarında yer alan Söylemez Barajı Havzası'nda meteorolojik ve hidrolojik kuraklığın özelliklerini ortaya koymak amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 1992-2023 dönemine ait yağış ve 1992-2023 dönemine ait akım verileri kullanılarak Mann-Kendall testi ile trend analizleri yapılmış, ayrıca SPI ve SSFI indisleri farklı zaman ölçeklerinde uygulanarak kuraklık koşulları değerlendirilmiştir.

Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında hem yağış değerlerinde hem de akım değerlerinde belirgin bir azalan trend olduğu görülmektedir. İki parametrede de S ve Sen'in eğim değerleri negatif

durumdadır. Güven faktörleri ise iki parametrede de %90'ın üzerinde bir seviyededir, bu da testlerin sonuçlarını anlamlı kılmaktadır. Tüm SPI zaman serileri incelendiğinde, 2012'nin sonlarından 2016'nın başlarına kadar olan dönem, Söylemez Barajı Yağış Alanı için gözlemlenen en şiddetli ve en uzun süreli kuraklık dönemi olarak öne çıkmaktadır. Bu dönem, tüm zaman ölçeklerinde sürekli ve derin negatif SPI değerleri ile karakterize edilmiştir. Diğer dikkat çeken kuraklık dönemleri ise 1998-1999 ve 2007-2008'dir, ancak bunların şiddeti ve süresi 2012-2016 dönemine kıyasla daha sınırlıdır. Ayrıca, 2020-2022 döneminde yeniden belirgin bir kuraklık eğilimi başlamıştır ve bu durumun izlenmesi gerekmektedir.

SSFI zaman serilerinde ise 2013-2015 dönemi, en şiddetli ve en uzun süreli hidrolojik kuraklık dönemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu dönem, tüm zaman ölçeklerinde sürekli ve derin negatif SSFI değerleriyle belirlenmiştir. Diğer kuraklık dönemleri ise 2000-2002 ve 2020-2022 yıllarıdır. Hidrolojik kuraklık analizleri, baraj havzasının hem kısa hem de uzun vadede ciddi bir akış azalması ve su stresi altında kaldığını göstermektedir. Determinasyon matrisleri, Söylemez Barajı Yağış Alanı'nda hem yağış hem de akış indislerinin benzer örüntüler sergilediğini ortaya koymuştur. Kısa vadeli indisler daha değişken iken, zaman ölçeği uzadıkça r^2 değerleri artmaktadır. Özellikle 12 ve 24 aylık zaman ölçeklerindeki güçlü pozitif ilişkiler, uzun süreli yağış azlıklarının akış üzerinde doğrudan ve belirgin bir etki yarattığını göstermektedir.

Kuraklık etkileri yavaş gelişen ve uzun süre devam eden bir karaktere sahiptir. Bu durum, kuraklığa yönelik tedbirlerin kriz anında değil, önceden planlanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Risk yönetimi yaklaşımı, kuraklığın uzun süreli etkilerinin azaltılmasında temel bir araç olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgular, özellikle baraj işletmesi ve bölgesel su yönetim stratejilerinde kuraklık risklerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Gelecek çalışmalarda farklı kuraklık indislerinin birlikte kullanılması, iklim projeksiyonlarıyla senaryo temelli analizlerin yapılması ve ekosistem hizmetleri üzerindeki etkilerin incelenmesi önem taşımaktadır. Elde edilen sonuçların karar vericiler için, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve kuraklık dirençliliğinin artırılması açısından yol gösterici olacağı değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu makale, Bünyamin ÇAKUR'un yüksek lisans tezi kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teşekkür etmektedirler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynaklar

Ablak E., Uysal ET., Kumanlioglu A. Farklı standartlaştırılmış indis yöntemleri ile Bartın ilinin meteorolojik kuraklıklarının analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2025; 14(1): 382-391.

Aktürk G., Çıtakoğlu H., Demir V., Beden N. Meteorological drought analysis and regional frequency analysis in the Kızılırmak Basin: creating a framework for sustainable water resources management. Water 2024; 16(15): 2124.

Beden N., Demir V., Keskin AÜ. Samsun ilinde SPI ve PNI kuraklık indekslerinin eğilim analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 2020; 22(64): 107-116.

Bloomfield JP., Marchant BP. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. Hydrology and Earth System Sciences 2012; 17(12): 4769-4787.

Bozkurt C. Farklı zaman periyotları kullanılarak SPI ve SPEI indisleri ile kuraklık analizleri. İleri Teknolojilerde Çalışmalar Dergisi 2024; 2(1): 13-23. https://doi.org/10.63063/jsat.1380592

Citakoglu H., Aktürk G., Demir V. Hybrid machine learning for drought prediction at multiple time scales: a case study of Ağrı station, Türkiye. Acta Geophysica 2025; 73(2): 1643-1677.

Coccia M., Roshani S. Evolution of topics and trends in emerging research fields: multiple analyses with entity linking, Mann-Kendall test and burst methods in cloud computing. Scientometrics 2024; 129(9): 5347-5371.

Çelik MA., Kopar İ., Bayram H. Doğu Anadolu Bölgesi'nin mevsimlik kuraklık analizi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2018; 22(3): 1741-1761.

Çirağ B., Firat M. Two-dimensional (2D) flood analysis and calibration of stormwater drainage systems using geographic information systems. Water Science & Technology 2023; 87(10): 2577-2596. https://doi.org/10.2166/wst.2023.126

DSİ. https://www.dsi.gov.tr/ Erişim Tarihi: 30.08.2025

Fuchs BA., Svoboda MD. Handbook of drought ındicators and ındices. WMO. 2016.

Guan M., Liang Q., Hou J. Smart approaches to predict urban flooding: current advances and challenges. Frontiers in Earth Science 2021; 9: 681751.

Gümüş V. Akim kuraklik indeksi ile Asi Havzasinin hidrolojik kuraklık analizi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology 2017; 5(1): 65-73.

Gümüş V., Başak A., Oruç N. Standartlaştırılmış yağış indeksi (SYİ) yöntemi ile Şanlıurfa istasyonunun kuraklık analizi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi 2016; 1(1): 36-44.

Kendall M. Rank correlation methods. London: 4th edition, Charles Griffin. 1975.

Mann HB. Nonparametric tests against trend. Econometrica 1945; 13(3): 245-259.

Marrone M. Application of entity linking to identify research fronts and trends. Scientometrics 2020; 122(1): 357-379.

Marsick A., André H., Khelf I., Leclère Q., Antoni, J. Benefits of Mann-Kendall trend analysis for vibration-based condition monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing 2024; 216: 111486.

McKee TB., Doesken NJ., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology Anaheim, CA: American Meteorological Society 1993; 179-186.

Mishra AK., Singh VP. A review of drought concepts. Journal of Hydrology 2010; 391(1-2): 202-216.

NCAR. https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi.Erişim Tarihi: 30.08.2025

Okka CT., Durduran SS. Ermenek barajı havzasında SPI ve SPEI indisleri kullanılarak kuraklık analizi tahmini. 2022.

Özdemir FN., Aksoy A. Kuraklığın Erzurum tarımına etkisi. Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences 2022; 9(1): 132-140.

Özgün G., Vaheddoost B., Aras E. Standart yağış indeksi (SPI) metodu kullanılarak kuraklık analizi ve Bursa Doğancı Barajı ile ilişkilendirilmesi. Academic Perspective Procedia 2020; 3(2): 876-885.

Pachauri RK., Allen MR., Barros VR., Broome J., Cramer W., Christ R., van Ypserle JP. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014; 151, IPCC.

Sarış F., Gedik F. Konya Kapalı Havzası'nda meteorolojik kuraklık analizi. Coğrafya Dergisi 2021; 42: 295-308.

Şarlak N., Muratoğlu A., Tiğrek Ş. Devegeçidi Baraj Gölü meteorolojik-hidrolojik-tarımsal kuraklık analizi. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi 2024; 10(1): 16-28.

Şimşek O., Oksal NGS., Uncu EM., Gümüş V, Şeker M. SYİ Yöntemiyle Çoruh Havzası uzun dönem (1969-2020) meteorolojik kuraklığının analizi. Politeknik Dergisi 2024.

Taşkolu İ., Acar R., Çırağ B. Monitoring and evaluation of meteorological drought in Malatya Station: Standard precipitation index (SPI) and reconnaissance drought ındex (RDI). Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 2025; 25(3): 635-646. https://doi.org/10.35414/akufemubid.1493278

Taşkolu İ., Güngör M. Kuraklık analizi ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi örneği. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2025; 31(3).

Thiessen AH. Precipitation averages for large areas. Monthly weather review 1911; 39(7): 1082-1089.

Topçu E., Karaçor F. Erzurum istasyonunun standartlaştırılmış yağış evapotranspirasyon indeksi ve bütünleşik kuraklık indeksi kullanılarak kuraklık analizi. Politeknik Dergisi 2021; 1-1.

Topçu E., Karaçor F., Çırağ B., Taşkolu İ., Acar R. Drought assessment in the northeastern Aras Basin using multi-parameter aggregate drought index and innovative polygon trend analysis. Earth Science Informatics 2025; 18(3): 273. https://doi.org/10.1007/s12145-025-01797-x

Uzunçubuk L. Yerleşim yerlerinde afet ve risk yönetimi. Ankara Üniversitesi, sayfa no: 395, Ankara, Türkiye, 2005.

Vicente-Serrano SM., Beguería S, López-Moreno JI. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate 2010; 23(7): 1696-1718.

Wilhite DA., Glantz MH. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. Water international 1985; 10(3): 111-120.

Yetmen H., Özcanlı A. Harran Ovası'nın kuraklık analizi. The Journal of Academic Social Science 2024; 46(46): 132-146.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 523-543, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 523-543, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Bitkilerde Bor Toksisitesi ve Bor Toleransı

Şansel BİLDİREN[1], Sezen TOKSOY KÖSEOĞLU[2], Ali DOĞRU[3*]

[1]Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce
[2,3]Sakarya Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 54187, Sakarya

[1]https://orcid.org/0000-0001-8110-8280
[2]https://orcid.org/0000-0002-1564-9465
[3]https://orcid.org/0000-0003-0060-4691
*Sorumlu yazar: adogru@sakarya.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 06.03.2025
Kabul tarihi: 04.07.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Bor
Hücre çeperi
Plazma zarı
Bor toleransı
Bor toksisitesi

ÖZ

Bor periyodik tablonun 3A grubunda bulunan ve metaloid olarak kabul edilen bir elementtir. Bor doğada oksijenle birleşmiş olarak boratlar ve daha seyrek olarak borik asit veya florin ile bileşik oluşturmuş halde bulunur. Bor bitkilerde normal büyüme ve gelişme için gereksinim duyulan bir mikroelementtir. Borun bitkilerde karbohidrat metabolizması, hücre çeperi sentezi, plazma membranının bütünlüğünün ve fonksiyonunun sürekliliği, nükleik asit, azot, fenolik madde ve oksin metabolizması, polen tüpü oluşumu, askorbat-glutatyon döngüsü ve fotosentez gibi konularda önemli fonksiyonları vardır. Ancak toprakta aşırı miktarda borun bulunması hücresel metabolizmada bozukluklara neden olabilir. Bor toksisitesinin bitkilerdeki primer fenotipik etkisi kök büyümesinin inhibisyonu ve kök kuru ağırlığının azalmasıdır. Ayrıca bor toksisitesi tarımsal öneme sahip olan bitkilerde oksidatif strese neden olur ve fotosentetik aktiviteyi azaltabilir. Bitkilerdeki bor tolerans mekanizması oldukça karmaşıktır ve henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Borun toprakdan suyla süzülerek uzaklaştırılması ve boru inaktif veya hareketsiz hale getirmek için yapılan uygulamalar uzun süre bor toksisitesini engellemek amacıyla kullanılmıştır. Ancak bu konudaki en gerçekçi yaklaşım tarımsal üretimi artırmak amacıyla bora toleranslı bitki genotiplerinin seleksiyonudur. Bu çalışmada borun bitkilerdeki fizyolojik fonksiyonları, bor toksisitesi semptomları ve tolerans mekanizmaları tartışılmıştır.

Boron Toxicity and Boron Tolerance in Plants

Reviews

Article History:
Received: 06.03.2025
Accepted: 04.07.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Boron
Cell wall
Plasma membrane
Boron tolerance
Boron toxicity

ABSTRACT

Boron is an element that is considered as a metalloid and belongs to the third A group in the periodic table. It occurs in nature in combination with oxygen as borates and less frequently boric acid or associated with fluorine. Boron is a micronutrient for plants necessary for normal growth and development. It has very important functions including carbohydrate metabolism, cell wall synthesis, the maintanence of plasma membrane integrity and functions, nucleic acid, nitrogen, phenolic and auxine metabolism, polen tube formation, ascorbate-glutathione cycle and photosynthesis. However, cellular metabolism could be impaired as a result of excess boron in soil. The primary phenotypic effect of boron toxicity is the inhibition of root growth and decreased dry weight of roots. In addition, boron toxicity could cause oxidative stress and lower photosynthetic activity in crop plants. The mechanism of boron tolerance in plants is very complex and has not been yet understood in details. Soil amendments such as leaching boron with water and application of some organic compounds to inactivate or immobilize

boron in soils has been used to solve boron toxicity in plants for many years. However, it appears that the most realistic way to improve crop yield is the selection of boron-tolerant genotypes. In this review, the physiological functions of boron in plants, toxicity symptoms and tolerance mechanisms has been discussed.

To Cite: Bildiren Ş., Toksoy Köseoğlu S., Doğru A. Bitkilerde Bor Toksisitesi ve Bor Toleransı. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 523-543.

1. Giriş

Periyodik tablonun 3A grubunda bulunan bor, metallerle ametaller arasında özelliklere sahiptir ve bir metalloid olarak kabul edilir. Küçük bir atom çapına, üç tane valens elektronuna ve yüksek bir iyonizasyon enerjisine sahip olması nedeniyle kompleks bir kimyasal yapıya sahiptir. Borun p orbitali boştur ve B^{+3} durumunda bulunur. Daha elektronegatif elementlerle bağ yaptığı için +3 yüklüdür. Bor ayrıca katyonik değil daha çok anyonik kompleksler oluşturma eğilimindedir (Xu ve ark., 2023).

Bor yeryüzünde elementel formda bulunmaz. Doğada oksijenle birleşmiş olarak boratlar (boraks; $Na_2B_4O_7.10H_2O$), borik asit (H_3BO_3) ve daha nadir olarak florür anyonu (BF_4^-) olarak bulunur. Bitki ve hayvan hücrelerinde pH değerinin 7,5 olduğu hücresel yapılarda ise borun %99,95'inden fazlası H_3BO_3 formunda bulunmaktadır (Kumar ve ark., 2022).

Hem borik asit hem de borat birçok farklı moleküle kolayca reaksiyona girebilir (Petersson ve Jonsson, 2024). Bor özellikle mono-, di- ve polihidroksil bileşikleri ile esterler ve kompleksler oluşturabilir. Borik asit riboz, apioz, mannitol, mannan ve polimannuronik asit gibi furanoid halkası içeren birçok şekerle bağ yapabilir (Chen ve ark., 2022). Bu şekerlerden riboz RNA'nın diğerleri ise hücre çeperinin yapısında bulunur. Yapılan bir çalışmada boratın *Arabidopsis thaliana*'da normal yaprak gelişimi için gerekli olan ve hücre çeperi yapısında bulunan ramnogalakturonan II'nin apioz rezidüsüne çapraz olarak bağlandığı ortaya çıkarılmıştır (O'Neill ve ark., 2004). Ancak borun ribonükleotidlerle kompleksler oluşturduğu ve bor toksisitesinin temelinde yatan sebebin bu reaksiyon olduğu ileri sürülmüştür (Bolanos ve ark., 2023). Borik asit ayrıca organik cis-dioller ile ve dikotil bitkilerde lignin biyosentezinin önemli öncü maddelerinden olan kafeik asit ve hidroksiferulik asit gibi bazı orto-difenollerle reaksiyona girerek stabil boratları da oluşturabilir (Bolanos ve ark., 2004). Borun şekerlerle ve organik cis-diollerle oluşturduğu bu kompleks bileşikler canlılık için oldukça önemlidir. Çünkü bu moleküllerin borla stabilizasyonu, genetik moleküllerin olumsuz koşullar altında termal ve kimyasal stabilitesini artırıcı etkiye sahiptir (Grew ve ark., 2011). Ayrıca birçok biyolojik molekülün yapısındaki hidroksil gruplarının varlığı farklı bor komplekslerinin oluşumuna ve parçalanmasına neden olur. Bu reaksiyonlar pH değerine bağlı olarak oldukça hızlı bir şekilde meydana gelir (Petersson ve Jonsson, 2024). Bu tip bileşiklerin stabilitesi bor komplekslerinin yapısındaki moleküler gruplara bağlıdır. Örneğin bir koenzim olan NAD^+, indirgenmiş formu olan NADH ile karşılaştırıldığında daha stabil borat kompleksleri oluşturma yeteneğine sahiptir (Bita ve ark., 2023). Bu durum bazı enzimatik reaksiyonları dolaylı olarak etkiler ve metabolik anormalliklere yol açar (Wimmer ve ark., 2003).

Topraktaki bor konsantrasyonu 1 mg/kg' yi aştığında bitkilerde bor toksisitesi belirtilerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir (Liu ve ark., 2017). Yüksek buharlaşma hızı, bor içeren gübrelerin yoğun bir şekilde kullanılması ve tuz stresi kurak ve yarı kurak bölgelerde topraktaki bor konsantrasyonunun artmasına yol açmaktadır (Corwin, 2021). Bor toksisitesinin yapraklarda kloroz ve nekroz olaylarının yanı sıra; kök, gövde ve yapraklarda büyümenin ve kuru madde birikiminin inhibisyonuna yol açarak verimi azalttığı rapor edilmiştir (Garcia-Sanchez ve ark., 2020). Ayrıca bor toksisitesi altındaki bitkilerde klorofil miktarının, fotosentetik elektron taşınım ve CO_2 fiksasyon reaksiyonlarının etkinliğinin, çözünür karbohidratların yapraklardan gövdeye taşınımının, çeşitli mineral maddelerin alınım, taşınım ve kullanımının ve bazı enzimlerin aktivitelerinin olumsuz yönde etkilendiği; lipid peroksidasyonunun artması ile ortaya çıkan oksidatif stres nedeniyle hücre ve doku ölümlerinin görülebileceği ortaya çıkarılmıştır (Flores ve ark., 2017; Naeem ve ark., 2018; Andreon Viçosi ve ark., 2020; Huo ve ark., 2022; Qin ve ark., 2022).

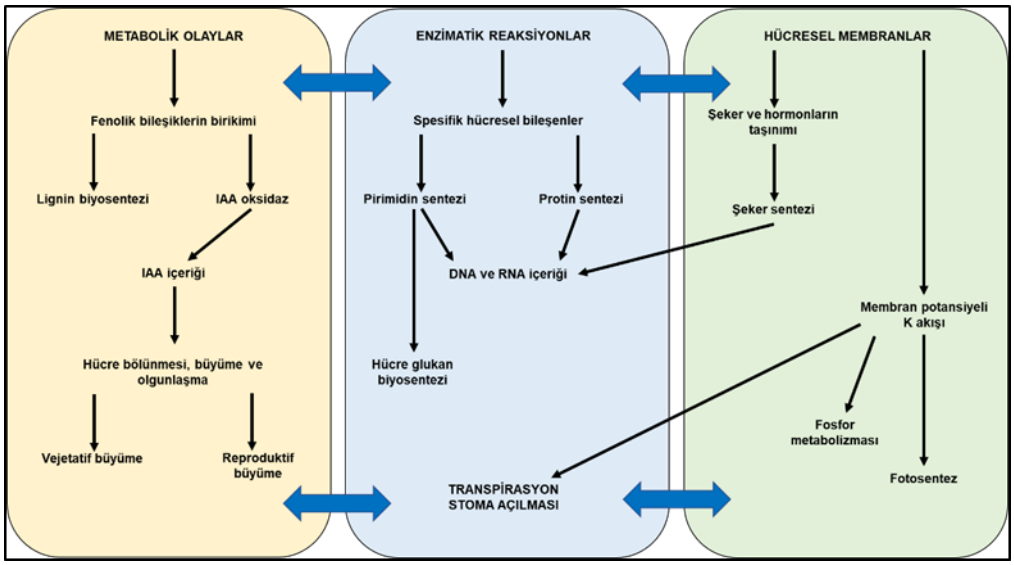
Bitkilerde bor toleransı sağlayan çeşitli mekanizmaların varlığı ortaya çıkarılmıştır. Bunlardan birisi borla bazı mineral maddeler arasında topraktan alınım bakımından var olan antogonistik etkileşimdir. Yapılan çalışmalar toprakta yeterli miktarda ve alınabilir nitelikte bulunan fosfor, kükürt, molibden, azot, silisyum, bakır ve alüminyumun köklerle alınan bor miktarı üzerinde düzenleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Hua ve ark., 2021). Bazı bitki türlerinde dokulardaki yüksek şeker alkol, mannitol, sorbitol ve antosiyanin içeriği ile bor toleransı srasında pozitif bir korelasyonun bulunduğu bildirilmiştir. Bunlardan şeker alkollerin dokulardaki borla toksik olmayan ve hareketsiz bileşikler oluşturarak, mannitol ve sorbitol gibi poliollerin borun floemde tutulmasını sağlayarak, antosiyaninlerin ise şelasyon mekanizması ile boru bağlayarak bitkilerde bor toleransı sağladığı bildirilmiştir (Tanaka ve Fujiwara, 2008; Landi ve ark., 2014; Papadakis ve ark., 2018). Aftab ve ark. (2011) ise bazı bitki türlerinde gözlenen bor toleransının, borun köklerde tutularak toprak üstü organlara taşınımının büyük oranda engellenmesi olduğunu rapor etmişlerdir. Bunun dışında yüksek bor konsantrasyonlarına maruz kalan bitkilerde antioksidant sistemin etkinliğinde meydana gelen artışın da bor toleransına katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Hua ve ark., 2021).

Bu derlemede, borun bitkilerdeki temel fonksiyonları, toksisite semptomları ve tolerans mekanizmaları güncel literatür ışığında ele alınarak, tarımsal açıdan uygulanabilir sonuçlara ulaşılması amaçlanmaktadır.

2. Bitkilerde Bor ve Temel İşlevleri

Bor günümüzde normal bitki büyümesi için gerekli olan esansiyel bir mikroelement olarak kabul edilmektedir (Emebiri ve ark., 2009; Bildiren, 2018). Bor gelişmiş bitkilerde şekerlerin taşınımı ve karbohidrat metabolizması, hücre çeperi sentezi ve lignifikasyon, plazma membranının bütünlüğünün ve fonksiyonelliğinin sağlanması, nükleik asit metabolizmasının stimülasyonu, indol-3-asetik asit metabolizması, askorbat-glutatyon döngüsünün fonksiyonelliği, fenolik madde metabolizması, polen tüpü oluşumu, azot metabolizması ve fotosentez gibi süreçler üzerinde önemli etkilere sahiptir (Şekil

1). Ancak borun bitkilerdeki en iyi bilenen yapısal fonksiyonu hücre çeperi ve plazma membranının bütünlüğüne olan katkısıdır (Funakawa ve Miwa, 2015). Borun bitkilerdeki diğer önemli fonksiyonu embriyo oluşumu ve gelişimi üzerindeki etkisidir. Matthes ve Torres-Ruiz (2016), bor eksikliği uygulanan *Arabidopsis thaliana* embriyolarında kök apikal meristem hücrelerinin ilk asimetrik bölünme evresinden hemen önce bozulduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 1. Bor elementinin bitkilerdeki fizyolojik fonksiyonları.

Bitkiler B gereksinimlerine göre dört farklı grup altında toplanmıştır. Bunlar: (1): laktifer (lateks oluşturan) bitkiler, (2): baklagiller, (3): diğer dikotil ve hemen hemen tüm monokotil bitkiler ve (4): neredeyse minimum miktarda bor gereksinimi olan Poaceae (buğdaygiller) familyasına ait olan bitki türleridir (Bonilla ve ark., 2009). Laktifer bitkiler hariç, yüksek konsantrasyonda bora gereksinim duyan diğer bitkilerin hücre çeperlerinde pektinler ve poligalakturanlar gibi cis-diol konfigürasyonuna sahip olan bileşikler bulunur. Bu durum bitki türleri arasında optimum büyüme için bora duyulan gereksinim farklılığını da açıklamaktadır (Kohli ve ark., 2023).

Borun farklı bitki dokularındaki düzeyleri geniş bir dağılım aralığı sergilemektedir; bu dağılım içerisinde reprodüktif organlar genellikle en yüksek bor konsantrasyonuna sahip dokular olarak öne çıkmaktadır. (Hegazi ve ark., 2018). Bitki türleri ve genotipleri arasında da uygun bor konsantrasyonu farklılık gösterir. Örneğin monokotil bitkilerde büyüme için uygun bor konsantrasyonu 1-6 mg kg^{-1} iken bu değer dikotil bitkilerde 20-70 mg kg^{-1}'dir. Ancak optimum bitki büyümesi için gerekli bor konsantrasyonu aralığı oldukça dardır (Archana ve Verma, 2017; Arunkumar ve ark., 2018). Hem bor eksikliği hem de bor toksisitesi bitkilerde ürün miktarı ve kalitesini belirgin şekilde azaltır.

2.1. Hücre Çeperi ve Membranlarında Bor

Bitkilerde bulunan borun yaklaşık %90'ı hücre çeperi bileşenlerinde lokalize olmuştur (Riaz ve ark., 2021). Bu durum borun bitki büyümesi ve gelişmesi boyunca çeper proteinlerinin, pektinlerin ve

prekürsörlerin organizasyonu konusundaki önemini göstermektedir. Yapılan araştırmalar bor eksikliğinin bitkilerde hücre çeperi ve orta lamelin kimyasal kompozisyonunda ve polen tüpü oluşumunda anormalliklere neden olduğunu, kök ve gövdenin apikal meristemlerinde hücre bölünmesini bloke ettiğini ve gelişmekte olan yapraklarla petiollerde kırılganlığı artırdığını ortaya çıkarmıştır (Uluışık ve ark., 2018; Camacho-Cristobal ve ark., 2018).

Borun hücre çeperi organizasyonundaki fonksiyonel rolü ilk olarak turp kök hücre çeperinden bor içeren bir kompleksin izolasyonu ile ortaya çıkarılmış, bu bileşiğin daha sonra bir ramnogalakturonan II polisakkaridi olduğu belirlenmiştir (O'Neill ve ark., 1996). Aynı zamanda 22 farklı bitki türünün hücre çeperinde ramnogalakturonan II-bor kompleksinin varlığı da ortaya çıkarılmıştır (Matoh ve ark., 1996). Bor eksikliği altındaki bitkilerde yeterli miktarda ramnogalakturonan II-bor kompleksi sentezlenemediği ve bu nedenle hücre çeperlerinde daha geniş porların gözlendiği belirlenmiştir. Bor eksikliğine maruz bırakılan bitki hücre çeperlerindeki anormal porların varlığı, çeşitli polimerlerin çeperlere entegrasyonu ve taşınımının bozulmasına yol açmaktadır. Ramnogalakturonan II-bor komplekslerinin hücre çeperlerinin uygun porositesi ve mekanik dayanıklılığı için gerekli olduğu anlaşılmıştır. *Arabidopsis*'in anormal ramnogalakturonan II-bor kompleksi içeriğine sahip *mur1* mutantı ile yapılan bir araştırma, bu kompleksin moleküler seviyede normal yaprak büyümesi için mutlaka gerekli olduğunu göstermiştir (Dannel ve ark., 2002). Farklı bitki türlerinde hücre çeperlerinin ramnogalakturonan II içeriğinin bor gereksinimi ile yakından ilişkili olduğu ve bor eksikliği altındaki bitkilerin çeperlerinde pektik madde üretiminin yavaşladığı bildirilmiştir (Reid ve ark., 2004). Yapılan diğer bir araştırma sonucunda ramnogalakturonan II sentezinin ve boratla çapraz bağlanma sonucunda kompleks oluşumunun enzimatik olarak gerçekleştiği ve bu konuda bor taşıyıcıları gibi düzenleyici yapıların da etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır (Begum ve Fry, 2023).

Birçok araştırıcı borun plazma membranı için yapısal bir öneme sahip olduğunu ileri sürmüştür (Vera-Maldonado ve ark., 2024). Borun iyon alınımı ve ferrisiyanide bağlı proton salınımını stimüle ederek plazma membranını etkilediği belirlenmiştir (Aftab ve ark., 2022). Bor eksikliğinin çeşitli bitki türlerinde birçok makro ve mikroelementin köklerle alınımını olumsuz etkilediği ancak bor uygulamasının mineral alınımını artırdığı ortaya çıkarılmıştır (Long ve Peng, 2023). Bor eksikliği ve toksisitesi ATP'ye bağımlı proton salınımını ve vanadata duyarlı ATPaz aktivitesini inhibe etmektedir (de Souza ve ark., 2022). Bu sonuçlar borun membran bileşenlerini stabilize etmenin yanı sıra fonksiyonlarını regüle ettiğini de göstermektedir.

Bor aynı zamanda glukosilfosfatidil inositol proteinlerine bağlanabildiği için sinyal iletim mekanizması ile ilgili fonksiyonlara sahip olan membran kümelerinin yapısında da bulunur. Bu membran kümeleri yüksek miktarda glikolipid ve glikoprotein içerir ve önemli miktarda bor kompleksinin oluşabileceği bölgelerdir. Aynı zamanda borun bağlanabileceği galaktoz ve mannoz gibi şekerlerle serin ve tirozin gibi aminoaistleri içerir. Bu nedenle bor bu tip membran kümelerinin yapısal bütünlüğü, stabilitesi ve fonksiyonu için oldukça önemlidir (Voxeur ve Fry, 2014).

2.2. Bir Sinyal Bileşeni Olarak Bor

Bitkilerin mineral madde eksikliklerini algılaması ve bununla ilgili sinyal iletim mekanizmaları hakkında yeterince bilgi bulunmasına rağmen, bor gibi birçok mikroelement için bu konudaki bilgiler sınırlıdır. Günümüzde bitki gelişimi bakımından geçerli olan çok sayıdaki belirleyici mekanizmanın kısa süreli bor eksikliğine nasıl cevap verdiği tam olarak bilinmemektedir. Borun çevresel koşullarda meydana gelen değişimlerin algılanmasını sağlayan bir sinyal molekülü olarak rol oynadığı ilk olarak bakterilerde belirlenmiş, bitki ve hayvanlarda da benzer bir fonksiyona sahip olabileceği ileri sürülmüştür (Chen ve ark., 2002). Bor konsantrasyonunda meydana gelen değişimlerin bitki hücrelerindeki sinyal iletim mekanizmalarını nasıl tetiklediği ve daha sonra membrana bağlı proteinlerin konformasyonlarını nasıl değiştirdiği kısmen açıklanmış olmasına rağmen borun bir sinyal molekülü olarak rolü tam olarak açıklanamamıştır (Goldbach ve Wimmer, 2007). Bor eksikliğine maruz bırakılan *Arabidopsis* ve mısır bitkilerinin kök hücrelerinin membranlarındaki aktin ve tübülin proteinlerinin miktarlarındaki artış borun sinyal iletimindeki rolünü ispatlamaktadır. Bu artışın daha sonra hücrelerdeki polimerizasyon modellerini ve hücre iskeletinin şekillenme tarzını değiştirdiği de belirlenmiştir (Shi ve ark., 2023). Bor eksikliğinin bitkilerde bor absorbsiyonu için gerekli bir proteini kodlayan *NIP1;5* geninin ekspresyonunu artırdığı ve böylece hücre çeperinden sitoplazmaya kadar uzanan bir sinyal iletim mekanizmasının aktive olduğu da ortaya çıkarılmıştır (Kobayashi ve ark., 2004; Takano ve ark., 2006). Borun muhtemel bir sinyal molekülü olarak sahip olduğu rol bazı araştırıcılar tarafından borun transkripsiyon faktörleri ile doğrudan ya da dolaylı etkileşimine bağlanmıştır (Gonzalez-Fontes ve ark., 2008). Hedef gene ve transkripsiyon faktörlerinin tipine bağlı olarak bor kompleksleri birçok genin ekspresyonunu regüle etmektedir. Bu da borun bitki metabolizmasında etkili olduğu olayların çeşitliliğinin neden bu kadar fazla olduğunu açıklamaktadır.

3. Bitkilerde Bor Toksisitesi

Bir bileşiğin canlı organizmalara zarar verme derecesi toksisite veya toksik etki olarak bilinmektedir. Canlılarda herhangi bir bileşiğin toksik etkisi konsantrasyona bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun dışında toksik bir bileşiğin olumsuz etkisi bir organizmanın sadece belirli bir dokusu ve organı üzerinde gözlenebileceği gibi tüm organizma üzerinde de ortaya çıkabilir.

Bitkilerde bor toksisitesi, toprak ve bitkilerin toprak üstü organlarındaki bor konsantrasyonu belli bir eşik değerini aştığı zaman ortay çıkmaktadır. Örneğin yapılan bir araştırmada bor toksisitesinin ortaya çıkması bakımından topraktaki kritik bor konsantrasyonunun 5 mg/kg olduğu bildirilmiştir (Güneş ve ark., 2017). Sulu tarımın yapıldığı bölgelerde 1 mg/L'den daha fazla miktarda bor içeren sulama suyunun sürekli kullanımı bor gereksinimi yüksek olan bitki türlerinde bile bor toksisitesine yol açabilmektedir. Buna göre sulama sularında bitkilerde bor toksisitesine neden olmayan bor konsantrasyonunun 0,3-4 mg/L arasında olması gerektiği bildirilmiştir (Nable ve ark., 1997). Yapraklarda da bor konsantrasyonunun belirli bir değerin üzerine çıkması bor toksisitesi ile ilgili

belirtilerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu değer tahıllar için 50 mg/kg, bor gereksinimi yüksek olan bitkiler için 250 mg/kg olarak belirtilmiştir (Güneş ve ark., 2017).

Karasal ve sucul ortamlarda gözlenen bor kontaminasyonunun çok farklı sebepleri vardır. Örneğin Arjantin, Şili, Rusya, Çin, Peru, Türkiye ve ABD gibi ülkelerin kurak bölgelerindeki topraklarda iklime bağlı sınırlı yağışlardan dolayı bor konsantrasyonu yüksektir (Helvacı, 2021). Bor, litosferde yaygın olarak bulunur ancak özellikle kil bakımından zengin olan kayalarda ve topraklarda bulunur (Hilal ve ark., 2011). Yer kabuğunda bulunan ve sayısı 200'den fazla olan bor bileşiklerinin çözünmesi nedeniyle özellikle volkanik aktivitenin yüksek olduğu bölgelerin topraklarında bor konsantrasyonu yüksektir (Goldbach, 2020). Bor sucul ortamlarda en yaygın olarak bulunan 10. elementtir. Örneğin Baltık Denizi ve Akdeniz'deki bor konsantrasyonunun sırasıyla 0,52 ve 9,57 mg/L olduğu belirtilmiştir. Bunun dışında yeraltı suları ve buz kütleleri gibi diğer hidrolojik kaynaklar da belli oranda bor içermektedir. Bu faktörlerle birlikte hidrotermal aktivite, fiziksel ve kimyasal yıkanma, yağmur ve ırmaklar yeryüzündeki karasal ve sucul alanlarda bor konsantrasyonunun artmasına neden olan jeogenik etkenler arasında yer almaktadır (Bolan ve ark., 2023). Doğadaki bor kontaminasyonunun diğer nedeni ise antropojenik aktivitelerdir. Özdemir ve Kıpçak (2010) dünyadaki yıllık bor tüketiminin 1,5 milyon tondan fazla olduğunu rapor etmişlerdir. Bunun en belirgin sebebi; deterjan, gübre, çelik, seramik, ilaç ve kozmetik endüstrisinin yanı sıra; ısıya dayanıklı çeşitli ürünlerin, korozyon önleyici malzemelerin ve nükleer santrallerde nötron emici malzemelerin üretiminde borun geniş bir kullanım alanına sahip olmasıdır (Hosmane, 2012). Bu tip aktiviteler sonucunda oluşan ve bor bakımından zengin olan atık suların doğaya kontamine olması karasal ve sucul alanlarda bor konsantrasyonunun artmasına yol açmaktadır (Pye ve ark., 2012).

Bitkilerde bor toksisistesi ile ilgili mekanizma henüz tam olarak aydınlatılamamıştır (Zhao ve ark., 2024). Ancak borun hidroksil grubu içeren bileşiklere bağlanma yeteneği düşünüldüğünde, riboz şekeri borla ilgili toksisite etkilerinin ortaya çıkmasında rol oynayan muhtemel bir adaydır. Bor özellikle ATP, NADH ve NADPH gibi moleküllerin yapısındaki hidroksil gruplarına bağlanabilir. Ancak hem fotosentez hem de solunum olayının çok yüksek bor konsantrasyonlarına bile dayanıklı olması nedeniyle borun enerji taşıyan moleküllere bağlanmasının bor toksisitesinin asıl sebebi olamayacağı düşünülmektedir (Reid ve ark., 2004). Yapılan bir çalışmada *Arabidopsis* bitkisinden elde edilen bazı ribozomal proteinlerin ve transkripsiyon faktörlerinin mantarlarda borun bağlanmasını engelleyerek bor toleransı sağladığı belirlenmiştir (Nozawa ve ark., 2006).

3.1. Bor Toksisitesi Belirtileri

Bor toksisitesi belirtileri bitki türleri arasında farklılık göstermektedir ve hem bazı bitki hastalıklarının hem de diğer mikroelementlerin toksisite belirtileri ile karıştırılmaktadır. Ancak bor toksisitesinin en belirgin etkileri yaşlı yapraklarda sararma, beneklenme ve yaprak uçlarının kurumaya başlaması şeklinde gözlenmektedir. Dikotil bitkilerde bor toksisitesinin ilk etkileri yaprak kenarlarında, buğday ve arpa gibi monokotil bitkilerde ise iletim demetlerinin sonlandığı yaprak uçlarında görülür

(Chatzistathis ve ark., 2021). Bu nedenle yapraklarda yanma ve nekrotik alanların oluşumu birçok bitki türünde bor toksisitesinin değerlendirilmesinde kullanılır (Sutton ve ark., 2007). Bor toksisitesi için spesifik olan diğer bir semptom ise yaprak alanının azalması ve yaprağın orta kısmının çukurlaşmasıdır (Huo ve ark., 2022). Bu durum muhtemelen bor toksisitesi nedeniyle ortaya çıkan çeper büyümesinin inhibisyonu ile ilgilidir. Bor toksisitesinin farklı bitki türlerinde antosiyanin, prolin ve süperoksit radikali birikimine ve fotosentetik pigment miktarında azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Estevez ve ark., 2021; Hua ve ark., 2021; Kohnehsharhi ve Demir, 2023). *Prunus*, *Malus* ve *Pyrus* gibi genuslara ait türlerde bor toksisitesi sonucunda meyvelerde gelişimsel bozukluklar (meyve sayısının, büyüklüğünün ve ağırlığının azalması gibi), kambiyal dokuların ölmesi ve kabuk nekrozu gibi semptomlar gözlenmektedir (Cervilla ve ark., 2012; Yang ve ark., 2022). Bunun dışında bitkilerde yapraklardaki bor konsantrasyonu ile toksisite semptomlarının şiddeti arasında da doğrudan bir ilişkinin varlığı belirlenmiştir. Bu nedenle bor toksisitesinin teşhisi için gövdelerden ziyade yapraklardaki bor miktarında meydana gelen değişimler kullanılmaktadır.

3.2. Bor Toksisitesi ve Kök Sistemi

Bor toksisitesinin kökler üzerindeki en belirgin fenotipik etkisi kök büyümesinin inhibisyonu, kök kuru ağırlığının azalması ve köklerdeki bor miktarında gözlenen artıştır (Turan ve ark., 2009). Bor toksisitesi altındaki domates, buğday ve üzüm gibi bitkilerde kök büyümesinin belli oranda inhibe edildiği belirlenmiştir (Güneş ve ark., 2006; Cervilla ve ark., 2009; Turan ve ark., 2009). Yapılan araştırmalar bor toksisitesinin kiraz bitkisinin kök meristemlerinde anormal hücre bölünmelerine, soya köklerinde ise hem hipodermis oluşumuna hem de kortikal hücre çeperlerinde süberin birikimine neden olduğunu göstermiştir (Pereira ve ark., 2021; Arredondo ve Bonomelli, 2023; Zimicz ve ark., 2023). Ancak lignifikasyon olayının domates bitkisinde borun neden olduğu kök büyümesi inhibisyonu ile ilgili olmadığı belirlenmiştir (Cervilla ve ark., 2009). Buğdayda yapılan bir çalışmada yüksek bor konsantrasyonlarının kök ucunda büyümeyi inhibe ederken, olgun kök zonlarında böyle bir cevabın oluşmadığı gözlenmiştir (Reid ve ark., 2004). Bu sonuç bor toksisitesi altındaki bitkilerde kök büyümesindeki inhibisyonun lokalize olmuş bir cevap olduğunu göstermektedir. Ayrıca bor toksisitesinin kök uçlarındaki mitoz bölünme üzerinde kolşisin benzeri sitotoksik bir etki yaparak kromozomlarda köprü oluşumu, fragmentasyon, yapışma ve mikronukleus oluşumuna yol açtığı belirlenmiştir (Zhang ve ark., 2024).

Bor toksisitesinin kök büyümesi üzerindeki inhibe edici etkisi *Arabidopsis* bitkisinde moleküler seviyede de araştırılmıştır (Aquea ve ark., 2012). Bu çalışmada bor toksisitesinin absisik asit sinyal mekanizması, absisik asit cevapları ve hücre çeperi modifikasyonları ile ilgili bazı genlerin ekspresyonunu indüklediği ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bor toksisitesinin bitkilerde su taşıyıcı proteinleri kodlayan genlerin ekspresyonunu baskılayarak kuraklığa ve sonuçta kök büyümesinin inhibisyonuna neden olduğu da gözlenmiştir. Arpa bitkisinde bor toleransının köklerdeki morfolojik değişimlerle ilgili olduğu, bor toksisitesine toleranslı olan genotiplerde köklerdeki dallanmanın arttığı

ve daha ince köklerin oluştuğu, böylece toprakla daha fazla etkileşimin sağlanarak su alınımının arttığı belirlenmiştir (Choi ve ark., 2007).

3.3. Bor Toksisitesi ve Fotosentez

Yüksek bor konsantrasyonları, etki mekanizması tam olarak bilinmemesine rağmen, fotosentezi olumsuz yönde etkilemektedir. Bor toksisitesi altındaki bitkilerde yaprakların kenarları ölür. Böylece fotosentetik alan, klorofil miktarı ve sonuçta fotosentetik aktivite azalmaktadır (Chen ve ark., 2013; Naeem ve ark., 2018; Huo ve ark., 2022). Ancak arpa bitkisinde fotosentez olayının bor toksisitesine duyarlı olmadığı rapor edilmiştir (Reid ve ark., 2004). *Cucumis sativus* ve *Cucurbita pepo* bitkilerinde ise bor toksisitesi klorofil a/b oranını ve fotosistem II'nin fotokimyasal aktivitesini azaltmıştır (Landi ve ark., 2013). Birçok bitki türünde bor toksisitesi fotosistem II'nin maksimum kuantum etkinliğini (Fv/Fm) azaltmaktadır. Bu sonuç bor toksisitesinin bitkilerde fotoinhibisyona yol açtığını ve buna bağlı olarak hem aktif oksijen türlerinin (AOT) oluştuğunu hem de klorofil miktarının azalmasına neden olduğunu göstermektedir (Karabal ve ark., 2003; Naeem ve ark., 2018). Ayrıca yüksek bor konsantrasyonlarına maruz bırakılan bitkilerde fotosentetik elektron taşınımının yavaşlamasına paralel olarak CO_2 asimilasyonunda rol oynayan bazı enzimlerin aktivitelerinde azalma, ATP ve NADPH kullanımında yavaşlama gözlenmiştir (Naeem ve ark., 2018). Ayrıca yapılan proteomik çalışmalar, bor toksisitesi altındaki bitkilerde fotosentezin elektron taşınım ve CO_2 fiksasyon reaksiyonları ile ilgili bazı proteinlerin olumsuz etkilendiğini göstermiştir (Chen ve ark., 2013).

3.4. Bor Toksisitesi ve Antioksidant Sistem

Abiyotik stres faktörleri genellikle bitkilerde süperoksit radikali, hidrojen peroksit ve hidroksil radikali gibi AOT'lerin birikimi ile karakterize edilen oksidatif stresi tetiklemektedir (Liu ve ark., 2024). Bu AOT'ler de protein, nükleik asit ve lipidlerde yapısal hasarlara ve en sonunda hücre ölümlerine yol açmaktadır. Yüksek bor konsantrasyonlarının da arpa, üzüm ve *Artemisia annua* gibi bitkilerde hidrojen peroksit birikimi ve lipid peroksidasyonu gibi olaylara yol açarak oksidatif hasara neden olduğu belirlenmiştir (Güneş ve ark., 2006; Aftab ve ark., 2012; Çatav ve ark., 2023). Askorbik asit ve glutatyon gibi antioksidant moleküllerle süperoksit dismutaz, katalaz ve askorbat peroksidaz gibi antioksidant enzimlerin AOT'lere karşı önemli bir savunma oluşturduğu bilinmektedir (Aftab ve ark., 2011; Hossain ve ark., 2015). Bu nedenle bor toksisitesi altındaki birçok bitkide antioksidant sistemle ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Bor toksisitesinin bazı *Citrus* türlerinde tokoferol oluşumunu inhibe ettiği; askorbik asit, glukoz ve fruktoz birikimini ise indüklediği rapor edilmiştir (Keleş ve ark., 2004). Ayrıca iki farklı *Citrus* türünde (*Citrus sinensis* ve *Citrus grandis*) yapılan bir araştırmada bor toksisitesinin fotosentez, enerji metabolizması, antioksidant sistem, detoksifikasyon, proteolizis ve hücresel taşınımla ilgili bazı proteinlerin miktarını farklı derecede artırdığı belirlenmiştir (Sang ve ark., 2015). Elmada da artan bor konsantrasyonlarının kültür ortamında askorbik asit ve glutatyon birikimini hızlandırdığı ortaya çıkarılmıştır. Aynı çalışmada araştırıcılar AOT detoksifikasyonu için

önemli olan prolin miktarındaki azalmanın bor toksisitesi altında lipid peroksidasyonunun artmasına neden olabileceği bildirilmiştir (Molassiotis ve ark., 2006). Bor toksisitesine toleranslı olan *Cicer arietinum* ve *Ocimium basilicum* genotiplerinde bor stresinin antioksidant etkinliği artırdığı belirlenmiştir (Landi ve ark., 2013; Sarı, 2023).

3.5. Bor Toksisitesi ve Azot Metabolizması

Bitkiler aminoasit, protein, nükleik asit ve sekonder metabolit sentezi için çok miktarda azota gereksinim duymaktadır. Tarımsal topraklarda nitrat azotun dominant formudur ve bitki büyümesi için oldukça önemlidir (Ye ve ark., 2022). Bitkiler nitratı kökleri vasıtasıyla aldıktan sonra nitrat redüktaz enziminin katalizlediği bir reaksiyonla nitrite dönüştürür. Bu reaksiyon nitrat asimilasyonunun ilk basamağını oluşturur. Nitrit daha sonra nitrit redüktaz enziminin katalizlediği diğer bir reaksiyonla amonyum iyonlarına dönüştürülür ve aminoasit biyosentezi için karbon iskeletine ilave edilir. Bor toksisitesi birçok bitkide azot metabolizmasını etkilemektedir. Örneğin bor toksisitesi altındaki pirinç bitkisinin yapraklarında hem nitrat redüktaz hem de nitrit redüktaz aktivitesi azalmaktadır (Zhang ve ark., 2024). Domates bitkisinde ise bor toksisitesinin glutamin sentaz, glutamat sentaz ve glutamat dehidrogenaz aktivitesini artırdığı; nitrat redüktaz ve nitrit redüktaz aktivitesini ise azalttığı belirlenmiştir (Cervilla ve ark., 2009). Bu sonuçlar bor toksisitesinin domates bitkisinde nitrat redüksiyonunu inhibe ettiğini, amonyum asimilasyonunu ise stimüle ettiğini göstermektedir. Bunun dışında yüksek bor konsantrasyonunun bitkilerde köklerin nitrat alınımını etkilediği de belirlenmiştir. Yapılan bir çalışmada azot gübrelemesinin bitkilerde bor toksisitesinin olumsuz etkilerini belli oranda azalttığı gözlenmiştir. Örneğin bor toksisitesi altındaki mercimek ve arpada amonyum gübrelemesinin, nitrat ve üre uygulaması ile karşılaştırıldığında, daha az oksidatif hasara ve ürün kaybına neden olduğu rapor edilmiştir (Tepe ve Aydemir, 2011).

3.6. Bor Toksisitesi ve Karbohidrat Metabolizması

Bor toksisitesi de dahil bitkilerde birçok çevresel stres faktörü altında dokulardaki sükroz miktarının değişim gösterdiği belirlenmiştir (Rosa ve ark., 2009). Bor stresinin bitkilerdeki glikozid sentezini farklı şekilde etkilediği rapor edilmiştir. Örneğin bor toksisitesi altındaki marul bitkisinin yapraklarında glukoz miktarı azalmıştır (Ouzounidou ve ark., 2013). Ayrıca yüksek bor konsantrasyonlarının *Spirodela polyrhiza'*da nişasta birikimini, biber bitkisinin yapraklarında ise indirgen şeker miktarını artırdığı ortaya konulmuştur (Çatav ve ark., 2022; Pagliuso ve ark., 2023). Bor toksisitesine toleranslı olan arpa genotipinin kök uçlarında hem invertaz aktivitesinin hem de indirgen şeker, glukoz ve fruktoz miktarının eş zamanlı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir (Singh ve ark., 2021). Karbohidrat metabolizmasında gözlenen bu değişim bor toksisitesi altındaki bitkilerde kök büyümesinin devam etmesini açıklamaktadır (Choi ve ark., 2007).

4. Bitkilerde Bor Toleransı

Topraktaki borun su ile filtre edilmesi ve toprağa boru immobilize edecek veya inaktif hale getirecek organik bileşiklerin verilmesi gibi yöntemler uzun zaman bor toksisitesi problemini çözmek için kullanılmıştır. Ancak bu yaklaşımlar ekonomik ve pratik yöntemler değildir. Ürün miktarı ve kalitesini artırmak için kullanılabilecek en gerçekçi ve etkili metod bor toksisitesine dayanıklı olan bitki tür ve genotiplerinin seçilmesidir. Çünkü birçok bitki türünde yüksek bor konsantrasyonlarına karşı tolerans bakımından genetik bir varyasyonun bulunduğu bilinmektedir (Bogacki ve ark., 2013). Sonuç olarak yüksek bor konsantrasyonlarına sahip topraklarda ürün kayıplarını minimum seviyeye indirmek için toleranslı genotiplerin seçilerek yetiştirilmesi en uygun çözüm yolu olarak değerlendirilmektedir.

4.1. Bitkilerde Bor Tolerans Mekanizmaları

Bitkilerde bor toleransının fizyolojik mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır. Vasküler bitkilerdeki bor toleransı mekanizmaları arasında topraktan bor alınımının ve borun bitki içindeki mobilitesinin sınırlandırılması, borun transpirasyon akımının son bölgesinde biriktirilmesi ve yapraklarda konsantrasyon gradientinin oluşturulması sayılabilir (Reid ve ark., 2004). Bunun dışında bitkilerde bir bor tolerans modeli de oluşturulmuştur. Buna göre bor toleransı için önemli olan bileşenler; bitki hücrelerinde boru bağlayan bileşiklerin varlığı, borun hücre içindeki dağılımının kısıtlanması (kompartımantasyon) ve borun çeşitli taşıyıcılar vasıtasıyla aktif olarak hücre dışına atılmasıdır (Hayes ve Reid, 2004). Ancak bora toleranslı genotiplerde dokulardaki bor miktarının düşük olması dışlayıcı tip borat taşıyıcılarının tolerans konusunda diğer mekanizmalara göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Yapılan araştırmalar bitkilerde bor toleransının temelinde, bor alınımının sınırlandırılması ve köklerden aktif olarak dışarı atılması yoluyla dokulardaki bor konsantrasyonunun sınırlandırılması olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Bitkilerde, topraktaki bor miktarı azaldığı zaman bor alınımının etkili bir şekilde devam etmesini sağlayan *AtBOR1* ve *AtNIP5;1* gibi genlerin varlığı belirlenmiştir (Jothi ve Takano, 2023; Liu ve ark., 2023). Yapılan araştırmalar *AtNIP5;1* geninin transkripsiyonel regülasyonunun ve *AtBOR1* geninin ürünlerinin endositoza uğratılması ve parçalanmasının aşırı bor alınımının kontrol altına alınmasını sağladığını ortaya çıkarmıştır (Takano ve ark., 2002; Takano ve ark., 2006). *AtBOR1* geninin aşırı ekspresyonu bitkilerde bor toksisitesi koşullarında koruma sağlamamaktadır. *AtNIP5;1* genine ait mesajcı RNA'nın bor toksisitesi altındaki bitkilerde parçalanması, *AtNIP5;1* ve *AtBOR1* genlerinin bor toksisitesi ile ilgili bir fonksiyona sahip olmadığını göstermektedir (Takano ve ark., 2005). Yapılan diğer bir araştırmada ise arpa bitkisinde *BOR1* ve *NIP5;1* genlerinin aktivitelerinin bora toleranslı genotiplerin seleksiyonunda bir markör olarak kullanılabileceği ileri sürülmüştür (Miwa ve ark., 2007). Birçok bitki türünde farklı bor taşıyıcı proteinlerin varlığı belirlenmiş ve bunların bor toleransı ile ilgili olabileceği rapor edilmiştir (Tanaka ve ark., 2011).

Arabidopsis genomunda bulunan *AtBOR4* geninin maya hücrelerinde borun dışarıya atılmasını sağlayan bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır (Mishra ve ark., 2015). Yine *Arabidopsis*

bitkisinde kök epiderma hücre membranlarının dış yüzeyinde BOR4 adı verilen bir protein belirlenmiştir. Bu lokalizasyon fazla miktardaki borun hücrelerden dışarı atılmasında etkilidir. *AtBOR4* geninin aşırı ekspresyonunun bor toksisitesi altındaki bitkilerde büyümeyi olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir. Bu sonuç *AtBOR4* geninin, *AtBOR1* geninde olduğu gibi posttranslasyonal bir parçalanmaya uğramadığını ve bor toksisitesine tolerans gelişiminde etkili olabileceğini göstermektedir (Miwa ve ark., 2007; Miwa ve Fujiwara, 2010). *AtBOR4* genini ekspresleyen transgenik pirinç bitkilerinin bora tolerans kazandıkları belirlenmiştir (Miwa ve ark., 2007). Bu çalışmada borun köklerden dış ortama etkili bir şekilde atıldığı, böylece bitki dokularında optimum bor konsantrasyonunun sağlandığı ve bitki büyümesinin olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir. *BOR1* ve *BOR4* genlerinin regülasyonundaki farklılık da bitkilerde bor homeostasisinin sağlanmasında kompleks mekanizmaların varlığını göstermektedir.

Yapılan araştırmalar su ve iyon taşınımında rol oynayan akuaporin izoformlarının bitkilerde birçok abiyotik stres faktörüne tolerans gelişiminde etkili olduğunu göstermiştir (Kajikawa ve ark., 2011). Bir tonoplast akuaporin geni olan *AtTIP5;1* geninin aşırı ekspresyonu ile boratın vakuolde alıkonulması ile ilgili olduğu ve bor toleransının sağlanmasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir (Pang ve ark., 2010). Pirinç bitkisinde yapılan diğer bir çalışmada da iki akuaporin geninin (*OsPIP2;4* ve *OsPIP2;7*) bor geçirgenliği ve bor toleransı ile ilgili olduğu rapor edilmiştir (Kumar ve ark., 2014). Her iki gen de bor toksisitesi koşullarında borun köklerden dış ortama atılmasından sorumludur. Bor toksisistesi bu genlerin ekspresyonunu gövdelerde azaltırken köklerde artırır ve bor toksisitesinden kaçınılmasını sağlamaktadır. *OsPIP2;4* ve *OsPIP2;7* genlerini aşırı derecede ekspresleyen *Arabidopsis* köklerinde bor uygulamasından bir saat sonra köklerden bor atılımının başladığı belirlenmiştir (Kumar ve ark., 2014).

5. Sonuç

Bor gelişmiş bitkilerde büyüme ve gelişme için gerekli bir mikroelement olmasına rağmen duyarlı bitkiler için yüksek konsantrasyonlarda toksik etkiye sahiptir. Az yağış alan bazik ve tuzlu topraklarda, bor bakımından zengin sularla yapılan sulama ve aşırı gübreleme bor toksisitesine neden olur. Bu nedenle kurak ve yarı kurak bölgelerde bor toksisitesi tarımsal açıdan oldukça büyük bir problem oluşturmaktadır. Farklı bitki türleri arasında bor gereksinimi büyük değişiklik göstermektedir. Borun bitkilerdeki eksiklik ve toksisite aralığı diğer mikroelementlerle karşılaştırıldığında daha küçüktür. Bor toksisitesi; hücre bölünmesi, çeper organizasyonu, kök büyümesi, fotosentez, oksidatif stres, karbohidrat ve azot metabolizması gibi birçok metabolik olayı etkilemektedir. Bitkilerde bor toleransı kök ve gövdelerde bor birikiminin sınırlandırılması ile ilgilidir. Bunun dışında bazı iyon taşıyıcıları yardımıyla dokulardaki fazla miktardaki borun köklerden aktif olarak dış ortama atılmasıyla bitki dokularındaki bor homeostasisi sağlanmaktadır. Gelişmiş bitkilerde bor homeostasisinin sağlanmasında fonksiyonel olan birçok gen belirlenmiştir. Yüksek konsantrasyonda bor içeren toprakların remediasyonunu sağlayan bazı fiziksel ve kimyasal yöntemler pratik öneme

sahip değildir. Bitki türleri ve genotipleri arasında bor toksisitesine tolerans bakımından büyük bir genetik varyasyon vardır. Bu nedenle bor toksisitesi ile mücadele konusunda uygulanabilecek en iyi strateji bora toleranslı olan bitki tür ve genotiplerini belirlemektir. Günümüzde bu konuda kullanılabilecek fizyolojik ve biyokimyasal parametrelerin belirlenmesine yönelik araştırmalara ağırlık verilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

Aftab T., Khan MMA., Idrees M., Naeem M., Moinuddin NH. Methyl jasmonate counteracts boron toxicity by preventing oxidative stress and regulating antioxidant enzyme activities and artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L. Protoplasma 2011; 248(3): 601-612.

Aftab T., Khan MMA., Naeem M., Idrees M., da Silva JAT., Ram M. Exogenous nitric oxide donor protects *Artemisia annua* from oxidative stress generated by boron and aluminium toxicity. Ecotoxicology and Environmental Safety 2012; 80: 60-68.

Aftab T., Landi M., Papadakis IE., Araniti F., Brown PH. Boron in plants and agriculture. Academic Press: London; 2022.

Andreon Viçosi K., dos Santos de Carvalho A., Castilho Silva D., de Paula Almeida F., Ribeiro D., Alves Flores R. Foliar fertilization with boron on the growth, physiology, and yield of snap beans. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 2020; 20(3): 917-924.

Aquea F., Federici F., Moscoso C., Vega A., Jullian P., Haseloff J., Arce-Johnson P. A molecular framework for the inhibition of *Arabidopsis* root growth in response to boron toxicity. Plant Cell an Environment 2012; 35: 719-734.

Archana NP., Verma P. Boron deficiency and toxicity and their tolerance in plants: A review. Journal of Global Bioscience 2017; 6: 4958-4965.

Arredondo G., Bonomelli C. Effect of three boron conconcentrations in soil on growth and physiology in sweet cherry trees. Plants 2023; 12(6): 1240.

Arunkumar B., Thippeshappa G., Anjali M., Prashanth K. Boron: A critical micronutrient for crop growth and productivity. Journal of Pharmacognosy Phytochemistry 2018; 7: 2738-2741.

Begum RA., Fry SC. Arabinogalactan-proteins as boron-acting enzymes, cross-linking the rhamnogalacturonan-II domains of pectin. Plants 2023; 12(23): 3921.

Bildiren Ş. Tuz stresi altındaki farklı buğday (*Triticum aestivum* L.) genotiplerinde bor uygulamalarının iyileştirici etkisinin araştırılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:137, Sakarya, Türkiye, 2018.

Bita A., Scorei IR., Ciocilteu MV., Nicolescu OE., Pirvu AS., Bejenaru LE., Rau G., Bejenaru C., Radu A., Neamtu J., Mogoşanu GD., Benner SA. Nicotinamide riboside, a promising vitamin B_3 derivative for healthy aging and longevity: Current research and perspectives. Molecules 2023; 28(16): 6078.

Bogacki P., Peck DM., Nair RM., Klaus JH., Oldach H. Genetic analysis of tolerance to boron toxicity in the legume *Medicago truncatula*. BMC Plant Biology 2013; 13: 54.

Bolan S., Wijesekara H., Amarasiri D., Zhang T., Regalyi P., Brdar-Jokanovic M., Rekasi M., Lin JY., Padhye LP., Zhao H., Wang L., Rinklebe J., Wang H., Siddique KHM., Kirkham MB., Bolan N. Boron contamination and its risk management in terrestrial and aquatic environmental settings. Sceince of the Total Environment 2023; 894: 164744.

Bolanos L., Abreu I., Bonilla I., Cristobal JJC., Reguero M. What can boron deficiency symptoms tell us about its function and regulation? Plants 2023; 12(4): 777.

Bolanos L., Lukaszewski K., Bonilla I., Blevins D. Why boron? Plant Physiology and Biochemistry 2004; 42: 907-912.

Bonilla I., Blevins D., Bolanos L. Boron functions in plants: looking beyond the cell wall. In: Taiz, L., Zeiger, E. (Eds.), Plant Physiology, 4th ed: IOP Publishing; 2009.

Camacho-Cristóbal JJ., Navarro-Gochicoa MT., Rexach J., González Fontes A., Herrera-Rodríguez MB. Plant response to boron deficiency and boron use efficiency in crop plants. Plant micronutrient use efficiency. Elsevier 2018; 109-121.

Cervilla LM., Blasco B., Rios JJ., Rubio-Wilhelmi MM., Sanchez-Rodriguez E., Romero L., Ruiz JM. Response of nitrogen metabolism to boron toxicity in tomato plants. Plant Biology 2009; 11: 671-677.

Cervilla LM., Rosales MA., Rubio-Wilhelmi MM., Sanchez-Rodriguez E., Blasco B., Rios JJ., Romero L., Ruiz JM. Involvement of lignification and membrane permeability in the tomato root response to boron toxicity. Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology 2009; 176(4): 545-552.

Chatzistathis T., Fanourakis D., Aliniaeifard S., Kotsiras A., Delis C., Tsaniklidis G. Leaf age-dependent effects of boron toxicity in two *Cucumis melo* varieties. Agronomy 2021; 11(4): 759.

Chen M., Mishra S., Heckathorn SA., Frantz JM., Krause C. Proteomic analysis of *Arabidopsis thaliana* leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. Journal of Plant Physiology 2013; 171(3–4): 235-242.

Chen X., Schauder S., Potier N., Van Dorsselaer A., Pelczer I., Bassler BL., Hughson FM. Structural identification of a bacterial quorum-sensing signal containing boron. Nature 2002; 415: 545-549.

Chen X., Smith SM., Shabala S., Yu M. Phytohormones in plant responses to boron deficiency and toxicity. Journal of Experimental Botany 2022; 74(3): 743-754.

Choi EY., Kolesik P., Mcneill A., Collins H., Zhang Q., Huynh BL., Graham R., Stangoulis J. The mechanism of boron tolerance for maintenance of root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). Plant Cell and Environment 2007; 30: 984-993.

Corwin D. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. European Journal of Soil Science 2021; 72(2): 842-862.

Çatav ŞS., Çetin E., Vural E., Bürün B. Boron toxicity tolerance in barley may be related to intrinsically higher levels of reactive oxygen species in the shoots. Botanica Serbica 2023; 47(1): 113-124.

Çatav ŞS., Köşkeroğlu S., Tuna AL. Selenium supplementation mitigates boron toxicity induced growth inhibition and oxidative damage in pepper plants. South African Journal of Botany 2022; 146: 375-382.

Dannel F., Pfeffer H., Romheld V. Update on boron in higher plant-uptake, primary translocation and compartmentation. Plant Biology 2002; 4: 193-204.

De Souza LT., Carr NF., Lavres J., Mazzafera P., Favarin JL. Boron deficiency affects ATP hydrolysis of plasma membrane and nutrients uptake in coffee: Consequences for plant growth. Journal of Plant Nutrition 2022; 45(14): 2123-2134.

Emebiri L., Michael P., Moody D. Enhanced tolerance to boron toxicity in two-rowed barley by marker assisted introgression of favorable alleles derived from Sahara 3771. Plant and Soil 2009; 314: 77–85.

Estevez L., Queizan M., Mosquera RA., Guidi L., Lo Piccolo E., Landi M. First characterization of the formation of anthocyanin–Ge and anthocyanin–B complexes through UV–vis spectroscopy and density functional theory quantum chemical calculations. Journal of Agriculture and Food Chemistry 2021; 69: 1272-1282.

Flores R., Silva Junior AR., Damin V., Arruda EM., Prado ER., Araujo CE. Nutrition and production of *Phaseolus vulgaris* (BRS Estilo) following boron application on soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 2017; 48(12): 1409-1416.

Funakawa H., Miwa K. Synthesis of borate cross-linked rhamnogalacturonan II. Frontiers in Plant Science 2015; 6: 223.

Garcia- Sanchez F., Simon-Grao S., Martinez-Nicolas JJ., Alfosea-Simon M., Liu C., Chatzissavvidis C., Camara-Zapata JM. Multiple stresses occuring with boron toxicity and deficiency in plants. Journal of Hazardous Materials 2020; 397: 122713.

Goldbach HE., Wimmer M. Boron in plants and animals: Is there a role beyond cell-wall structure? Journal of Plant Nutrition and Soil Science 2007; 170: 39-48.

Goldbach HE. Advances in understanding boron cycling in soils, uptake/use by plants and ways of optimizing boron use efficiency in crop production. In: Rengel Z. (ed.) Achieving Sustainable Crop Nutrition. London: Burleigh Dodds Science Publishing 2020; 355-406.

Gonzalez-Fontes A., Rexach J., Navarro-Gochicoa MT., Herrera-Rodriguez MB., Beato VM., Maldonado JM., Camacho-Cristobal JJ. Is boron involved solely in structural roles in vascular plants? Plant Signaling and Behavior 2008; 3: 24-26.

Grew ES., Bada JL., Hazen RM. Borate minerals and origin of the RNA World. Origins of Life and Evolution of Biosphere 2011; 41: 307-316.

Güneş A., Söylemezoğlu G., İnal A., Bağcı EG., Çoban S., Şahin O. Antioxidant and stomatal responses of grapevine (*Vitis vinifera* L.) to boron toxicity. Scientia Horticulturae 2006; 110: 279-284.

Güneş A., Gezgin S., Kalınbacak K., Özcan H., Çakmak İ. Bor elementinin bitkiler için önemi. Bor Dergisi 2017; 2(3): 168-174.

Hayes JE., Reid RJ. Boron tolerance in barley is mediated by efflux of boron from the roots. Plant Physiology 2004; 136: 3376-3382s.

Hegazi E., El-Motaium R., Yehia T., Hashim M. Effect of foliar boron application on boron, chlorophyll, phenol, sugars and hormones concentration of olive (*Olea europaea* L.) buds, leaves, and fruits. Journal of Plant Nutrition 2018; 41: 749-765.

Helvacı C. Borates. In: Alderton D., Elias SA. (eds.) Encyclopedia of Geology. United Kingdom: Academic Press 2021; 489-504.

Hilal N., Kim GJ., Somerfield C. Boron removal from saline water: a comprehensive review. Desalination 2011; 273: 23-35.

Hosmane NS. Boron science. New Technologies and Applications. Boca Raton: CRC Press 2012.

Hossain MF., Shenggang P., Meiyang D., Zhaowen M., Karbo MB., Bano A., Xiangru T. Photosynthesis and antioxidant response to winter rapeseed (*Brassica napus* L.) as affected by boron. Pakistan Journal of Botany 2015; 47(2): 675-684.

Hua T., Zhang R., Sun H., Liu C. Alleviation of boron toxicityin plants: Mechanisms and approaches. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2021; 51(24): 2975-3015.

Huo J., Song B., Riaz M., Song X., Li J., Liu H., Huang W., Jia Q., Wu W. High boron stress leads to sugar beet (*Beta vulgaris* L.) toxicity by disrupting photosystem II. Ecotoxicology and Environmental Safety 2022; 248: 114295.

Jothi M., Takano J. Understanding the regulatory mechanisms of B transport to develop crop plants with B efciency and excess B tolerance. Plant and Soil 2023; 487: 1-20.

Kajikawa M., Fujibe T., Uraguchi S., Miwa K., Fujiwara T. Expression of the *Arabidopsis* borate efflux transporter gene, *AtBOR4*, in rice affects the xylem loading of boron and tolerance to excess boron. Bioscience Biotechnology, and Biochemistry 2011; 75(12): 2421-2423.

Karabal E., Yucel M., Oktem HA. Antioxidant responses of tolerant and sensitive barley cultivars to boron toxicity. Plant Science 2003; 164: 925-933.

Keleş Y., Öncel I., Yenice N. Relationship between boron content and antioxidant compounds in *Citrus* leaves taken from fields with different water source. Plant and Soil 2004; 265: 345-353.

Kobayashi M., Mutoh T., Matoh T. Boron nutrition of cultured tobacco BY-2 cells. IV Genes induced under low boron supply. Journal of Experimental Botany 2004; 55: 1441-1443.

Kohli SK., Kaur H., Khanna K., Handa N., Bhardwaj R., Rinklebe J., Ahmad P. Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. Plant Growth Regulation 2023; 100: 267-282.

Kohnehsharhi SM., Demir Y. Glutathione and proline attenuates injury induced by boron toxicity in wheat. Journal of Agricultural Science 2023; 29(2): 371-379.

Kumar K., Mosa K., Chhikara S., Musante C., White J., Dhankher O. Two rice plasma membrane intrinsic proteins, OsPIP2;4 and OsPIP2;7, are involved in transport and providing tolerance to boron toxicity. Planta 2014; 239: 187-198.

Kumar V., Pandita S., Kaur R., Kumar A., Bhardwaj R. Biogeochemical cycling, tolerance mechanism and phytoremediation strategies of boron in plants: A critical review. Chemosphere 2022; 300: 134505.

Landi M., Pardossi A., Remorini D., Guidi L. Antioxidant and photosynthetic response of a purple-leaved and a green-leaved cultivar of sweet basil (*Ocimum basilicum*) to boron excess. Environmental and Experimental Botany 2013; 85: 64-75.

Landi M., Guidi L., Pardossi A., Tattini M., Gould KS. Photoprotection by foliar anthocyanins mitigates effects of boron toxicity in sweet basil (*Osimum basilicum*). Planta 2014; 240(5): 941-953.

Liu C., Lu W., Ma Q., Ma C. Effectf of silicon on the alleviation of boron toxicity in wheat growth, boron accumulation, photosynthesis activities, and antioxidative responses. Journal of Plant Nutrition 2017; 40(17): 2458-2467.

Liu J., Chen T., Wang CL., Liu X. Transcriptome analysis in *Pyrus betulaefolia* roots in response to short-term boron deficiency. Genes 2023; 14: 817.

Liu L., Luo Y., Ding G., Wang C., Cai H., Shi L., Xu F., Bao X., Wang S. Identifcation and function characterization of *BnaBOR4* genes reveal their potential for *Brassica napus* cultivation under high boron stress. Ecotoxicology and Environmental Safety 2024; 271: 1160112012.

Long Y., Peng J. Interaction between boron and other elements in plants. Genes 2023; 14(1): 130.

Matoh T., Kawaguchi S., Kobayashi M. Ubiquity of a boraterhamno-galacturonan II complex in the cell walls of higher plants. Plant and Cell Physiology 1996; 37: 636-640.

Matthes M., Torres-Ruiz RA. Boronic acid treatment phenocopies monopteros by affectin PIN1 membrane stability and polar auxin transport in Arabidopsis thaliana embryos. Development 2016; 143: 4053-4062.

Mishra S., Heckathorn S., Krause C. The levels of boron-uptake proteins in roots are correlated with tolerance to boron stress in barley. Crop Science 2015; 55(4): 1741-1748.

Miwa K., Fujiwara T. Boron transport in plants: co-ordinated regulation of transporters. Annals of Botany 2010; 105: 1103-1108.

Miwa K., Takano J., Omori H., Seki M., Shinozaki K., Fujiwara T. Plants tolerant of high boron levels. Science 2007; 318(5855): 1417.

Molassiotis A., Sotiropoulos T., Tanou G., Diamantidis G., Therios I. Boron-induced oxidative damage and antioxidant and nucleolytic responses in shoot tips culture of the apple rootstock EM9 (*Malus domestica* Borkh). Environmental and Experimental Botany 2006; 56: 54-62.

Nable RO., Banuelos GS., Paull JG. Boron toxicity. Plant and Soil 1997; 193: 191-189.

Naeem M., Naeem M., Ahmad R., Ahmad R., Ashraf M., Ihsan M., Nawaz F., Athar HR., Ashraf M., Abbas HT., Abdullah M. Improving drought tolerance in maize by foliar application of boron: water status, antioxidative defense and photosynthetic capacity. Archieves in Agronomy and Soil Science 2018; 64(5): 626-639.

Nozawa A., Takano J., Kobayashi M., Von Wiren N., Fujiwara T. Roles of BOR1, DUR3 and FPS1 in B transport and B tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. FEMS Microbiology Letters 2006; 262: 216-222.

O'Neil MA., Warrenfeltz D., Kates K., Pellerin P., Doco T., Darvill AG., Albersheim P. Rhamnogalatturonan-II, a pectic polysaccharide in the walls of growing plant cell, forms a dimmer that is covalently cross-linked by a borate ester. Journal of Biological Chemistry 1996; 271: 22923-22930.

O'Neill MA., Ishii T., Albersheim P., Darvill AG. Rhamnogalacturonan II: structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. Annual Review of Plant Biology 2004; 55: 109-139.

Ouzounidou G., Paschalidis C., Petropoulos D., Koriki A., Zamanidis P., Petridis A. Interaction of soil moisture and excess of boron and nitrogen on lettuce growth and quality. Horticultural Science 2013; 40(3): 119-125.

Özdemir M., Kıpçak İ. Recovery of boron from borax sludge of boron industry. Minerals Engineering 2010; 23: 685-690.

Pagliuso D., Pereira JPJ., Ulrich JC., Cotrim MEB., Buckeridge MS., Grandis A. Carbon allocation of *Spirodela polyrhiza* under boron toxicity. Frontiers in Plant Science 2023; 14: 1208888.

Pang Y., Li L., Ren F., Lu P., Wei P., Cai J., Xin L., Zhang J., Chen J., Wang X. Overexpression of the tonoplast aquaporin AtTIP5;1 conferred tolerance to boron toxicity in *Arabidopsis*. Journal of Genetics and Genomics 2010; 37: 389-397.

Papadakis IE., Tsiantas PI., Tsaniklidis G., Landi M., Psychoyou M., Fasseas C. Changes in sugar metabolism associated to stem bark thickening partially assist young tissues of *Eriobotrya japonica* seedlings under boron stress. Journal of Plant Physiology 2018; 231: 337-345.

Pereira GL., Siqueira JA., Batista-Silva W., Cardoso FB., Nunes-Nesi A., Araujo WL. Boron: More than an essential element for land plants. Frontiers in Plant Science 2021; 11: 610307.

Petersson F., Jonsson M. The reactivity of hydroxyl radicals toward boric acid as a function of pH. The Journal of Physical Chemistry A 2024; 128(36): 7593-7600.

Pye LD., Frechette VD., Kreidl NJ. Borate glasses: Structure, Properties, Applications. Part of the Materials Science and Research Book Series, MSR. 2012: Vol. 12, Springer Science & Business Media.

Qin S., Xu Y., Nie Z., Liu H., Gao W., Li C., Zhao P. Metabolomic and antioxidant enzyme activity changes in response to cadmium stress under boron application of wheat (*Triticum aestivum*). Enviromental Science and Pollution Research 2022; 29: 34701-34713.

Reid RJ., Hayes JE., Post A., Stangoulis JCR., Graham RD. A critical analysis of the causes of boron toxicity in plants. Plant Cell and Environment 2004; 25: 1405-1414.

Riaz M., Kamran M., El-Esawi MA., Hussain S., Wang X. Boron-toxicity induced changes in cell wall components, boron forms, and antioxidant defense system in rice seedlings. Ecotoxicology and Environmental Safety 2021; 216: 112192.

Rosa M., Prado C., Podazza G., Interdonato R., Gonzalez JA., Hilal M., Prado FE. Soluble sugars metabolism, sensing and abiotic stress. A complex network in the life of plants. Plant Signaling and Behavior 2009; 4: 388-393.

Sang W., Huang ZR., Qi YP., Yang LT., Guo P., Chen LS. An investigation of B-toxicity in leaves of two citrus species differing in boron-tolerance using comparative proteomics. Journal of Proteomics 2015; 123: 128-146.

Sarı D. Effects of PEG-induced drought stress and different boron levels on seed germination and seedling growth characteristics in chickpea (*Cicer arietinum* L.) and lentil (*Lens culinaris* Medik.). Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi 2023; 10(2): 154-161.

Schachtman DP., Shin R. Nutrient sensing and signaling: NPKS. Annual Review of Plant Biology 2007; 58: 47-69.

Shi Y., Huang C., Wang X., Jin W., Wang M., Yu H. Physiological and iTRAQ-based quantitative proteomics analyses reveal the similarities and diferences in stress responses between short-term boron deficiency and toxicity in wheat roots. Molecular Biology Reports 2023; 50: 3613632.

Singh P., Singh G., Dadrwal BK., Yadav N. Importance of boron for crops: A review. Frontiers in Crop Improvement 2021; 9: 2392-2402.

Sutton T., Baumann U., Hayes J., Collins NC., Shi BJ., Schnurbusch T., Hay A., Mayo G., Pallotta M., Tester M., Langridge P. Boron-toxicity tolerance in barley arising from efflux transporter amplification. Science 2007; 318: 1446-1449.

Takano J., Miwa K., Yuan L., von Wiren N., Fujiwara T. Endocytosis and degradation of BOR1, a boron transporter of *Arabidopsis thaliana*, regulated by boron availability. Proceeding of the National Academy of Science USA 2005; 102: 12276-12281.

Takano J., Noguchi K., Yasumori M., Kobayashi M., Gajdos Z., Miwa K., Hayashi H., Yoneyama T., Fujiwara T. *Arabidopsis* boron transporter for xylem loading. Nature 2002; 420: 282-283.

Takano J., Wada M., Ludewig U., Schaaf G., von Wiren N., Fujiwara T. The *Arabidopsis* major intrinsic protein NIP5;1 is essential for efficient boron uptake and plant development under boron limitation. The Plant Cell 2006; 18: 1498-1509.

Tanaka M., Fujiwara T. Physiological roles and transport mechanism of boron. Perspectives from plants. Pflugers Archieve-European Journal of Physiology 2008; 456(4): 671-677.

Tanaka M., Takano J., Chiba Y., Lombardo F., Ogasawara Y., Onouchi H., Naito S., Fujiwara T. Boron dependent degradation of NIP5;1 mRNA for acclimation to excess boron conditions in *Arabidopsis*. Plant Cell 2011; 23: 3547-3559.

Tepe M., Aydemir T. Antioxidant responses of lentil and barley plants to boron toxicity under different nitrogen sources. African Journal of Biotechnology 2011; 53(10): 10882-10891.

Turan M., Taban N., Taban S. Effect of calcium on the alleviation of boron toxicity and localization of boron and calcium in cell wall of wheat. Notulae Botanicae Horticulture Agrobotanici Cluj-Napoca 2009; 37(2): 99-103.

Uluışık I., Karakaya HC., Koç A. The importance of boron in biological systems. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology 2018; 45: 156-162.

Vera-Maldonado P., Aquea F., Reyes-Diaz M., Carcamo-Fincheira P., Soto-Cerda B., Nunes-Nesi A., Inostroza-Blancheteau C. Role of boron and its interaction with other elementsin plants. Frontiers in Plant Science 2024; 15: 1332459.

Voxeur A., Fry SC. Glycosylinositol phosphorylceramides from Rosa cell cultures are boron-bridged in the plasma membrane and form complexes with rhamnogalacturonan II. Plant Journal 2014; 79(1): 139-149.

Wimmer MA., Mühling KH., Lauchli A., Brown PH., Goldbach HE. The interaction between salinity and boron toxicity effects the subcellular distribution of ions and proteins in wheat leaves. Plant Cell and Environment 2003; 26: 1267-1274.

Xu S., He C., Zhao Y., Yang X., Xu H. Generalized octet rule with fractional occupancies for boron. Journal of the American Chemical Society 2023; 145(45): 25003-25009.

Yang LT., Pan JF., Hu NJ., Chen HH., Jiang HX., Lu YB., Chen LS. *Citrus* physiological and molecular response to boron stresses. Plants 2022; 11(1). 40.

Ye JY., Tian WH., Jin CW. Nitrogen in plants: from nutrition to the modulation of abiotic stress adaptation. Stress Biology 2022; 2: 4-18.

Zhang L., Suo L., Shan Y., Wang B. Glutathione alleviates boron toxicity by modulating nitrogen metabolism and boron uptake in rice seedlings. Türkish Journal of Agriculture and Forestry 2024; 48: 1011-1022.

Zhao S., Huq ME., Fahad S., Kamran M., Riaz M. Boron toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies; a review. Plant Cell Reports 2024; 43: 238.

Zimicz CC., Moretto AS., Camilion C. Characterization of boron toxicity tolerance of two soybean (*Glycine max* L.) varieties. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 2023; 23: 4101-4114.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 544-564, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 544-564, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

İnsan Faktörünün İş Kazaları Üzerindeki Etkilerinin ve Kaza Önleyici Sistemlerin İncelenmesi: Sistematik Bir İnceleme

Kübra Sezen ERKÜVÜN[1*], Ali Fuat GÜNERİ[2]

[1]İstanbul Beykent Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34398, İstanbul
[2]Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34349, İstanbul

[1]https://orcid.org/0000-0003-2193-3478
[2]https://orcid.org/0000-0003-2525-7278
*Sorumlu yazar: kubrasezen@beykent.edu.tr

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 26.03.2025
Kabul tarihi:09.08.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
İş kazası
İnsan faktörü
İş sağlığı ve güvenliği

ÖZ

İş sağlığı ve güvenliği (İSG) çalışanların sağlığının ve güvenliğinin korunmasını, üretim güvenliğinin sağlanmasını, güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamının sürdürülmesini amaç edinen multidisipliner bir alandır. Çalışma ortamında, çalışanları ve işyerlerini doğrudan etkileyecek İSG tehlikeleriyle karşı karşıya kalınmaktadır. İSG tehlikelerinin önlenmesine yönelik tedbirler uygulamaya koyulamaz ise iş kazaları kaçınılmaz olmaktadır. İş kazalarına yol açan makine, ortam, insan ve yönetim gibi nedenler olmakla birlikte işyerlerinde gerçekleşen iş kazalarının önemli bir kısmı insan kaynaklı olarak gerçekleşmektedir. İnsan kaynaklı iş kazalarına yönelik proaktif yaklaşımla önleyici faktörlerin geliştirilmesi iş kazalarının azaltılması noktasında önemli bir katkı sunacaktır. Bu bağlamda çalışmada iş kazaları ile insan faktörü arasındaki ilişkinin ve insan faktörü etkenli iş kazalarının önlenmesine yönelik sistemlerin incelenmesi amaçlanmıştır. Amaca yönelik olarak gerçekleştirilen sistematik taramada, Web of Science, Scopus ve Science Direct veri tabanlarında 2010-2024 yılları arasındaki literatür taranmıştır. Belirlenen anahtar kelimelere ve dahil etme kurallarına göre ulaşılan literatür, PRISMA modeli ile analiz edilmiş ve nihai olarak 61 çalışmaya ulaşılmıştır. Çalışmalar, insan faktörü ve iş kazası ilişkisini ele alış biçimlerine göre incelenmiştir. Çalışmaların %46'sı, insan faktörünün iş kazalarının gerçekleşmesinde bir etkisinin olup olmadığını ortaya çıkarmaya yönelik olarak yürütülmüştür. Bu çalışmaların genel bir sonucu olarak, insan faktörünün iş kazalarını arttırdığı yargısına ulaşılmaktadır. Çalışmaların %33'ünde, insan faktöründen kaynaklı iş kazalarını önlemek amacıyla risk analizi gerçekleştirilmiştir. Risk analizi, iş kazalarının minimize edilmesi için proaktif bir önlem olarak uygulanmıştır. Çalışmaların %21'i ise, insan faktöründen kaynaklı iş kazalarını önlemeye yönelik sistemlerin geliştirildiği çalışmalardan oluşmaktadır. İş kazası tahmin yöntemlerinin ve işyerlerinde sürekli izleme sistemlerinin geliştirildiği çalışmalara daha az rastlanmakla birlikte veri odaklı risk analizlerine ve yapay zeka destekli sistemlere verilecek önem ile iş kazalarının önlenmesi yönünde kritik bir adım atılacağı düşünülmektedir.

Investigation of the Effects of Human Factors on Occupational Accidents and Accident Prevention Systems

Reviews

Article History:
Received: 26.03.2025
Accepted: 09.08.2025
Published online:13.01.2026

ABSTRACT

Occupational health and safety (OHS) is a multidisciplinary field that aims to protect the health and safety of employees, ensure production safety and maintain a safe and healthy working environment. OHS hazards that will directly affect workers and workplaces are encountered in the working

Keywords:
Occupational accident
Human factor
Occupational health and safety

environment. If measures to prevent OHS hazards cannot be implemented, occupational accidents are inevitable. Although there are reasons such as machinery, environment, human and management that cause occupational accidents, a significant portion of workplace occupational accidents are human-induced. Developing preventive factors with a proactive approach toward human-induced occupational accidents will significantly contribute to reducing occupational accidents. In this context, the study aims to examine the relationship between occupational accidents and human factors and systems for preventing occupational accidents caused by human factors. This systematic review searched the literature between 2010 and 2024 in Web of Science, Scopus and Science Direct databases. The literature accessed according to the determined keywords and inclusion rules was analyzed with the PRISMA model, and finally, 61 studies were found. The studies were analyzed according to how they addressed the relationship between human factors and occupational accidents. In 46% of the studies were conducted to determine whether the human factor had an impact on the occurrence of occupational accidents. As a general conclusion of these studies, it was determined that the human factor increases occupational accidents. In 33% of the studies, risk analysis was performed to prevent occupational accidents caused by the human factor. Risk analysis was applied as a proactive measure to minimize occupational accidents. In 21% of the studies involved the development of systems aimed at preventing occupational accidents caused by human factors. While studies on the development of occupational accident prediction methods and continuous monitoring systems in workplaces are less common, it is believed that a critical step toward preventing occupational accidents will be taken by prioritizing data-driven risk analysis and AI-supported systems.

To Cite: Erküvün KS., Güneri AF. İnsan Faktörünün İş Kazaları Üzerindeki Etkilerinin ve Kaza Önleyici Sistemlerin İncelenmesi: Sistematik Bir İnceleme. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 544-564.

1. Giriş

Sanayileşmenin artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte işyerlerinde karşılaşılan tehlikelerin sayısı artmakta ve türleri çeşitlilik göstermektedir. Tehlikelerin etkisiz hale getirilmesi noktasında iş sağlığı ve güvenliğinin (İSG) önemi ortaya çıkmaktadır (Güler ve ark., 2018). İSG işle ilgili kaza, yaralanma ve hastalıkların önlenmesi ile çalışanların sağlığının korunması ve geliştirilmesiyle ilgilenen multidisipliner bir alandır (ILO, 1998). Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), İSG kavramını dört temel hedef bağlamında incelemiştir. Bu hedefler; iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesiyle çalışan sağlığının korunması ve geliştirilmesi, sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamı sağlanması, çalışanların fiziksel, zihinsel ve sosyal refahının artırılması ve çalışanların sosyoekonomik açıdan üretken yaşamlar sürdürmeleridir (Gul ve ark., 2017). İSG faaliyetlerinin, standartlara ve işyerinin ihtiyaçlarına uygun olarak yerine getirilememesi sonucunda iş kazaları gerçekleşmektedir. İş kazası, 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nda "İşyerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen, ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenen engelli hâle getiren olay" olarak tanımlanmaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi, 2012).

İş kazaları genel olarak, güvensiz çalışma ortamı ve insandan kaynaklanan güvensiz davranışlar nedeniyle gerçekleşmektedir. Heinrich tarafından açıklanan Domino teorisine göre; gerçekleşen kazaların %88'inin güvensiz (tehlikeli) davranışlardan, %10'unun güvensiz (tehlikeli) koşullardan

(ortam) ve %2'sinin ise doğal afetler gibi kontrol edilemeyen nedenlerden dolayı meydana geldiği belirtilmiştir (Sabet ve ark., 2013). Güvensiz davranışlara; bilinçsiz çalışma, dalgınlık, dikkatsizlik, yetkisi dışında çalışma yapma, eğitim eksikliği, tecrübesizlik, kişisel koruyucu donanım kullanmamak gibi sebepler örnek gösterilmektedir. Güvensiz çalışma koşullarına; işyeri düzensizliği, hasarlı veya bakımı yapılmamış ekipmanlar, işe uygun olmayan el aletleri, koruyucusu yeterli olmayan ekipmanlar gibi sebepler örnek gösterilmektedir (Albar, 2024). Genel olarak, iş kazası nedenleri 4M (insan, çevre/ ortam, makine/fiziksel koşullar ve yönetim) ve önleyici faktörler 4E (eğitim, mühendislik, çevre ve denetim) kuralı ile özetlenmektedir (Chiba ve ark., 2005). İş kazalarının önlenebilmesi için ilk adım olarak risk analizi yapılması gerekmektedir. Risk analizi, seçilen bir yöntem ile işyerindeki mevcut durumun göz önünde bulundurulmasıyla birlikte olasılık ve sonuç parametrelerinin değerlendirilmesi ve sonucunda bir risk seviyesinin belirlenmesidir (Özkılıç, 2005). Risk değerlendirmesi, risk seviyesine göre risklerin kabul edilebilirliğine karar verilmesi ve kabul edilebilirliğin sağlanabilmesi adına önleyici faktörlerin belirlenmesidir (Akpınar ve Çakmakkaya, 2014). Risk değerlendirmesinde, iş kazasına maruz kalınmadan önce, çalışanların sağlığını ve güvenliğini tehdit edebilecek faktörler belirlenmektedir. Tespit edilen risk faktörleri sonrasında önleyici tedbirler uygulamaya koyulmaktadır. Bu noktada, güvensiz davranışlar insan faktörü kapsamında değerlendirilmekte ve bireysel farkındalık, tutum, davranış biçimi, deneyim ve eğitim düzeyi gibi etkenlerin doğrudan sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. İnsan faktörü, iş kazalarına yol açan en kritik unsurlardan biri olarak tanımlanmakta ve bu bağlamda güvensiz davranışlar, insan faktörlü risklerin temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmaktadır (Reason, 2000; Wiegmann ve Shappell, 2017). Bununla birlikte, insan faktörlü iş kazalarının önlenmesinde risk değerlendirmesi tek başına yetersiz kalmakta ve İSG eğitimleriyle destek verilmesi gerekmektedir (Kavgacı ve Çiçek, 2019). Eğitimlerle birlikte, çalışanlar işyeri tehlikeleri ve riskleri hakkında bilinçlendirilmektedir. Çalışanların tehlikeler ve riskler hakkında bilinçlendirilmesi hususuyla birlikte işyerinde güvenlik kültürünün kazandırılması ve iş kazalarında düşüşlerin meydana gelmesi sağlanabilecektir (Güler ve ark., 2018).

İş kazaları, hem çalışanları hem de işverenleri doğrudan etkileyen, toplumsal ve ekonomik boyutları olan ciddi bir sorundur. Ülkemizde yaşanan iş kazalarının boyutu, bu durumun ciddiyetini açıkça ortaya koymaktadır (Olcay ve Erdem, 2021). Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) verilerine göre 2018-2024 yılları arasında 3.802.285 iş kazası meydana gelmiş ve bu kazalar sonucunda 10.651 sigortalı yaşamını yitirmiştir (SGK, 2025). Bu veriler, iş kazalarının sadece sıklık açısından değil, sonuçları itibarıyla da çok ciddi düzeylere ulaştığını göstermektedir. İş kazalarının önlenmesine yönelik etkili stratejiler geliştirebilmek için, kazaların kök nedenlerinin kapsamlı biçimde analiz edilmesi kritik önem taşımaktadır. Ancak iş kazalarının nedenlerini sadece nicel verilerle belirlemek her zaman mümkün olamamakta, bu nedenle niteliksel değerlendirmelere ve daha bütüncül yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle insan faktörünün iş kazalarının oluşumundaki rolü, literatürde giderek daha fazla önem kazanan bir alan haline gelmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada iş kazalarının meydana gelmesinde etkili olan insan faktörüne odaklanılmış ve bu konudaki mevcut akademik birikimi

sistematik olarak ortaya koymak amacıyla bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu tarama, hem mevcut bilgileri derleyerek insan faktörü temelli risklerin anlaşılmasına katkı sağlamakta hem de bu alandaki kavramsal ve uygulamalı boşlukları tespit ederek ileride yapılacak araştırmalar için yol gösterici olmayı amaçlamaktadır. Sistematik literatür taraması, insan faktörüne dayalı iş kazalarının önlenmesine yönelik geliştirilecek sistemlerin ve yaklaşımların daha sağlam temellere dayanmasını mümkün kılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Web of Science, Scopus ve Science Direct veri tabanları üzerinden sistematik bir literatür taraması yürütülmüş ve araştırma kapsamına alınan çalışmalar belirli kriterler çerçevesinde detaylı biçimde incelenmiştir.

İncelenen literatür kapsamında, insan faktörünün iş kazaları üzerindeki etkisini ele alan çalışmaların ağırlık kazandığı görülmektedir (Ghasemi ve ark., 2013; Wong ve ark., 2016; Febriyanto ve ark., 2021; Kaptan, 2022; Sun ve ark., 2023; Si ve Niu, 2024). Bu çalışmalar, iş kazalarının oluşumunda insan davranışları, algılar, dikkat düzeyi, bilgi eksikliği gibi etkenlerin belirleyici rolünü vurgulamaktadır. Söz konusu çalışmaları, insan faktörü kaynaklı iş kazalarının önlenmesine yönelik çeşitli risk analizi yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar izlemektedir. Bu tür çalışmalar, tehlikelerin önceden tanımlanarak kontrol altına alınmasına katkı sağlamaktadır (Noroozi ve ark., 2013; Akyüz ve Çelik, 2018; Tong ve ark., 2021; Li ve ark., 2022; Noman ve ark., 2023; Bayazit ve Kaptan, 2024). Son olarak, insan faktörünü hedef alan önleyici sistem uygulamalarının geliştirildiği çalışmalar literatürde daha sınırlı bir yer kaplamaktadır (Zhao ve ark., 2016; Nykänen ve ark., 2020; Önal ve Dandıl, 2024). Bu çalışmalardan Zhao ve ark. (2016), insan davranışını etkileyebilecek ve güvenli çalışma bilgisini çalışanlarda oluşturabilecek mobil sanal gerçeklik teknolojisi ile bir İSG eğitimi prototipi hazırlamışlardır. Önal ve Dandıl (2024), güvenli olmayan davranışların gerçek zamanlı olarak tespit edilmesi ve çalışanların uyarılması için derin öğrenme modellerinin kullanıldığı gerçek zamanlı gözetim videosu oluşturmuştur. Bu çalışmalarda, teknolojik çözümlerle güvenli olmayan davranışların önlenmesi amaçlanmıştır. Mevcut literatür, insan faktörüne ilişkin çeşitli bakış açıları sunsa da bu çalışmaların genel olarak odaklandıkları alt temalar, insan faktörünün iş kazalarına etkisinin ortaya koyulmasına ve risk analizi uygulamasına yönelik olmuştur. Sistematik literatür taramasıyla, insan faktörüne karşı önleyici sistem uygulamalarına olan ihtiyacın ve insan faktörü ile iş kazaları arasındaki ilişkinin teknolojik yaklaşımlarla analiz edebileceğinin ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Bu çalışma, insan faktörü ve iş kazaları ilişkisini; neden-sonuç odaklı, risk analizi temelli ve önleyici sistem çözümleri sunan bir biçimde sınıflandırması ve önleyici sistem çözümlerinin yetersizliğini ortaya koyması yönüyle literatürden farklılaşmaktadır.

2. Yöntem

Bu çalışmanın amacı, iş kazaları ile insan faktörü arasındaki ilişkinin ve insan faktörü etkenli iş kazalarının önlenmesine yönelik geliştirilen sistemlerin incelenmesidir. Amaca yönelik gerçekleştirilen sistematik literatür taramasıyla, aşağıdaki soruya yanıt aranmıştır:

İnsan faktöründen kaynaklı iş kazaları nasıl önlenmektedir?

Literatür taraması önceki çalışmaların çerçevesinin keşfedilmesine, mevcut bilginin derinliğinin ve ayrıntılarının ortaya koyulmasına ve araştırma için boşlukların belirlenmesine katkı sağlamaktadır (Mohamed Shaffril ve ark., 2021). Akademik çalışmalar, hem sayı olarak artmakta hem de içerik bakımından detaylanmaktadır. Bu durum çalışmaların incelenmesini, sonuçların sistematik şekilde aktarılmasını, incelemelerin şeffaf bir şekilde sunulmasını ve araştırmanın tekrardan yapılabilirliğinin olmasını önemli kılmaktadır (Yıldız, 2022). Sistematik literatür taramasıyla birlikte belirlenen bir soruya yanıt aramak amacıyla, çalışmaların dahil edilme ve hariç tutulma kriterleri başlangıç aşamasında belirlenmekte ve sonucunda seçim yanlılığının en aza indirilmesi sağlanmaktadır (Nightingale, 2009; Yıldız, 2022). Sistematik literatür taraması sırasıyla; taramanın planlanması, taramanın gerçekleştirilmesi, raporlanması ve kullanıma sunulması adımlarından oluşmaktadır. Taramanın gerçekleştirilmesi; literatürün taranması, dahil etme ve dışlama amaçlı inceleme, veri çıkarma ve veri sentezleme adımlarını içermektedir (Yıldız, 2022).

Çalışmada, sistematik literatür taramasının gerçekleştirilmesi için Tablo 1'de verilen anahtar kelimeler belirlenmiştir.

Tablo 1. Literatür taramasında kullanılan anahtar kelimeler

1	İnsan unsuru (human element)
2	İnsan faktörü (human factor)
3	İnsan hatası (human error)
4	İş kazası (work accident/occupational accident)
5	Risk analizi (risk analysis)
6	İş sağlığı ve güvenliği (Occupational health and safety)

Tablo 1'de verildiği üzere anahtar kelimeler; insan faktörü, iş kazası, risk analizi ve iş sağlığı ve güvenliği kavramlarıyla birlikte kavramların literatürdeki farklı kullanımlarından oluşmaktadır. Anahtar kelimelerin birlikte kullanımıyla literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Anahtar kelimelerin gösterimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Literatür taramasında anahtar kelimelerin gösterimi

("human factor" OR "human element" OR "human error") AND ("occupational accident" OR "work accident" OR "risk analysis" OR "risk assessment" OR "occupational health and safety" OR "occupational safety")

Araştırmanın temel kavramları olan insan faktörünün ve iş kazalarının geniş literatüre sahip olması nedeniyle Tablo 2'de verildiği şekliyle anahtar kelimeler birleştirilmiştir. Mart 2024 - Mayıs 2024 tarihleri arasında nihai anahtar kelime ile Web of Science, Scopus ve Science Direct veri tabanlarında

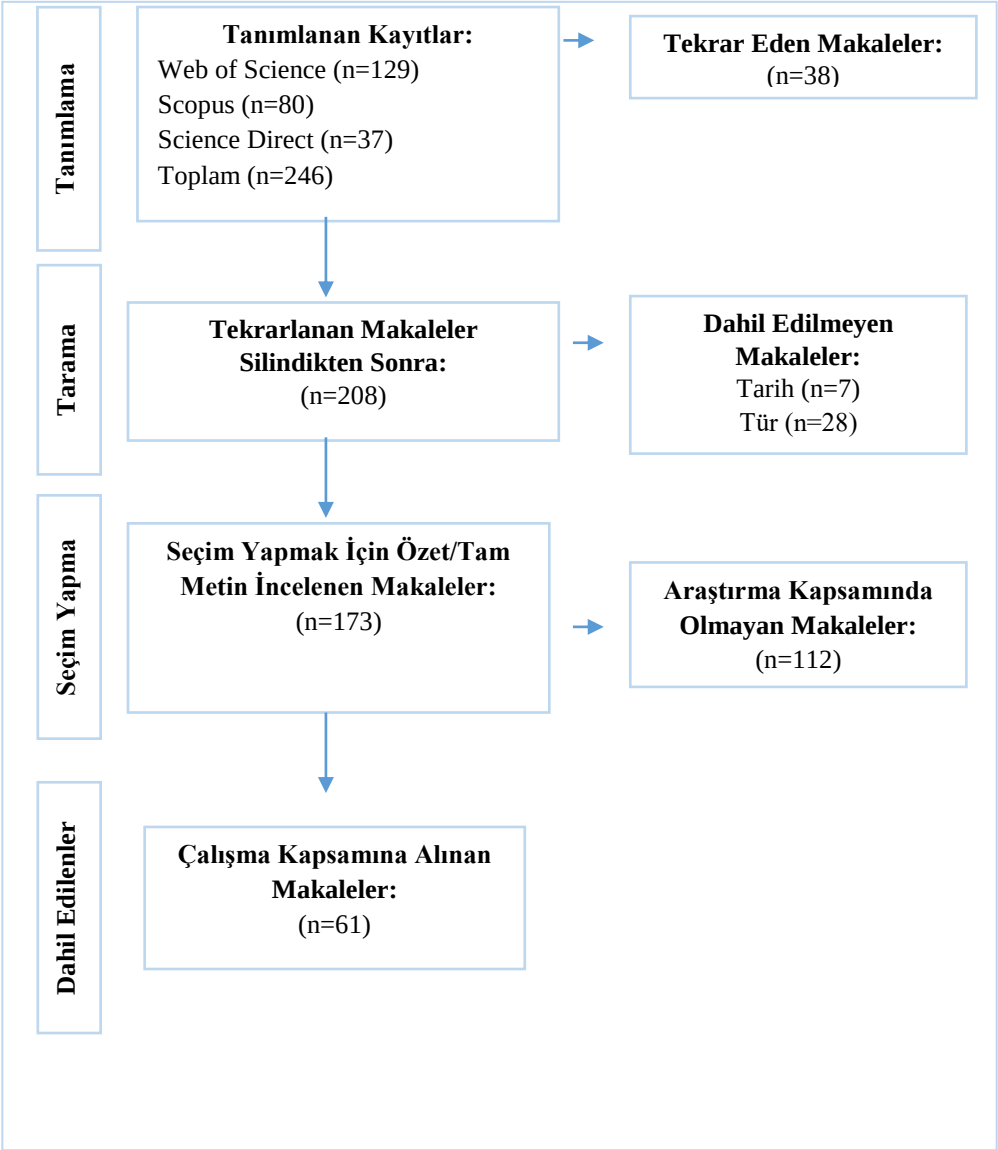
arama gerçekleştirilmiştir. Anahtar kelimelerin kullanımıyla tarama gerçekleştirildiğinde Web of Science (1043), Scopus (4893) ve Science Direct (530) veri tabanlarında konu hakkında çok sayıda çalışmaya ulaşılmıştır. Bu nedenle arama sonuçlarını sınırlandırabilmek için dahil etme kuralları belirlenmiştir. Dahil etme kurallarının seçiminde, kullanımı yaygın olan kriterlerin (yayın yılı, dil, tür vb.) seçimine önem verilmiştir (Yıldız, 2022). Çalışmaların dahil edilme kuralları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmaların dahil edilme kuralları

Çalışma türünün makale olması
Çalışma dilinin İngilizce olması
2010 yılı ve sonrasındaki çalışmalar olması
İnsan faktörü ve iş kazası arasında ilişki kurulması
İnsan faktörlü iş kazalarının risk analizinin yapılması
İnsan faktörlü iş kazalarına yönelik önleyicilerin geliştirilmesi

Literatür taraması sonucunda ulaşılan çalışmaları filtrelemek amacıyla Tablo 3'te verilen altı maddelik dahil edilme kuralları kullanılmıştır. İncelenen çalışmaların öncelikle, 2010 yılı ve sonrasında İngilizce dilinde yazılmış makalelerden oluşması beklenmiştir. Kullanılan diğer dahil edilme kuralları ise araştırmanın amacına yönelik olarak belirlenmiştir. Tarama incelemesinde kullanılmak üzere PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) akış şeması oluşturulmuştur. PRISMA akış şeması ile gerçekleştirilen literatür taraması kapsamında ulaşılan çalışma sayıları verilmiştir. Çalışmaların belirli kurallar çerçevesinde değerlendirilmesi sağlanmış ve araştırmada incelemeye dahil edilen çalışmaların seçilmesine yönelik görselleştirme yapılmıştır. Çalışmaların seçim sürecine ait akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.

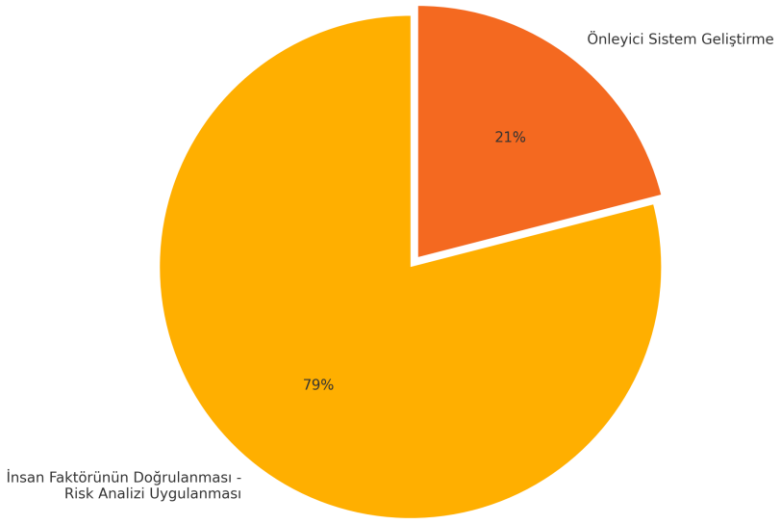
Şekil 1'de verilen akış şemasına göre, kullanılan anahtar kelime serisi ile üç veri tabanında toplam 246 (Web of Science: 129, Scopus: 80 ve Science Direct: 37) çalışmaya ulaşılmıştır. Veri tabanlarındaki çalışmalar birleştirildikten sonra tekrar eden çalışmalara ulaşılmış ve bu çalışmalar analiz dışı bırakılarak ilk etapta 208 çalışma incelemeye tabi tutulmuştur. Dahil etme kurallarına göre tür ve tarih kriterlerini karşılamayan çalışmaların çıkarılması sonucunda 173 çalışmaya ulaşılmıştır. Kalan 173 çalışmanın özet ve tam metinleri incelenerek araştırmanın amacını karşılamayan çalışmalar elenmiştir. Nihai sonuca göre araştırma kapsamını karşılayan 61 çalışma belirlenmiş ve detaylı inceleme gerçekleştirilmiştir. Sistematik literatür taramasında incelenecek çalışma sayısıyla ilgili belirli minimum sayının olmamasıyla birlikte çalışmanın konusuna ve amacına uygun olacak şekilde belirli kurallar kapsamında çalışmaların filtrelenmesi ve seçilmesi önerilmektedir (Çınar ve Suzan, 2022; Mutlu, 2024).



Şekil 1. Çalışmaların seçim süreci için akış şeması

3. Bulgular

İş kazaları ile insan faktörü arasındaki ilişkinin ve insan faktörü etkenli iş kazalarının önlenmesine yönelik sistemlerin ortaya koyulması için gerçekleştirilen araştırmada, örneklem 61 çalışmadan oluşmaktadır. Bu çalışmalar, insan faktörü ve iş kazası ilişkisini ele alış biçimlerine göre iki tema altında gruplandırılmıştır. İlk tema, insan faktörünün doğrulanması ve risk analizi uygulanması başlıklarını bir arada içermekte; ikinci tema ise doğrudan önleyici sistem geliştirme başlığını içermektedir. Temalara göre makale sınıflandırılması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Makalelerin temalara göre sınıflandırılması

Çalışmaların tema bazlı sınıflandırılmasına göre, yüksek oranda temsil edilen kategori %79 ile insan faktörünün doğrulanması-risk analizi uygulanması temasıdır. Bunu %21 oranıyla önleyici sistem geliştirme temalı çalışmalar izlemektedir.

3. 1. İnsan Faktörünün Doğrulanması-Risk Analizi Uygulanması Teması

İnsan faktörünün doğrulanması-risk analizi uygulanması temasına ait bulgular Tablo 4'te sunulmuştur. Çalışmalar, yapılan uygulamaya ve sektöre göre analiz edilmiştir.

Tablo 4. Çalışmaların insan faktörünün doğrulanmasına ve risk analizine yönelik incelenmesi

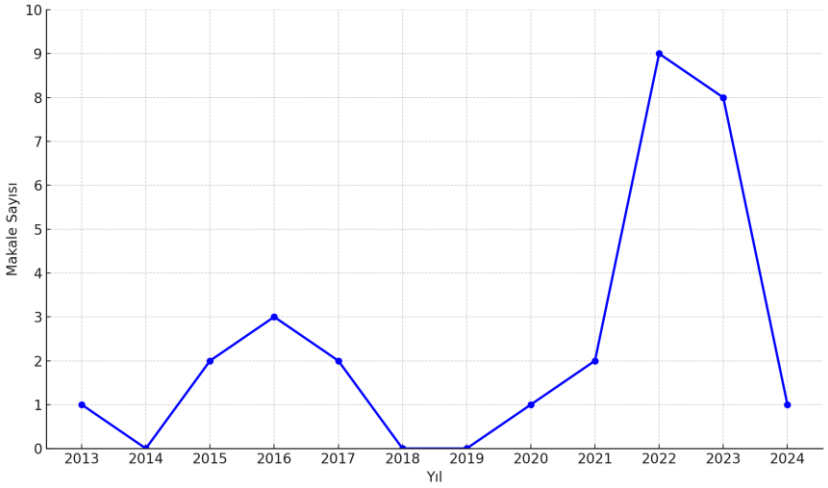
Yazarlar	**Risk Analizi**	**Risk Yönetimi**	**İnsan Faktörünün İş Kazasına Etkisinin Doğrulanması**	**Sektör**
Deacon ve ark., (2010)	X	X		Denizcilik
Ghasemi ve ark., (2013)			X	Üretim
Noroozi ve ark., (2013)	X	X		-
Kirytopoulos ve ark., (2014)	X			İnşaat
Stojiljkovic ve ark., (2015)			X	-
Reyes ve ark., (2015)			X	Üretim
Aalipour ve ark., (2016)			X	Üretim
Koushik Balaji ve Alphin (2016)			X	Üretim
Wong ve ark., (2016)			X	İnşaat
Gnoni ve ark., (2016)	X	X		Üretim
Petrillo ve ark., (2017)			X	Üretim
Misiurek ve Misiurek (2017)			X	Üretim
Akyuz ve Celik (2018)	X	X		Denizcilik
Chen ve ark., (2019)	X			Ulaşım

Mollaoglu ve ark., (2019)	X				Denizcilik
Aliabadi ve ark., (2020)				X	Maden
Febriyanto ve ark., (2021)				X	Denizcilik
Kang ve ark., (2021)				X	İnşaat
La Fata ve ark., (2021)	X				Üretim
Tong ve ark., (2021)	X	X			Üretim
Liu ve ark., (2021)	X	X			Denizcilik
Fan ve ark., (2022)	X				Doğalgaz
Suprapto ve ark., (2022)				X	Petrol
Khaleghi ve ark., (2022)				X	Sağlık
Bussier ve Chong (2022)				X	İnşaat
Abbaszadeh ve ark., (2022)	X				İnşaat
Li ve ark., (2022)	X				Kimyasal
Kaptan (2022)				X	Denizcilik
Edem ve Akinsola (2022)				X	İnşaat
Morais ve ark., (2022)				X	-
Aydın ve ark., (2022)				X	Denizcilik
Khan ve ark., (2022)				X	Denizcilik
Nwankwo ve ark., (2022)				X	Petrol ve gaz
La Fata ve ark., (2023)				X	Tekstil
Sun ve ark., (2023)				X	İnşaat
Erdem ve ark., (2023)				X	Denizcilik
Uflaz ve ark., (2023)	X				Denizcilik
Yılmaz ve Turan (2023)				X	-
Niu ve ark., (2023)	X				Maden
Taheri ve ark., (2023)				X	Maden
Spasojević Brkić ve ark., (2023)				X	-
Maternová ve ark., (2023)				X	Denizcilik
Sadeghi-Yarandi ve ark., (2023)				X	Elektrik Dağıtımı
Noman ve ark., (2023)	X	X			-
Zheng ve ark., (2024)	X	X			Sağlık
Musavi ve ark., (2024)	X	X			Üretim
Si ve Niu (2024)				X	İnşaat
Bayazit ve Kaptan (2024)	X				Denizcilik

Risk analizi ve insan faktörünün iş kazasına etkisinin doğrulanması çalışmaları Tablo 4'teki gibi birlikte incelenmiştir. İnceleme kapsamında çalışmaların uygulama yaptıkları sektörler verilmiştir.

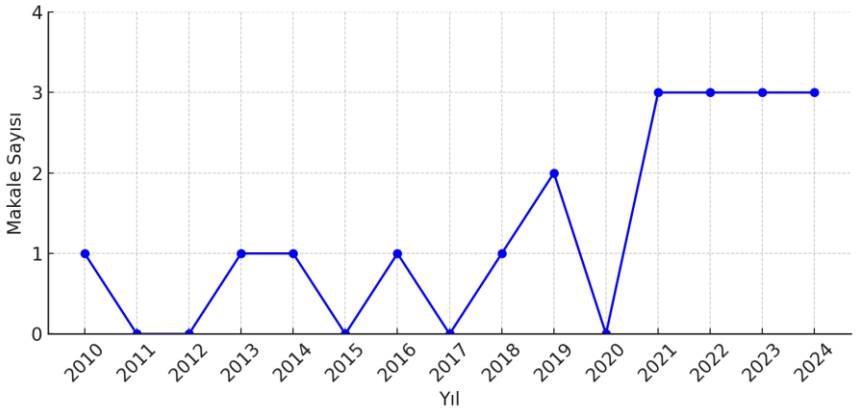
Risk analizi, yapılan incelemeler sonucunda risklerin belirlenip değerlendirilmesi olarak tanımlanırken; risk yönetimi, iş kazasına ve meslek hastalığına sebep olabilecek risklerin tespit edilmesi, risklerin analiz edilerek derecelendirilmesi, risklerin tamamen ortadan kaldırılması ve tamamen ortadan kaldırılamadığı durumlarda ise riskin kabul edilebilir seviyeye indirilebilmesi için

risk kontrol tedbirlerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Özkılıç, 2005). Risk analizi, iş kazalarının önlenmesi için bir başlangıç iken risk yönetimi, süreç boyunca devam eden iş kazalarıyla başa çıkma yöntemidir. Bu nedenle, risk analizi uygulaması yapılan çalışmaların risk yönetimi süreci açısından değerlendirilmesi gerçekleştirilmiş ve sekiz çalışmada bu yönde faaliyetlerin olduğu tespit edilmiştir. Uygulamaların yıllara göre değişimleri Şekil 3'te ve Şekil 4'te verilmiştir.



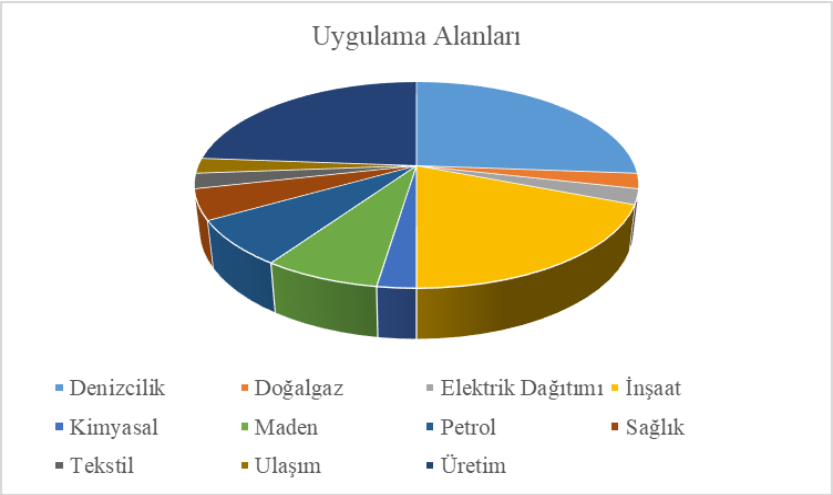
Şekil 3. Yıllara göre insan faktörünün doğrulanması

Şekil 3'e göre, insan faktörünün doğrulandığı ilk çalışmanın 2013 yılına ait olduğu tespit edilmiştir. Yıllara göre tutarlı bir artış olmamakla birlikte en çok çalışma 2022 yılında yapılmıştır.



Şekil 4. Yıllara göre risk analizi uygulamaları

Şekil 4'e göre, risk analizi uygulaması gerçekleştirilen ilk çalışmanın 2010 yılına ait olduğu tespit edilmiştir. 2020 yılı sonrasında konunun popülaritesi artarak devam etmiştir. Tablo 4'teki makalelerin uygulama alanlarına göre sınıflandırılması Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Çalışmaların uygulama alanlarına göre sınıflandırılması

İnsan faktörünün doğrulanması-risk analizi uygulanması teması kapsamında toplam 48 makale incelenmiştir. Şekil 5'te görüldüğü üzere, bu çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımında ilk üç sırayı denizcilik (%25), üretim (%21) ve inşaat (%17) sektörleri oluşturmaktadır.

3.2. Önleyici Sistem Geliştirme Teması

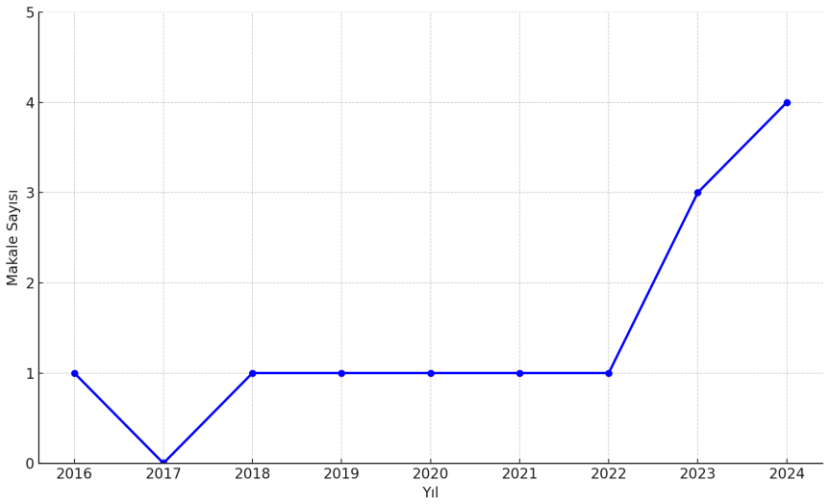
Önleyici sistem geliştirme temasına ait bulgular Tablo 5'te sunulmuştur. Çalışmalar, yöntem/veri toplama ve uygulama alanı bilgilerine göre analiz edilmiştir.

Tablo 5. Önleyici sistem uygulamalarının yapıldığı çalışmaların sınıflandırılması

Yazarlar	Yöntem/Veri Toplama	Uygulama Alanı	Açıklama
Zhao ve ark., (2016)	Sanal Gerçeklik	İnşaat	Mobil sanal gerçeklik (MVR) teknolojisine dayalı İSG eğitimi için bir prototip uygulama kullanılarak işçilerin güvenlik performansını artırmak ve günlük uygulamalarına güvenlik kültürünü entegre etmek hedeflenmiştir.
Hasanzadeh ve ark., (2018)	-	-	Bilişsel süreçlerin insan hatasındaki ve iş kazalarındaki etkisinin incelenmesi için mobil göz izleme teknolojisinin kullanılması amaçlanmıştır.
Zahiri Harsini ve ark., (2019)	Derinlemesine görüşme	Petrokimya	Çalışanların güvensiz davranışlarının belirlenmesiyle eğitim stratejilerinin geliştirilmesi ve farklı periyotlarda sürecin izlenmesi amaçlanmıştır.
Nykänen ve ark., (2020)	Sanal Gerçeklik	İnşaat	Sanal gerçeklik tabanlı bir güvenlik eğitiminin, insan faktörleriyle ilgili bir güvenlik eğitiminin etkinliğinin ve uygulama sürecinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

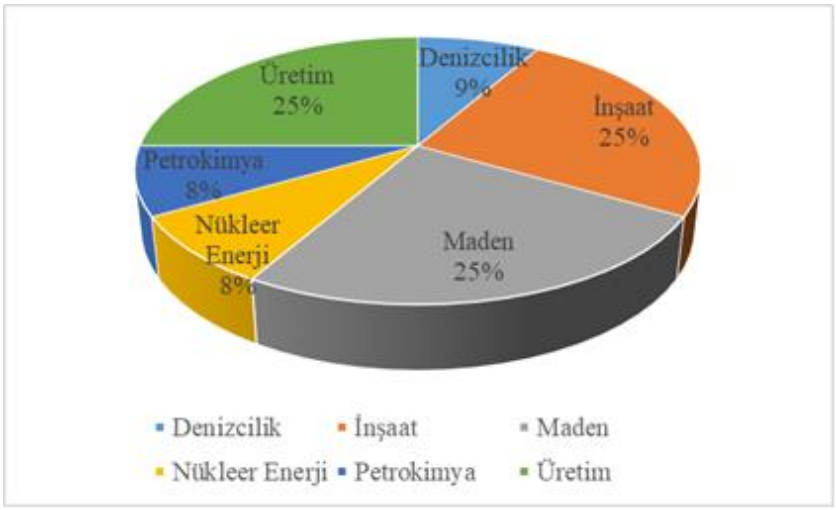
Kirin ve ark., (2021)	Anket	Maden	Madencilik iş gücünün genel olarak risk tutumu ve güvenlik kuralları hakkındaki görüşlerinin öğrenilmesiyle maden işçilerinin davranışlarını tahmin etmeye yönelik model oluşturulması amaçlanmıştır.
Es'haghi ve ark., (2022)	Gözlem-yarı yapılandırılmış görüşme-sosyal ağ analizi	Maden	Madencilik sektöründe işçiler arasındaki güvensiz davranışları etkileyen nedenler ve güvensiz davranışların ortaya çıkmasında hangi nedenlerin daha önemli rol oynadığının belirlenmesi amaçlanmıştır.
Chen ve ark., (2023)	IETTSM-DLD algoritmaları	Denizcilik	Önerilen IETTSM-DLD model ile açık deniz sondaj operatörlerinin anormal çalışmasının gerçek zamanlı olarak uyarabildiğini ve güvensiz davranışlardan kaynaklanan kazaların erken uyarısının gerçekleştirebildiğinin ortaya koyulması amaçlanmıştır.
Kabanov ve ark., (2023)	Diskriminant ve regresyon analizi	Maden	Madencilik sektöründeki işçilerin psikofizyolojik özelliklerinin iş kazalarına yatkınlıklarının nasıl etkilediğinin sunulması hedeflenmiştir.
Sivapragasam ve ark., (2023)	HIRA-HEART-Kohenen Algoritması	İnşaat	Görev-Personel Bağlantı Matrisi (TPM) kullanılarak şantiyedeki kazaların azaltılması için iş ve çalışan arasındaki uyumun sağlanmasına yönelik model geliştirilmesi hedeflenmiştir.
Shakerian ve ark., (2024)	Öz bildirim araçları (anket)-QEEG-BMW	Üretim	Endüstriyel işçilerde güvensiz davranışların tahmin edilebilmesi amacıyla bir model geliştirilmiştir. Öz-bildirim anketleriyle, işçilerin güvenlik algıları, güvenli olmayan davranışları ve risk alma eğilimleri hakkında bilgi sağlanır. QEEG analizleri, işçilerin beyin aktivitelerini ölçer ve güvenli olmayan davranışlarla ilişkili nörolojik belirteçleri belirler.
Önal ve Dandıl (2024)	YOLO v4 ve ConvLSTM derin öğrenme modelleri	Üretim	Endüstriyel fabrikalarda çalışanların güvensiz davranışlarının tespit edilmesi, sistem tarafından tehlikeli davranışların önlenmesi ve çalışanların anında uyarabilmesi amacıyla gerçek zamanlı gözetim videosu kullanılarak derin öğrenme modelleri aracılığıyla veri seti oluşturulmuştur.
Wang ve ark., (2024)	FFT-LSTM-GCN	Nükleer Enerji	Nükleer santrallerde meydana gelebilecek arızaların belirlenmesi için bir model geliştirilmiştir. Modelle birlikte, nükleer santrallerdeki potansiyel arızaların daha doğru tespit edilmesi hedeflenmiştir.
Karevan ve Nadeau (2024)	STPA- PSO yaklaşımı-BMW	Üretim	Akıllı gözlüklerin karmaşık sistemlerde kullanımıyla ilişkili insan hatası risklerine özel olarak odaklanılması ve ölçülmesi amaçlanmıştır.

Tablo 5'te verilen 13 çalışmaya göre, insan faktörlü iş kazalarını önlemeye yönelik farklı sistemlerin geliştirildiği görülmektedir. Bu sistemler arasında sanal gerçeklik tabanlı eğitimler, göz izleme teknolojileri, derin öğrenme modelleri, nörolojik analizler ve risk değerlendirme algoritmaları gibi yöntemler yer almaktadır. Bu çalışmaların yıllara göre değişimleri Şekil 6'da ve uygulama alanları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Yıllara göre önleyici sistem uygulamaları

Şekil 6'ya göre, ilk çalışmanın 2016 yılına ait olduğu tespit edilmiştir. Yayımlanan çalışmaların çoğu 2022 yılı sonrasına ait olmakla birlikte 2024 yılı en çok çalışmaya sahip yıl olmuştur.



Şekil 7. Önleyici sistem uygulamalarının yapıldığı sektörler

Şekil 7'ye göre, uygulama alanlarına bakıldığında aynı orana sahip olmakla birlikte ilk üç sırada maden, inşaat ve üretim yer almaktadır. Çalışmalar, önleyici sistemler bağlamında incelendiğinde teknolojik çözümler arasında sanal gerçeklik destekli eğitim simülasyonları, göz izleme cihazları ve derin öğrenme algoritmaları gibi ileri düzey dijital araçlar öne çıkmaktadır. Öte yandan, yönetsel çözümler kapsamında görev-personel uyumunun sağlanması, risk algısının ölçülmesi ve davranışsal eğitim stratejilerinin geliştirilmesi gibi insan odaklı yaklaşımlar dikkat çekmektedir. Bu durum, etkili bir önleme stratejisinin sadece teknolojik sistemlerle değil, aynı zamanda güçlü bir yönetimsel çerçeveyle de desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.

4. Sonuç

İSG faaliyetlerinin güvenli bir şekilde yürütülebilmesi için öncelikle işyerlerinde güvenlik önlemlerinin alınması gerekmektedir. Çoğu zaman sadece güvenlik önlemlerinin alınması tek başına yeterli olmamakta ve öngörülemeyen insan faktörünün iş kazaları üzerindeki etkisi öne çıkmaktadır. Bu nedenle araştırmada, iş kazaları ile insan faktörü arasındaki ilişkinin ve insan faktörü etkenli iş kazalarının önlenmesine yönelik sistemlerin incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, belirlenen üç veri tabanında (Web of Science, Scopus ve Science Direct) literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında incelenmek üzere 61 çalışmaya ulaşılmış ve bu çalışmalar; insan faktörünün doğrulanması-risk analizi uygulanması ve önleyici sistem geliştirme temaları altında incelenmiştir. İncelenen çalışmaların ağırlıklı olarak insan faktörü ve iş kazası ilişkisinin doğrulanmasına yönelik olduğu görülmüş ve bu çalışmaları risk analizi ve önleyici sistem geliştirme çalışmaları takip etmiştir. Literatürde, insan faktörünün iş kazalarındaki belirleyici rolü net biçimde ortaya konmuştur (Ghasemi ve ark., 2013; Reyes ve ark., 2015; Aliabadi ve ark., 2020). Özellikle üretim, inşaat, denizcilik ve maden gibi yüksek riskli sektörlerde yapılan çalışmalar, güvensiz davranışların iş kazalarının temel nedeni olduğunu vurgulamaktadır (Petrillo ve ark., 2017; Wong ve ark., 2016; Niu ve ark., 2023). Bulgular, insan faktörlü iş kazalarının önlenmesinde hem teknolojik hem de yönetsel sistemlerin giderek daha yaygın biçimde kullanıldığını göstermektedir (Zhao ve ark., 2016; Nykänen ve ark., 2020; Chen ve ark., 2023; Sivapragasam ve ark., 2023). İnsan faktörünün iş kazalarına etkisinin tespit edilmesi ve risk analizi gerçekleştirilmesi tek başına yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, etkili önleme sistemlerinin geliştirilmesinin teknolojik çözümlerle ve yönetsel müdahalelerle desteklenebileceği düşüncesi çalışmanın amacı ile örtüşmektedir.

Araştırmanın sınırlılıklarını, örnekleminin sadece üç veri tabanında taranan makalelerden oluşması, çalışmaların 2010 yılı ve sonrasında yayımlanmış olması ve çalışma dilinin İngilizce olması oluşturmaktadır. İş kazalarının önlenmesinde yapı taşı olarak risk analizi yapılması gerekmektedir. Risk analizi, risk yönetim sürecinin temelini oluşturmaktadır. Bu noktada, risk yönetimi sürecinin yürütülmesi ve çalışanlara verilecek eğitimlerle İSG kültürünün oluşturulması ve süreklilik getirilmesi önerilmektedir. Literatürdeki çalışmalardan da görüldüğü üzere iş kazası tahmin yöntemlerinin ve işyerlerinde sürekli izleme sistemlerinin geliştirilmesine yönelik ihtiyacın olduğu ifade edilebilir. Bu bağlamda, iş kazalarının önlenmesine yönelik yeni nesil yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. İnsan faktörüne dayalı risk değerlendirme süreçlerinin güçlendirilmesi, yapay zeka destekli tahmin modellerinin kullanılması ve işyerlerinde sürekli izleme sistemlerinin yaygınlaştırılması, iş kazalarının azaltılmasında kritik rol oynayacaktır. Ayrıca, iş güvenliği kültürünün kurumsal düzeyde daha etkin hale getirilmesi, çalışanların farkındalığının artırılması, eğitim programlarının geliştirilmesi ve veri odaklı analiz yöntemlerinin benimsenmesi bu alandaki proaktif önlemleri güçlendirecektir. Bu çalışma, İSG alanında insan faktörünü merkeze alan önleyici sistemlerin önemini ortaya koyarak gelecekte yapılacak araştırmalar için bir yol haritası sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda; kültürel,

dilsel, örgütsel ya da sosyoekonomik farklılıkların insan faktörüne etkisinin incelenmesi ve her sektörün kendi yapısına özgü risk profillerinin oluşturulması önerilmektedir. İş kazalarının tamamen önlenmesi mümkün olmasa da, bu alanda geliştirilecek yeni yöntemler ve teknolojiler ile işyerlerinde daha güvenli ve sürdürülebilir çalışma ortamlarının sağlanması mümkün olacaktır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

Kaynakça

Aalipour M., Ayele YZ., Barabadi A. Human reliability assessment (HRA) in maintenance of production process: A case study. International Journal of System Assurance Engineering and Management 2016; 7: 229-238.

Abbaszadeh S., Jahangiri M., Abbasi M., Banaee S., Farhadi P. Risk assessment of probable human errors in the scaffold erection and dismantling procedure: A fuzzy approach. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2022; 28(3): 1773-1778.

Akpınar T., Çakmakkaya BY. İş sağlığı ve güvenliği açısından işverenlerin risk değerlendirme yükümlülüğü. Çalışma ve Toplum 2014; 1(40): 273-304.

Akyuz E., Celik E. The role of human factor in maritime environment risk assessment: A practical application on Ballast Water Treatment (BWT) system in ship. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 2018; 24(3): 653-666.

Albar BÖ. İş kazalarının önlenmesinde kaza sebep teorilerinin önemi. EJONS International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences 2024; 8(1): 174-182.

Aliabadi MM., Askaripoor T., Ghamari F., Aghaei H. An investigation of the relationship between human and organizational factors in occupational accidents using Bayesian network approach: A case study in mining accidents. Journal of Occupational Hygiene Engineering 2020; 8(2): 8-15.

Aydın M., Uğurlu Ö., Boran M. Assessment of human error contribution to maritime pilot transfer operation under HFACS-PV and SLIM approach. Ocean Engineering 2022; 266: 112830.

Bayazit O., Kaptan M. Dynamic risk analysis of allision in port areas using DBN based on HFACS-PV. Ocean Engineering 2024; 298: 117183.

Bussier MJP., Chong HY. Relationship between safety measures and human error in the construction industry: Working at heights. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2022; 28(1): 162-173.

Chen C., Hu J., Zhang L., Hu Y., Li X. Early warning method of unsafe behavior accidents for offshore drilling operators based on eye-tracking trajectory. Process Safety and Environmental Protection 2023; 177: 1506-1522.

Chen W., Zhang Y., Khasawneh MT., Geng Z. Risk analysis on Beijing metro operation initiated by human factors. Journal of Transportation Safety & Security 2019; 11(6): 683-699.

Chiba T., Aonuma S., Kusugami T. Research on method of human error analysis using 4M4E. JR East Technical Review 2005; 5: 59-65.

Çınar N., Suzan ÖK. Sistematik derleme metodolojisi ve yazımı. Ankara: Akademisyen Kitabevi; 2022.

Deacon T., Amyotte PR., Khan FI. Human error risk analysis in offshore emergencies. Safety Science 2010; 48(6): 803-818.

Edem IE., Akinsola B. An approach to assessing human factors related occupational safety using behavioural observation-based indicators: The case of a construction site in Nigeria. Engineering and Applied Science Research 2022; 49(2): 133-145.

Erdem P., Akyuz E., Aydin M., Celik E., Arslan O. Assessment of human error contribution to container loss risk under fault tree analysis and interval type-2 fuzzy logic-based SLIM approach. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 2023; 238(3): 553-566.

Es'haghi M., Nikravesh A., Fereydoni MJ., Shabani N. Understanding factors influencing workers' unsafe behaviors through social network analysis in the mining industry. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2022; 28(2): 863-871.

Fan H., Enshaei H., Jayasinghe SG. Human error probability assessment for LNG bunkering based on fuzzy Bayesian network-CREAM model. Journal of Marine Science and Engineering 2022; 10(3): 333.

Febriyanto K., Rachman A., Rahman FF. The contribution of human error related to occupational accident among traditional divers. Gaceta Sanitaria 2021; 35: S27-S29.

Ghasemi M., Nasleseraji J., Hoseinabadi S., Zare M. Application of SHERPA to identify and prevent human errors in control units of petrochemical industry. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2013; 19(2): 203-209.

Gnoni MG., Duraccio V., Iavagnilio R. A fuzzy AHP-based approach for assessing the faulty behaviour risk at workplace. International Journal of Business and Systems Research 2016; 10(2-4): 291-305.

Gul M., Ak MF., Guneri AF. Occupational health and safety risk assessment in hospitals: A case study using two-stage fuzzy multi-criteria approach. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 2017; 23(2): 187-202.

Güler M., Derin KH., Şahin NL. İş sağlığı ve güvenliği kültürü ve eğitimi ilişkisi. İş ve Hayat 2018; 4(8): 311-348.

Hasanzadeh S., Esmaeili B., Dodd MD. Examining the relationship between construction workers' visual attention and situation awareness under fall and tripping hazard conditions: Using mobile eye tracking. Journal of Construction Engineering and Management 2018; 144(7): 1-18.

International Labour Organization (ILO). Technical and ethical guidelines for workers' health surveillance. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_publ_9221108287_en.pdf (Erişim tarihi: 10.04.2024).

Kabanov EI., Tumanov MV., Smetanin VS., Romanov KV. An innovative approach to injury prevention in mining companies through human factor management. Journal of Mining Institute 2023; 263: 774-784.

Kang S., Cho S., Yun S., Kim S. Semantic network analysis using construction accident cases to understand workers' unsafe acts. International Journal of Environmental Research and Public Health 2021; 18(23): 12660.

Kaptan M. Estimating human error probability in transporting steel cargo with bulk carriers using a hybrid approach. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment 2022; 236(2): 303-314.

Karevan A., Nadeau S. A comprehensive STPA-PSO framework for quantifying smart glasses risks in manufacturing. Heliyon 2024; 10(9): e30162.

Kavgacı Y., Çiçek H. Kamu hastanelerinde iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının çalışanların iş performansına etkisi: Burdur ili örneği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi 2019; 11(28): 306-331.

Khaleghi P., Akbari H., Alavi NM., Kashani MM., Batooli Z. Identification and analysis of human errors in emergency department nurses using SHERPA method. International Emergency Nursing 2022; 62: 101159.

Khan RU., Yin J., Mustafa FS., Wang S. Analyzing human factor involvement in sustainable hazardous cargo port operations. Ocean Engineering 2022; 250: 111028.

Kirin S., Sedmak A., Li W., Brzaković M., Miljanović I., Petrović A., Sedmak S. Human factor risk management procedures applied in the case of open pit mine. Engineering Failure Analysis 2021; 126: 105456.

Kirytopoulos K., Konstandinidou M., Nivolianitou Z., Kazaras K. Embedding the human factor in road tunnel risk analysis. Process Safety and Environmental Protection 2014; 92(4): 329-337.

Koushik Balaji K., Alphin MS. Computer-aided human factors analysis of the industrial vehicle driver cabin to improve occupational health. International Journal of Injury Control and Safety Promotion 2016; 23(3): 240-248.

La Fata CM., Giallanza A., Micale R., La Scalia G. Ranking of occupational health and safety risks by a multi-criteria perspective: Inclusion of human factors and application of VIKOR. Safety Science 2021; 138: 105234.

La Fata CM., Adelfio L., Micale R., La Scalia G. Human error contribution to accidents in the manufacturing sector: A structured approach to evaluate the interdependence among performance shaping factors. Safety Science 2023; 161: 106067.

Li Z., Wang X., Gong S., Sun N., Tong R. Risk assessment of unsafe behavior in university laboratories using the HFACS-UL and a fuzzy Bayesian network. Journal of Safety Research 2022; 82: 13-27.

Liu Y., Ma X., Qiao W., Luo H., He P. Human factor risk modeling for shipyard operation by mapping fuzzy fault tree into Bayesian network. International Journal of Environmental Research and Public Health 2021; 19(1): 297.

Maternová A., Materna M., Dávid A., Török A., Švábová L. Human error analysis and fatality prediction in maritime accidents. Journal of Marine Science and Engineering 2023; 11(12): 2287.

Misiurek K., Misiurek B. Methodology of improving occupational safety in the construction industry on the basis of the TWI program. Safety Science 2017; 92: 225-231.

Mohamed Shaffril HA., Samsuddin SF., Abu Samah A. The ABC of systematic literature review: The basic methodological guidance for beginners. Quality & Quantity 2021; 55: 1319-1346.

Mollaoglu M., Bucak U., Demirel, H. A quantitative analysis of the factors that may cause occupational accidents at ports. Journal of ETA Maritime Science 2019; 7(4): 294-303.

Morais C., Yung KL., Johnson K., Moura R., Beer M., Patelli E. Identification of human errors and influencing factors: A machine learning approach. Safety Science 2022; 146: 105528.

Musavi F., Hekmatshoar R., Fallahi M., Moradi A., Yazdani-Aval M. Identifying and preventing human error in the sugar production process: A multi-stage approach using HTA, HEC and PHEA techniques. Heliyon 2024; 10(9): e29687.

Mutlu H. Dijital sağlık diplomasisi: Sistematik derleme. Akademik Hassasiyetler 2024; 11(26): 173-193.

Nightingale A. A guide to systematic literature reviews. Surgery (Oxford) 2009; 27(9): 381-384.

Niu L., Zhao J., Yang J. Risk assessment of unsafe acts in coal mine gas explosion accidents based on HFACS-GE and Bayesian networks. Processes 2023; 11(2): 554.

Noman MA., Alqahtani FM., Al-Harkan I., Alabdulkarim SA., Alasim F. A new integrated risk-assessment model for minimizing human-machine error consequences in a preventive maintenance system. IEEE Access 2023; 11: 25253-25265.

Noroozi A., Khakzad N., Khan F., MacKinnon S., Abbassi R. The role of human error in risk analysis: Application to pre-and post-maintenance procedures of process facilities. Reliability Engineering & System Safety 2013; 119: 251-258.

Nwankwo CD., Arewa AO., Theophilus SC., Esenowo VN. Analysis of accidents caused by human factors in the oil and gas industry using the HFACS-OGI framework. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2022; 28(3): 1642-1654.

Nykänen M., Puro V., Tiikkaja M., Kannisto H., Lantto E., Simpura F., Teperi AM. Evaluation of the efficacy of a virtual reality-based safety training and human factors training method: Study protocol for a randomised-controlled trial. Injury Prevention 2020; 26(4): 360-369.

Olcay ZF., Erdem B. İş kazalarının önlenmesinde güvenlik kültürü. Pearson Journal 2021; 6(14): 82-88.

Önal O., Dandıl E. Unsafe-Net: YOLO v4 and ConvLSTM based computer vision system for real-time detection of unsafe behaviours in workplace. Multimedia Tools and Applications 2024; 1-27.

Özkılıç Ö. İş sağlığı ve güvenliği, yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri. Ankara: Türkiye İşveren Sendikaları Konfederasyonu Yayınları; 2005.

Petrillo A., Falcone D., De Felice F., Zomparelli F. Development of a risk analysis model to evaluate human error in industrial plants and in critical infrastructures. International Journal of Disaster Risk Reduction 2017; 23: 15-24.

Reason J. Human error: Models and management. BMJ 2000; 320(7237): 768-770.

Reyes RM., de la Riva J., Maldonado A., Woocay A. Association between human error and occupational accidents' contributing factors for hand injuries in the automotive manufacturing industry. Procedia Manufacturing 2015; 3: 6498-6504.

Sabet PGP., Aadal H., Jamshidi MHM., Rad KG. Application of domino theory to justify and prevent accident occurance in construction sites. Journal of Mechanical and Civil Engineering 2013; 6(2): 72-76.

Sadeghi-Yarandi M., Torabi-Gudarzi S., Asadi N., Golmohammadpour H., Ahmadi-Moshiran V., Taheri M., ... Alimohammadi B. Development of a novel electrical ındustry safety risk ındex (EISRI) in the electricity power distribution industry based on fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). Heliyon 2023; 9(2): e13155.

Shakerian M., Nami M., Jahangiri M., Hasanzadeh J., Alimohammadlou M., Choobineh A. Validating the effectiveness of a self-report tool to predict unsafe behavior of industrial workers: A QEEG analysis. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2024; 30(2): 624-634.

Si W., Niu L. Enhancing human reliability prediction in smart tower crane ınterfaces: A refined approach using simplified plant analysis risk–human reliability assessment and the decision making trial and evaluation laboratory–analytic network process. Buildings 2024; 14(4): 1083.

Sivapragasam C., Ajith S., Arumugaprabu V. A conceptual framework for minimizing construction site accidents using Task-Personnel Nexus Matrix. International Journal of Construction Management 2023; 23(9): 1603-1610.

Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK). İş kazası istatistikleri. https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4 (Erişim tarihi: 04.08.2025).

Spasojević Brkić V., Golubović T., Brkic A., Alsharif AM. Influence of human factors on risk associated with pressure equipment. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2023; 29(2): 651-660.

Stojiljkovic E., Glisovic S., Grozdanovic M. The role of human error analysis in occupational and environmental risk assessment: A Serbian experience. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 2015; 21(4): 1081-1093.

Sun Z., Zhu Z., Xiong R., Tang P., Liu Z. Dynamic human systems risk prognosis and control of lifting operations during prefabricated building construction. Developments in the Built Environment 2023; 14: 100143.

Suprapto VH., Pujawan IN., Dewi RS. Effects of human performance improvement and operational learning on organizational safety culture and occupational safety and health management performance. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2022; 28(4): 2455-2467.

T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. İş sağlığı ve güvenliği kanunu. https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.6331.pdf (Erişim tarihi: 29.04.2024).

Taheri MR., Mortazavi SB., Asilian H., Ahmadi O., Sogandi F. Investigating human error in Iran's copper mines using the CREAM based on human cognitive reliability analysis. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2023; 29(4): 1423-1428.

Tong R., Li H., Zhang B., Yang X., Ma X. Modeling of unsafe behavior risk assessment: A case study of Chinese furniture manufacturers. Safety Science 2021; 136: 105157.

Uflaz E., Akyuz E., Arslan O., Gardoni P., Turan O., Aydin M. Analysing human error contribution to ship collision risk in congested waters under the evidential reasoning SPAR-H extended fault tree analysis. Ocean Engineering 2023; 287: 115758.

Wang Y., Liu J., Qian G. Hierarchical FFT-LSTM-GCN based model for nuclear power plant fault diagnosis considering spatio-temporal features fusion. Progress in Nuclear Energy 2024; 171: 105178.

Wiegmann DA., Shappell SA. A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system. London: Routledge; 2017.

Wong L., Wang Y., Law T., Lo CT. Association of root causes in fatal fall-from-height construction accidents in Hong Kong. Journal of Construction Engineering and Management 2016; 142(7): 1-12.

Yıldız A. Bir araştırma metodolojisi olarak sistematik literatür taramasına genel bakış. Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi 2022; 22(Özel Sayı 2): 367-386.

Yılmaz C., Turan AH. The causes of occupational accidents in human resources: The human factors theory and the accident theory perspective. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 2023; 29(2): 796-805.

Zahiri Harsini A., Ghofranipour F., Sanaeinasab H., Amin Shokravi F. A randomised controlled trial of an educational intervention to promote safe behaviours in petrochemical workers: A study protocol. BMC Public Health 2019; 19: 1-8.

Zhao D., McCoy A., Kleiner B., Feng Y. Integrating safety culture into OSH risk mitigation: A pilot study on the electrical safety. Journal of Civil Engineering and Management 2016; 22(6): 800-807.

Zheng Q., Liu X., Wang W., Han S. A hybrid HFACS model using DEMATEL-ORESTE method with linguistic Z-number for risk analysis of human error factors in the healthcare system. Expert Systems with Applications 2024; 235: 121237.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 565-581, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 565-581, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Parametric and Symbiotic Approaches in Landscape Architecture: New Urban Space Paradigms

Merve SİPAHİ[1]*

[1]Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Architecture, Design and Fine Arts, Department of Interior Architecture and Environmental Design, 80010, Osmaniye

[1]https://orcid.org/0000-0002-3246-6302
*Correspondence: mervesipahi@osmaniye.edu.tr

Reviews

Article History:
Received: 01.06.2025
Accepted: 10.10.2025
Published online:13.01.2026

Keywords:
Landscape architecture
Parametric design
Symbiotic city
Sustainability

ABSTRACT

Environmental, social and spatial problems faced by today's cities necessitate new design paradigms in landscape architecture. This study investigates how the parametric design approach in landscape architecture can be evaluated within the framework of the symbiotic city concept. The aim is to conceptually and theoretically reveal the intersection point of these two concepts by supporting the symbiotic city vision, which aims to establish a mutually beneficial relationship between nature and the city, with parametric design tools. In the study based on a qualitative research method, literature review, conceptual analysis and thematic synthesis techniques were used. The findings obtained show that these two approaches play a complementary role in the process of producing not only formal but also functional, systemic and sustainable design decisions in landscape architecture. The study revealed that the symbiotic city approach is a systematic planning model that advocates the integration of natural and built environments on the basis of mutual benefit, and that parametric design is a powerful tool that enables the integrated modeling of these systems with environmental and social data. It is also emphasized that landscape architecture plays a spatial and systemic unifying role that can combine both approaches. The results reveal that landscape architects can develop integrated designs at ecological, social and technical levels by making symbiotic relationships more readable, simulatable and measurable through parametric tools. In this context, the discipline of landscape architecture is being redefined as a strategic actor in the sustainable transformation of cities.

Peyzaj Mimarlığında Parametrik ve Simbiyotik Yaklaşımlar: Yeni Kentsel Mekân Paradigmaları

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 01.06.2025
Kabul tarihi:10.10.2025
Online Yayınlanma:13.01.2026

Anahtar kelimeler:
Peyzaj Mimarlığı
Parametrik Tasarım
Simbiyotik Kent
Sürdürülebilirlik

ÖZ

Günümüz kentlerinin karşı karşıya kaldığı çevresel, sosyal ve mekânsal sorunlar, peyzaj mimarlığında yeni tasarım paradigmalarını gerekli kılmaktadır. Bu çalışma, peyzaj mimarlığında parametrik tasarım yaklaşımının simbiyotik kent kavramı çerçevesinde nasıl değerlendirilebileceğini araştırmaktadır. Amaç, doğa ve kent arasında karşılıklı faydaya dayalı bir ilişki kurmayı hedefleyen simbiyotik kent vizyonunu, parametrik tasarım araçlarıyla destekleyerek bu 2 kavramın (simbiyotik kent ve parametrik tasarım) kesişim noktasını kavramsal ve kuramsal olarak ortaya koymaktır. Nitel araştırma yöntemine dayanan çalışmada, literatür taraması, kavramsal çözümleme ve tematik sentez teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, bu iki yaklaşımın peyzaj mimarlığı içinde yalnızca biçimsel değil, aynı zamanda işlevsel, sistemsel ve sürdürülebilir tasarım kararları üretme sürecinde tamamlayıcı rol oynadığını göstermektedir. Çalışma simbiyotik kent yaklaşımının doğal ve yapılı

çevrelerin karşılıklı fayda temelinde bütünleşmesini savunan sistematik bir planlama modeli olduğunu, parametrik tasarımın ise bu sistemlerin çevresel ve sosyal verilerle bütünleşik olarak modellenmesini sağlayan güçlü bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca peyzaj mimarlığının her iki yaklaşımı birleştirebilecek mekânsal ve sistemsel birleştirici rolü üstlendiği vurgulanmıştır. Sonuçlar peyzaj mimarlarının parametrik araçlar sayesinde simbiyotik ilişkileri daha okunabilir, simüle edilebilir ve ölçülebilir hale getirerek ekolojik, sosyal ve teknik düzeyde entegre tasarımlar geliştirebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, peyzaj mimarlığı disiplini, kentlerin sürdürülebilir dönüşümünde stratejik bir aktör olarak yeniden tanımlanmaktadır.

To Cite: Sipahi M. Parametric and Symbiotic Approaches in Landscape Architecture: New Urban Space Paradigms. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 565-581.

1. Introduction

Cities in the 21st century are faced with the necessity of developing resilient, adaptable and sustainable solutions to global problems such as climate change, rapid urbanization and ecological destruction (Beatley, 2011; Newman and Jennings, 2012). The discipline of landscape architecture has undertaken the responsibility of developing holistic and innovative approaches to re-establish this balance. In this context, the concept of the symbiotic city, which proposes an interaction based on mutual benefit between nature and the city, has become one of the fundamental areas of interest not only in urban planning but also in landscape architecture (Mostafavi and Doherty, 2010; Mang and Reed, 2012). Symbiotic cities aim to ensure that natural systems and urban systems co-exist and evolve together by reorganizing the relationships that the city establishes with its biotic and abiotic environment (Zhang et al., 2013). These approaches require multi-scale and multi-functional solutions in terms of both landscape design and urban formation.

Symbiotic cities are conceptually not only an ecological restoration project, but also a systemic reconstruction proposal. This approach treats nature not only as an area to be protected, but also as a system to be integrated with the city (Olivieri, 2022). Therefore, the discipline of landscape architecture, with its ability to read natural processes and urbanization processes simultaneously, plays an important role in the spatial representation of symbiotic city theory (McHarg, 1969; Forman, 1995). Traditional urban design methods are often insufficient in providing this holistic view. At this point, parametric design stands out, especially with its ability to read and analyze multivariate data simultaneously (Kolarevic, 2001; Schumacher, 2009). Parametric approaches enable the production of symbiotic urban strategies in a digital environment by offering the opportunity to model city components not only formally but also at a functional and relational level (Januszkiewicz and Kowalski, 2017).

Parametric design, especially in landscape architecture, has the potential to model complex relationships between variable environmental data (climate, topography, water cycle, etc.) and user behavior (Hensel, 2010; Allen and McQuade, 2011; Charalampidis and Tsalikidis, 2015). In this way, integrating symbiotic relationships into design can cease to be a mere theoretical approach and turn into applicable projects (Ripley, 2023). At the intersection of these two approaches, the city becomes

an organism that does not compete with nature but establishes a symbiotic partnership with it (Gaha, 2023). Thanks to parametric methods, sustainability criteria such as energy cycles, water management, biodiversity protection, and microclimatic effects can be made a dynamic part of the design (Hudson, 2010; López López et al., 2023). The integration of the concepts of symbiotic city and parametric design offers not only a method proposal on how to produce urban space, but also a vision on how this production can be more ethical, sustainable and resilient (Han et al., 2023). By combining these two paradigms, landscape architecture has the potential to reconstruct the nature-city relationship not only spatially but also culturally and politically. In this context, the main purpose of this study is to reveal how the parametric design approach in landscape architecture can be interpreted within the framework of symbiotic city theory at a theoretical and conceptual level. The study aims to discuss the intersection of these two approaches through the discipline of landscape architecture by supporting the symbiotic city vision, which aims to establish mutually beneficial relationships between nature and the city, with the digital tools offered by parametric design. In this direction, it will be examined how symbiotic relationships can be constructed not only spatially but also at ecological, social and technical levels; and it will be evaluated how parametric design methods make these relationships more readable, simulatable and measurable. Thus, the theoretical foundations of a new design paradigm in the discipline will be opened to discussion by highlighting the transformative and strategic role that landscape architecture can play in sustainable urban design.

2. Method

The study, which aims to associate parametric design with symbiotic city theory, is based on qualitative research method and consists of two main stages. In the first stage, symbiotic city and parametric design theories were examined by conducting a literature review. In this context, how the design flexibility offered by parametric systems and data-based decision mechanisms intersect with symbiotic city components was evaluated at a theoretical level. In the second stage, a conceptual matching was made between parametric and symbiotic approaches in the light of the information obtained from the literature review. A framework was created on the strengths, intersections and possible syntheses of parametric and symbiotic approaches. This matching was examined under 3 main headings (Symbiotic city, parametric design, integrated role of symbiotic and parametric approaches in landscape architecture) (Table 1). While revealing the integrated role of symbiotic and parametric approaches, conceptual harmony and practical limitations were revealed, and a comparative analysis was made on comparison criteria. The aim is to reveal in which aspects these two approaches complement each other, where they diverge and how their combination can contribute to landscape architecture.

Table 1. Theoretical framework

	Theoretical Framework	
	Symbiotic city	
1	1.1. Structural features of symbiotic cities	
2	Parametric design	
	2.1. Analytical potential of parametric design	
	Integrated role of symbiotic and parametric approaches in landscape architecture	
3	*3.1. Conceptual Consistency and Practical Limitations;* Common Conceptual Ground, Complementary Qualities, Common Purpose in Sustainability, Implementation Gap	*3.2. Comparative Analysis Performance-Based Comparison; Future Scenarios with Time-Space Simulations, Multidisciplinary Integration: Socio-Ecological Systems, Formal and Morphological Comparison*

3. Discussion and Results

The study was evaluated under 3 main headings (Symbiotic cities, Parametric design, Integrated role of symbiotic and parametric approaches in landscape architecture).

3.1. Symbiotic Cities

Today's cities are increasingly complex not only in terms of population but also in terms of being at the center of the ecological, economic and cultural metabolism of societies (The World Bank, 2010). The fact that approximately 80% of energy consumption takes place in cities (Seydioğulları, 2013) shows that these spaces are not only centers of consumption but also centers of transformation and innovation. The growing ecological footprint of cities reveals that traditional urban development models are no longer sustainable; therefore, approaches that aim to establish mutually beneficial, symbiotic relationships between the city and nature are coming to the fore (Boyacıoğlu, 2010; Stuiver, 2022).

Historically, cities have been likened to living organisms. In Plato's work "Politeia", the city is defined as a “macro-anthropos”, that is, a large human body (Šijaković and Perić, 2018). This analogy continues today, and urban tissue is explained with terms such as city epidermis, nervous systems and vascular structures (Solà Morales, 2008). This organic perspective emphasizes that cities are not static objects; they are living structures that constantly develop, breathe and change and establish symbiotic relationships. The concept of symbiosis, as a biological concept, was first defined by Anton de Bary as “the cohabitation of different organisms” and has been adapted to disciplines such as urban planning, architecture and sociology over time (Sapp, 1994; Paracer and Ahmadjian, 2000). Japanese architect Kisho Kurokawa was one of the first names to bring this biological concept to architecture and urban planning, developing the concept of the “symbiotic city”. According to Kurokawa, architecture is not only physical structures; it is a process of interaction between nature, society, culture and the individual based on mutual benefit (Kurokawa, 1994; Lee, 2015).

The concept of the symbiotic city refers to a new planning vision that focuses on increasing efficiency by creating synergy between city functions, improving the quality of life by cooperating with nature, and sustainability (Cansever, 2019). In this context, symbiotic cities aim to protect ecosystem services by establishing symbiotic bonds between both natural and built environmental elements, and to increase resource efficiency in areas such as health, energy, and transportation (Mulder and Delft, 2017; Minh et al., 2021). Kurokawa's approach is based on the balance established between seemingly opposing elements such as tradition and modernity, east and west, nature and humans. In this context, symbiotic architecture represents an architectural approach that is in harmony with nature rather than in conflict with it, observes cultural continuity, provides temporal flexibility, and encourages social integration (Kurokawa, 1994; Xue et al., 2011). This approach suggests transformation not only at the physical but also at the social and cultural level for sustainable urban life (Zamperini and Lucenti, 2015).

The symbiosis theory consists of three basic elements: symbiotic unit (U), symbiotic form (M) and symbiotic environment (E). The interaction of these elements determines the sustainability and direction of the symbiotic system. When this structure is applied to urban design, it proposes a new urban model in the nature-human-technology triangle by establishing a balance between physical space and social systems (Zhang et al., 2013).

Urban symbiosis emerges as an innovation strategy for sustainable urban transformation through the integration of emission reduction, waste management, resource sharing and infrastructure systems (Mulder and Delft, 2017). Public spaces stand out as the basic ground where these symbiotic relationships take place. The “human ecosystem” structure, which consists of mutual relationships between humans, nature and society, can provide benefits such as reducing energy consumption and increasing economic welfare by considering historical and cultural continuity (Minh et al., 2021). Frederick Law Olmsted’s “Emerald Necklace” project in Boston can be considered an early example of the contemporary symbiotic city approach in that it addresses nature as a partner in human design (Stuiver, 2022). This example shows that the urban landscape can be designed not only as an aesthetic element, but also as a functional and symbiotic system.

3.1.1. Structural Features of Symbiotic Cities

Symbiotic cities stand out with their structural organizations inspired by nature. These cities have a system approach that aims to ensure that different urban components work in harmony with each other (Kurokawa, 1994). This organic approach emphasizes that cities should be designed as dynamic and evolutionary structures, not static. Stuiver (2022) argues that symbiotic cities should be in harmony with both natural and built environments, and that this structural feature should be reflected not only at the physical level but also at the cultural level.

Symbiotic relationships overlap with the basic principles of sustainability. Managing resources such as energy, water and waste in cities with cyclical systems, reducing emissions and increasing

infrastructure efficiency are directly related to this type of relationship (Mulder and Delft, 2017). In this context, a symbiotic city is not only a formal structure, but also a functioning sustainability mechanism. When the features of symbiotic cities are examined; The design and operation of cities are seen to have a multi-layered structure that aims to benefit from ecosystem services, ensure resource cyclicality and increase environmental sustainability (Table 2).

Table 2. Symbiotic city features

Feature	Description	Literature
Ecological Integration	Integration of natural systems into the urban fabric; elements such as green infrastructure, ecological corridors.	McHarg (1969); Waldheim (2006)
Resource Circularity and Waste Reduction	Evaluation of waste as a resource, establishment of cyclical systems.	Newman and Jennings (2012)
Metabolic Approach	Design of the urban system as a living organism that manages energy and material flows.	Register (2006)
Mutual Benefit (Symbiosis) Principle	Establishment of functional relationships based on mutual benefit between urban components.	Kurokawa (2001)
Local Context and Cultural Adaptation	Context-based design approach that is sensitive to local climate, culture and geography.	Kurokawa (1994); Lee et al., (2018)
Data-Driven, Dynamic Planning	Scenario-based planning processes with parametric and data-driven methods.	Kolarevic (2001); Schumacher (2009); Edmonds et al., (2022)
Interdisciplinary and Holistic Approach	Holistic design model with integration of fields such as ecology, sociology, economy, etc.	Spirn (2005)

3.2. Parametric Design

Parametric design is a data-driven and algorithmic design approach that has been increasingly applied in recent years, especially in the disciplines of architecture and urban design. This approach is a systematic process that includes not only the production of form but also the interactive analysis of environmental, social and economic variables (Kolarevic, 2001; Januszkiewicz and Kowalski, 2017). Unlike traditional design methods, parametric design allows the production of multiple solutions within the framework of certain rules or parameters; thus, the designer can create flexible, dynamic and adaptive solutions by controlling the relationships between variables (Schumacher, 2009).

The application of parametric methods to urban planning and landscape architecture provides critical advantages, especially in the modeling of complex ecosystems. More sustainable and livable spaces can be designed by processing variables such as the city's topography, sunshine durations, wind direction, population density, heat islands and green space distribution together (Yoffe et al., 2020).

Schumacher (2016) defines parametric design as “a new global style in architecture” and argues that this approach is based on a relational system logic that constantly redefines the urban fabric. Therefore, parametric design offers both a philosophical and technological basis in terms of establishing a symbiotic bond between nature and the built environment. At the same time, analyzing socio-technical data such as user behavior, energy consumption and transportation needs through simulation enables cities to become flexible and adaptable. The possibilities offered by parametric design are particularly useful in the management of complex systems and the production of future

scenarios. For example, algorithmic models integrated with environmental data can be used to develop sustainability strategies such as reducing heat island effects or optimizing wind guidance systems (Lee et al., 2018). Thus, parametric design contributes to cities becoming more livable and resilient (Gaha, 2023; López López et al., 2023). On the other hand, with the development of digital design tools, not only technical data but also social and cultural data have begun to be taken into account in parametric models. This shows that parametric design can be considered not only as a formal tool but also as a cultural and ethical framework (Birkeland, 2008). Thus, parametric design has a strong potential to establish symbiotic relationships between nature and humans, the user and the environment, and the past and the future.

3.2.1. Analytical Potential of Parametric Design

Parametric design has the potential to produce effective solutions to complex environmental and social problems with its capacity to process a large amount of data simultaneously (López López et al., 2023). Parametric design is a versatile approach supported by digital technologies and can be integrated into urban and landscape design processes with different methods. These methods include data-based design, where environmental data is directly converted into design input, computational modeling, where geometric relationships are shaped by algorithms, and multi-scenario simulation analyses (Gaha, 2023). Performance-oriented optimization processes allow the design to be guided by measurable outputs such as energy efficiency, microclimate, or permeability (Edmonds et al., 2022). In addition, form-finding and interdisciplinary integration techniques allow the parametric approach to produce more effective solutions in both technical and ecological contexts (Table 3).

Table 3. Parametric design methods

Method	**Description**	**Literature**
Data-Based Design	Using environmental and structural data directly as design input.	Edmonds et al., (2022)
Algorithmic and Computational Design	Geometric and environmental variables produce form through algorithms.	Gaha (2023)
Simulation and Scenario Analysis	Modeling factors such as climate, user behavior and energy to test alternative scenarios.	Roudavski (2009)
Optimization Processes	Directing the design to the best solution according to specific performance targets.	Kolarevic (2001); Schumacher (2009)
Form-Finding	Reconstructing forms derived from natural forces in a digital environment.	Han et al., (2023)
Multi-Disciplinary Integration	Directing the design by integrating engineering, ecology and social data in the same model.	Schumacher (2009)

3.3. The Integrated Role of Symbiotic and Parametric Approaches in Landscape Architecture

Landscape architecture is a discipline that creates a physical and functional interface between nature and the built environment, mediating both the protection and redesign of multi-layered ecosystems. The intersections of parametric design and the symbiotic city approach are particularly evident in

landscape architecture. In this context, the mutually beneficial structure proposed by symbiotic cities (Kurokawa, 1994; Stuiver, 2022) and the data-driven modeling tools offered by parametric design become an integrated strategy in landscape architecture. This integration offers a new paradigm in terms of urban sustainability, especially through ecosystem-based design strategies and data-driven process management.

Applications such as transferring natural processes to digital media, topographic analyses, permeability tests, and biodiversity simulations enable these two approaches to work together (Allen and McQuade, 2011).

In the literature, it is emphasized that landscape is not only a spatial result but also a dynamic process and system (Waldheim, 2006). The symbiotic city approach defines this dynamism through the metabolic relationship between the city and nature. Parametric design offers the opportunity to simulate, optimize and scenarioize this metabolism with concrete data and algorithms (Edmonds et al., 2022). Parametric design enables multiple environmental data (climate, water cycle, soil analysis, sunshine durations, etc.) to be brought together in a digital environment and transformed into functional space decisions (Kolarevic, 2001; Hudson, 2010). This becomes an important tool in the development of symbiotic cities (Allen and McQuade, 2011). Environmental variables such as permeable surface ratios, water retention capacity, and sunshine durations can be modeled with parametric tools and design decisions that consider the ecological balance can be produced. This enables landscape architects to move away from traditional form-oriented design and transform into performance-based, adaptable and system-based design producers (Hudson, 2010). Software such as Grasshopper, Rhino, and Dynamo play a significant role among the algorithmic methods used in parametric design. These tools allow for numerical modeling and performance analysis of environmental data such as the urban heat island effect, sunshine duration, wind directions, and permeable surface ratios. Thus, the nature-city relationships envisioned by the symbiotic city approach become quantitatively measurable (Kolarevic, 2003; Woodbury, 2010; Oxman, 2017).

In addition, the basic principles of the symbiotic architecture approach, integrity, continuity and mutual benefit, can be implemented not only formally but also functionally with parametric landscape design. In this context, landscape architecture is not only an aesthetic intervention, but also a strategic reconstruction of urban ecosystems.

Landscape architecture also plays a critical role in the production of hybrid systems such as intermediate areas where cities establish symbiotic relationships, such as green corridors, ecological spines and public transition spaces. The formation of these areas should not only be based on formal preferences, but also on parametrically analyzed socio-ecological relationships (Han et al., 2023). Thus, the design process can create new spatial arrangements that produce mutual benefits between the cycles of nature and urban life practices. In addition, parametric-symbiotic landscape design is an important tool in the development of infrastructure systems that are resilient to climate change. For example, designs shaped in light of data such as permeable surface ratios, flood risk maps and carbon

dioxide absorption potential do not only provide spatial aesthetics; they also create functional areas that reduce natural disaster risks and lower carbon footprints (Birkeland, 2008).

3.3.1. Conceptual Compatibility and Practical Limitations

Parametric design and symbiotic city approach stand out as two powerful methods that complement each other on a conceptual level. Both aim to develop sustainable, flexible and environmentally sensitive design solutions based on a systemic thinking structure. While the parametric approach offers a technical tool in data-based form production, the symbiotic approach gives these forms an ecological and ethical aspect. Despite this theoretical compatibility, the reflections of both approaches in landscape architecture practice are still limited. In this context, the compatibility and limitations of both concepts are explained under 4 subheadings.

• *Common Conceptual Ground*: Parametric design and symbiotic city approach are both based on systemic thinking and aim to produce spatial solutions that can adapt to dynamic environmental conditions. This partnership brings data-driven but nature-compatible design models to landscape architecture.

• *Complementary Qualities*: While parametric design offers a powerful tool in terms of form production, data analysis and multivariable system establishment, the symbiotic city approach provides content that directs these systems in ecological, ethical and social terms. Therefore, when form (parametric) and content (symbiotic) are combined, holistic landscape strategies can be developed.

• *Common Purpose in Sustainability*: Both approaches adopt sustainability as a goal; however, while parametric design pursues sustainability with performance-oriented models, the symbiotic approach interprets it through ecosystem integrity and continuity of life. This difference enables the development of multifaceted sustainability strategies in landscape design.

• *Application Gap*: Although both approaches are theoretically strong, they are represented with limited examples in landscape architecture practice. This situation can be associated with the lack of interdisciplinary knowledge and the inadequacy of the use of digital design tools.

3.3.2. Comparative Analysis

Using parametric design to compare symbiotic cities from different perspectives provides a more comprehensive assessment of the potential of these two approaches. Below, how parametric design enables multi-dimensional comparative analyses with symbiotic cities based on literature is examined under four headings:

• *Performance-Based Comparison*

Parametric design allows urban systems to be evaluated not only formally but also functionally. In this context, symbiotic cities can be compared numerically through performance criteria such as energy

efficiency, carbon footprint, access to green areas, and water cycle management. In this context, it is possible to measure the scalability of symbiotic cities, their adaptation capacity in the process, and the degree of interaction with ecological systems with parametric analyses.

• *Future Scenarios with Time-Space Simulations*

Parametric design allows for the prediction of how symbiotic systems may develop by modeling the temporal evolution of cities. This approach has the ability to visualize what kind of responses the city will give according to future climate scenarios, population changes, and infrastructure requirements. Edmonds et al., (2022) argue that parametric tools can work not only with current data but also with hypothetical futures. This way, the long-term resilience capacity of symbiotic cities can be calculated.

• *Multidisciplinary Integration: Socio-Ecological Systems*

Parametric design allows modeling symbiotic cities as a multi-dimensional system, as it can integrate data from different disciplines such as ecology, sociology, engineering, and economics. Schumacher (2016) defines parametric design as not only a form production tool but also an information-oriented "interdisciplinary thinking tool". This approach addresses socio-ecological systems together, enabling space to be processed not only physically but also culturally and socially.

This integration, for example, makes it possible to model the relationship between the health of an ecosystem and the well-being of a community on a parametric level. Thus, the potential of symbiotic urban structures to produce social benefits can also be quantified.

• *Formal and Morphological Comparison*

Parametric design is also a powerful tool for comparing the spatial formations of symbiotic cities. In particular, it can be analyzed how spatial components such as urban morphology, transportation schemes, and green infrastructure connections evolve under different local conditions. Parametric approaches emerge as an ideal method for modeling morphological differences, particularly focusing on the behavior of the form (Yoffe et al., 2020). In this context, landscape architecture has the potential to spatially represent symbiotic relationships and optimize these relationships with parametric tools. This situation shows that landscape architects are positioned as process designers as well as form designers. In addition, landscape architecture serves as a bridge that can transform the system-level urban vision of symbiotic city theory into local-scale, measurable and sustainable design practices with parametric design tools. This bridge plays a central role in both the ecological and technological transformation of 21st-century cities.

4. Conclusion

The study examined the concepts of parametric design and symbiotic city, two innovative approaches that are gaining importance in landscape architecture, at a theoretical level and evaluated the potential interaction areas between these approaches. Findings based on literature review and conceptual comparison revealed that these two approaches have complementary qualities.

Parametric design offers landscape architects the opportunity to develop adaptive, dynamic and scenario-based designs by processing multiple data (Schumacher, 2016). This feature provides great advantages in terms of producing fast and flexible responses to the complex environmental conditions of today's cities. However, the content of parametric design can often be limited to form production and numerical optimization.

The symbiotic city approach focuses more on ecological integrity, harmony with natural processes and mutually beneficial living systems (Register, 2006; Beatley, 2011). This approach advocates that human settlements evolve in an integrated manner with nature and that cities should be considered as ecosystem components.

While traditional urban planning and landscape design approaches often offer linear and fixed solutions, the algorithmic thinking offered by parametric design offers landscape architects the opportunity to model dynamic processes. In particular, basic parameters of the landscape such as microclimate, water management, soil permeability and plant diversity become measurable, comparable and scriptable through parametric systems (Hudson, 2010; Hensel, 2010). As emphasized in the literature, parametric design is a powerful tool for measuring and comparing environmental parameters (Oxman, 2017; Woodbury, 2010). In this context, the integration of parametric tools with the symbiotic approach proposed in this study enables sustainable design decisions based not only on formal diversity but also on climatic data. Modeling current environmental problems, particularly urban heat islands, plays a critical role in translating theoretical frameworks into practice. The combination of both approaches has the potential to produce powerful and holistic solutions in landscape design in terms of both formal flexibility and ecological depth. Parametric tools can serve as a tool for analyzing and modeling the multi-layered environmental relationships required by symbiotic cities. This unity is especially promising in terms of developing innovative responses to contemporary problems such as climate change, biodiversity loss and urban resilience.

Since landscape architecture functions as a spatial interface between nature and the city, it is one of the most powerful tools for spatially representing symbiotic cities. However, this representation should not only be structured at an aesthetic level, but also in the form of functional networks that support ecosystem services. At this point, parametric design strengthens the role of the landscape architect as a spatial strategy developer and system designer (Allen and McQuade, 2011; Charalampidis and Tsalikidis, 2015).

In this context, landscape architects' role extends beyond green space design; they can also act as contributors to cities' ecological performance, support nature–city interactions, and explore alternative scenarios with digital tools. The algorithmic measurement capacity of parametric design supports the practical applicability of the symbiotic city approach. As emphasized in this study, quantitatively demonstrating nature-city interactions through parametric tools contributes to the development of next-generation design paradigms. Future studies are recommended to apply this finding to the field and test it through experimental projects. For example, comparing the heat retention capacity of different surface materials through parametric models will fill the gap between theory and practice and add methodological strength to the study. This comparative perspective highlights how different design approaches, when analyzed together, reveal both their individual limitations and the opportunities they create when integrated. The comparison table illustrates the fundamental differences and complementarities between traditional design, parametric design, and the symbiotic approach, while also highlighting the potential of an integrated model. Traditional design primarily relies on intuition and visual aesthetics, often lacking systematic data-driven analyses. Parametric design, on the other hand, offers algorithmic processing of multiple variables, enabling advanced simulation and optimization processes, yet it remains highly technology-dependent and still limited in its practical applications. The symbiotic approach emphasizes the mutual relationship between nature and the city, advocating for ecological integrity and ethical responsibility. However, while strong in theory, it has not yet been widely realized in practice. Finally, the integrated model proposes a synthesis: by applying parametric tools to model symbiotic relationships, it becomes possible to achieve both theoretical depth and practical applicability. This comparative framework underscores the necessity of moving beyond isolated approaches, towards more holistic and measurable design strategies that align urban development with ecological imperatives (Table 4).

Although direct intersections between parametric design and the symbiotic city approach remain limited in the literature, this very limitation constitutes the original contribution of the present study. The few existing intersections point to fundamental features that require further development. In this context, three key dimensions can be identified: measurability, integration, and a new paradigm. Measurability refers to the capacity of parametric tools to model nature–city relations quantitatively, thereby transforming the abstract principles of the symbiotic approach into concrete and verifiable data. Integration denotes the incorporation of environmental parameters into the principles of the symbiotic city, providing a multidimensional perspective within the design process. The new paradigm demonstrates that this intersection is not merely a technical overlap but also marks the beginning of a methodological transformation in urban design and landscape architecture.

Table 4. Comparison of traditional, parametric, and symbiotic approaches

Approach	Characteristics	Limitations	Strengths
Traditional Design	Intuition-based, focused on visual aesthetics and historical continuity.	Lacks quantitative analysis, adaptation to environmental variables is weak.	Strong in cultural and historical continuity (e.g., preserving traditional forms).
Parametric Design	Uses algorithmic tools (e.g., Grasshopper, Rhino, Dynamo) to simulate solar radiation, wind flow, urban heat island effects.	Technology-dependent; results may vary depending on data input quality.	Provides measurable outputs (e.g., solar exposure reduced by 25% with shading structures).
Symbiotic Approach	Focuses on nature–city integration, enhancing ecosystem services (e.g., biodiversity, carbon sequestration).	Still mostly theoretical, with limited real-world applications.	Strong in ecological integrity (e.g., potential to reduce CO_2 emissions by 15% in green corridors).
Integrated Model	Combines parametric simulations with symbiotic principles to optimize both performance and ecological balance.	Few pilot projects exist; requires interdisciplinary collaboration.	Can demonstrate quantifiable improvements (e.g., 20% reduction in surface temperature + enhanced habitat diversity).

The intersections highlighted in this study can be further summarized in more concrete terms as follows:

- *Data-Driven Measurability:* Through parametric simulations, the nature–city relationships envisioned by the symbiotic city approach can be supported with quantitative data, thereby grounding the theoretical framework in concrete criteria.
- *Ecological and Systemic Integration:* The incorporation of parameters such as climate, water cycles, and biodiversity into urban design enhances the practical applicability of the symbiotic city concept.
- *Sustainability-Oriented New Paradigm:* The convergence of the two approaches generates a holistic design perspective that relies both on performance-based evaluations and ecological values.
- *Form–Content Coherence:* The formal flexibility enabled by parametric tools, when combined with the symbiotic city perspective, endows design outcomes with ecological and ethical substance.
- *Identification of the Implementation Gap:* While both approaches are theoretically robust, their limited real-world applications highlight the original contribution of this study and pave the way for future applied research.

Although the theoretical framework of this study reveals significant strengths, addressing the existing implementation gap remains crucial. In order to bridge this gap, pilot projects and experimental applications are recommended as essential steps toward validating the proposed approach. For instance, the application of parametric simulations and measurability analyses of symbiotic relationships on a selected urban public space would enable the empirical verification of the method. Such practice-based validation would not only strengthen the methodological rigor of the study but also provide a tangible contribution to the transformation of theoretical insights into practical design strategies. By doing so, the study would move beyond the limits of a literature-based exploration and actively support the integration of symbiotic and parametric approaches into real-world urban and landscape design practices.

In the study, it is seen that the concept of symbiotic city is addressed more at a “representative” or “symbolic” level in landscape architecture literature, and it is emphasized that this concept has now become applicable, calculable, and evaluable with parametric methods. This requires the discipline to move towards more data-based decision-making models, as well as to collaborate more effectively with public policy and urban management.

In the study, it is seen that the concept of symbiotic city is addressed more at a “representative” or “symbolic” level in landscape architecture literature, and it is emphasized that this concept has now become applicable, calculable, and evaluable with parametric methods. This requires the discipline to move towards more data-based decision-making models, as well as to collaborate more effectively with public policy and urban management.

As a result, the parametric design approach can be considered a powerful tool in realizing the symbiotic city vision. Parametric design and the symbiotic city approach offer not only technical tools and conceptual frameworks, but also a new way of thinking for landscape architecture. This synthesis can enable cities to be reimagined as systems that live together with nature. Future studies can deepen the impact of this approach with more application analysis and user experience-focused evaluations.

Conflict of Interest

The author of the article declares that she has no conflict of interest.

Author’s Contributions

The author declares that she has contributed 100% to the article.

References

Allen S., McQuade M. Landform building: Architecture’s new terrain. Zurich: Lars Müller Publishers; 2011.

Beatley T. Biophilic cities: Integrating nature into urban design and planning. Washington DC: Island Press; 2011.

Birkeland J. Positive development: From vicious circles to virtuous cycles through built environment design. London: Earthscan; 2008.

Boyacıoğlu C. The analysis of sustiınable architecture in the basis of symbiotic relation between city and ecosystem. Istanbul Technic University Doctoral Thesis, Istanbul, Turkey, 2010.

Cansever DB. Evaluation of symbiocity approach to providing sustainable urban development: example of Trabzon Değirmendere. Necmettin Erbakan University MS Thesis, Konya, Turkey, 2019.

Charalampidis E., Tsalikidis I. A parametric landscape design approach for urban green infrastructure development. Proceedings of the International Conference on Changing Cities II: Spatial, Design, Landscape & Socio-economic Dimensions, 22-26 June 2015, page no: 591-600, Peloponnese.

Edmonds A., Mourtis T., Boyle M. Parametric design-A drive towards a sustainable future. In: Innovation in construction: A practical guide to transforming the construction industry. Cham: Springer International Publishing; 2022.

Forman RTT. Land mosaics: The ecology of landscapes and regions. Cambridge: Cambridge University Press; 1995.

Gaha IS. Parametric architectural design for a new city identity: Materials, environments and new applications. Journal of Contemporary Urban Affairs 2023; 7(1): 122-138.

Han Y., Zhang K., Xu Y., Wang H., Chai T. Application of parametric design in the optimization of traditional landscape architecture. Processes 2023; 11(2): 639.

Hensel M. Performance-oriented architecture: Towards biologically informed design. FormAkademisk 2010; 3(1): 36-55.

Hudson R. Strategies for parametric design in architecture. Civil Engineering 2010; 274: 77-81.

Januszkiewicz K., Kowalski KG. Parametric architecture in the urban space. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017; 245(5): 052082.

Kolarevic B. Designing and manufacturing architecture in the digital age. Architectural Information Management 2001; 5: 117-123.

Kolarevic B. Architecture in the digital age. Design and Manufacturing. Nueva York-Londres: Spon Press-Taylor & Francis Group 2003.

Kurokawa K. Philosophy of urban design and its planning method. Tokyo: Shokokusha Publishing Co. Ltd.; 1994.

Kurokawa K. Symbiotic city. Architectural Journal 2001; (4): 7-12.

Lee J., Peng M., Kwan SY. Integration of environmental simulation to parametric design workflow: Thermal comfort and daylight. Building Performance Analysis Conference, 26-28 September 2018, page no:374-381, Chicago.

Lee YH. A study on the concepts in Kisho Kurokawa's architecture. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society 2015; 16(1): 827-836.

Li B. Ecology. Beijing: Higher Education Press; 2000.

López López D., Serrano Jiménez A., Gavilanes J., Ventura Blanch F., Barrios Padura Á., Díaz López C. A study on the parametric design parameters that influence environmental ergonomics and sustainability. Sustainability 2023; 15(7): 6304.

Mang P., Reed B. Designing from place: A regenerative framework and methodology. Building Research & Information 2012; 40(1): 23-38.

McHarg IL. Design with nature. Garden City, NY: Natural History Press; 1969.

Minh KD., Pham VH., Doan TM. Sustainable symbiotic relationship in the human ecosystem in the development of public spaces. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology 2021; 12(3): 112-127.

Mostafavi M., Doherty G. Ecological urbanism. Zurich: Lars Müller; 2016.

Mulder K., Delft TU. Urban symbiosis as a strategy for sustainabilising cities. Civil Engineering Research Journal 2017; 2(3): 1-7.

Newman P., Jennings I. Cities as sustainable ecosystems: Principles and practices. Washington DC: Island Press; 2012.

Olivieri F. Symbiotic design for a resilient urban ecosystem. Agathón - International Journal of Architecture, Art and Design 2022; 11: 40-49.

Oxman R. Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking. Design studies 2017; 52: 4-39.

Paracer S., Ahmadjian V. Symbiosis: An introduction to biological associations. Oxford: Oxford University Press; 2000.

Reed C., editor. Projective ecologies. New York: Actar D, Inc.; 2014.

Register R. Ecocities: Rebuilding cities in balance with nature. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers; 2006.

Ripley BA. Symbiosis: Recalibrating design thinking for the urban environment. University of Maryland, College Park, Master's Thesis, Maryland, USA, 2023.

Roudavski S. Towards morphogenesis in architecture. International Journal of Architectural Computing 2009; 7(3): 345-374.

Sapp J. Evolution by association: A history of symbiosis. New York: Oxford University Press; 1994.

Schumacher P. Parametricism: A new global style for architecture and urban design. Architectural Design 2009; 79(4): 14-23.

Schumacher P. Parametricism 2.0: Gearing up to impact the global built environment. Architectural Design 2016; 86(2): 8-17.

Seydioğulları HS. Sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerji. Planlama Dergisi 2013; 23(1): 19-25.

Šijaković M., Perić A. Symbiotic architecture: Redefinition of recycling design principles. Frontiers of Architectural Research 2018; 7(1): 67-79.

Solà Morales MD., Frampton K., Ibelings H. A matter of things. (Yayınevi ve yayın bilgisi eksik).

Spirn AW. Ecological urbanism: A framework for the design of resilient cities. Landscape Research 2005; 30: 359-377.

Stuiver M., The symbiotic city. Wageningen: Wageningen University Press; 2022.

The World Bank. Cities and climate change: An urgent agenda. Washington DC: The World Bank; 2010.

Waldheim C., The landscape urbanism reader. San Francisco: Chronicle Books; 2012.

Woodbury R. Elements of parametric design. Routledge; 2010.

Xue CQ., Sun LL., Tsai L. The architectural legacies of Kisho Kurokawa in China. The Journal of Architecture 2011; 16(3): 415-442.

Yoffe H., Plaut P., Fried S., Grobman Y. Enriching the parametric vocabulary of urban landscapes. Proceedings of the eCAADe Conference: Anthropologic Architecture and Fabrication in the Cognitive Age; 2020, Berlin.

Zamperini E., Lucenti S. Symbiotic architecture for building and urban rehabilitation. 2nd International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historic Buildings and Structures, 22-24 July 2015, page no: 1037-1046, Porto.

Zhang JJ., Sun YL., Shan KJ. Research of tourism town planning based on symbiosis theory. Applied Mechanics and Materials 2013; 253: 114-125.

OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
9(1): 582-608, 2026

OKU Journal of The Institute of Science and Technology, 9(1): 582-608, 2026

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

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

Meme Kanseri Gelişiminde ve Tedavisinde İntegrinlerin Rolü

Ceren BÖRÇEK KASURKA[1*], Yıldız Can BAL[2], Ceren DERELİ[3], Zülal Atlı ŞEKEROĞLU[4]

[1,2,4]Ordu Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, 52200, Ordu
[3]Karabük Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Biyoinformatik Anabilim Dalı, 78050, Karabük

[1]http://orcid.org/0000-0002-5772-9463
[2]http://orcid.org/0009-0006-2816-4869
[3]http://orcid.org/0009-0004-0224-0283
[4]https://orcid.org/0000-0002-3552-3819
*Sorumlu yazar: cerenborcek@yahoo.com

Derleme

Makale Tarihçesi:
Geliş tarihi: 29.09.2025
Kabul tarihi:05.01.2026
Online Yayınlanma: 13.01.2026

Anahtar Kelimeler:
Meme kanseri
İntegrinler
İntegrin bağlayıcı proteinler

ÖZ

Meme kanseri, kadın sağlığını tehdit eden önemli bir hastalıktır. Tanı ve tedavi süreçlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, tam olarak anlaşılamayan doğası sebebiyle büyük bir bilimsel ve klinik zorluk oluşturur. İntegrinler, hücrelerin hücre dışı matrise bağlanmasını sağlayan, hücreler arası iletişim ve sinyal iletimini destekleyen, hücre hareketinin, büyümesinin ve hayatta kalmasının düzenlenmesinde rol oynayan bir molekül ailesidir. Ayrıca kanser hücrelerinin invazyon ve metastaz aşamalarında da kritik rol oynamaktadır. Bu derleme, PubMed, Web of Science ve Scopus veri tabanlarında 2000–2025 yılları arasında yayımlanan makaleler taranarak hazırlanmış, özellikle integrinlerin meme kanseri progresyonu, metastaz ve tedavi direncindeki rolleri incelenmiştir. Meme kanserinde (özellikle triple negatif alt tipinde) integrinlerin hücresel işlevleri, bu reseptörlerin aktive ettiği temel sinyal yolları ve tümör ilerlemesiyle ilişkili moleküler mekanizmalar ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır. Ayrıca integrinlerin invazyon, metastaz ve tedavi direncindeki belirleyici rolleri değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, integrinlerin sahip olduğu çok yönlü roller, integrinlerin meme kanserinde yeni ve umut verici tedavi stratejilerinin geliştirilmesinde cazip hedefler oluşturmasına olanak sağlamaktadır.

The Role of Integrins in Breast Cancer Development and Treatment

Reviews

Article History:
Received: 29.09.2025
Accepted: 05.01.2026
Published online: 13.01.2026

Keywords:
Breast cancer
Integrins
Integrin-binding proteins

ABSTRACT

Breast cancer is a significant disease that threatens women's health. Despite significant advances in diagnosis and treatment, its poorly understood nature poses a major scientific and clinical challenge. Integrins are a family of molecules that enable cells to attach to the extracellular matrix, support intercellular communication and signal transmission, and play a role in regulating cell movement, growth, and survival. They also play a critical role in the invasion and metastasis stages of cancer cells. This review was prepared by searching articles published between 2000 and 2025 in the PubMed, Web of Science, and Scopus databases, focusing particularly on the roles of integrins in breast cancer progression, metastasis, and treatment resistance. The cellular functions of integrins in breast cancer (especially in the triple-negative subtype), the fundamental signaling pathways activated by these receptors, and the molecular mechanisms associated with tumor progression are discussed in detail. Furthermore, the decisive roles of

integrins in invasion, metastasis, and treatment resistance are evaluated. In conclusion, the multifaceted roles of integrins make them attractive targets for the development of novel and promising therapeutic strategies in breast cancer.

To Cite: Börçek Kasurka C., Bal YC., Dereli C., Şekeroğlu ZA. Meme Kanseri Gelişiminde ve Tedavisinde İntegrinlerin Rolü. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(1): 582-608.

1. Giriş

Meme kanseri, kadınlar arasında en sık teşhis edilen kanser türüdür ve dünya çapında kadınlarda kansere bağlı ölümlerin önde gelen nedenlerinden biri olmaya devam etmektedir (Singh ve ark., 2022). Global Cancer Observatory-GLOBCAN'ın 2022 yılında yayınladığı rapora göre, yeni teşhis edilen kadınlarda görülen meme kanseri vakaları, küresel çapta tüm kanser vakalarının %11,6'sını oluşturmaktadır. Bu oran kansere bağlı ölüm oranları açısından akciğer kanserinden sonra ikinci sırada yer almaktadır (Bray ve ark., 2024).

Meme kanseri, farklı patolojik özellikleri ve klinik etkileri olan çoklu alt tiplerden oluşan heterojen bir hastalıktır. Erkekler daha az etkilenmekle birlikte, en önemli risk faktörleri cinsiyet (kadınlar) ve ileri yaştır. Diğer risk faktörleri arasında obezite, östrojen maruziyeti, alkol tüketimi ve aile öyküsü yer almaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmaların sunduğu klinik ve deneysel veriler, farklı histopatolojik ve biyolojik özelliklere sahip meme kanserlerinin farklı tedavi yanıtlarına yol açan farklı davranışlar sergilediğini ve bu nedenle farklı terapötik stratejiler uygulanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Hem tedavi stratejilerini yönetebilmek adına, hem de meme kanseri tiplerini sınıflandırabilmek adına tümörlerde östrojen reseptörü (ER), progesteron reseptörü (PR) ve insan epidermal büyüme faktörü reseptörü 2 (HER2) dahil olmak üzere reseptörlerin işlevselliği moleküler tanımlayıcı olarak kullanılmaktadır. Bu tanımlama sayesinde, moleküler olarak hedeflenmiş kişiye özel tedavi seçeneklerini uygulayabilmek de mümkün olabilmektedir (Perou ve ark., 2000, Eliyatkın ve ark., 2015; Franco ve ark., 2018).

Meme kanseri, östrojen reseptörü (ER), progestron reseptörü (PR) ve insan epidermal büyüme faktörü reseptörü (HER2) ekspresyonlarına göre beş temel moleküler alt gruba ayrılmaktadır. Bu grupların adları ve reseptör ekspresyon durumları aşağıdaki gibidir;

1) Luminal A; ER(+) - PR(+/-) - HER2 (-)
2) Luminal B; ER(+) - PR(+/-) - HER2 (+)
3) Bazal Benzeri; ER(-) - PR(-) - HER2 (-)
4) Düşük Klaudinli; ER(-) - PR(-) - HER2 (-)
5) HER2 pozitif; ER(-) - PR(-) - HER2 (+)

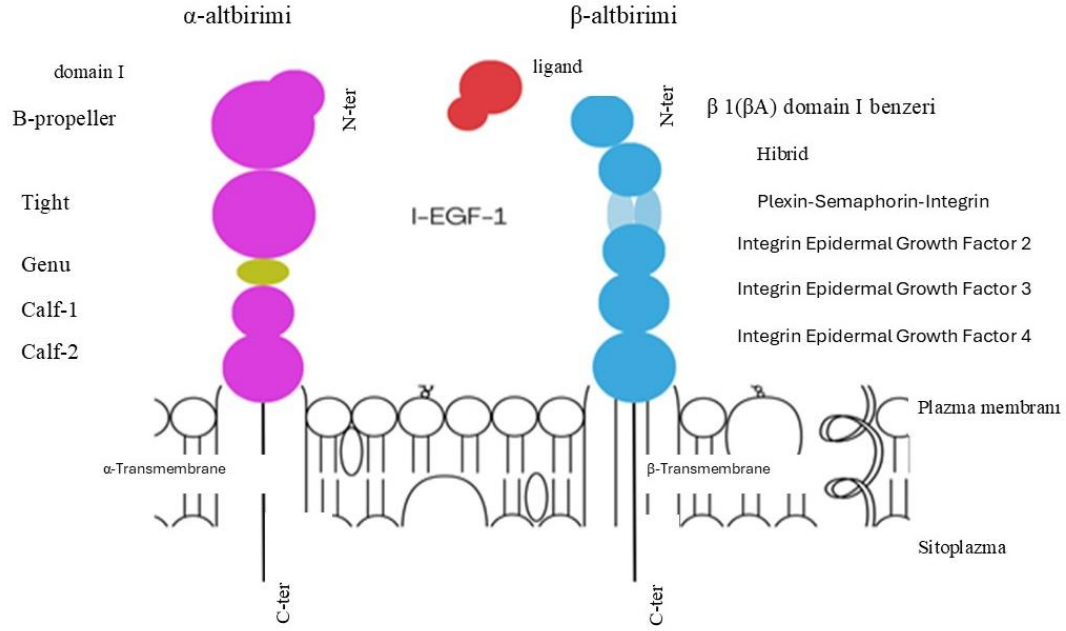
Kanser hastalarının daha uzun ve daha iyi bir yaşam sürmelerine yardımcı olmak için erken tanı ve tedavi yöntemleri hızla ilerlemekte; tümör ilerlemesi üzerinde etkili olan faktörler yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. İntegrinler, 1980'lerde keşfedildiklerinden beri sağlık ve hastalık durumlarını kapsayacak geniş bir yelpazede araştırmaların hedefi olmuştur. İntegrinler, ekstraselüler matriks (ECM)-sitoiskelet bağlayıcıları olarak görev yapan, hücreler ile çevreleri arasında hem biyokimyasal

hem de mekanik sinyalleri ileten "hücre yapışma transmembran reseptörleri" olarak ortaya çıkmıştır (Hynes, 1982; Hynes, 2004; Kechagia ve ark., 2019). İntegrinler, hücre yapışması ve hücre sinyallemesinde çok yönlü işlevlere sahip, çeşitli α ve β alt birimlerinden oluşan bir transmembran protein ailesidir. Ayrıca integrinlerin tümör ilerlemesi üzerindeki etkileri de araştırılmaktadır (Cooper ve Giancotti., 2019).

Bu derleme çalışması, integrin ailesinin meme kanserinde hücresel davranışları nasıl düzenlediğini; özellikle invazyon, metastaz, hücre içi sinyal iletimi, tümör–mikroçevre etkileşimi, kanser kök hücre fenotipi ve ilaç direnci gibi süreçlerdeki rollerini sistematik olarak değerlendirmeyi hedeflemektedir. PubMed, Web of Science ve Scopus veri tabanları üzerinden 2000–2025 yılları arasında yayımlanan makaleler kullanılarak literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Anahtar kelimeler "meme kanser/breast cancer", "integrin", "metastaz/metastasis", "ilaç direnci/drug resistance" ve "teröpatik hedef/therapeutic target" olarak belirlenmiştir. Literatür taramasında *in vitro, in vivo* ve klinik araştırmaları kapsayan çalışmalar değerlendirilmiştir. Seçilen çalışmalar, integrin alt tipleri, hücresel sinyal yolları, metastaz ve ilaç direnci bağlamında incelenmiştir. Bu derleme, mevcut bilgiler ışığında meme kanserinde integrinlerin rolü ve törapatik potansiyellerini tartışan narratif (anlatımsal) bir derleme niteliğindedir.

1.1. İntegrin Molekülü

Her bir α- veya β-integrin alt birimi tipik bir tip 1 transmembran proteinidir. Her biri büyük bir amino-terminal ektodomain, tek bir transmembran domain ve genellikle kısa bir karboksi-sitoplazmik kuyruğa sahiptir (Şekil 1) (Shattil ve ark., 2010; Yousefi ve ark., 2021).



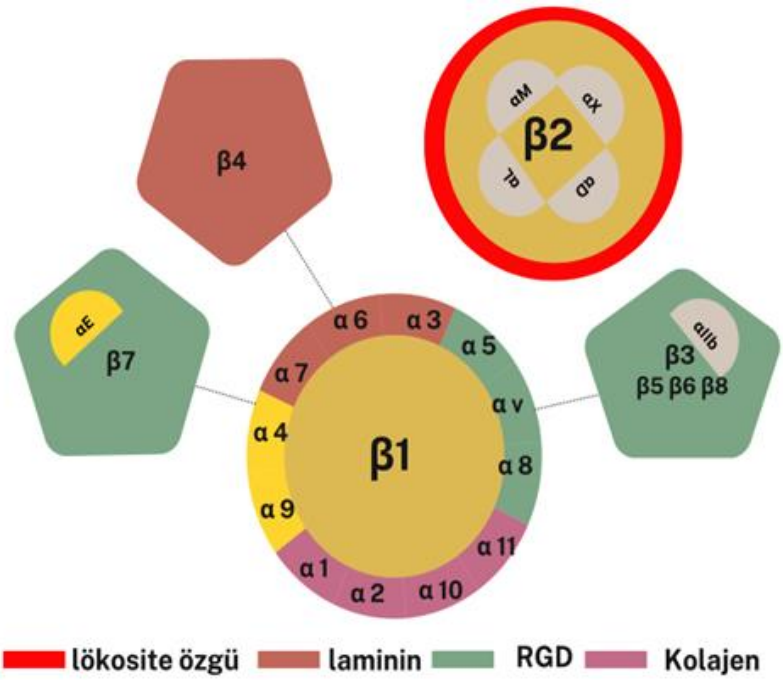
Şekil 1. İntegrin heterodimerleri, kovalent olmayan etkileşimlerle birleşen bir alfa (α) ve bir beta (β) alt biriminden oluşur. Hücre dışı bir ligand bağlayıcı kısım, iki çok alanlı, iki tek geçişli transmembran heliks ve iki kısa sitoplazmik kuyruktan oluşur (Yousefi ve ark., 2021'den uyarlanmıştır).

1.2. İntegrin Ailesinin Üyeleri

Memelilerde, her integrin heterodimeri kovalent olmayan bir komplekste bir α-alt birim ve bir β-alt birimden oluşur. Mevcut 8 α-alt birim ve 8 β-alt birim farklı kombinasyonlarda bir araya gelerek işlevsel olarak da birbirinden farklı olan 24 heterodimerik transmembran reseptörünü oluşturur (Moreno-Layseca ve ark., 2019). İntegrin heterodimerlerinin çoğunluğu β1 alt birimi ve αv alt birimini içerir. β1 alt birimi, 12 farklı α-alt birimiyle heterodimerik kompleksler oluşturabilir. Ancak β4, β5, β6 ve β8 altbirimleri yalnızca belirli bir α-alt birimiyle etkileşime girer. Çoğu α-alt birimi yalnızca bir β-partneriyle tek bir tür kompleks oluştururken α4 ve αv, birden fazla β-partneriyle etkileşime girerek (α4β1, α4β7, αvβ1, αvβ3, αvβ5, αvβ6 ve αvβ8) farklı molekülleri oluşturmaktadır (Şekil 2) (Pang ve ark., 2023).

İntegrin ailesi, toplamda 24 αβ üyesinden oluşan ve heterodimerler halinde bulunan proteinlerden oluşur. Bu üyeler, ligand bağlama özelliklerine veya alt birim bileşimlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar içerisindeki en büyük üç alt grup, β1 integrinleri, β2 integrinleri ve αv içeren integrinlerdir (Yousefi ve ark., 2021). Genel olarak, α alt birimleri integrinlere ligand özgüllüğü kazandırırken, β alt birimleri hücre iskeletine bağlanır ve çeşitli sinyal yollarını etkiler (Li ve ark., 2021).

Meme dokusu epitelinde, β1-integrin α1, α2, α3, α5 ve α6 alt birimleriyle heterodimerler oluştururken β4 yalnızca α6 ile heterodimer oluşturur (Nisticò ve ark., 2014). β1-integrinin anormal ekspresyonu, epitel–mezenkimal geçiş (EMT), metastaz ve anjiyogenez ile ilişkilendirilmektedir (Hou ve ark., 2016). Literatürde bu durumu destekleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yüksek β1-integrin ekspresyonunun, invaziv meme kanseri hastalarında hem genel sağkalımın hem de hastalıksız sağkalımın azalmasıyla ilişkili olduğu bildirilmiştir (dos Santos ve ark., 2012). Kolon ve meme kanserlerinde, α6β4-integrinin invaziv ve metastatik fenotipi teşvik ettiği, hemidesmozomlar aracılığıyla ekstraselüler matriks (ECM)'deki lamininlere bağlanarak stabil adezyonu kolaylaştırdığı gösterilmiştir (Stewart ve O'connor 2015). α6β4-integrinin hemidesmozomlardan ayrılmasının, tümör hücrelerinin büyümesi, invazyonu ve metastazına yol açan sinyalleri değiştirebileceği bildirilmektedir (Lipscomb ve Mercurio, 2005).



Şekil 2. İntegrin alt birimlerinin eşleşmesi. İntegrinler, hücrenin hücre dışı matris proteinlerine veya hücre yüzeyi karşı reseptörlerine yapışmasını sağlayan transmembran proteinlerdir. Hücre yüzeyinde α ve β alt birimlerinden oluşan heterodimerler olarak ifade edilirler. Bugüne kadar, 24 heterodimeri oluşturan 18 farklı α ve 8 β alt birimi tanımlanmıştır. Farklı integrinler, belirli bir dokuda belirli bir mekansal ve zamansal dağılım düzenine sahip farklı hücre dışı matris proteinlerine ve/veya hücre yüzey moleküllerine bağlanır. İntegrinler, yakından ilişkili alt birimlerin alt kümelerine ayrılır (Samaržija ve ark., 2020'den uyarlanmıştır).

1.3. İntegrinlerin Hücre Sinyal Yolaklarındaki Rolleri

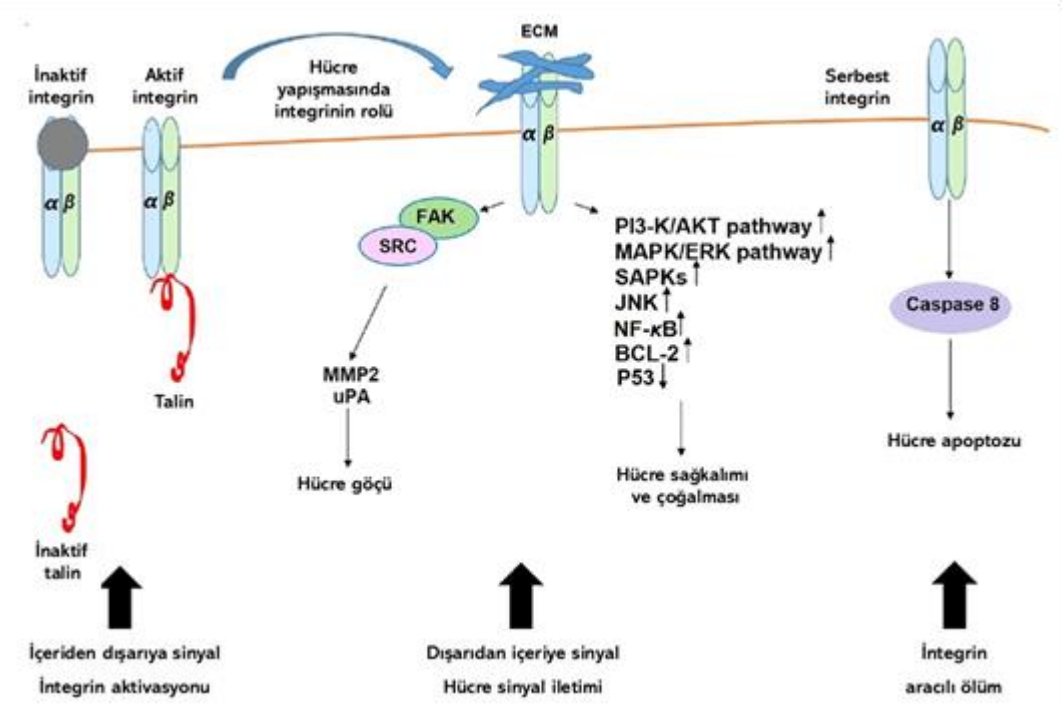
Meme kanseri, gen mutasyonları, epigenetik değişiklikler ve düzgün çalışmayan sinyal yolları dahil olmak üzere karmaşık bir patogeneze sahip, çok yönlü bir moleküler hastalıktır (Xu ve ark., 2023). Hastalık, meme kanserinin başlangıcı, ilerlemesi ve sonuçlarıyla bağlantılı temel hücresel yolların işlev bozukluğundan kaynaklanır (Li ve ark., 2022). Meme kanseri, hücre büyümesini ve çoğalmasını düzenleyen MAPK, RB/E2F, PI3K/AKT/mTOR ve TP53 yolları dahil olmak üzere moleküler düzeyde çeşitli hücresel yollarda değişikliklere yol açar (Zhu ve ark., 2022). Bu yolları farklı genler kontrol eder. Bu genlerden bazıları HER2, c-MYC ve RAS gibi onkogenler; östrojen reseptör genleri; siklin D1 ve E gibi hücre döngüsü genleri; RB, TP53 ve PTEN gibi tümör baskılayıcı genler; ve BRCA1 ile BRCA2 meme kanseri yatkınlık genleridir (Suter ve ark., 2007).

Hücre yüzeyinde aktif ve aktif olmayan formlar arasında hassas bir dengeye sahip olan integrinler, hücre dışı matris bileşenleri için ana adhesyon reseptörleridir. Kanser sürecinde, integrin sinyallerinde modifikasyon değişiklikleri ve protein-protein etkileşimleri gibi mekanizmalarla düzenlenmeler olduğu bilinmektedir. Kanser hücrelerinin göçü, dolaşımda hayatta kalması ve metastaz yapması, integrinler tarafından değiştirilebilir (Seguin ve ark., 2015). Bu nedenle, integrin sinyal yolunun temel mekanizmalarını incelemek ve integrinin nasıl çalıştığını anlamak kanser için yeni terapötik yaklaşımlar geliştirmek açısından da önemlidir (Raab-Westphal ve ark., 2017).

İntegrin heterodimerleri, hücrelerin ECM'ye bağlanmasını sağlar, hücreler arası iletişim ve sinyal iletimini destekler, hücre hareketi, büyümesi ve hayatta kalmasını düzenler ve kanser hücrelerinin metastazında kritik rol oynar. Integrinler, hücre içi ve dışı sinyalleri iletebilen iki yönlü sinyal yeteneklerine sahiptir. (Şekil 3) (Li ve ark., 2021).

Rap1 proteininin aktivasyonu, Talin ve kindlinler gibi integrin aktivatör proteinlerin toplanmasını tetikleyerek β-integrin kuyruklarında konformasyon değişikliklerine ve hücre dışı matris ligandlarına artan afiniteye yol açar. Integrinlerin hücre dışı matrise bağlanması, Focal Adhesion Kinase (FAK) ve Src gibi protein komplekslerini aktif hale getirir, bu da RAS/MAPK ve PI3K/AKT/mTOR gibi sinyal yollarını harekete geçirir. PI3K/AKT/mTOR yolu, özellikle üçlü negatif meme kanserinde (TNBC) önemli bir rol oynar ve FAK'ın aşırı ifadesi yüksek histolojik derece ile ilişkilidir (Humphries ve ark., 2006; Bahrami ve ark., 2018; Costa ve ark., 2018).

Meme kanseri gelişiminde, ilerlemesinde rol alan yolaklar ve integrinlerin bu yolaklarla etkileşimleri karmaşıktır. İntegrinler, ECM, büyüme faktörleri ve tümör mikroçevresinden gelen sinyalleri entegre ederek proliferasyon, invazyon, metastaz ve tedavi direnci gibi temel süreçlerin dinamiğini güçlü şekilde etkiler. Bu sebeple meme kanserinde tek bir yolağın evrensel olarak "en iyi" terapötik hedef olarak değerlendirilmesi mümkün değildir. Aslında seçilecek en etkili hedefler tümör alt tipi, moleküler değişimler ve direnç mekanizmalarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3. İntegrinler, plazma membranını kaplayan ve çift yönlü sinyalleme yeteneğine sahip proteinlerdir. Çeşitli sitoplazmik etkileşimler integrin aktivasyonunu kontrol ederek, "içeriden dışarıya" sinyaller ileten hücre dışı ligandlara afinitesini değiştirir. İntegrinler, "dışarıdan içeriye" sinyallere bağlanan ECM veya diğer hücre dışı matrikse yanıt olarak hücre içi yolları düzenleme yeteneğine sahiptir. İntegrin-ECM etkileşimleri ise adaptörlerin ve sinyal proteinlerinin integrinlerin sitoplazmik alanına alınmasıyla sonuçlanır ve odaksal yapışma olarak da bilinen makromoleküler kompleks birleşmesini teşvik eder (Li ve ark., 2021'ndan uyarlanmıştır).

1.4. Meme Kanserinde İntegrinler

Düzensiz integrin ekspresyonu ve işlevi, tümör gelişimini çeşitli düzeylerde etkileyebilir. Tümör başlangıcında epitel hücrelerinin ilk dönüşümünden, kanser hücrelerinin doku sınırları boyunca göçüne, istilasına ve uzak dokuların kolonizasyonuna kadar etkili olduğunu gösteren çeşitli çalışmalar mevcuttur (Faraldo ve ark., 2024).

Meme kanserindeki metastatik kaskadın daha derinlemesine anlaşılması, bu hastalıkla mücadelede terapötik müdahalelerin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Metastatik yayılma, kanser hücrelerinin hücre dışı matris ve endotel bariyerlerini aşma yeteneğini gerektirir. Bu süreçte, tümör hücreleri ve inflamatuar stromal hücreler tarafından üretilen proteazlar, özellikle matriks metaloproteinazlar (MMP'ler), hücre dışı matrisi bozar. MMP aktivitesi, integrin ekspresyonu ve ortak lokalizasyonla ilişkilidir. Meme kanseri hücrelerinde MMP aktivitesinin integrin ekspresyonuna fonksiyonel bağımlılığı gösterilmiştir (Rathinam ve Alahari., 2010). İntegrin aracılı kanser sinyalleri, çeşitli integrin bağlayıcı proteinler tarafından başlatılır. Örneğin, İntegrin αvβ3/ERK1/2 sinyal yolu, bağ dokusu büyüme faktörünün (CGF) işlevlerini kontrol eder. CGF, meme kanserinde daha fazla üretilir ve metastaza neden olur. Meme ve yumurtalık kanseri dokularında, β3 alt birimi ile heterodimerize olan integrinler, tümör büyümesi ve metastazında önemli rol oynar. Yani kanser hastalarında sürekli aktif olduğu süreçte kontrolsüz yayılmaya neden olan NF-kB aktivitesi MCP-1'in salgılanmasına ve metastaza yol açar. Ancak, β3-endoneksin proteininin fazla üretilmesi, MCP-1 seviyelerini düşürür bu sebeple integrin sinyal iletimini düzenleyen bir rol oynadığını gösterir (Yousefi ve ark., 2021).

Üçlü negatif meme kanseri (TNBC), meme kanseri vakalarının %15-20'sini ve meme kanseri ölümlerinin %30'unu oluşturur. Özellikle, erken evre TNBC'li hastaların yaklaşık %50'sinde hastalık tekrarlar ve hastaların %37'si ameliyattan sonraki ilk beş yıl içinde hastalığa yenik düşer. Bu agresif özellikleri yönlendiren moleküler mekanizmaların araştırılması ve anlaşılması, TNBC hastaları için yeni tedavi stratejileri geliştirmek adına gereklidir (Michaels ve ark., 2024). Bu sebeple derlememizde integrinler ve meme kanseri ilişkisi araştırılırken TNBC alt tipi daha kapsamlı ele alınmıştır.

TNBC; östrojen reseptörü (ER), progesteron reseptörü (PR) ve insan epidermal büyüme faktörü reseptörü 2'nin (HER2) aşırı ekspresyonunun bulunmadığı bir alt tip olarak tanımlanır. β4-integrin ve FAK'ın birlikte ekspresyonunun tümör üretimi ve metastazı artırdığı, ancak bu kompleksin bozulmasının TNBC hücrelerine saldırıyı artırabileceği ifade edilmektedir (Tai ve ark., 2015). Ayrıca, integrinlerin ve büyüme faktörü reseptörlerinin iş birliği yaparak FAK'ı etkinleştirebileceği ve meme kanseri malignansını regüle edebileceği belirtilmektedir.

Ek olarak, endositozlu integrinlerin hücre altı lokasyonlarda da çalışabildikleri gösterilmiştir. Endozomlardayken FAK aktivitesini destekleyebilen ve anoikisi baskılayabilen "içeriden-içe" sinyalleme yetenekleri vardır. Anoikise dirençli bir fenotipin geliştirilmesi, tümör metastazında kritik bir başlangıç adımıdır. Bu adım, kaderin ve integrin gibi sitozolik bağlayıcıların bozulmasıyla başlar ve takiben ortamdan uzaklaştırılır. Bu bozulma, hücre içi hücre iskeleti ve sinyal yolu değişikliklerine

neden olur ve kaspazları aktive ederek programlanmış hücre ölümünü başlatır. Anoikise direnç, kanser hücrelerinin hayatta kalmasına, dolaşımda varlığını sürdürmesine ve yeni doku ve organlarda kolonize olmasına olanak tanır; böylece metastaz sürecini destekler. Bu nedenle, anoikise direnç mekanizmalarının anlaşılması, meme kanserinin tedavisinde ve metastazın önlenmesinde önemli bir araştırma alanıdır (Alanko ve ark., 2015).

1.4.1. α6β4

Bir laminin reseptörü olarak integrin α6β4, bazal membrana bağlanır ve normal fizyolojide epitel bütünlüğünü korumak için hemidesmozom oluşumunu sağlar. Tümör ilerlemesi sırasında integrin α6β4, bu büyük hemidezmozomal plaklardan serbest kalır. Serbest α6β4, mikroçevreden gelen sinyalleri koordine eder ve güçlendirir. Bu sayede meme kanseri de dahil olmak üzere çeşitli kanser türlerinde invaziv ve metastatik bir fenotipin gelişine katkı sağlamış olur. TNBC vakalarının %80'inden fazlasında yüksek integrin α6β4 ekspresyonu gözlenmektedir. TNBC tedavisinde kişiye özel tıp için uygulanabilir stratejiler sağlanabilmesi ve prognozunun iyileştirilebileceğimesi açısından, integrin α6β4 sinyallemesinin nasıl hedeflenebileceği önem arz etmektedir. Bu sebeple Chen ve ark. (2024) çalışmalarında integrin α6β4'ün TNBC'nin PTPRZ1'in UCHL1-Hif-1α ekseni üzerinde kapsamlı bir çalışma yayınlamışlardır.

İntegrin α6β4'ün TNBC saldırganlığını yönlendirdiği moleküler mekanizma, UCHL1, HIF-1α ve PTPRZ1'i içeren spesifik üç proteinli düzenleyici bir kaskad aracılığıyla çalışır. Bu yolda, integrin α6β4, UCHL1 aracılığıyla PTPRZ1'i kontrol eder ve bu da HIF-1α'yı stabilize eder. UCHL1, HIF-1α'dan ubikitin etiketlerini kaldıran, onun bozunmasını önleyen ve normal oksijen koşulları altında bile birikmesine izin veren bir deubikitinasyon enzimi olarak işlev görür. Bu stabilize edilmiş HIF-1α daha sonra hücre sinyalizasyonunda ve göçünde önemli roller oynayan bir protein tirozin fosfataz olan PTPRZ1'in ekspresyonunu düzenleyebilen bir transkripsiyon faktörü olarak işlev görür. Bu düzenleyici eksenin koordineli işlevi, TNBC'nin invaziv yeteneklerinin sürdürülmesi için esastır, çünkü UCHL1 veya PTPRZ1'in bloke edilmesi, integrin β4 sinyallemesinin yönlendirdiği saldırganlığı önemli ölçüde azaltır. Bu mekanizma, integrin α6β4'ün, TNBC'de tümör ilerlemesini ve metastazı destekleyen güçlü bir sinyal ağı oluşturmak için birden fazla alt akış efektörünü nasıl koordine edebildiğini göstermektedir. İntegrin α6β4-UCHL1-HIF-1α-PTPRZ1 düzenleyici ekseninin keşfi, üçlü negatif meme kanserinin tedavisi için birçok umut verici tedavi fırsatı sunmaktadır. Araştırma, UCHL1 veya PTPRZ1 bloke edildiğinde, integrin β4 sinyallemesinin tetiklediği saldırganlığın önemli ölçüde azaldığını ve bu proteinlerin etkili ilaç hedefleri olarak hizmet edebileceğini göstermektedir. Bu bulgu, TNBC'nin şu anda diğer meme kanseri alt tiplerine kıyasla sınırlı hedefli tedavi seçeneklerine sahip olması nedeniyle özellikle önemlidir. Ek olarak, bu mekanizma özellikle tümör istilasını ve metastazı yönlendiren genleri kontrol ettiğinden, bu yolu hedef alan tedaviler potansiyel olarak kanser yayılmasını önleyebilir; bu da genellikle TNBC'nin yaşamı en çok tehdit eden yönüdür (Chen ve ark., 2024). TNBC'de yüksek düzeyde eksprese edilen integrin α6β4'ün, UCHL1 ve PTPRZ1 üzerinden

HIF-1α'yı stabilize ederek tümörün saldırgan ve ilerleyici özelliklerini besleyen kritik bir düzenleyici ağın merkezinde yer aldığı gösterilmiştir.

1.4.2. α6

Meme kanserinde α6 (Itgα6), tümör hücresi istilası ve metastazıyla ilişkilendirilmiştir. Faraldo ve ark., (2024) tarafından meme lüminal epitelindeki Brca1 ve p53 eksikliğine bağlı agresif meme kanserinin fare modelini kullanarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada primer tümör hücrelerinde, lüminal progenitörlerde Itga6'nın silinmesinin, tümör öncesi bezlerde p16'nın aşırı ekspresyonuyla ilişkili hücre döngüsü ilerlemesinin inhibibe ettiği bulunmuştur. Ayrıca Brca1/p53 kaybıyla tetiklenen tümör oluşumunun ilk aşamalarında normalde meydana gelen EMT benzeri bir programa müdahale yoluyla tümör oluşumunu engellediği bildirilmiştir (Faraldo ve ark., 2024). Meme kanserinde α6 integrini, tümör hücrelerinin invazyon ve metastaz potansiyelini artıran temel bir düzenleyici olarak öne çıkmaktadır. Bu molekülün kaybı ise hücre döngüsü ilerlemesini ve erken tümörleşmeyi baskılamaktadır. Bu integrin, meme kanserinin agresif biyolojisindeki belirleyici bir role sahiptir.

1.4.3. αvβ3

αvβ3 integrini, yara iyileşmesi ve anjiyogenez gibi çeşitli fizyolojik süreçlerde önemli bir rol oynar. Bu integrin, aynı zamanda tümör patogenezinde de kritik bir etkiye sahiptir. Araştırmalar, αvβ3 integrinin çeşitli kanser hücrelerinin büyümesi, hayatta kalması, invazyonu ve metastazı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Özellikle meme kanseri, melanom ve kolon karsinoması gibi kanser türlerinde, tümör progresyonu ve daha düşük hasta sağkalım oranları ile bağlantılıdır. Ayrıca, αvβ3 integrini, tümör hücrelerinin göç ve invazyonunu artırdığı bilinmektedir. αvβ3 ve CD44 gibi integrinler, özellikle kanser patogenezinde kritik öneme sahiptir (Bagati ve ark., 2021). Osteopontin ve Syndecan-1 gibi moleküller, αvβ3 ve αvβ5 integrinleri ile etkileşerek hücre yapışması, yayılması ve invazyonunu düzenler, böylece kanser hücrelerinin metastaz yapma yeteneğini artırabilir. Hücre çalışmalarında αvβ3 integrinin, Tip IV kollagenin α3 zincirine ve vitronektine yapışmayı artırdığı, ancak inhibisyonunun hücre göçünü ve in vivo anjiyogenezi azalttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, αvβ3 integrinin kanser tedavisinde hedeflenebilir bir molekül olduğunu ve bu integrinin inhibisyonunun kanser hücrelerinin metastaz yeteneğini sınırlayarak tedavi etkinliğini artırabileceğini gösterir (Rapraeger ve ark. 2009). αvβ3 integrini, meme kanserinde tümör hücrelerinin büyümesini, invazyonunu ve metastaz yapma yeteneğini artıran önemli bir düzenleyici olarak öne çıkmaktadır. Bu integrinin yüksek düzeyde bulunması, hastalığın daha hızlı ilerlemesi ve sağkalımın azalmasıyla ilişkilendirilmekte, dolayısıyla meme kanserinin agresif biyolojisine yön veren başlıca faktörlerden biri olarak görülmektedir.

1.4.4. αvb6/8

İntegrin αvb6/8 adı verilen bir proteine karşı geliştirilen antikor tedavisinin, tümör hücrelerinin yayılmasını azalttığı ve bağışıklık sisteminin tümör hücrelerine saldırmasını kolaylaştırdığı belirtilmektedir. Özellikle, CD8+ T hücrelerinin tümörlerin kontrol altına alınmasında önemli bir rol oynadığı ve bu antikor tedavisinin CD8+ T hücrelerinin etkinliğini artırdığı vurgulanmaktadır. Ayrıca, bu tedavinin akciğer metastazlarını azalttığı ve tümör mikroçevresini yeniden şekillendirdiği ifade edilmektedir. Sonuç olarak, integrin αvb6/8 antikor tedavisinin, TNBC gibi agresif kanser tiplerinde önemli bir terapötik fayda sağladığı görülmektedir. αvβ6 integrin TGF-β'nın aktive edilmesiyle matriks yeniden yapılanması ve fibrozis süreçlerini tetikler. Kolorektal kanser hücrelerinde αvβ6 integrin eksprese edilmesi, inaktif TGF-β salgılanmasına neden olur ve bu TGF-β, fibroblastları aktive ederek kolorektal kanser hücrelerinde hücrelerinin invazyonunu teşvik eder (Li ve ark., 2021). αvβ6/8 integrini, tümör hücrelerinin invazyonunu ve metastatik potansiyelini artıran, tümör mikroçevresini şekillendiren ve bağışıklık yanıtını baskılayan önemli bir düzenleyici olarak öne çıkmaktadır; bu nedenle, özellikle TNBC gibi agresif meme kanserlerinde, αvβ6/8'in hedeflenmesi tümörün yayılmasını sınırlayarak terapötik açıdan umut verici bir strateji sunmaktadır.

1.4.5. α5β1

α5β1 integrin, anjiyogenezin merkezi düzenleyicisi olarak bilinmektedir. Endotelyal hücrelerde yüksek seviyelerde bulunmasının, hücresel hayatta kalma üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Farelerde α5β1 integrin anormalliklerinin revaskülarizasyon kusurlarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Kolon kanserinde, α5β1 integrin eksprese eden hücrelerin serum açlığına bağlı apoptoza direnç gösterdiği ve bu integrinin ADAM-15 düşüklüğü ile kötü prognoz ile ilişkili bulunduğu rapor edilmiştir. Meme kanserinde, ERBB2 onkojeni α5β1 integrinini up regüle ederek tümör hücresi hayatta kalmasını artırabilir. Son çalışmalar, meme kanserinde hipoksik koşulların α5β1 integrin ekspresyonunu artırarak metastazı teşvik ettiğini göstermiştir. α5β1 integrininin akciğer kanseri, melanom ve gliom gibi diğer kanser türlerinde de rol oynadığı bilinmektedir. Ayrıca bu integrin PI3K/AKT, Rho-GTPazlar ve IL6-STAT3 gibi sinyal yolları ile de ilişkilendirilmektedir (Ignatoski ve ark., 2000; Rathinam ve ark., 2010). α5β1 integrini, meme kanserinde tümör hücrelerinin hayatta kalması, çoğalması ve göç/motilitesini destekleyen kritik işlevlere sahiptir. Bu integrin, tümorun agresif özelliklerini destekleyen çeşitli sinyal yollarını aktive ederek agresif süreci güçlendirmekte, metastaz ve kötü prognozla ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle, α5β1'in hedeflenmesi, tümör progresyonunu sınırlayarak metastazı önlemeye ve tedavi etkinliğini artırmaya yönelik potansiyel bir strateji sunma potansiyeli taşımaktadır.

1.4.6. α9β1

İntegrin α9β1 birçok memeli dokusunda bulunmaktadır. Molekülün hücre göçünü hızlandırabileceği düşünülmektedir. İntegrin α9β1'in özgül bağlanması, Src tirozin kinazı hızla aktive eder, bu da p130

Cas'in tirozin fosforilasyonuna ve Rac-1'in aktivasyonuna yol açar. Src, paxillin, Crk, Rac ve p21-aktive kinaz (PAK) yoluyla ERK1/2 'yi aktive ederek hücre proliferasyonunu artırır. CCN3, hücre yapışması ve proliferasyonu gibi çeşitli hücresel işlevlerde rol alan bir integrin reseptör ligandı olarak görev yapar. İntegrin α9β1'in aktivasyonu ayrıca, indüklenebilir nitrik oksit sentaz (iNOS) aktivasyonu yoluyla nitrik oksit (NO) üretimini artırır. Src tirozin kinaz veya nitrik oksit sentaz (NOS) inhibisyonu, integrin α9β1'e bağlı hücre göçünü azaltır. İntegrin α9'un özellikle sitoplazmik domaini, Src aktivasyonu, müteakip sinyal olayları ve hücre göçü süreçlerinde önemli rol oynar. Bu bulgular, çeşitli kanserlerin hücre yüzey reseptörü-integrin aracılı sinyal yollarına bağlı olarak ilerlediğini göstermektedir (Miskin ve ark., 2021). α9β1 integrin ekspresyonu, normal meme dokusuyla karşılaştırıldığında meme kanserinde yüksektir ve çalışmalar meme kanseri örneklerinin çoğunun yüksek α9 seviyeleri ifade ettiğini göstermektedir (Pucci ve diğerleri, 2022). Meme kanseri alt tipleri arasında, α9β1 integrini, özellikle üçlü negatif meme kanserinde (TNBC) yüksek ekspresyon gösterir ve burada metastatik potansiyelin artmasına katkıda bulunur. (Wang ve diğerleri, 2019). α9β1 integrini, meme kanserinde tümör hücrelerinin göç ve metastatik potansiyelini artıran önemli bir düzenleyici olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, özellikle TNBC'de tümör ilerlemesini sınırlamak için potansiyel bir terapötik hedef olarak değerlendirilmektedir.

1.4.7. α3β1

Miskin ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, metastatik TNBC'de integrin α3β1'in rolü ve bu integrinin Brain-2 (Brn-2) transkripsiyon faktörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma, α3β1'in TNBC hücrelerinde Brain-2 ifadesini düzenleyerek invazyon ve metastazı nasıl teşvik ettiğini göstermektedir. Ayrıca, α3β1'in Akt sinyal yolakları aracılığıyla Brn-2 ifadesini artırdığı ve hücre invazyonunu yönettiği belirlenmiştir. Hastaların verilerinden elde edilen bulgular, yüksek BRN2 ifadesinin kötü sağkalım ile ilişkili olduğunu ve α3β1'in Brn-2 ile pozitif bir korelasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır. TNBC'de tümör hücrelerinin invazyon ve metastatik potansiyelini artıran önemli bir düzenleyici olarak öne çıkan α3β1 integrini, bu integrini terapötik olarak hedeflenebilir kılmaktadır.

1.4.8. β 1/ β 3

Meme kanseri hücrelerinde β1 ve β3 integrinlerinin ifadesi arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur. Li ve Ark. (2021) tarafından yapılan kapsamlı bir derlemede bu integrinlerin ilişkisi karmaşık ve paradoksal olmakla birlikte, kanser prognozu ve klinik tedavide gösterge olarak kullanılmıştır. β1 integrinin baskılanması, β3 integrin ifadesinin artırılmasıyla telafi edilmiş ve bu, meme kanseri hücrelerinin metastazını sürdürmelerini sağlamıştır. Ancak β1 ve β3 integrinlerin aynı anda baskılanmasıyla tümör proliferasyonu etkilenmiştir, bu etki normal hücrelerde gözlenmemiştir. β1 integrinin rolleri arasında proliferasyonu teşvik etmek ve metastazı inhibe etmek bulunur. β1 integrinin inhibisyonu ise TGF-β fonksiyonunu etkiler ve bu da E-cadherin ifadesini azaltarak hücre-hücre bağlantılarının aktivitesini

azaltır; motilite ve göçü artırır. Öte yandan, β3 integrin epitel-mezenkimal geçişi (EMT) indükler ve non-kanonik bir FAKs-bağımsız sinyal yolunu aktive eder. Bu durum kanser hücrelerinin doğal hücre ölümünü önlemesine ve metastazlarını teşvik etmesini sağlar. Yani β1 integrini, hücre proliferasyonunu teşvik ederken, metastazı inhibe edebilir ve hücre-hücre bağlantılarını düzenler. Bununla birlikte, β3 integrini, EMT sürecini indükleyebilir ve kanser hücrelerinin metastaz kapasitesini artırabilir. Bu integrinlerin ifadesinin dengede olması veya dengesinin bozulmuş olması, kanser prognozu ve tedavi stratejileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. (Bui ve ark., 2019). β1 ve β3 integrinler meme kanserinde tümör hücre davranışlarını farklı ve çoğu zaman zıt şekillerde düzenler. β1 integrin proliferasyonu ve hücre-hücre bağlantılarını desteklerken, β3 integrin EMT'yi indükleyerek metastatik potansiyeli artırır. Bu karşıtlık, tedavi stratejilerinde her iki integrinin dengeli bir şekilde hedeflenmesini önemli kılmaktadır. Hatta, hem β1 hem β3 integrinlerin birlikte hedeflenmesinin, metastatik ilerlemenin önlenmesinde daha etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır (Hedrick ve ark., 2016; Bui ve ark., 2019).

Integrin α11'in aşırı ekspresyonu, ilaca dirençli meme kanseri hücrelerinin hayatta kalmasını sağlar. İlaç dirençli meme kanseri hücrelerinin hayatta kalmasını düzenleyen ortak anahtar molekülleri belirlemek için, iki farklı ilaç dirençli meme kanseri hücre hattı kullanılarak bir çalışma yapılmış. Tamoksifen dirençli (TAMR) ve adriamisin dirençli (ADR) MCF-7 hücre hatlarında yapılan bu çalışmada hücreler arasında farklı şekilde eksprese edilen genler incelenmiş. Çalışmada Integrin α11 ile dimerize olan integrin β1 incelenerek, dirençli hücre hatlarının hayatta kalmasında dimerizasyon yoğunluğu karşılaştırılmış; integrin β1 ekspresyon profilleri hücreler arasında karşılaştırılmış. Sonuçta araştırmacılar İntegrin α11'in, ilaca dirençli meme kanseri hücrelerinde sürekli olarak upregüle edildiğini bildirmişlerdir. İfadenin susturulmasıyla kanser kök hücrelerini (CSC'ler) ve epitel-mezenkimal geçişi (EMT) inhibe ettiği ve böylece antikanser ilaçlara duyarlılığı geri kazandırdığını ortaya koymuşlardır (Chaudhary ve ark., 2024).

CD93 çeşitli hücre tiplerinde bulunur ve sinyal iletiminde önemli bir rol oynar. Liu ve ark. (2024) tarafından CD93'ün MDA-MB-231 hücrelerinde integrin β1'i aktive etmek için MMRN2'ye bağlanıp bağlanmadığı test edilmiş ve ilişki doğrulanmış. Çalışmada CD93 baskılanmasının, MDA-MB-231 hücrelerinin çoğalmasını, göçünü ve istilasını engellediği; çıplak farelerde meme kanseri gelişimini ve vaskülojenik mimikri oluşumunu engellediği bildirilmiştir (Liu ve ark., 2024).

Son araştırmalar, TNBC ilerlemesinde QSOX2 ve ITGB1 (integrin β1) arasında doğrudan işlevsel bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. TNBC hücreleri, tüm meme kanseri alt tipleri arasında en yüksek QSOX2 ekspresyon seviyelerini göstermektedir. Bu etkileşimin altında yatan temel mekanizma, QSOX2'nin ITGB1 protein stabilitesini artırmadaki rolünü içerir. QSOX2 ekspresyonu hedefli baskılama yoluyla azaltıldığında, ITGB1 seviyeleri TNBC hücrelerinde hem mRNA hem de protein seviyelerinde önemli ölçüde azalmaktadır. Bu, upregüle QSOX2'nin, doğrudan ITGB1 stabilitesini güçlendiren disülfür bağı oluşumunu teşvik ederek integrin yapısını ve işlevini geliştirmesi nedeniyle meydana gelir. QSOX2-ITGB1 etkileşiminin TNBC davranışı üzerinde önemli işlevsel sonuçları

vardır. ITGB1'in QSOX2 tarafından stabilizasyonu, aşağı akış sinyal yollarını güçlendirir, hızlı hücre çoğalmasını teşvik eder ve epitel-mezenkimal geçiş (EMT) yoluyla agresif göçü kolaylaştırır. Bu bulgular, QSOX2-ITGB1 ekseninin hedeflenmesinin, TNBC saldırganlığını potansiyel olarak azaltabileceğini ve bu protein stabilize edici etkileşimi bozarak hasta sonuçlarını iyileştirebileceğini göstermektedir (Kim ve ark., 2024).

1.5. İntegrin Bağlayıcı Proteinler

İntegrin bağlayıcı proteinler de kanser ilerlemesinde önemli bir rol oynamaktadırlar. İntegrinle ilişkili bu proteinler, tümör baskılayıcı veya tümör destekleyici moleküller olarak işlev görebilirler (Yousefi ve ark., 2021). Tablo 1'de en önemli integrin bağlayıcı proteinler, bunların temel işlevleri ve meme kanseri patogenezine katkıları özetlenmiştir.

İntegrin bağlayıcı proteinler, hücrelerde integrin ekspresyonunu ve aktivitesini düzenleyerek kanserle ilişkili kritik süreçlerde önemli rol oynar. Örneğin, A549 ve HUVEC hücrelerinde artan αvβ3 integrini, hücrelerin kollajene yapışmasını artırırken, göçü azaltır. Osteopontin, αvβ3 ve CD44 gibi integrinlerle etkileşerek meme kanserinde hücre proliferasyonu, göçü ve anjiyogenezi teşvik eder. Syndecan-1, hücre yapışması ve yayılmasını düzenleyerek kanser hücrelerinin metastaz yapma yeteneğini artırır. Insulin receptor substrates-1 (IRS-1) ve cytohesin-1, integrin toplanmasını ve hücre yayılımını artırarak hücresel proliferasyonu destekler. UPAR, α5β1 ve diğer integrinlerle etkileşerek hücre göçünü kontrol eder ve meme tümörü invazyonunu artırır. Rab 25, α5β1 integrini ile etkileşerek tümör hücrelerinin invazyonunu artırır, fibronectin ise meme kanseri ilerlemesini teşvik eder. Bu etkileşimler, kanser biyolojisi ve tedavisinde önemli hedeflerdir (Spangenberg ve ark., 2006; Schaffner ve ark., 2013).

Tablo 1. İntegrin bağlayıcı proteinlerin meme kanseri invazyonu ve metastazındaki rolleri.

İntegrin bağlayıcı protein	Bağlayıcı ortak(lar)	Ana işlevler	Kanserle ilgili işlevler	Kaynaklar
Tümör teşvik edici				
Matriks metalloproteinazlar (MMP'ler)	αvβ3 integrin CD44 Hemopeksin	ECM degradasyonu	Hücre çoğalmasını, göçünü (yapışma/dağılma), farklılaşmayı, anjiyogenezi, apoptozu ve bağışıklık tepkisini etkileyerek meme kanserinde tümör destekleyici rol oynar.	Radisky ve Radisky, 2015.
Osteopontin	Ana: αVβ3 ve CD44 Alternatifler: αvβ1, αvβ5, αvβ6, α4β1, α5β1, α8β1, α9β1	Hücre çoğalmasını, göçünü ve apoptozu düzenler. Hematopoietik kök hücrelerin düzenlenmesinde rol oynar.	Tümör metastazını artırır. Apoptozu azaltır. Meme tümörü büyümesini (αvβ3) teşvik eder. Tümör hücre hareketliliğini ve anjiyogenezisi ve metastazı artırır. Terapi direncine sebebiyet verir.	Wei ve ark., 2017; Kale ve ark., 2015; Kovacheva ve ark., 2019; Pio ve ark., 2017; Göthlin Eremo ve ark., 2020.
Syndecan-1	αvβ3 αvβ5	Hücre yapışmasını, yayılmasını ve invazyonunu düzenler.	Tümör büyümesini ve metastazı hızlandırır. Kanser kök hücrelerini modüle eder. Radyoterapiye karşı direnç geliştirir.	Sayyad ve ark., 2019; Malek-Hosseini ve ark., 2017; Cordone ve ark., 2017; Ibrahim ve ark., 2013; Hassan ve ark., 2013
İnsülin reseptör substratları-1	αvβ3	İnsülin ve IGF1 kaynaklı sinyal yolunu düzenler.	Meme tümörü saldırganlığını artırır. Hücresel çoğalmayı destekler. Meme karsinomu hücrelerinin hayatta kalmasını ve yayılmasını hızlandırır. Kanser hücrelerini kemoterapiye karşı duyarlı hale getirir.	Mardilovich ve ark., 2009; Porter ve ark., 2013; Li ve ark., 2018.
Sitohezin-1	αLβ2	ADP-ribozilasyon faktörü GTPazları için guanin-nükleotid değişim faktörü olarak görev yapar. Aktin sitoskeletonunu düzenler.	Meme kanseri gelişiminde rol oynar. Hücre göçünü artırır.	Casalou ve ark., 2016
Üroplazminojen aktivatör reseptörü (uPAR)	α5β1 α4β1 α6β1 α9β1 α5β3 Cyr61 YB-1	Matris bozunmasını, lokal fibrinolizi, hücre göçünü ve iltihabı kontrol eder.	Meme tümörü invazyonunu ve metastazı artırır.	Annis ve ark., 2018; Indira Chandran ve ark., 2015.
İntegrin sitoplazmik alanla	β1A integrin sitoplazmik	Gen ifadesini, hücre yapışmasını ve	Hücresel çoğalmayı uyarır.	Fournier ve ark., 2002;

ilişkili protein (ICAP-1)	alanı nm23-H2	çoğalmasını kontrol eder.	Metastazda rol oynar.	
Trombospondin-1	α3β1 αvβ3	Hücre yapışmasını ve göçünü kontrol eder.	Tümör büyümesini, anjiyogenezi ve metastazı destekler.	Cen ve ark., 2019.
Von Willebrand faktörü (VWF)	αIIβ3 αvβ3	Hemostazı ve hücre göçünü kontrol eder.	Tümör hücresi infiltrasyonunu ve anjiyogenezi hızlandırır.	Gil-Bazo ve ark., 2003.
Talin	β1, β3 sitoplazmik alanları Vinculin	Fokal yapışıklıklar oluşturur. İntegrinin hücre dışı alanlarının ECM'ye olan afinitesini artırır.	Hücre göçünü ve fokal yapışma dinamiklerini artırır.	Li ve ark., 2017.
α-aktinin	β1, β2 ve β3 integrinleri	Aktin filamentleri ile fokal yapışıklıklar arasındaki önemli bağlantı elemanlarıdır.	Meme kanseri hücrelerinde radyorezistansa bağlı invazivlik sağlar.	
Rab 25	α5β1	İntegrin içeren veziküllerin lokalizasyonunu matrisi istila eden psödopodların ön kenarına yönlendirir.	Tümör hücrelerinin invazyonunu arttırır. Bazı Rab'ler tümör oluşturucu olabilirken, diğerleri tümör baskılayıcı işlevlere sahip olabilir.	Chia ve Tang, 2009.
Laminin	α3β1 α6β1 α6β4 α7β1	Bazal laminanın önemli bir bileşenidir.	Metastatik meme kanserinin göçünü teşvik eder. Kök hücre popülasyonunu düzenler.	Sato ve ark., 2015; Berardi ve ark., 2017.
Kolajen	α1β1 α2β1 αvβ3	Çeşitli bağ dokularındaki ECM ana yapısal proteini olarak görev yapar.	Kemoterapi direncini meme kanseri hücrelerine aktarır. İnsan meme kanseri hücrelerinin hayatta kalmasını destekler.	Baltes ve ark., 2020; Badaoui ve ark., 2017.
Fibronektin	α5β1 kolajen fibrin proteoglikanlar	Hücre yapışması, büyümesi, göçü ve farklılaşmasında rol oynar.	Meme kanseri hücrelerinin yayılmasını kolaylaştırır. Meme kanserinin ilerlemesini destekler.	Park ve Helfman 2019; Kwon ve ark. 2020.
Tümör baskılayıcılar				
β3-endoneksin	İntegrin β3 sitoplazmik alanı	αIIbβ3'ü aktive eder. Hücre döngüsü ilerlemesini düzenler.	Hücre çoğalmasını engeller. Apoptozu destekler. Anjiyogenezi durdurur.	Ohtoshi ve ark., 2000; Li ve ark., 2004; Kracun ve ark., 2014
Nişarin	α5 integrin sitoplazmik alanı PAK, Rac ve LIM kinazları LKB1	Rac sinyalleme kademesini birden fazla kademede düzenler. Aktin filamentlerini organize eder (Rac sinyali). Fokal yapışma proteinlerini düzenler. Eksozom salgılanmasını tetikler.	Rac tarafından yönlendirilen hücre göçünü ve istilasını engeller. Meme kanseri hücrelerinin büyümesini ve metastazını kontrol eder.	Katz ve Streuli, 2007; Juliano ve ark., 2004; Chen ve ark.,2015.
Tensin	β1 integrin sitoplazmik kuyruğu Vinculin	Hücresel yapının korunması ve sinyal iletiminde rol alır. Fokal yapışma noktasındaki aktin filamentleri için çapa	Transformasyon potansiyelini azaltır. Tümör başlatıcı sinyal yollarını bastırır.	Lo ve ark., 1994;

	paxillin, Src, FAK, PI-3K ve p130CAS	görevi görür.		
Matris metalloproteinaz-2 (TIMP-2) doku inhibitörü	α5β1	MMP'yi engeller.	Tümör büyümesini ve metastazı baskılar.	Peeney ve ark., 2019.

2. Meme Kanseri Tedavisinde İntegrini Hedef Alan Stratejiler

İntegrin hedeflemesinin terapötik etkileri, kanser hücrelerinin hayatta kalması ve metastaz yapması için ihtiyaç duyduğu kritik hücresel süreçleri bozmaktan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla integrin blokajının hücresel dinamikler üzerindeki çok yönlü etkileri, tedavi stratejilerinin temelini oluşturmaktadır.

β1 integrinini fonksiyonel antikorlarla bloke etmek, hücre çoğalmasını azaltır ve apoptozu indükler; ancak yalnızca β1'i hedef alan monoterapi yaklaşımları sınırlı klinik fayda göstermiştir (Hou ve ark., 2016) .

Önemli bir mekanizma, kanser ilerlemesinde kritik bir süreç olan integrin aracılı epitel-mezenkimal geçişi (EMT) bozmayı içerir. TGF-β stimülasyonu, meme epitel hücrelerinde EMT ile örtüşen αVβ3 integrin ekspresyonunu indükler ve β3 integrinin siRNA ile bloke edilmesi hem TGF-β indüksiyonunu hem de EMT stimülasyonunu önler (Lu ve ark., 2008).

İntegrin hedefli tedaviler, integrinler ve büyüme faktörü reseptörleri arasındaki işbirlikçi sinyal ağlarını bozmada özellikle etkilidir. TNBC'de EGFR, integrin αvβ3 ile işbirliği yaparak integrinin vaskülojenik taklit için gerekli olan hücre dışı ligandlara bağlanmasını düzenler.Böylece bu etkileşimin bozulması hem integrin αvβ3'e bağlı hücre yapışmasını hem de tümör büyümesini engeller (Camorani ve ark., 2017)

Mekanizmalar ayrıca kanser kök hücrelerini hedeflemeye ve ilaç direncini aşmaya kadar uzanır. İntegrin hedeflemesi, yuvalanmayı ve kolonizasyonu engelleme, kendini yenilemeyi ve çoğalmayı düzenleme, metastatik potansiyeli azaltma ve tedavi duyarlılığını artırma dahil olmak üzere birden fazla yol aracılığıyla kanser kök hücrelerini etkili bir şekilde etkileyebilir (Gou ve ark., 2024) .

Meme kanseri için mevcut integrin hedefli tedaviler arasında monoklonal antikorlar (AIIB2, LM609/Etaracizumab, CNTO95), küçük molekül inhibitörleri (silengitid, ATN-161, pranlukast), peptit bazlı ajanlar (RGD peptitleri) ve aptamerler ve hedeflenmiş nanopartiküller gibi yenilikçi yaklaşımlar yer almaktadır. Bu ajanlar hem monoterapi olarak hem de kemoterapi, radyasyon ve diğer hedeflenmiş tedavilerle kombinasyon halinde test edilmektedir."

2.1. Monoklonal Antikorlar

Meme kanseri için geliştirilen integrin hedefli tedaviler arasında çeşitli monoklonal antikorlar önemli bir yer tutmaktadır. αvβ3 integrinini hedefleyen insanlaştırılmış monoklonal antikor LM609/Etaracizumab meme kanseri modellerinde belirgin anti-anjiyojenik aktivite göstermektedir (Brooks ve ark., 1995). Bunun yanında, CNTO95 isimli tamamen insanlaştırılmış anti-αv integrin antikoru, hem anti-anjiyojenik etki ortaya koymakta hem de hücre sinyallemesini ve invazyonu baskılamaktadır (Chen ve ark. 2008; Trikha ve ark., 2004). β1-integrin blokajı sağlayan AIIB2, özellikle HER2 pozitif meme kanseri hücrelerinde ve trastuzumab dirençli hatlarda, trastuzumabın sitotoksik etkilerini sinerjik olarak artırmakta ve radyasyonla birleştiğinde tümör büyüme inhibisyonunu güçlendirmektedir (Lahlou ve ark., 2011). Yüksek afiniteli bir diğer ajan olan Abergrin

(MEDI-522), çeşitli klinik çalışmalarda αvβ3 integrinine karşı etkinliği değerlendirilmekte olan bir antikordur (Cerqueira ve ark., 2022).

2.2. Küçük Molekül İnhibitörleri

Küçük molekül yapısındaki inhibitörler de integrin hedefli meme kanseri tedavilerinde önemli potansiyeller sunmaktadır. Bunlar arasında yer alan Cilengitide, αvβ3 ve αvβ5 integrinlerini hedef alan siklik RGD motifli (Arginin–Glisin–Aspartik Asit) bir pentapeptittir ve metastatik kemik kolonizasyonunu baskıladığı gibi radyoterapiye yanıtı da artırmaktadır. (Lautenschlaeger ve ark., 2013). Cilengitide molekülünün meme kanseri de dahil olmak üzere birden fazla tümör için faz I ve II denemelerinde iyi tolere edildiği bildirilmektedir (Burčík ve ark. 2025) Ayrıca FDA onaylı bir astım ilacı olan Pranlukast'ın, TNBC modellerinde CD49f antagonisti gibi davranarak kanser kök hücresi popülasyonunu azalttığı gösterilmiştir (Velazquez-Quesada ve ark., 2020). GLPG0187, TNBC hücrelerinde Cilengitide ile benzer duyarlılık gösteren bir pan-ITGAV inhibitörü olarak tanımlanmıştır (Girnius ve ark., 2024).

2.3. Peptit Bazlı Maddeler

RGD peptit tabanlı hedefleme mekanizmaları, TNBC'de yaygın olarak aşırı ifade edilen αvβ3, αvβ5 ve α5β1 integrinlerine özgül bağlanma afinitesinden yararlanır. Bu peptitler, kanser hücrelerini ve tümör damarlarını spesifik olarak hedefleyerek, sağlıklı dokular üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirirken ilaç iletim verimliliğini artırabilir (Javid ve ark., 2024)

Peptit tabanlı ajanlar, integrin hedefli tedavilerde hem doğrudan tümör baskılama hem de hedefe yönelik ilaç iletimini artırma potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir. RGD tabanlı olmayan bir peptit inhibitörü olan ATN-161, integrin α5β1'i hedeflemekte ve faz II klinik denemelerde yer almasının yanı sıra meme kanseri ksenograft modellerinde tümör büyümesini ve metastazı anlamlı şekilde azaltmaktadır (Lahlou ve ark., 2011). Ayrıca TP5-iRGD peptidi, antikanser bileşiklerle birlikte uygulandığında IC50 değerlerinde belirgin azalma oluşturarak αvβ3 etkileşiminin güçlendirilmesi yoluyla terapötik etkinliği artırmaktadır (Eid ve ark., 2019). αvβ3 integrinine özgü bağlanma kapasitesine sahip RGD peptitleri ise özellikle nanopartikül formülasyonlarında kullanılarak ilaç iletimini artırmakta ve kemoterapi direncinin aşılmasına katkı sağlamaktadır (Wang ve ark., 2021).

2.4. Yenilikçi Yaklaşımlar

İntegrin hedefli tedavilere yönelik daha yenilikçi ve gelişmiş stratejiler arasında aptamerler, çift ligandlı nanopartiküller, integrin parçalayıcılar ve siRNA taşıyıcı sistemleri bulunmaktadır. β3 integrinine yönelik siRNA yüklü ECO tabanlı nanopartiküller ise özellikle RGD peptitleriyle birleştirildiğinde üçlü negatif meme kanseri modellerinde hem primer tümör büyümesini hem de metastatik yükü anlamlı derecede azaltmaktadır (Lu ve ark., 2015). Hem EGFR'yi hem de doksorubisin yüklü αvβ3 integrinini hedefleyen çift ligandlı nanopartiküller ise metastatik meme

kanseri modellerinde sağkalımı anlamlı şekilde artırmaktadır (Covarrubias ve ark., 2019). Bunun yanı sıra lizozomal hedefleme yolaklarını kullanarak αv integrinlerini parçalamayı amaçlayan yeni bileşiklerin güçlü antiproliferatif etkiler ürettiği bildirilmiştir (Monroy ve ark., 2025).

3. Sonuçlar

İntegrin β1, αvβ6, αvβ3, α3β1 ve α6β4, meme kanserinde en belirgin olanlardır ve alt tipe özgü hedefleme stratejileri klinik öncesi dönemde güçlü bir umut vaat etmektedir. HER2+ kanserlerde αvβ6'nın ve TNBC ve ilaca dirençli kanserlerde β1/αvβ3'ün hedeflenmesi, özellikle antikorlar, aptamerler ve siRNA tabanlı yaklaşımlar kullanılarak klinik uygulamaya en yakın olanıdır. Meme kanserinde integrinlerin rolü, hücreler arası etkileşimlerin karmaşıklığı ve integrinlerin kanser hücrelerinin davranışlarını nasıl şekillendirdiği üzerine derinlemesine bir anlayış gerektirir. Integrinler, hücrelerin dış ortamla iletişim kurmasında kritik roller oynar ve bu süreçte çeşitli sinyal yolaklarını etkiler. Özellikle αvβ3, αvβ5, α6β4, ve α9β1 gibi integrinler, metastatik ilerlemeyi teşvik ederek ve hücrelerin ekstraselüler matriks ile etkileşimini düzenleyerek meme kanserinin invazyon sürecinde önemli bir rol oynarlar. Bununla birlikte, integrinlerin ECM proteazlarıyla etkileşerek bazal membranın parçalanmasına katkıda bulunduğu bilinmektedir. Meme kanseri tedavisinde integrinlerin hedeflenmesi, diğer hedeflenmiş terapilerle (tirozin kinaz inhibitörleri, büyüme faktörü antikorları veya CAR-T terapisi gibi) kombinasyon halinde kullanılarak ilaç geliştirme potansiyeline sahip olabilir. Ancak bu yaklaşımın etkinliğini artırmak için integrin mekanizmalarının kapsamlı bir şekilde araştırılması ve uygun ilaç dozlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, integrinlerin meme kanseri tedavisindeki rolü, hücresel sinyallemeyi etkileyen karmaşık mekanizmaların anlaşılmasıyla daha iyi yönetilebilir ve terapötik stratejilere entegre edilebilir. Gelecekte, integrinlerin moleküler mekanizmalarının derinlemesine anlaşılması ve alt tip-spesifik yaklaşımların geliştirilmesi, meme kanseri tedavisinde daha kişiselleştirilmiş ve etkili terapötik çözümler sunma yolunda kritik bir adım olacaktır.

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

Alanko J., Mai A., Jacquemet G., Schauer K., Kaukonen R., Saari M., Goud B., Ivaska J. Integrin endosomal signalling suppresses anoikis. Nature Cell Biology 2015; 17: 1412-1421.

Annis MG., Ouellet V., Rennhack JP., L'Esperance S., Rancourt C., Mes-Masson AM., Andrechek ER., Siegel PM. Integrin-uPAR signaling leads to FRA-1 phosphorylation and enhanced breast cancer invasion. Breast Cancer Research 2018; 20(1): 9.

Badaoui M., Mimsy-Julienne C., Saby C., Van Gulick L., Peretti M., Jeannesson P., Morjani H., Ouadid-Ahidouch H. Collagen type 1 promotes survival of human breast cancer cells by overexpressing Kv10. 1 potassium and Orai1 calcium channels through DDR1-dependent pathway. Oncotarget 2017; 9(37): 24653-24671.

Bagati A., Kumar S., Jiang P., Pyrdol J., Zou AE., Godicelj A., Mathewson ND, Cartwright ANR, Cejas P, Brown, M, Giobbie-Hurder A., Dillon, D., Agudo, J., Mittendorf, EA, Liu X S, Wucherpfennig KW. Integrin αvβ6–TGFβ–SOX4 pathway drives immune evasion in triple-negative breast cancer. Cancer Cell 2021; 39(1): 54-67.

Bahrami A., Khazaei M., Shahidsales S., Hassanian SM., Hasanzadeh M., Maftouh M., Ferns GA., Avan A. The therapeutic potential of PI3K/Akt/mTOR inhibitors in breast cancer: rational and progress. The Journal of Cellular Biochemistry 2018; 119: 213–222.

Baltes F., Pfeifer V., Silbermann K., Caspers J., von Rekowski KW., Schlesinger M., Bendas G. β1-Integrin binding to collagen type 1 transmits breast cancer cells into chemoresistance by activating ABC efflux transporters. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research 2020; 1867(5): 118663.

Beauvais DL., Ell BJ., McWhorter AR., Rapraeger AC. Syndecan-1 regulates αvβ3 and αvβ5 integrin activation during angiogenesis and is blocked by synstatin, a novel peptide inhibitor. J Exp Med 2009; 206(3): 691-705.

Berardi DE., Raffo D., Todaro LB. Simian M. Laminin modulates the stem cell population in LM05-E murine breast cancer cells through the activation of the MAPK/ERK pathway. Cancer Research and Treatment: Official Journal of Korean Cancer Association 2017; 49(4): 869-879.

Bray F., Laversanne M., Sung H., Ferlay J., Siegel RL., Soerjomataram I., Jemal A. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. CA: A Cancer Journal for Clinicians 2024; 74(3): 229-263.

Brooks PC., Strömblad S., Klemke R., Visscher D., Sarkar FH., Cheresh DA. Antiintegrin alpha v beta 3 blocks human breast cancer growth and angiogenesis in human skin. J Clin Invest 1995; 96(4): 1815-1822.

Bui T., Rennhack, J., Mok S., Ling C., Perez M., Roccamo J., Andrechek Er., Moraes C., Muller WJ. Functional redundancy between β1 and β3 integrin in activating the IR/Akt/mTORC1 signaling axis to promote ErbB2-driven breast cancer. Cell Reports 2019; 29(3): 589-602.

Burčík D., Macko JF., Podrojková N., Demeterová J., Stano M., Oriňak A. Role of cell adhesion in cancer metastasis formation: A review. ACS Omega 2025; 10: 5193-5213.

Camorani S., Crescenzi E., Gramanzini M., Fedele M., Zannetti A., Cerchia L. Aptamer-mediated impairment of EGFR-integrin αvβ3 complex inhibits vasculogenic mimicry and growth of triple-negative breast cancers. Sci Rep 2017; 7 (1): 46659.

Casalou C., Faustino A., Barral DC. Arf proteins in cancer cell migration. Small GTPases 2016; 7(4): 270-282.

Cen J., Feng L., Ke, H., Bao L., Li LZ., Tanaka Y., Weng J., Su L. Exosomal thrombospondin-1 disrupts the integrity of endothelial intercellular junctions to facilitate breast cancer cell metastasis. Cancers 2019; 11(12): 1946.

Cerqueira OLD., Botelho MCS., Fiore APZP., Osório CABT., Tomasin R., Morais MCC., López RVM., Cardoso EC., Vilella-Arias SA., Reis EM., Bruni-Cardoso A. Prognostic value of integrin αV expression and localization pattern in invasive breast carcinomas. Neoplasia 2022; 30: 100803.

Chandran VI., Eppenberger-Castori S., Venkatesh T., Vine KL.,Ranson M. HER2 and uPAR cooperativity contribute to metastatic phenotype of HER2-positive breast cancer. Oncoscience 2015; 2(3): 207-224

Chaudhary P., Yadav K., Lee HJ., Kang KW., Mo J., Kim JA. siRNA treatment targeting integrin α11 overexpressed via EZH2-driven axis inhibits drug-resistant breast cancer progression. Breast Cancer Research 2024; 26(1): 72.

Chen J., Feng WL., Mo WJ., Ding XW., Xie SN. Expression of integrin-binding protein Nischarin in metastatic breast cancer. Molecular Medicine Reports 2015; 12(1): 77-82.

Chen Q., Manning CD., Millar H., McCabe FL., Ferrante C., Sharp C., Shahied-Arruda L., Doshi P., Nakada MT., Anderson GM. CNTO 95, a fully human anti αv integrin antibody, inhibits cell signaling, migration, invasion, and spontaneous metastasis of human breast cancer cells. Clin Exp Metastasis 2008; 25(2): 139-148.

Chia WJ., Tang BL. Emerging roles for Rab family GTPases in human cancer. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Reviews on Cancer, 2009; 1795(2): 110-116.

Cooper J., Giancotti FG. Integrin signaling in cancer: mechanotransduction, stemness, epithelial plasticity, and therapeutic resistance. Cancer Cell 2019; 35(3): 347-367.

Cordone I., Masi S., Summa V., Carosi M., Vidiri A., Fabi A., Pasquale A., Conti L, Carapella CM., Villani V., Pace A. Overexpression of syndecan-1, MUC-1, and putative stem cell markers in breast cancer leptomeningeal metastasis: a cerebrospinal fluid flow cytometry study. Breast Cancer Research 2017; 19(1): 46.

Costa RL., Han HS., Gradishar WJ. Targeting the PI3K/AKT/mTOR pathway in triple-negative breast cancer: A review. Breast Cancer Research and Treatment 2018; 169(3): 397-406.

Covarrubias G., He F., Raghunathan S., Turan O., Peiris PM., Schiemann WP., Karathanasis E. Effective treatment of cancer metastasis using a dual-ligand nanoparticle. PLoS ONE 2019; 14(7): e0220474.

dos Santos PB., Zanetti JS., Ribeiro-Silva A., Beltrão EI. Beta 1 integrin predicts survival in breast cancer: a clinicopathological and immunohistochemical study. Diagnostic Pathology 2012; 7: 104.

Eid EM., Alanazi SA., Koosha S., Alrasheedy AA., Azam F., Taban IM., Khalilullah H., Sadiq Al-Qubaisi M., Alshawsh MA. Zerumbone ınduces apoptosis in breast cancer cells by targeting αvβ3 ıntegrin upon Co-administration with TP5-iRGD Peptide. Molecules 2019; 24(14): 2554.

Eliyatkın N., Yalçın E., Zengel B., Aktaş S. Vardar E. Meme karsinomunda moleküler sınıflama: Gelenekselden yeni döneme yolculuk. Meme Sagligi Dergisi 2015; 11(2): 59-66

Faraldo MM., Romagnoli M., Wallon L., Dubus P., Deugnier MA., Fre S. Alpha-6 integrin deletion delays the formation of Brca1/p53-deficient basal-like breast tumors by restricting luminal progenitor cell expansion. Breast Cancer Research 2024; 26(1): 91.

Fournier HN., Dupé-Manet S., Bouvard D., Lacombe ML., Marie C., Block MR., Albiges-Rizo C. Integrin cytoplasmic domain-associated protein 1α (ICAP-1α) interacts directly with the metastasis suppressor nm23-H2, and both proteins are targeted to newly formed cell adhesion sites upon integrin engagement. Journal of Biological Chemistry 2002; 277(23): 20895-20902.

Franco YL., Vaidya TR., Ait-Oudhia S. Anticancer and cardio-protective effects of liposomal doxorubicin in the treatment of breast cancer. Breast Cancer: Targets and Therapy 2018; 10: 131-141

Gil-Bazo I., Catalán V., Páramo J., Quero C., Escriva de Romani S., Perez-Ochoa A., Arbea L., Navarro V., de la Cámara J., Garrán C., Espinós J., Rocha E., García-Foncillas J., Martín-Algarra S. Von Willebrand factor as an intermediate between hemostasis and angiogenesis of tumor origin. Revista de Medicina de la Universidad de Navarra 2003; 47(3): 22-28.

Girnius N., Henstridge AZ., Marks B., Yu J., Gray K., Sander C., Zervantonakis I., Luna A. Cilengitide sensitivity is predicted by overall integrin expression in breast cancer. Breast Cancer Res 2024; 26: 187.

GLOBOCAN. World fact sheets. Retrieved 27.12.2022, 2022, from https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/900-world-fact-sheets.pdf. 2020.

Gou S., Wu A., Luo Z. Integrins in cancer stem cells. Front Cell Dev Biol 2024; 12: 1434378.

Göthlin Eremo A., Lagergren K., Othman L., Montgomery S., Andersson G., Tina E. Evaluation of SPP1/osteopontin expression as predictor of recurrence in tamoxifen treated breast cancer. Scientific Reports 2020; 10(1): 1451.

Hassan H., Greve B., Pavao MS., Kiesel L., Ibrahim SA., Götte M. Syndecan-1 modulates β-integrin-dependent and interleukin-6-dependent functions in breast cancer cell adhesion, migration, and resistance to irradiation. The FEBS Journal 2013; 280(10): 2216-2227.

Hedrick E., Lee SO., Doddapaneni R., Singh M., Safe S. NR4A1 Antagonists Inhibit β1-Integrin-Dependent Breast Cancer Cell Migration. Molecular and Cellular Biology 2016; 36(9): 1383-1394.

Hou S., Isaji T., Hang Q., Im S., Fukuda T., Gu J. Distinct effects of β1 integrin on cell proliferation and cellular signaling in MDA-MB-231 breast cancer cells. Scientific Reports 2016; 6(1): 18430.

Humphries JD., Byron A., Humphries MJ. Integrin ligands at a glance. J Cell Sci. 2006; 119: 3901–3903.

Hynes RO. The emergence of integrins: a personal and historical perspective. Matrix biology: journal of the International Society for Matrix Biology 2004; 23(6): 333.

Hynes RO., Yamada KM. Fibronectins: multifunctional modular glycoproteins. The Journal of Cell Biology 1982; 95(2 Pt 1): 369-377.

Ibrahim SA., Hassan H., Vilardo L., Kumar SK., Kumar AV., Kelsch R., Schneider C., Kiesel L., Eich HT., Zucchi I., Reinbold R., Greve B., Götte, M. Syndecan-1 (CD138) modulates triple-negative breast cancer stem cell properties via regulation of LRP-6 and IL-6-mediated STAT3 signaling. PloS One 2013; 8(12): e85737.

Ignatoski KM., Maehama T., Markwart, SM., Dixon JE., Livant DL., Ethier SP. ERBB-2 overexpression confers PI 3′ kinase-dependent invasion capacity on human mammary epithelial cells. British Journal of Cancer 2000; 82(3): 666-674.

Javid H., Oryani MA., Rezagholinejad N., Esparham A., Tajaldini M., Karimi-Shahri M. RGD peptide in cancer targeting: Benefits, challenges, solutions, and possible integrin–RGD interactions. Cancer Med 2024; 13(2): e6800

Juliano RL., Reddig P., Alahari S., Edin M., Howe A., Aplin A. Integrin regulation of cell signalling and motility. Biochemical Society Transactions 2004; 32(3): 443-446.

Kale S., Raja R., Thorat D., Soundararajan G., Patil T. V., Kundu G. C. Erratum: Osteopontin signaling upregulates cyclooxygenase-2 expression in tumor-associated macrophages leading to enhanced angiogenesis and melanoma growth via α9β1 integrin. Oncogene 2015; 34(42): 5408-5410.

Katz E., Streuli CH. The extracellular matrix as an adhesion checkpoint for mammary epithelial function. The İnternational Journal of Biochemistry & Cell Biology 2007; 39(4): 715-726.

Kechagia JZ., Ivaska J., Roca-Cusachs P. Integrins as biomechanical sensors of the microenvironment. Nature Reviews Molecular Cell Biology 2019; 20(8): 457-473.

Kim A., Oh JH., Cho J. QSOX2 Upregulated in triple-negative breast cancer exacerbates patient prognosis by stabilizing integrin β1. Heliyon 2024; 10(2024): e27148

Kovacheva M., Zepp M., Schraad M., Berger S., Berger M. R. Conditional knockdown of osteopontin inhibits breast cancer skeletal metastasis. International Journal of Molecular Sciences 2019; 20(19): 4918.

Kračun D., Rieß F., Kanchev I., Gawaz M., Görlach A. The β3-integrin binding protein β3-endonexin is a novel negative regulator of hypoxia-inducible factor-1. Antioxidants & Redox Signaling 2014; 20(13): 1964-1976.

Kwon A., Chae IH., You E., Kim SH., Ahn SY., Lee OJ., Park ZY., Rhee S., Huh YH., Song WK. Extra domain A-containing fibronectin expression in Spin90-deficient fibroblasts mediates cancer-stroma interaction and promotes breast cancer progression. Journal of Cellular Physiology 2020; 235(5): 4494-4507.

Lahlou H., Muller WJ. β1-integrins signaling and mammary tumor progression in transgenic mouse models: implications for human breast cancer. Breast Cancer Res 2011; 13: 229-229.

Lautenschlaeger T., Perry J., Peereboom DM., Li B., Ibrahim A., Huebner A., Meng W., White JR., Chakravarti A. In vitro study of combined cilengitide and radiation treatment in breast cancer cell lines. Radiat Oncol 2013; 8: 246-246.

Li D., Das S., Yamada T., Samuels HH. The NRIF3 family of transcriptional coregulators induces rapid and profound apoptosis in breast cancer cells. Molecular and Cellular Biology 2004; 24(9): 3838-3848.

Li J., Qiu J., Han J., Li X., Jiang Y. Tumor microenvironment characterization in breast cancer identifies prognostic pathway signatures. Genes 2022; 13(11): 1976.

Li L., Li X., Qi L., Rychahou P., Jafari N., Huang C. The role of talin2 in breast cancer tumorigenesis and metastasis. Oncotarget 2017; 8(63): 106876.

Li M., Wang Y., Li M., Wu X., Setrerrahmane S., Xu H. Integrins as attractive targets for cancer therapeutics. Acta Pharmaceutica Sinica B 2021; 11(9): 2726-2737.

Li Z., Levine KM., Bahreini A., Wang P., Chu D., Park BH., Oesterreich S., Lee AV. Upregulation of IRS1 enhances IGF1 response in Y537S and D538G ESR1 mutant breast cancer cells. Endocrinology 2018; 159(1): 285-296.

Lipscomb EA., Mercurio AM. Mobilization and activation of a signaling competent α6β4integrin underlies its contribution to carcinoma progression. Cancer Metastasis Review 2005; 24(3): 413-423.

Liu H., Zhang J., Zhao Y., Fan Z., Yang Y., Mao Y., Yang J., Ma S. CD93 regulates breast cancer growth and vasculogenic mimicry through the PI3K/AKT/SP2 signaling pathway activated by integrin β1. Journal of Biochemical and Molecular Toxicology 2024; 38(4): e23688.

Lo SH., Weisberg E., Che LB. Tensin: a potential link between the cytoskeleton and signal transduction. Bioessays 1994; 16(11): 817-823.

Lu X., Lu D., Scully M., Kakkar VV. The role of ıntegrins in cancer and the development of anti-ıntegrin therapeutic agents for cancer therapy. Perspect Med Chem 2008; 2: 57-73.

Lu Z., Schiemann WP. ECO/siRNA nanoparticles and breast cancer metastasis. Oncoscience 2015; 2: 823-824.

Malek-Hosseini Z., Jelodar S., Talei A., Ghaderi A., Doroudchi M. Elevated Syndecan-1 levels in the sera of patients with breast cancer correlate with tumor size. Breast Cancer 2017; 24(6): 742-747.

Mardilovich K., Shaw LM. Hypoxia regulates insulin receptor substrate-2 expression to promote breast carcinoma cell survival and invasion. Cancer Research 2009; 69(23): 8894-8901.

Michaels E., Chen N., Nanda R. The role of immunotherapy in triple-negative breast cancer (TNBC). Clinical Breast Cancer 2024; 24(4): 263-270.

Miskin RP., Warren JS., Ndoye A., Wu L., Lamar JM., DiPersio CM. Integrin α3β1 promotes invasive and metastatic properties of breast cancer cells through induction of the Brn-2 transcription factor. Cancers 2021; 13(3): 480.

Monroy MF., Krumpoch M., Mcteague TA., Fee A., Lee D., Zhou ZS., Lin F. Bi-functional integrin degraders cause stronger anti-proliferative effects than a blocking antibody by modulating distinct downstream signaling. mAbs 2025; 17: 2575849.

Moreno-Layseca P., Icha J., Hamidi H., Ivaska J. Integrin trafficking in cells and tissues. Nature Cell Biology 2019; 21(2): 122-132.

Nisticò P., Di Modugno F., Spada S., Bissell MJ. β1 and β4 integrins: from breast development to clinical practice. Breast Cancer Research 2014; 16(5): 459.

Ohtoshi A., Maeda T., Higashi H., Ashizawa S., Yamada M., Hatakeyama M. β3-Endonexin as a novel inhibitor of cyclin A-associated kinase. Biochemical and Biophysical Research Communications 2000; 267(3): 947-952.

Pang X., He X., Qiu Z., Zhang H., Xie R., Liu Z., Gu Y., Zhao N., Xiang Q., Cui Y. Targeting integrin pathways: mechanisms and advances in therapy. Signal Transduction and Targeted Therapy 2023; 8(1): 1.

Park HJ., Helfman DM. Up-regulated fibronectin in 3D culture facilitates spreading of triple negative breast cancer cells on 2D through integrin β-5 and Src. Scientific Reports 2019; 9(1): 19950.

Peeney D., Jensen SM., Castro NP., Kumar S., Noonan S., Handler C., Kuznetsov A., Shih J., Tran AD., Salomon, DS., Stetler-Stevenson WG. TIMP-2 suppresses tumor growth and metastasis in murine model of triple-negative breast cancer. Carcinogenesis 2020; 41(3): 313-325.

Perou CM., Sørlie T., Eisen MB., Van De Rijn M., Jeffrey SS., Rees CA., Pollack JR., Ross DT., Johnsen H., Akslen L A. Molecular portraits of human breast tumours. Nature 2000; 406(6797): 747-752.

Pio GM., Xia Y., Piaseczny MM., Chu JE., Allan AL. Soluble bone-derived osteopontin promotes migration and stem-like behavior of breast cancer cells. PLoS One 2017; 12(5): e0177640.

Porter HA., Perr, A., Kingsley C., Tran NL., Keegan, AD. IRS1 is highly expressed in localized breast tumors and regulates the sensitivity of breast cancer cells to chemotherapy, while IRS2 is highly expressed in invasive breast tumors. Cancer Letters 2013; 338(2): 239-248.

Pucci S., Zoli M., Clementi F., Gotti C. α9-Containing Nicotinic Receptors in Cancer. Frontiers in Cellular Neuroscience 2022; 15: 15.

Raab-Westphal S., Marshall JF., Goodman SL. Integrins as therapeutic targets: successes and cancers. Cancers 2017; 9(9): 110.

Radisky ES., Radisky DC. Matrix metalloproteinases as breast cancer drivers and therapeutic targets. Frontiers in Bioscience (Landmark Edition) 2015; 20: 1144.

Rathinam R., Alahari SK. Important role of integrins in the cancer biology. Cancer and Metastasis Reviews 2010; 29(1): 223-237.

Samaržija I., Dekanić A., Humphries JD., Paradžik M., Stojanović N., Humphries MJ., Ambriović-Ristov A. Integrin crosstalk contributes to the complexity of signalling and unpredictable cancer cell fates. Cancers 2020; 12(7): 1910.

Sato H., Higashi S., Miyazaki K. Amino-terminal fragments of laminin γ2 chain stimulate migration of metastatic breast cancer cells by interacting with CD44. Clinical & Experimental Metastasis 2015; 32(5): 405-415.

Sayyad MR., Puchalapalli M., Vergara NG., Wangensteen SM., MooreM., Mu L., Edwards C., Anderson A., Kall S., Sullivan M., Dozmorov M., Singh J., Idowu MO., Koblinski JE. Syndecan-1 facilitates breast cancer metastasis to the brain. Breast Cancer Research And Treatment 2019; 178(1): 35-49.

Schaffner F., Ray AM., Dontenwill M. Integrin α5β1, the fibronectin receptor, as a pertinent therapeutic target in solid tumors. Cancers 2013; 5(1): 27-47.

Seguin L., Desgrosellier JS., Weis SM., Cheresh DA. Integrins and cancer: regulators of cancer stemness, metastasis, and drug resistance. Trends in Cell Biology 2015; 25(4): 234-240.

Shattil SJ., Kim C., Ginsberg MH. The final steps of integrin activation: the end game. Nature reviews Molecular Cell Biology 2010; 11(4): 288-300.

Singh D., Assaraf YG., Gacche RN. Long non-coding RNA mediated drug resistance in breast cancer. Drug Resistance Updates 2022; 63: 100851.

Spangenberg C., Lausch EU., Trost TM., Prawitt D., May A., Keppler R., Fees SA., Reutzel D., Bell C, Schmitt S., Schiffer IB., Weber A., Brenner W., Hermes M., Sahin U., Türeci Ö., Koelbl H., Hengstler JG., Zabel BU. ERBB2-mediated transcriptional up-regulation of the α5β1 integrin fibronectin receptor promotes tumor cell survival under adverse conditions. Cancer Research 2006; 66(7): 3715-3725.

Stewart RL., O'connor KL. Clinical significance of the integrin α6β4 in human malignancies. Laboratory Investigation 2015; 95: 976.

Suter R., Marcum JA. The molecular genetics of breast cancer and targeted therapy. Biologics: Targets and Therapy 2007; 1(3): 241-258.

Tai YL., Chu PY., Lai IR., Wang MY., Tseng HY., Guan JL., Liou JY., Shen TL. An EGFR/Src-dependent β4 integrin/FAK complex contributes to malignancy of breast cancer. Scientific Reports 2015; 5(1): 16408.

Trikha M., Zhou Z., Nemeth JA., Chen Q., Sharp C., Emmell E., Giles-Komar J., Nakada MT. CNTO 95, a fully human monoclonal antibody that inhibits αv integrins, has antitumor and antiangiogenic activity in vivo. Int J Cancer 2004; 110(3): 326-335.

Velázquez-Quesada I., Ruiz-Moreno AJ., Casique-Aguirre D., Aguirre-Alvarado C., Cortés-Mendoza F., de la Fuente-Granada M., García-Pérez C., Pérez-Tapia SM., González-Arenas A., Segura-Cabrera A., Velasco-Velázquez MA. Pranlukast antagonizes CD49f and reduces stemness in triple-negative breast cancer cells. Drug Des Devel Ther 2020; 14: 1799-1811.

Wang W., Lei B., Li L., Liu J., Li Z., Pang Y., Liu T., Li Z. Single-cell proteomic profiling ıdentifies nanoparticle enhanced therapy for triple negative breast cancer stem cells. Cells 2021; 10(11): 2842.

Wang Z., Li Y., Xiao Y., Lin H., Yang P., Humphries BA., Gao T., Yang C. Integrin α9 depletion promotes β-catenin degradation to suppress triple-negative breast cancer tumor growth and metastasis. Int J Cancer 2019; 145(10): 2767-2780.

Wei, R., Wong, JPC., Kwok HF. Osteopontin--a promising biomarker for cancer therapy. Journal of Cancer, 2017; 8(12): 2173.

Wu GY., Xiao MZ., Hao WC., Yang ZS., Liu XR., Xu DS., Peng ZX., Zhang LY. Drug resistance in breast cancer: Mechanisms and strategies for management. Drug Resistance Updates 2025; 83: 101288.

Xu J., Yu C., Zeng X., Tang W., Xu S., Tang L., Yu T. Visualization of breast cancer-related protein synthesis from the perspective of bibliometric analysis. European Journal of Medical Research 2023; 28(1): 461.

Yousefi H., Vatanmakanian M., Mahdiannasser M., Mashouri L., Alahari NV., Monjezi MR., Ilbeigi S., Alahari SK. Understanding the role of integrins in breast cancer invasion, metastasis, angiogenesis, and drug resistance. Oncogene 2021; 40(6): 1043-1063.

Zhu K., Wu Y., He P., Fan Y., Zhong X., Zheng H., Luo T. PI3K/AKT/mTOR-targeted therapy for breast cancer. Cells 2022; 11(16): 2508.