

-USMTD-
**Uluslararası Sürdürülebilir
Mühendislik ve Teknoloji Dergisi**

-IJSET-
**International
Journal of Sustainable
Engineering and Technology**



Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi
International Journal of Sustainable Engineering and Technology

ISSN: 2618-6055 / Cilt: 10, Sayı: 1, (2026)



BAŞ EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Prof. Dr. Cengiz ÖZEL
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ONURSAL EDİTÖR / HONORARY EDITOR

Prof. Dr. Reşat SELBAŞ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Nihat YILMAZ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Bekir AKSOY
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Berkay ERGENE
Pamukkale Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Nadi KAPLAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gamzepelin AKSOY
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hande VAROL MOROVA
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Kubilay TAŞDELEN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Koray ÖZSOY
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Mualla Birgül HUBAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Merdan ÖZKAHRAMAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Tolgahan ERMERGEN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yaşar Kemal ERDOĞAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

YAYIN DANIŞMA KURULU / EDITORIAL ADVISORY BOARD

Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL
Süleyman Demirel Üniversitesi

Doç. Dr. Shoaib KHANMOHAMMADI
Kermanshah University of Technology

Dr. Deeb E. A. ALASHGAR
Qatar Environment and Energy Research Institute
(QEERI) Hamad Bin Khalifa University

Prof. Dr. Osman GENÇEL
Bartın Üniversitesi

Dr. Majid POURAMİNİAN
Islamic Azad University, Ramsar Branch

Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi
International Journal of Sustainable Engineering and Technology

ISSN: 2618-6055 / Cilt: 10, Sayı: 1, (2026)



MİZANPAJ EDİTÖRLERİ / LAYOUT EDITORS

Arş. Gör. Dr. Ali Ekber SEVER
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Yusuf YAŞIR
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Nergiz YÜCEL
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Rafet GÖZBAŞI
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Mehmet Can SEKANLI
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Kamil Furkan İLHAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Atilla SUNKAR
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Enes DUVARCI
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Hüseyin Furkan ZENGİN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Enes İVEDİKLİOĞLU
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Erhan ERYİĞİT
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

DİL EDİTÖRÜ (TÜRKÇE) / LANGUAGE EDITOR (TURKISH)

Arş. Gör. Elifnur ŞAKALAK
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

DİL EDİTÖRÜ (İNGİLİZCE) / LANGUAGE EDITOR (ENGLISH)

Arş. Gör. Mehmet YÜCEL
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

TEKNİK EDİTÖR/ TECHNICAL EDITOR

Arş. Gör. Yakup Hakan AYDİN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Mert ÖPÖZ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Yazıların tüm bilimsel sorumluluğu yazar(lar)a aittir. Editör, yardımcı editör ve yayıncı dergide yayınlanan yazılar için herhangi bir sorumluluk kabul etmez. Bu dergi, aşağıda listelenen veri tabanları tarafından taranmaktadır.

All the scientific responsibilities of the manuscripts belong to the authors (s). The editor, assistant editor and publisher accept no responsibility for the articles published in the journal. The Journal is indexed by the following abstracting and indexing databases.

Index Copernicus, Google Scholar, Sobiad, Sindex, DRJI, ROAD



Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi
International Journal of Sustainable Engineering and Technology
Cilt: 10, Sayı: 1, Yıl: 2026
Volume: 10, Issue: 1, Year: 2026



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

<u>MAKALE / ARTICLES</u>	<u>SAYFA / PAGES</u>
MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE GERÇEK ZAMANLI SİLAH TESPİT SİSTEMİ *Kıyas KAYAALP ^{id} , Tuba YILMAZ ^{id}	1 – 14
ATIK ISI KAYNAKLI ENDÜSTRİYEL ISI POMPALARININ TERMODİNAMİK ANALİZİ *Sinem SEZGİN ^{id} , Reşat SELBAŞ ^{id}	15 – 25
GİRESUN İLİ KOŞULLARINDA ŞEBEKEYE BAĞLI 100 KWP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TEKNİK PERFORMANS, EKONOMİK FİZİBİLİTE VE SERA GAZI EMİSYON ANALİZİ *Emre ÇOLAK ^{id} , Emre Aşkın ELİBOL ^{id}	26 – 43
SLAG, LIME AND FLY ASH EFFECT ON STRENGTH OF LOW PLASTICITY CLAY *Emrah DAĞLI ^{id} , Ömer Faruk ÇAPAR ^{id}	44 – 55
BETONARME OKUL BİNALARI İÇİN TBDY-2018 UYUMLU SİSMİK GÜÇLENDİRME ALTERNATİFLERİ: PERFORMANS VE OPERASYONEL SÜREKLİLİK ODAKLI BİR KARŞILAŞTIRMA * İbrahim SAIL ^{id} , Mehmet Kevser DERDİMAN ^{id}	56 – 68
ÇİMENTO YERİNE ATIK BAZALT TOZU İKAMESİNİN BETONUN MEKANİK VE GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ *Yusuf Tahir ALTUNCI ^{id} , Abide GENÇER ^{id}	69 – 74
MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE VERİ KALİTESİ KURALLARININ OTOMATİK OLUŞTURULMASI VE UYGULANMASI: BANKACILIK SEKTÖRÜ ÖRNEĞİ Arif KOYUN ^{id} , *Mehmet Halit UÇAN ^{id}	75 – 86
ANALYSIS OF TURBULENT HEAT TRANSFER IN A PARTIALLY WAVY CHANNEL WITH TURBULATOR *Selma AKÇAY ^{id}	87 – 100
BİR DEMİR ÇELİK FABRİKASINDA KULLANILAN TAV FIRINININ ENERJİ YÖNETİMİ AÇISINDAN İNCELENMESİ *Tansel KOYUN ^{id}	101 – 109
FARKLI BETON TÜRLERİNDE MERMER TOZU KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ *Ayşe BÜYÜKÜNSAL ^{id}	110 – 118
MONONOBE-OKABE YÖNTEMİNDE SİSMİK TOPRAK BASINCI KATSAYILARINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN DUYARLILIK ANALİZİ *Burak SÜRÜCÜ ^{id}	119 – 132
ADVANCED TECHNOLOGIES IN WEARABLE FOR SLEEP APNEA DIAGNOSIS: A REVIEW *Elif Nur SELÇUK ^{id} , Gökçenur ÇAKMAK ^{id} , Mustafa Reşit USAL ^{id}	133 – 149



MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE GERÇEK ZAMANLI SİLAH TESPİT SİSTEMİ

*Kıyas KAYAALP¹, Tuba YILMAZ²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Isparta
²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği
Anabilim Dalı, Isparta

(Geliş/Received: 04.02.2026, Kabul/Accepted: 10.04.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Ruhsatsız silahların yaygınlığı ve silahlı suçların artışı, kamu güvenliği açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu çalışmada, güvenlik kamerası sistemlerinde gerçek zamanlı silah tespiti amacıyla YOLOv11, RT-DETR, SSD-Lite + MobileNetV3-Large ve FCOS modelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Üç farklı açık kaynak veri setinin birleştirilmesiyle oluşturulan 10.824 görüntülük veri seti kullanılmış, model performansları Precision, Recall, mAP@50 ve mAP@50:95 metrikleri üzerinden analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, RT-DETR modelinin %99.7 Recall, %97.3 Precision ve yaklaşık %90 F1 skoru ile en yüksek performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Web kamerası üzerinden gerçekleştirilen testlerde RT-DETR, değişken aydınlatma koşullarında tutarlı performans göstermiş ve silaha benzer nesnelere düşük yanlış pozitif oranı sağlamıştır. Elde edilen bulgular, RT-DETR modelinin güvenlik odaklı uygulamalar için umut vadeden bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Silah tespiti, Derin öğrenme, RT-DETR, Gerçek zamanlı nesne tespiti, Güvenlik kamerası sistemleri

REAL-TIME WEAPON DETECTION SYSTEM USING MACHINE LEARNING

ABSTRACT

The prevalence of unlicensed firearms and the rise in gun-related crimes pose a serious threat to public safety. In this study, four deep learning models—YOLOv11, RT-DETR, SSD-Lite + MobileNetV3-Large, and FCOS—were comparatively evaluated for real-time weapon detection in surveillance systems. A dataset of 10,824 images, created by merging three open-source datasets, was used, and model performance was analyzed using Precision, Recall, mAP@50, and mAP@50:95 metrics. Experimental results demonstrated that RT-DETR achieved the highest performance with 99.7% Recall, 97.3% Precision, and approximately 90% F1 score. In real-time webcam tests, RT-DETR showed consistent detection under varying lighting conditions and maintained a low false positive rate for weapon-like objects. The findings suggest that RT-DETR offers a promising approach for security-oriented applications.

Keywords: Weapon detection, Deep learning, RT-DETR, Real-time object detection, Security camera systems

1. Giriş (Introduction)

Modern toplumların karşı karşıya kaldığı en kritik güvenlik sorunlarından biri, bireysel silahlanmanın kontrolsüz artışı ve buna bağlı olarak gelişen asayiş olaylarıdır [1]. Özellikle ruhsatsız silahların yaygınlığı, suçun önlenmesi ve kamu düzeninin korunması önündeki en büyük engellerden birini oluşturmaktadır [2]. İçişleri Bakanlığı tarafından paylaşılan veriler, bu tehdidin boyutlarını çarpıcı bir şekilde ortaya koymaktadır.

İçişleri Bakanlığı verileri ruhsatsız silahların toplumsal güvenlik açısından ciddi bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymaktadır. İçişleri Bakanı Ali Yerlikaya'nın 15 Aralık 2024 tarihinde TBMM Genel Kurulu 2025 Bütçe Görüşmeleri'nde yaptığı açıklamaya göre, 2024 yılının 11 ayında düzenlenen MERCEK operasyonları kapsamında 99.277 adet ruhsatsız silah ele geçirilmiş ve 110.361 şahıs hakkında işlem yapılmıştır [3]. Bakan Yerlikaya, özellikle dikkat çekici bir istatistik paylaşmıştır: "Bu yılın 11 ayında, silahla işlenen kasten öldürme ve yaralama olaylarına ilişkin, her 10 suçun 8'i ruhsatsız silahla işlendi" [3].

Bu veri, silahla işlenen suçların %80'inin ruhsatsız silahlarla gerçekleştirildiğini göstermekte olup, güvenlik sistemlerinde otomatik silah tespit teknolojilerinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Ruhsatsız silahların yaygınlığı ve bunların suç işlemede kullanım oranının yüksekliği, güvenlik önlemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [4].

Küresel ölçekte bakıldığında, ateşli silahların yol açtığı güvenlik ve halk sağlığı sorunlarının yalnızca ulusal sınırlarla sınırlı olmadığı açıkça görülmektedir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri örneği, silahlı şiddetin ulaştığı boyutları göstermesi açısından dikkat çekicidir. Centers for Disease Control and Prevention (CDC) verilerine göre, 2022 yılında ABD'de 48.000'den fazla silahla ilişkili ölüm kaydedilmiş ve bu durum günlük ortalama 132 can kaybına karşılık gelmiştir. Bu ölümlerin yarısından fazlası intihar, %40'tan fazlası ise ateşli silahlarla işlenen cinayetlerden kaynaklanmaktadır [5]. Ayrıca, kalabalık veya kapalı alanlarda birden fazla kişiyi hedef alan aktif silahlı saldırı olaylarında da artış rapor edilmiştir [6].

Bu küresel eğilimler, silahlı şiddetin yalnızca belirli ülkelere özgü bir sorun olmadığını, aksine farklı toplumsal ve coğrafi bağlamlarda benzer güvenlik açıkları yarattığını göstermektedir. Küresel ölçekte gözlemlenen bu riskler, ülkelerin kendi özgül güvenlik dinamiklerine uygun önleyici ve teknolojik müdahaleler geliştirmesini zorunlu kılmaktadır [7]. Bu bağlamda, ruhsatsız silahların yaygınlığı ve silahlı suçların niteliği dikkate alındığında, Türkiye'de kamu güvenliğinin sağlanmasına yönelik olarak geliştirilen video tabanlı gözetim ve erken uyarı sistemleri, küresel güvenlik sorunlarına verilen yerel ve uygulamaya dönük bir yanıt niteliği taşımaktadır [8].

Türkiye'de kamu güvenliğinin sağlanmasında video gözetim sistemleri kritik bir rol üstlenmektedir. MOBESE (MOBil Elektronik Sistem Entegrasyonu), 2001 yılından bu yana Türkiye'nin 81 ilinde faaliyet gösteren ve suç ile suçluyla mücadelede güvenlik kuvvetlerinin elini güçlendiren kameralı güvenlik sistemleridir. İçişleri Bakanlığı bütçesi ve il özel idareleri tarafından finanse edilen bu sistemler için önemli yatırımlar yapılmıştır. MOBESE Projesi, Polis İtranet İletişim Hattı (Pol-Net) üzerinden kapalı ve güvenli hatlarda çalışmaktadır [9].

Küresel ölçekte bakıldığında, güvenlik kamerası pazarı tarihsel bir ivmeyle hızla büyümektedir [10]. Bu büyümenin kökleri, 2000'li yılların başında gözetim teknolojilerinin "bilim kurgu objesi" olmaktan çıkıp gündelik hayatın bir parçası haline gelmesine dayanmaktadır. Nitekim 2006 yılında yayımlanan "A Report on the Surveillance Society" başlıklı kapsamlı çalışma, küresel gözetim endüstrisinin o dönemde dahi yıllık bazda diğer pek çok sektörden daha hızlı büyüdüğünü ve askeri teçhizattan sivil CCTV sistemlerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsayan küresel pazar değerinin yaklaşık 1 trilyon ABD dolarına ulaştığını vurgulamaktadır [11]. Bu büyüme, yapay zeka destekli video analitik çözümlerine olan talebin artmasıyla doğrudan ilişkilidir. Özellikle derin öğrenme tabanlı nesne tespit sistemleri, güvenlik kameralarının etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır [12]. Bu küresel eğilimler doğrultusunda, güvenlik ve gözetim teknolojilerindeki dönüşümün ulusal politika ve stratejilere nasıl yansıtıldığı, ülkelerin dijitalleşme ve yapay zekâ odaklı yaklaşımlarını incelemeyi gerekli kılmaktadır.

Türkiye, yapay zeka alanında stratejik adımlar atmaktadır. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı ile Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı iş birliğinde hazırlanan "Ulusal Yapay Zeka Stratejisi 2021-2025", 20 Ağustos 2021 tarihli ve 31574 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu strateji, Türkiye'nin yapay zeka alanındaki ilk ulusal strateji belgesi olma özelliğini taşımaktadır. Strateji, 6 stratejik öncelik, 24 amaç ve 119 tedbir içermektedir [13].

Ulusal Yapay Zeka Stratejisi'nin vizyonu, "müreffeh bir Türkiye için çevik ve sürdürülebilir yapay zeka ekosistemiyle küresel ölçekte değer üretmek" olarak belirlenmiştir [13]. 2025 hedefleri arasında yapay zeka alanının GSYİH'ya katkısının %5'e yükseltilmesi, istihdamın 50 bin kişiye çıkarılması ve uluslararası yapay zeka endekslerinde Türkiye'nin ilk 20 ülke arasında yer alması bulunmaktadır [14]. TÜBİTAK, 1711 sayılı Yapay Zeka Ekosistem Çağrısı kapsamında makine öğrenmesi, doğal dil işleme, bilgisayarlı görü ve derin öğrenme gibi teknolojilerin geliştirilmesini desteklemektedir [15].

Silah tespiti alanında derin öğrenme tekniklerinin kullanımı son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Santos ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan sistematik derleme çalışmasında, bu alanda en yaygın kullanılan modellerin Faster R-CNN ve YOLO mimarileri olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar, mevcut yöntemlerin zorlu bağlamlarda sınırlı performans gösterdiğini ve otomatik silah tespiti alanında veri kümesi çeşitliliği, değerlendirme standartları ve gerçek dünya doğrulaması konularında önemli zorlukların bulunduğunu belirtmişlerdir [6].

Wang ve arkadaşları (2023), CCTV ortamlarında küçük nesne tespiti için optimize edilmiş bir YOLOv4 tabanlı silah tespit sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, SCSP-ResNet yapısı ve alıcı alan geliştirme modülü önerilmiştir [16].

Yadav ve arkadaşları (2024) ise düşük ışık koşullarında silah tespiti için YOLOv7-DarkVision modelini geliştirmişlerdir. Model, %95,50 hassasiyet ve %93,41 F1-Skoru ile gece koşullarında başarılı sonuçlar elde etmiştir [17].

Berardini ve arkadaşları (2025), video gözetim sistemlerinde gerçek zamanlı silah tespitini iyileştirmek amacıyla uç yapay zekâ (edge AI) ve süper çözünürlük tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada geliştirilen YOLOS model, kenar cihazlarında çalışacak şekilde tasarlanmış ve YOLOv8 ile karşılaştırıldığında %10,2 oranında Ortalama Hassasiyet (AP) artışı sağlamıştır [18].

Lai ve Maples tarafından gerçekleştirilen çalışmada, gerçek zamanlı silah tespiti problemi erken dönem derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar çerçevesinde ele alınmıştır. Çalışmada, TensorFlow tabanlı OverFeat evrişimli sinir ağı mimarisi kullanılarak gözetim görüntülerinde elde taşınan silahların tespiti ve sınıflandırılması hedeflenmiştir. Yaklaşık 3.000 görüntüden oluşan özel bir veri kümesi üzerinde yapılan deneylerde, ayarlanmış hiperparametreler ile %93 eğitim doğruluğu ve %89 test doğruluğu elde edilmiştir. Bununla birlikte, modelin çalışma süresinin gerçek zamanlı video uygulamaları için sınırlayıcı olduğu belirtilmiş ve doğruluk-hız dengesi açısından daha verimli mimarilere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır [19].

Mohamed ve arkadaşları (2020), CCTV görüntülerinde ateşli silahların tespiti amacıyla CNN tabanlı bir yöntem önermiş ve transfer öğrenme kullanarak performans artışı sağlamıştır. AlexNet ve GoogLeNet mimarileri üzerinde yapılan deneyler, yöntemin IMFDB veri kümesi üzerinde farklı silah türlerine uyarlanabilir olduğunu göstermiştir. Çalışma, insan operatörlere bağımlı geleneksel gözetim sistemlerinin sınırlılıklarını vurgulayarak, otomatik ve gerçek zamanlı silah tespit sistemlerine duyulan ihtiyacı açık biçimde ortaya koymaktadır [20].

Yukarıda özetlenen çalışmalar, video tabanlı silah tespiti alanında kullanılan yaklaşımların çeşitliliğini, farklı uygulama senaryolarını ve karşılaşılan temel zorlukları ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut literatürde kullanılan mimariler, hedeflenen performans ölçütleri ve elde edilen sonuçlar arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmaları karşılaştırmalı ve bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirebilmek amacıyla, literatürde öne çıkan bazı yaklaşımlar ve temel bulguları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Silah tespiti literatüründeki ilgili çalışmaların özeti (Summary of Related Works in the Weapon Detection Literature)

Çalışma	Yıl	Kullanılan Yöntem / Model	Temel Bulgular
Santos ve ark. [6]	2024	Faster R-CNN, YOLO (derleme)	YOLO ve Faster R-CNN en yaygın mimariler; veri çeşitliliği ve gerçek dünya doğrulaması önemli zorluklar
Wang ve ark. [16]	2023	YOLOv4 (SCSP-ResNet)	Küçük nesne tespiti için optimize edilmiş yapı; alıcı alan geliştirme ile performans artışı
Yadav ve ark. [17]	2024	YOLOv7-DarkVision	%95,50 hassasiyet ve %93,41 F1-skoru ile düşük ışıkta yüksek başarı
Berardini ve ark. [18]	2025	YOLOS (Edge AI + Süper Çözünürlük)	YOLOv8'e kıyasla %10,2 AP artışı; kenar cihazlar için uygunluk
Lai & Maples [19]	2017	OverFeat tabanlı CNN (TensorBox, sliding-window)	%93 eğitim ve %89 test doğruluğu; gerçek zamanlılıkta hız sınırlamaları
Mohamed ve ark. [20]	2020	AlexNet, GoogLeNet (Transfer Öğrenme)	Transfer öğrenme ile performans artışı; insan operatör bağımlılığının azaltılması

Mevcut literatür, silah tespitine yönelik derin öğrenme tabanlı yaklaşımların doğruluk açısından önemli ilerlemeler sağladığını ortaya koymakla birlikte, gerçek zamanlı çalışma gereksinimleri, hesaplama maliyetleri ve farklı görüntü kaynaklarına uyarlanabilirlik gibi konularda çeşitli zorlukların devam ettiğini göstermektedir. Özellikle düşük çözünürlük ve değişken aydınlatma koşulları gibi faktörlerin, farklı video kaynaklarından elde edilen görüntülerde tespit performansını etkileyebileceği rapor edilmektedir. Bu çerçevede, literatürde sıklıkla tartışılan doğruluk-hız dengesi, video tabanlı silah tespit sistemlerinde gerçek zamanlı çalışabilen modellerin geliştirilmesinin neden kritik bir gereklilik olduğunu ortaya koymakta ve bu tür yaklaşımların değerlendirilmesini ön plana çıkarmaktadır.

Bu çalışmada, video tabanlı silah tespiti amacıyla derin öğrenme tabanlı bir sistem geliştirilmiş ve farklı kullanım senaryoları bağlamında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında birden fazla derin öğrenme mimarisi denenmiş; sistemin gerçek zamanlı işleme kapasitesi, tespit doğruluğu ve uygulama esnekliği analiz edilmiştir. Geliştirilen sistemin genel iş akışı ve deneysel kurgu yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Sistem, hedef uygulama alanı olarak güvenlik kamerası altyapıları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır; bununla birlikte, sistemin gerçek zamanlı çalışabilirliği web kamera üzerinden gerçekleştirilen canlı video testleri ile prototip düzeyinde doğrulanmıştır. Bu yaklaşım, önerilen sistemin yalnızca belirli bir kamera türüne değil, farklı video akışlarına uyarlanabilir olduğunu göstermektedir.

Derin Öğrenme Tabanlı Silah Tespit Sistemi



Şekil 1. Genel mimari ve deneysel şema (Overall Architecture and Experimental Scheme)

Türkiye’de silahla işlenen kasten öldürme ve yaralama suçlarının önemli bir bölümünün ruhsatsız silahlarla gerçekleştirildiği ve bu durumun kamu güvenliği açısından ciddi bir risk oluşturduğu dikkate alındığında [3], geliştirilen sistemin mevcut güvenlik altyapılarını destekleyici bir teknolojik çözüm olarak değerlendirilmesi mümkündür. Bu yönüyle çalışma, Ulusal Yapay Zekâ Stratejisi 2021–2025 kapsamında belirlenen hedeflerle uyumlu biçimde, yerli ve uygulanabilir akıllı güvenlik uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır [13].

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Deneysel ortam (Experimental setup)

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm model eğitimi ve test işlemleri, 13. nesil Intel® Core™ i7-13700H işlemci, 16 GB RAM ve 6 GB VRAM kapasitesine sahip NVIDIA GeForce RTX 3050 grafik birimi içeren bir sistem üzerinde yürütülmüştür. Deneylerde işletim sistemi olarak Windows 11 kullanılmıştır.

2.2. Veri setinin düzenlenmesi (Dataset preparation)

Bu çalışmada, güvenlik sistemlerinde kullanılmak üzere silah tespitine odaklanan bir nesne tespit problemi ele alınmıştır. İnsan (person) sınıfı, silahların genellikle insanlarla birlikte bulunduğu gerçek dünya senaryolarını daha iyi temsil edebilmek amacıyla bağlamsal bir sınıf olarak modele dahil edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti, üç farklı açık kaynak veri setinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu veri setleri; Roboflow platformundan elde edilen Person-Weapon Datasets (10.257 görüntü) [21], Gun Surveillance (200 görüntü) [22] ve Weapon veri seti (367 görüntü) [23] şeklindedir. Birleştirme işlemi sonucunda toplamda 10.824 görüntüden oluşan kapsamlı bir veri seti elde edilmiştir. Şekil 2’de sunulan örnek görüntüler, veri setinin çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Veri seti; farklı aydınlatma koşulları (gündüz, gece, yapay aydınlatma), çeşitli kamera açıları (yakın çekim, uzak plan, yan açı), değişken arka planlar (ofis, ev, dış mekan) ve farklı silah tutma pozisyonları içermektedir. Bu çeşitlilik, modelin gerçek dünya senaryolarına genelleme yapabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, güvenlik kamerası görüntülerini simüle eden gri tonlamalı ve düşük çözünürlüklü örnekler de veri setine dahil edilmiştir.



Şekil 2. Birleştirilmiş veri setinden örnek görüntüler (Sample Images from the Combined Dataset)

Veri seti, yaygın nesne tespit modelleriyle uyumlu olacak şekilde, her görüntü için sınıf etiketi ve normalize edilmiş bounding box koordinatlarını içeren standart bir etiketleme formatında hazırlanmıştır. Veri seti, modellerin performansını objektif bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla eğitim (%80) ve doğrulama (%20) alt kümelerine ayrılmıştır.

Modelin genelleme kabiliyetini artırmak amacıyla eğitim sürecinde çevrimiçi veri artırma (data augmentation) teknikleri uygulanmıştır. Bu kapsamda; sınırlı açısal döndürme, ölçekleme ve öteleme işlemleri ile yatay çevirme gibi geometrik dönüşümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca HSV renk uzayında doygunluk ve parlaklık varyasyonları kullanılarak aydınlatma koşullarındaki değişimlere karşı dayanıklılık artırılmıştır. Erken epoch'larda mozaik artırma tekniğinden faydalanılmış, ancak hassas konum tahmini gerektiren nesnelere üzerindeki olası olumsuz etkileri azaltmak amacıyla eğitim sürecinin son aşamalarında mozaik artırma devre dışı bırakılmıştır.

Güvenlik odaklı uygulama senaryoları göz önünde bulundurularak, MixUp, Copy-Paste ve etiket yumuşatma (label smoothing) gibi sınıf belirsizliği oluşturabilecek yöntemler bilinçli olarak kullanılmamıştır. Bu yaklaşım, modelin tahmin güvenilirliğini ve sınıf ayırma netliğini korumayı amaçlamaktadır.

2.3. Değerlendirme ölçütleri (Evaluation metrics)

Nesne tespit modellerinin performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla dört temel metrik kullanılmıştır: Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall), mAP@50 ve mAP@50:95. Bu metrikler, modellerin yanlış alarm üretme eğilimi, pozitif örnekleri yakalama başarısı ve farklı örtüşme seviyelerindeki konumlandırma doğruluğunu ölçerek kapsamlı bir karşılaştırma sağlamaktadır.

Karşılaştırma sonucunda en iyi performansı gösteren model belirlendikten sonra, bu modelin karar verme davranışını daha ayrıntılı incelemek amacıyla F1 skoru kullanılmıştır. F1 skoru, kesinlik ve duyarlılık metriklerinin harmonik ortalaması olup, özellikle dengesiz veri setlerinde model performansını tek bir değer üzerinden değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, F1 skorunun farklı güven eşiği değerlerine bağlı değişimi analiz edilerek, model için optimum güven eşiği belirlenmiştir.

Kesinlik (Precision): Modelin pozitif olarak sınıflandırdığı örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu gösterir. Bu metrik, yanlış pozitif tahminleri azaltma gücünü ölçmektedir.

$$Kesinlik = DP / (DP + YP) \quad (1)$$

Burada DP (Doğru Pozitif), modelin doğru şekilde pozitif olarak tahmin ettiği örnek sayısını; YP (Yanlış Pozitif) ise modelin hatalı şekilde pozitif olarak tahmin ettiği örnek sayısını ifade etmektedir.

Duyarlılık (Recall): Gerçek pozitif örneklerin ne kadarının doğru şekilde tahmin edildiğini ifade eder. Kaçırılan pozitif vakaları azaltma gücünü göstermektedir.

$$Duyarlılık = DP / (DP + YN) \quad (2)$$

Burada YN (Yanlış Negatif), modelin hatalı şekilde negatif olarak tahmin ettiği gerçek pozitif örnek sayısını ifade etmektedir.

mAP@50 (Mean Average Precision at IoU=0.50): IoU (Intersection over Union) eşik değeri 0.50 olarak alındığında, tüm sınıflar için hesaplanan ortalama hassasiyet değeridir. Bu metrik, tahmin edilen bounding box ile gerçek bounding box arasındaki örtüşme oranının en az %50 olması durumunda tahmini doğru kabul etmektedir.

$$mAP@50 = (1/N) \times \sum AP_i \quad (3)$$

Burada N, toplam sınıf sayısını; AP_i ise i. sınıf için hesaplanan Average Precision değerini ifade etmektedir.

mAP@50:95 (Mean Average Precision at IoU=0.50:0.95): IoU eşik değerinin 0.50'den 0.95'e kadar 0.05 artışlarla değiştirilmesiyle hesaplanan ortalama mAP değeridir. Bu metrik, modelin farklı örtüşme seviyelerindeki performansını değerlendirerek daha kapsamlı bir analiz sağlamaktadır.

$$mAP@50:95 = (1/10) \times \sum mAP@IoU \quad (4)$$

Bu formülde, IoU değerleri 0.50, 0.55, 0.60, ..., 0.95 olmak üzere 10 farklı eşik değerinde hesaplanan mAP değerlerinin ortalaması alınmaktadır.

F1 Skoru: Kesinlik ve Duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasıdır. Bu metrik, her iki ölçütü de dengeli bir şekilde değerlendirerek modelin genel performansını tek bir değerle ifade etmektedir.

$$F1 = 2 \times (Kesinlik \times Duyarlılık) / (Kesinlik + Duyarlılık) \quad (5)$$

F1 skoru, 0 ile 1 arasında değer almakta olup, 1 değeri mükemmel performansı temsil etmektedir. Bu metrik, özellikle dengesiz veri setlerinde modelin performansını değerlendirmek için tercih edilmektedir.

2.4. Algoritma seçimi (Algorithm selection)

Bu çalışmada, nesne tespit alanında güncel ve başarılı performans sergileyen dört farklı derin öğrenme modeli değerlendirilmiştir. Seçilen modeller, farklı mimari yaklaşımları temsil etmekte olup gerçek zamanlı güvenlik uygulamaları için uygunlukları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

YOLOv11, Ultralytics tarafından Eylül 2024'te resmi olarak yayınlanan YOLO sürümüdür [24]. Bu model, tek aşamalı (single-stage) nesne tespit yaklaşımını benimsemekte olup, önceki YOLO versiyonlarına kıyasla geliştirilmiş özellik çıkarma mekanizmaları ve optimize edilmiş anchor-free tahmin başlıkları içermektedir. Gerçek zamanlı performansı ve yüksek doğruluk oranı ile güvenlik uygulamaları için ideal bir aday olarak değerlendirilmektedir [25].

RT-DETR (Real-Time Detection Transformer), 2023 yılında Baidu Research tarafından geliştirilen ve transformer tabanlı ilk gerçek zamanlı nesne tespit modelidir. DETR mimarisinin güçlü global bağlam modelleme yeteneklerini, gerçek zamanlı çıkarım hızıyla birleştirmektedir. Hibrit encoder yapısı sayesinde, hem CNN tabanlı lokal özellik çıkarımı hem de transformer tabanlı global ilişki modelleme kapasitesine sahiptir [26].

SSD-Lite + MobileNetV3-Large kombinasyonu, 2019 yılında tanımlanan hafif ve verimli bir nesne tespit mimarisidir. MobileNetV3 omurga ağı, düşük hesaplama maliyetiyle yüksek özellik çıkarma kapasitesi sunarken, SSD-Lite başlık yapısı çoklu ölçekte nesne tespiti gerçekleştirmektedir. Bu kombinasyon, özellikle kaynak kısıtlı ortamlar ve mobil uygulamalar için optimize edilmiştir [27].

FCOS (Fully Convolutional One-Stage Object Detection), 2019 yılında duyurulan anchor-free tek aşamalı bir nesne tespit mimarisidir. Geleneksel anchor tabanlı yöntemlerden farklı olarak, her piksel için doğrudan bounding box regresyonu gerçekleştirmektedir. Center-ness dalı sayesinde düşük kaliteli tahminleri filtreleyerek yüksek doğruluk oranları elde etmektedir [28].

Çalışmada kullanılan model varyantları şu şekildedir: YOLOv11 ailesinin beş farklı boyut seçeneği (nano, small, medium, large, xlarge) arasından YOLOv11-m (Medium) varyantı, doğruluk ve çıkarım hızı arasındaki denge gözetilerek tercih edilmiştir. RT-DETR ailesinin iki varyantı (Large ve Extra Large) arasından RT-DETR-l (Large) varyantı seçilmiştir; Large varyant yaklaşık 32 milyon parametre içermekte olup Extra Large varyanta (65 milyon parametre) kıyasla daha yüksek çıkarım hızı sunmaktadır. SSD-Lite için Torchvision kütüphanesinde tek varyant olarak sunulan ssdlite320_mobilenet_v3_large modeli, FCOS için ise omurga ağı olarak ResNet50 kullanılmıştır.

Tüm modellerde transfer öğrenme yaklaşımı uygulanmıştır: YOLOv11, COCO veri seti üzerinde ön eğitilmiş yolo11m.pt ağırlıkları ile başlatılmıştır. RT-DETR, COCO üzerinde ön eğitilmiş rtdetr-l.pt ağırlıkları ile başlatılmıştır. SSD-Lite modelinde Torchvision'ın SSdLite320_MobileNet_V3_Large_Weights.DEFAULT ağırlıkları kullanılmış olup omurga ağı (MobileNetV3-Large) ImageNet, tespit başlığı ise COCO veri seti üzerinde ön eğitilmiştir. FCOS modelinin omurga ağı olan ResNet50, ImageNet üzerinde ön eğitilmiş ağırlıklarla (ResNet50_Weights.IMAGENET1K_V2) başlatılmış; FPN ve FCOS Head katmanları sıfırdan eğitilmiştir. Transfer öğrenme kullanımı, 10.824 görüntüden oluşan veri seti boyutunda daha hızlı

yakınsama sağlamayı ve genel özellik temsillerinden faydalanarak genelleme performansını artırmayı amaçlamaktadır.

2.5. Eğitim konfigürasyonu (Training configuration)

Tüm modeller aynı veri seti üzerinde 50 epoch boyunca eğitilmiştir. Giriş görüntü boyutu YOLOv11, RT-DETR ve FCOS modelleri için 640×640 piksel, SSD-Lite modeli için ise 320×320 piksel olarak belirlenmiştir. Batch boyutu, modellerin bellek gereksinimleri göz önünde bulundurularak YOLOv11 ve SSD-Lite için 16, RT-DETR ve FCOS için 8 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon algoritması olarak YOLOv11, RT-DETR ve FCOS modellerinde AdamW, SSD-Lite modelinde ise SGD tercih edilmiştir.

AdamW optimizör tercihinin gerekçesi, bu algoritmanın adaptif öğrenme oranı ve düzgünleştirilmiş ağırlık azalması mekanizması sayesinde özellikle transformer mimarileri ve modern CNN yapılarında etkili sonuçlar üretmesidir. RT-DETR için $weight_decay=0.0001$, YOLOv11 için $weight_decay=0.0005$ olarak ayarlanmıştır; bu fark, transformer mimarisinin daha düşük düzenleme gerektirmesinden kaynaklanmaktadır. SSD-Lite modelinde SGD (momentum=0.9, $weight_decay=0.0005$) tercih edilmiş olup bu seçim Torchvision kütüphanesinin önerdiği standart eğitim konfigürasyonu ile uyumludur. Ayrıca SSD-Lite’da öğrenme oranı zamanlaması olarak StepLR scheduler kullanılmış ve her 10 epoch’ta öğrenme oranı 0.1 katına düşürülmüştür; bu yaklaşım diğer modellerde uygulanan cosine annealing stratejisinden farklıdır.

Öğrenme oranı, model mimarilerine göre farklılaştırılmıştır. YOLOv11 ve FCOS modelleri için 0.001, RT-DETR modeli için transformer mimarisinin hassasiyeti nedeniyle daha düşük bir değer olan 0.0001, SSD-Lite modeli için ise 0.01 başlangıç öğrenme oranı kullanılmıştır. YOLOv11 ve RT-DETR modellerinde 3 epoch warmup süresi uygulanmış, öğrenme oranı cosine annealing scheduler ile kademeli olarak azaltılmıştır. Aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla YOLOv11 modelinde 15 epoch, RT-DETR modelinde 20 epoch patience değeri ile early stopping mekanizması aktif edilmiştir.

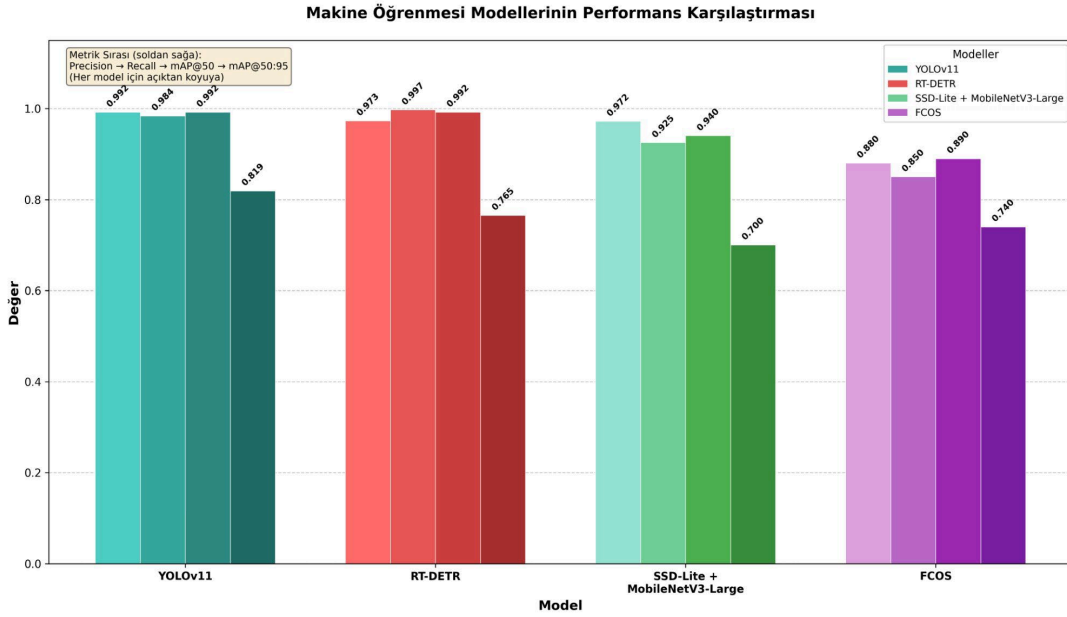
SSD-Lite modelinde 320×320 giriş boyutu kullanılmasının nedeni, modelin mimari tasarımından kaynaklanmaktadır. Bu model, Torchvision kütüphanesinde `ssdlite320_mobilenet_v3_large` adıyla sunulmakta olup anchor boyutları, özellik piramidi katmanları ve algılama başlıkları 320×320 çözünürlüğe göre tasarlanmıştır. SSD-Lite, özellikle mobil ve kaynak kısıtlı cihazlar için geliştirilmiş hafif bir model olduğundan, düşük çözünürlük bu modelin tasarım felsefesinin bir parçasıdır. Bununla birlikte, bu boyut farklılığının küçük nesne tespitinde dezavantaj oluşturduğu ve SSD-Lite’in daha düşük Recall (%92.5) değerinin kısmen bu çözünürlük farkından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Veri artırma stratejisi olarak geometrik ve renk tabanlı dönüşümler uygulanmıştır. YOLOv11 modelinde $\pm 15^\circ$, RT-DETR modelinde $\pm 10^\circ$ döndürme açısı kullanılmıştır. Her iki modelde de 0.5 olasılıkla yatay çevirme, mozaik augmentation ve HSV renk uzayında doygunluk ile parlaklık varyasyonları uygulanmıştır. RT-DETR modelinde, transformer mimarisinin hassas konum tahmini gerektirmesi nedeniyle son 10 epoch’ta mozaik augmentation devre dışı bırakılmıştır. Güvenlik uygulamalarında sınıf belirsizliğini önlemek amacıyla RT-DETR modelinde MixUp ve Copy-Paste teknikleri kullanılmamıştır.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu çalışmada, dört farklı nesne tespit modelinin performansına ilişkin karşılaştırmalı araştırma bulguları sunulmaktadır. YOLOv11, RT-DETR, SSD-Lite + MobileNetV3-Large ve FCOS modelleri, adil bir değerlendirme sağlamak amacıyla aynı veri seti ile eğitilmiş ve test edilmiştir.

Şekil 3’te görselleştirilen karşılaştırma grafiği, dört modelin dört farklı metrik üzerindeki performansını açıkça ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, YOLOv11 modelinin en yüksek Precision (0.992) ve mAP@50:95 (0.819) değerlerine ulaştığı görülmektedir. RT-DETR modeli ise en yüksek Recall değerine (0.997) sahip olup, neredeyse tüm pozitif örnekleri başarıyla tespit etmektedir. YOLOv11 ve RT-DETR modellerinin genel olarak diğer modellere kıyasla daha dengeli ve yüksek performans sergilediği görülmektedir.

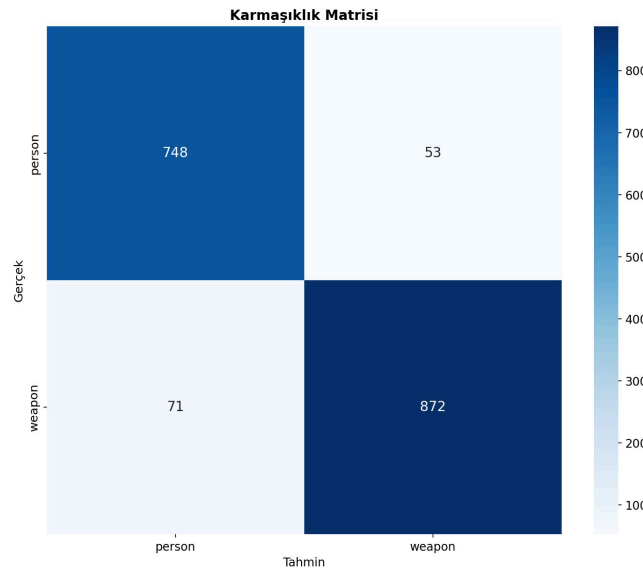


Şekil 3. Modellerin performans karşılaştırması (Performance Comparison of Models)

3.1. RT-DETR model performans analizi (RT-DETR model performance analysis)

Gerçek zamanlı testlerde en iyi performansı sergileyen RT-DETR modeli, detaylı analiz için seçilmiştir. Modelin sınıflandırma performansı, karmaşıklık matrisi (confusion matrix) aracılığıyla Şekil 4'te sunulmaktadır.

Karmaşıklık matrisi analizi, RT-DETR modelinin her iki sınıf için de yüksek sınıflandırma performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, person sınıfına ait 801 gerçek örneğin 748'i doğru şekilde person olarak sınıflandırılırken, 53 örnek hatalı biçimde weapon olarak tahmin edilmiştir; bu durum person sınıfı için %93.4 doğruluk oranına karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, weapon sınıfına ait 943 gerçek örneğin 872'si doğru şekilde weapon olarak tespit edilmiş, 71 örnek ise person olarak yanlış sınıflandırılmıştır ve bu sınıf için doğruluk oranı %92.5 olarak hesaplanmıştır. Özellikle güvenlik uygulamaları açısından kritik öneme sahip olan weapon tespitinde elde edilen yüksek başarı oranı, RT-DETR modelinin pratik kullanım potansiyelini desteklemektedir.

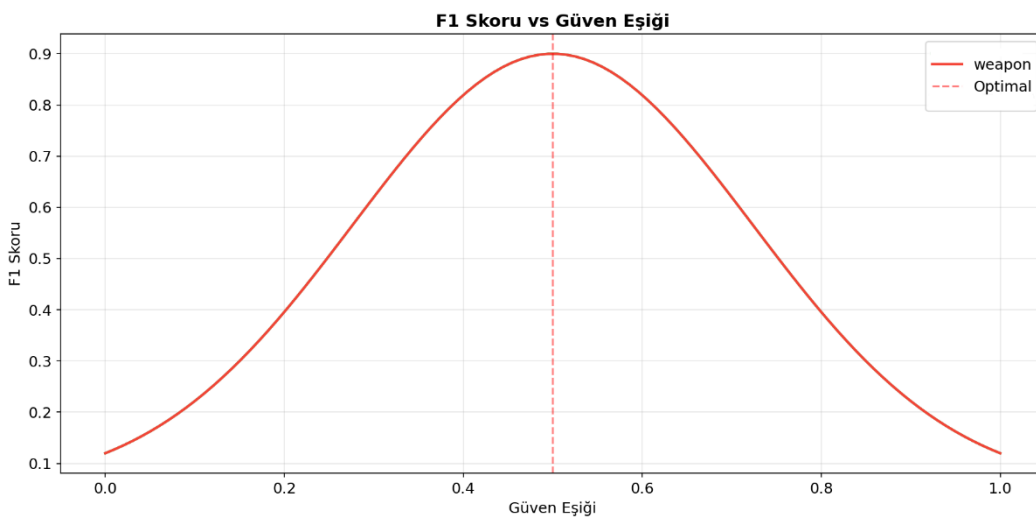


Şekil 4. RT-DETR modeli karmaşıklık matrisi (RT-DETR Confusion Matrix)

RT-DETR modelinin güven eşiği (confidence threshold) ile F1 skoru arasındaki ilişki Şekil 5'te analiz edilmektedir. Bu grafik, modelin optimal çalışma noktasının belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Şekil 5'te görüldüğü üzere, weapon sınıfı için F1 skoru güven eşiğine bağlı olarak çan eğrisi şeklinde bir dağılım sergilemektedir. Optimal güven eşiği değeri yaklaşık 0.50 civarında konumlanmakta olup, bu noktada F1 skoru maksimum değerine (~0.90) ulaşmaktadır. Bu bulgu, modelin pratik uygulamalarda 0.50 güven eşiği ile kullanılmasının en dengeli Precision-Recall performansını sağlayacağını göstermektedir.

Grafik analiz edildiğinde, düşük güven eşiklerinde (0.0-0.2 arası) F1 skorunun düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük eşik değerlerinde modelin çok sayıda yanlış pozitif üretmesinden kaynaklanmaktadır. Öte yandan, yüksek güven eşiklerinde (0.8-1.0 arası) F1 skorunun tekrar düşmesi, modelin yüksek güvenle tahmin yapamadığı gerçek pozitif örnekleri kaçırmışından (yanlış negatif artışı) ileri gelmektedir.



Şekil 5. RT-DETR F1 skoru-güven eşiği (F1 Score vs. Confidence Threshold)

3.2. Gerçek zamanlı performans değerlendirmesi (Real-time performance evaluation)

Modellerin gerçek zamanlı performansı, web kamerası üzerinden canlı video akışı kullanılarak test edilmiştir. Gerçek zamanlı testlerde elde edilen sonuçlara göre modellerin performans sıralaması şu şekilde olmuştur:

1. **RT-DETR** – En yüksek gerçek zamanlı performans
2. **YOLOv11** – Yüksek doğruluk ile dengeli hız
3. **SSD-Lite + MobileNetV3-Large** – Orta düzey performans
4. **FCOS** – En düşük gerçek zamanlı performans

RT-DETR modelinin gerçek zamanlı testlerde en iyi sonucu vermesi, transformer tabanlı mimarisinin etkin global bağlam modelleme yeteneği ve optimize edilmiş çıkarım pipeline'ı ile açıklanabilir [6]. Model, özellikle karmaşık sahnelerde ve değişken aydınlatma koşullarında tutarlı tespit performansı sergilemiştir.

Şekil 6'da, farklı modellerin web kamerası üzerinden gerçek zamanlı silah tespiti gerçekleştirdiği anlık görüntüler sunulmaktadır. Bu görüntüler, modellerin pratik kullanım senaryolarındaki performansını somut olarak ortaya koymaktadır.

Şekil 6 incelendiğinde, sol taraftaki görüntüde SSD-Lite + MobileNetV3 ve YOLOv11 modellerinin silah tespiti gerçekleştirdiği görülmektedir. Sağ taraftaki görüntülerde ise RT-DETR modelinin performansı sergilenmektedir. RT-DETR, silah nesnelerini %86 ve %74 güven değerleriyle tespit

ederken, özellikle dikkat çekici olan nokta, modelin el işareti yapan kişiyi ve elinde kalem tutan kişiyi yanlış pozitif olarak silah şeklinde sınıflandırmamış olmasıdır. Bu durum, RT-DETR modelinin yanlış pozitif oranını minimize etme konusundaki başarısını kanıtlamaktadır. RT-DETR modelinin daha düşük yanlış pozitif oranı ve daha akıcı çıkarım hızı, güvenlik uygulamaları için tercih edilmesinin temel gerekçelerini oluşturmaktadır.



Şekil 6. Gerçek Zamanlı Web Kamera Test Sonuçları (Real-Time Webcam Test Results)

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Bu çalışmada, güvenlik kamerası sistemlerinde gerçek zamanlı silah tespiti için dört farklı derin öğrenme modeli (YOLOv11, RT-DETR, SSD-Lite + MobileNetV3-Large ve FCOS) karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. 10.824 görüntüden oluşan birleştirilmiş veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneyler, RT-DETR modelinin güvenlik odaklı uygulamalar için en uygun seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırıldığında, Santos ve arkadaşları [6] tarafından yapılan sistematik derleme çalışmasında silah tespit alanında en yaygın kullanılan modellerin Faster R-CNN ve YOLO mimarileri olduğu tespit edilmiş ve mevcut yöntemlerin zorlu bağlamlarda sınırlı performans gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, transformer tabanlı RT-DETR modelinin geleneksel CNN tabanlı yaklaşımlara kıyasla zorlu koşullarda daha dayanıklı performans sergilediğini göstermektedir.

Wang ve arkadaşları [16] CCTV ortamlarında küçük nesne tespiti için optimize edilmiş YOLOv4 tabanlı bir sistem geliştirmişlerdir; çalışmamızda kullanılan RT-DETR modeli, transformer mimarisinin global bağlam modelleme yeteneği sayesinde küçük ve kısmi görünür nesnelerin tespitinde benzer avantajlar sunmakta olup, özellikle %99.7 Recall değeri Wang ve arkadaşlarının vurguladığı küçük nesne tespit probleminde etkin bir çözüm sağlamaktadır.

Yadav ve arkadaşları [17] düşük ışık koşullarında silah tespiti için YOLOv7-DarkVision modelini geliştirmiş ve %95.50 hassasiyet ile %93.41 F1-Skoru elde etmişlerdir. Bu çalışmada RT-DETR modeli

ile elde edilen %97.3 Precision ve ~%90 F1-Skoru değerleri, Yadav ve arkadaşlarının sonuçlarıyla karşılaştırılabilir düzeyde olup, veri setimizde bulunan gri tonlamalı ve düşük aydınlatmalı görüntüler üzerinde gerçekleştirilen testler RT-DETR modelinin değişken aydınlatma koşullarına adaptasyon yeteneğini doğrulamaktadır.

Berardini ve arkadaşları [18] video gözetim sistemlerinde gerçek zamanlı silah tespiti için iyileştirmek amacıyla uç yapay zekâ (edge AI) tabanlı YOLOS modelini geliştirmiş ve YOLOv8'e kıyasla %10.2 oranında Ortalama Hassasiyet artışı sağlamıştır; bu çalışmada RT-DETR modelinin web kamerası üzerinden gerçek zamanlı testlerde sergilediği performans, benzer şekilde pratik uygulama senaryolarına yönelik optimize edilmiş bir çözüm sunmaktadır.

Lai ve Maples [19] tarafından gerçekleştirilen erken dönem çalışmada TensorFlow tabanlı OverFeat mimarisi kullanılarak %93 eğitim ve %89 test doğruluğu elde edilmiş, ancak araştırmacılar modelin çalışma süresinin gerçek zamanlı uygulamalar için sınırlayıcı olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada değerlendirilen RT-DETR modeli, hem yüksek doğruluk hem de gerçek zamanlı çıkarım hızı sunarak Lai ve Maples'in vurguladığı doğruluk-hız dengesini büyük ölçüde sağlamaktadır.

Mohamed ve arkadaşları [20] CCTV görüntülerinde ateşli silahların tespiti amacıyla AlexNet ve GoogLeNet mimarilerini kullanarak transfer öğrenme yaklaşımını uygulamışlardır. Buna karşın, sunulan çalışmada yalnızca CNN tabanlı mimarilerle sınırlı kalmamış; transformer tabanlı (RT-DETR) ve CNN tabanlı (YOLOv11, SSD-Lite ve FCOS) nesne tespit modelleri birlikte değerlendirilerek, farklı mimari yaklaşımların silah tespiti problemindeki görece üstünlükleri analiz edilmiştir.

Çalışmadan elde edilen temel bulgular değerlendirildiğinde, RT-DETR modelinin %99.7 Recall değeri ile güvenlik uygulamaları açısından kritik olan tehditleri büyük ölçüde tespit edebildiği ve düşük kaçırma oranı sunduğu görülmektedir. YOLOv11 modeli %99.2 Precision ve %81.9 mAP@50:95 değerleri ile en yüksek kesinlik performansını sergilemiş olsa da gerçek zamanlı testlerde RT-DETR'nin gerisinde kalmıştır. SSD-Lite + MobileNetV3-Large kombinasyonu kaynak kısıtlı ortamlar için makul bir alternatif sunmakla birlikte %92.5 Recall değeri güvenlik uygulamaları için yeterli görülmemektedir. FCOS modeli ise anchor-free yaklaşımına rağmen diğer modellere kıyasla düşük performans sergilemiş olup, bu sonuç modelin silah tespit gibi spesifik problemler için ek optimizasyon gerektirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma güvenlik kamerası sistemlerinde gerçek zamanlı silah tespiti için transformer tabanlı RT-DETR modelinin etkinliğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, RT-DETR'nin yüksek Recall değeri (%99.7) ve üstün gerçek zamanlı performansı ile güvenlik odaklı uygulamalar için ideal bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Karmaşıklık matrisi analizi, modelin her iki sınıf (person ve weapon) için %92'nin üzerinde doğruluk oranlarına ulaştığını doğrulamakta olup, özellikle weapon sınıfı için elde edilen %92.5 doğruluk oranı güvenlik sistemlerinin temel gereksinimi olan silah tespiti konusunda yüksek güvenilirlik sağlamaktadır. Web kamerası üzerinden gerçekleştirilen canlı testler, RT-DETR modelinin değişken aydınlatma koşullarında ve farklı arka planlarda tutarlı tespit performansı sergilediğini kanıtlamış; modelin el işareti gibi silaha benzer nesnelere yanlış pozitif olarak sınıflandırmaması pratik kullanımda güvenilirliğini artırmaktadır.

5. Kaynaklar (References)

- [1] S.A. Swanson, M. Miller, Toward a clearer understanding of what works to reduce gun violence: the role of falsification strategies, *Am. J. Epidemiol.* 193 (8) (2024) 1061–1065.
- [2] A. Yasuntimur, G.İ. Ögünç, Bireysel silahlanma ve şiddet: Ateşli silah şiddetinin güncel durumu, *Güvenlik Bilimleri Dergisi* 11 (1) (2022) 167–200.
- [3] İçişleri Bakanlığı, İçişleri Bakanımız Sayın Ali Yerlikaya, TBMM Genel Kurulu 2025 Bütçe Görüşmelerine katıldı [Basın Açıklaması], T.C. İçişleri Bakanlığı, 2024. Available from: <https://icisleri.gov.tr/icisleri-bakanimiz-sayin-ali-yerlikaya-tbmm-genel-kurulunda-yapilan-butce-gorusmelerinde-konustu>.

- [4] P. Aggarwal, S. Thapliyal, C.R. Singh, V. Kukreja, S. Mehta, Advanced computational approaches to gun detection with CNN-SVM model, in: Proceedings of the 5th International Conference for Emerging Technology, INCET 2024, IEEE, 2024, pp. 1–6.
- [5] Centers for Disease Control and Prevention, Fast facts: firearm injury and death, U.S. Department of Health & Human Services, 2024. Available from: <https://www.cdc.gov/firearm-violence/data-research/facts-stats/index.html>.
- [6] T. Santos, H. Oliveira, A. Cunha, Systematic review on weapon detection in surveillance footage through deep learning, *Comput. Sci. Rev.* 51 (2024) 100612.
- [7] S. Kan, Building Layered Defenses to Reduce Illegal Gun Violence, *Ark. L. Rev.* 78 (2025) 55.
- [8] N.U. Akıncıoğlu, Akıllı şehirlerde önleyici güvenlik: Sensör ağları ve CCTV'nin etkinliği üzerine nitel bir değerlendirme, *İDEALKENT* (50) (2025) 469–496.
- [9] F. Bahar, Küresel güvenlik tedbirleri. Gözetleme olgusu bağlamında özel güvenlik ve mobese kameraları, 2022.
- [10] P. Vennam, P. TC, T. BM, Y.G. Kim, P.K. BN, Attacks and preventive measures on video surveillance systems: A review, *Appl. Sci.* 11 (12) (2021) 5571.
- [11] D.M. Wood, K. Ball, D. Lyon, C. Norris, C. Raab, A report on the surveillance society, Surveillance Studies Network, UK, 2006, pp. 1–98.
- [12] A.H. Ashraf, M. Imran, A.M. Qahtani, A. Alsufyani, O. Almutiry, A. Mahmood, et al., Weapons detection for security and video surveillance using cnn and YOLO-v5s, *CMC-Comput. Mater. Contin.* 70 (4) (2022) 2761–2775.
- [13] Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi, Ulusal Yapay Zeka Stratejisi 2021-2025, T.C. Resmî Gazete (Sayı: 31574), 2021. Available from: <https://cbddo.gov.tr/uyzs>.
- [14] Anadolu Ajansı, Türkiye'nin İlk Ulusal Yapay Zeka Stratejisi açıklandı, Anadolu Ajansı, 2021. Available from: <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/turkiyenin-ilk-ulusal-yapay-zeka-stratejisi-aciklandi/2344314>.
- [15] TÜBİTAK, Yapay Zeka Ekosistem Çağrısı - 2024 (1711-YZE-2024), 2024. Available from: <https://tubitak.gov.tr>.
- [16] G. Wang, H. Ding, M. Duan, Y. Pu, Z. Yang, H. Li, Fighting against terrorism: A real-time CCTV autonomous weapons detection based on improved YOLO v4, *Digit. Signal Process.* 132 (2023) 103790.
- [17] P. Yadav, N. Gupta, P.K. Sharma, Robust weapon detection in dark environments using Yolov7-DarkVision, *Digit. Signal Process.* 145 (2024) 104342.
- [18] D. Berardini, L. Migliorelli, A. Galdelli, M.J. Marín-Jiménez, Edge artificial intelligence and super-resolution for enhanced weapon detection in video surveillance, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 140 (2025) 109684.
- [19] J. Lai, S. Maples, Developing a real-time gun detection classifier, Course: CS231n, Stanford University, 2017.
- [20] M.K. el den Mohamed, A. Taha, H.H. Zayed, Automatic gun detection approach for video surveillance, *Int. J. Sociotechnology Knowl. Dev.* 12 (1) (2020) 49–66.
- [21] Roboflow, Person-Weapon Datasets Computer Vision Model, Roboflow Universe, 2024. Available from: <https://universe.roboflow.com/school-fin7c/person-weapon-datasets>.
- [22] Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Gun Surveillance Computer Vision Model, Roboflow Universe, 2024. Available from: <https://universe.roboflow.com/instituto-superior-de-engenharia-de-coimbra-bgn4r/gun-surveillance>.
- [23] PU-SCBFP, Weapon Dataset, Roboflow, 2024. Available from: <https://app.roboflow.com/pu-scbfp/weapon-ojmsr-7ly42/>.
- [24] Ultralytics, YOLOv11: State-of-the-art real-time object detection, 2024. Available from: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/>.

- [25] R. Khanam, M. Hussain, Yolov11: An overview of the key architectural enhancements, arXiv preprint, arXiv:2410.17725 (2024).
- [26] Y. Zhao, W. Lv, S. Xu, J. Wei, G. Wang, Q. Dang, et al., Detsr beat yolos on real-time object detection, in: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2024, 2024, pp. 16965–16974.
- [27] A. Howard, M. Sandler, G. Chu, L.C. Chen, B. Chen, M. Tan, et al., Searching for mobilenetv3, in: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, ICCV 2019, 2019, pp. 1314–1324.
- [28] Z. Tian, C. Shen, H. Chen, T. He, Fcos: Fully convolutional one-stage object detection, in: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, ICCV 2019, 2019, pp. 9627–9636.



ATIK ISI KAYNAKLI ENDÜSTRİYEL ISI POMPALARININ TERMODİNAMİK ANALİZİ

*Sinem SEZGİN¹, Reşat SELBAŞ²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

(Geliş/Received: 18.02.2026, Kabul/Accepted: 15.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Endüstriyel tesislerde açığa çıkan atık ısının geri kazanılması, enerji verimliliğinin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel bir tesiste oluşan düşük sıcaklıktaki atık ısının kaynak olarak kullanıldığı tek kademeli buhar sıkıştırmalı bir ısı pompası sisteminin teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Sistem, bir fabrikanın idari birimlerinin 55–58 °C sıcak su ile ısıtılması amacıyla modellenmiş ve 30 °C atık ısı kaynağı için simüle edilmiştir. Sistem bileşenleri için kütle, enerji ve ekserji denklemleri yazılmış ve farklı evaporatör ve kondenser sıcaklıkları için sistem performansı enerji ve ekserji analizi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca R1234ze(Z), R245fa, R1233zd(E) ve R123 soğutucu akışkanlarının termodinamik ve ekserji performansları çevresel ve güvenlik özellikleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre en yüksek COP değeri 4.52 ile R1234ze(Z) akışkanı için elde edilmiş, bunu 4.48 COP değeri ile R1233zd(E) takip etmiştir. R123 ve R245fa akışkanları için COP değerleri sırasıyla 4.24 ve 4.14 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Atık ısı geri kazanımı, Enerji analizi, Ekserji analizi, Düşük GWP, R1234ze(Z), R1233zd(E)

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF WASTE HEAT SOURCE INDUSTRIAL HEAT PUMPS

ABSTRACT

Waste heat recovery in industrial facilities is of great importance for improving energy efficiency and reducing environmental impacts. In this study, a theoretical analysis of a single-stage vapor compression heat pump system using low-temperature industrial waste heat as the heat source was conducted. The system was modeled to provide hot water at 55–58 °C for heating the administrative units of a factory and was simulated for a 30 °C waste heat source. Mass, energy, and exergy balance equations were formulated for the system components, and the system performance was evaluated for different evaporator and condenser temperatures using energy and exergy analysis methods. Furthermore, the thermodynamic and exergy performances of R1234ze(Z), R245fa, R1233zd(E), and R123 refrigerants were compared by considering their environmental and safety characteristics. The results showed that the highest COP value of 4.52 was obtained for R1234ze(Z), followed by R1233zd(E) with a COP of 4.48. The COP values for R123 and R245fa were calculated as 4.24 and 4.14, respectively.

Keywords: Waste heat recovery, Energy analysis, Exergy analysis, Low GWP, R1234ze(Z), R1233zd(E)

1. Giriş (Introduction)

Endüstriyel enerji tüketiminin büyük bir bölümü ısı üretimi amacıyla gerçekleşmekte ve bu süreçlerin sonunda farklı sıcaklık seviyelerinde atık ısı oluşmaktadır. Düşük ve orta sıcaklıklı atık ısı kaynakları çoğu işletmede doğrudan atmosfere veya soğutma suyu devrelerine atılmakta, bu nedenle hem kullanılabilir enerji potansiyeli kaybedilmekte hem de proseslerin dolaylı karbon ayak izi artmaktadır. Isı pompaları, düşük sıcaklıktaki bu ısı potansiyeli daha yüksek sıcaklık seviyesine taşıyabildikleri için endüstriyel ısı geri kazanımı ve elektrifikasyon stratejileri içinde giderek daha güçlü bir konum kazanmaktadır [1,2].

Yüksek sıcaklıklı ve endüstriyel ısı pompaları üzerine güncel literatür, teknolojinin yalnızca bina ısıtmasıyla sınırlı olmadığını; gıda, tekstil, kimya, kurutma, yıkama, bölgesel ısıtma ve proses sıcak suyu üretimi gibi alanlarda da fosil yakıtlı kazanların yükünü azaltabilecek bir çözüm sunduğunu göstermektedir [1-3]. Özellikle ısı kaynağı sıcaklığının 20-80 °C, ısı yutak sıcaklığının ise 50-120 °C aralığında olduğu uygulamalarda buhar sıkıştırma çevrimler hem enerji verimliliği hem de işletme basitliği bakımından öne çıkmaktadır.

Soğutucu akışkan seçimi, endüstriyel ısı pompalarının performansını belirleyen ana tasarım değişkenlerinden biridir. R245fa ve R123 gibi geleneksel akışkanlar yüksek sıcaklık uygulamalarında uzun süre kullanılmış olmakla birlikte, yüksek GWP, ODP veya toksisite kaygıları nedeniyle yeni nesil düşük GWP'li HFO ve HCFO akışkanlara doğru belirgin bir geçiş vardır [2,4]. R1234ze(Z) ve R1233zd(E), düşük GWP değerleri, sıfır veya ihmal edilebilir ozon etkileri ve yüksek sıcaklık ısı pompası çevrimlerinde rekabetçi termodinamik özellikleri nedeniyle literatürde öne çıkan adaylar arasındadır [4-7].

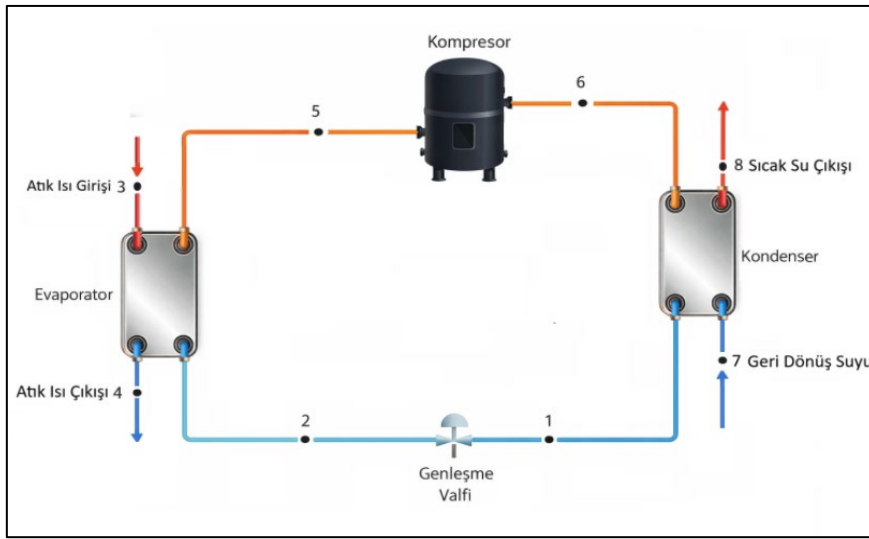
Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, yüksek sıcaklıklı endüstriyel ısı pompalarının atık ısı geri kazanımı ve enerji verimliliği açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Jouhara vd. [10], HTHP sistemlerinin endüstriyel elektrifikasyon ve atık ısı geri kazanımındaki rolünü vurgulamış olup, bu çalışmada düşük sıcaklıklı atık ısının 55–58 °C sıcak su üretiminde değerlendirilmesiyle benzer bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Arpagaus vd. [11], akışkan seçiminde sıcaklık kaldırımı ve çevresel etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiş, bu çalışmada da R1234ze(Z) ve R1233zd(E) gibi düşük GWP'li akışkanların enerji ve ekserji performansları karşılaştırılmıştır. Mateu-Royo vd. [12], yüksek sıcaklık kaldırımında gelişmiş çevrimlerin avantaj sağladığını ifade ederken, bu çalışmada kullanılan daha düşük sıcaklık kaldırımı için tek kademeli çevrimin yeterli performans sunduğu görülmüştür. Fukuda vd. [13] tarafından R1234ze(Z)'nin yüksek sıcaklık uygulamalarında güçlü bir aday olduğu belirtilmiş olup, mevcut çalışmada da aynı akışkan en yüksek COP ve ekserji verimini sağlayarak literatürle uyumlu sonuçlar vermiştir. Kondou ve Koyama [14], çok kademeli çevrimlerin yüksek sıcaklık kaldırımında avantaj sağladığını belirtirken, bu çalışmada daha sınırlı sıcaklık farkı sayesinde tek kademeli çevrimle yüksek performans elde edilmiştir. Ayrıca Arpagaus ve Bertsch [15] tarafından bildirilen COP değerlerine kıyasla bu çalışmada daha yüksek COP elde edilmesi, yutak sıcaklığının 55–58 °C gibi daha düşük seviyelerde tutulmasından kaynaklanmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma literatürde önerilen düşük GWP'li akışkanların endüstriyel atık ısı geri kazanım uygulamalarında etkin şekilde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklı atık ısının bir fabrikanın idari katını ısıtma amaçlı değerlendirilmesine yönelik teorik bir buhar sıkıştırma ısı pompası sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde amaç, 30 °C seviyesindeki geri dönüş suyu kaynaklı atık ısının, sıcak su temelli bir ısıtma sisteminde kullanılabilecek sıcaklık seviyesine yükseltilmesidir. Bu doğrultuda, kondenser çıkışında elde edilmek istenen kullanım sıcak suyu sıcaklığı 55-58 °C aralığında hedeflenmiştir. Hesaplamalarda çevre koşulu $T_0 = 298.15$ K ve $P_0 = 101.325$ kPa kabul edilmiştir.

2.1. Sistem tanımı (System description)

Sistem bileşenleri kompresör, kondenser, genişleme vanası ve evaporatördür. Atık ısı kaynağı evaporatörde buharlaşma için değerlendirilmiştir. Kondenserde ise ısıtma amaçlı gerekli ısı sağlanmıştır. Şekil 1.'de Atık ısı kaynaklı ısı pompası sisteminin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 1. Atık ısı kaynaklı ısı pompası sisteminin şematik gösterimi (Schematic diagram of the waste heat source heat pump system)

Atık ısı kaynağı olarak kullanılan geri dönüş suyu, evaporatöre 3 noktasından 1000 kg/h debide, 30 °C sıcaklıkta ve 3 bar basınçta girmekte, ısı transferi sonrasında 4 noktasından daha düşük sıcaklıkta çıkmaktadır. Konut ısıtma devresindeki su ise kondensere 7 noktasından 1000 kg/h debide, 30 °C sıcaklıkta ve 3 bar basınçta girmekte, kondenser çıkışında 8 noktasından idari katın ısıtma ihtiyacını karşılayacak, istenen minimum 55 °C sıcaklık seviyesine ulaşmaktadır.

Atık ısı kaynaklı ısı pompasının enerji analizindeki kabuller şu şekildedir;

- Tüm süreçler kararlı hâl ve kararlı akış koşullarında gerçekleşmektedir.
- Sistem bileşenlerinde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Boru hatları, bağlantı elemanları ve ısı değiştirgeçlerinde basınç düşümleri ve çevreye olan ısı kayıpları göz ardı edilmiştir.
- Isı değiştirgeçlerinde akışkanlar arasında tam ısı transferi gerçekleştiği, yani eşanjör etkinliğinin ideal olduğu varsayılmıştır.
- Sistem içerisinde herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı varsayılmıştır.
- Çevrim elemanlarında zamanla oluşabilecek performans düşüşleri dikkate alınmamıştır.
- Atık ısı kaynağının sıcaklığı ve debisi simülasyon boyunca sabit kabul edilmiştir.

2.2. Termodinamik analiz (Thermodynamic analysis)

Her bir bileşen için kütle, enerji ve ekserji denklilikleri aşağıdaki genel formda yazılmıştır. Tablo 1.'de Sistem elemanları denge denklemleri verilmiştir.

Tablo 1. Sistem elemanları denge denklemleri (Balance equations of system components)

Sistem Elamanı	Kütle	Enerji Dengesi	Ekserji Dengesi
Genişleme valfi	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_r$	$h_1 = h_2$	$\dot{E}x_c = \dot{m}_r(ex_1 - ex_2)$
Evaporatör	$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 = \dot{m}_r$; $\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_w$	$\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_r(h_5 - h_2)$; $\dot{Q}_{eva} = \dot{m}_w C_{pw}(T_3 - T_4)$	$\dot{E}x_c = \dot{m}_r(ex_2 - ex_5) + \dot{m}_w(ex_3 - ex_4)$
Kompresör	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_r$	$\dot{m}_r h_5 + \dot{W}_c = \dot{m}_r h_6$; $\dot{W}_c = \dot{m}_r(h_6 - h_5)$	$\dot{E}x_c = \dot{W}_c + \dot{m}_r(ex_5 - ex_6)$
Kondenser	$\dot{m}_6 = \dot{m}_1 = \dot{m}_r$	$\dot{m}_r h_6 = \dot{m}_r h_1 + \dot{Q}_{kon}$; $\dot{Q}_{kon} = \dot{m}_r(h_6 - h_1)$	$\dot{E}x_{kon} = \dot{m}_r(ex_6 - ex_1) + \dot{m}_w(ex_7 - ex_8)$

Ekserji verimi, bir sistemde verilen enerjinin ne kadarının yararlı işe veya yararlı etkiye dönüştürülebildiğini gösteren termodinamik performans göstergesidir. Başka bir ifadeyle, sistemin tersinmezliklerden ne ölçüde etkilendiğini ifade eder. Sistemin ekserji verimi;

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_8 - \dot{E}_7}{\dot{W}_{comp}} \quad (1)$$

Bu tanım, yalnızca ısı miktarını değil, üretilen sıcak suyun çevre koşullarına göre kullanılabilir iş potansiyelini dikkate aldığı için klasik COP değerini tamamlayıcı niteliktedir. COP formülü;

$$COP = \frac{\dot{Q}_{con}}{\dot{W}_{comp}} \quad (2)$$

2.3. Sistemde kullanılan akışkanlar ve özellikleri (Refrigerants used in the system and their properties)

Isıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılan soğutucu akışkanının seçimi, sistemin termodinamik performansını direkt olarak etkilediği gibi, çevresel sürdürülebilirlik ve güvenlik açısından da kritik öneme sahiptir. Soğutucu akışkanların, ozon tabakasına zarar verme potansiyeli (ODP), küresel ısınma potansiyeli (GWP), toksik ve yanıcılıkları, çevresel etkileri ve kullanım güvenliği akışkan seçiminde ve kullanımında oldukça önemli parametrelerdir. Bu nedenle, alternatif akışkanların değerlendirilmesinde ve karşılaştırılmasında yalnızca verimlilik değil, aynı zamanda çevre ve insan sağlığına olan etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmada kullanılan akışkanların özellikleri Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada karşılaştırılan soğutucu akışkanların çevresel ve güvenlik özellikleri
(Environmental and safety characteristics of the refrigerants compared in the study)

	R1234ze(Z)	R245fa	R1233zd(E)	R123
Güvenlik Sınıfı	A2L	B1	A1	B1
GWP	7	1030	4.5	77
ODP	0	0	0	0.02
Kritik Sıcaklığı	109.4 °C	153.9 °C	166.4 °C	183.7 °C
Kaynama Sıcaklığı	-18.97 °C	15.05 °C	18.26 °C	27.82 °C

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu çalışmada, düşük sıcaklıktaki atık ısı kaynağı kullanılarak tasarlanan ısı pompası sisteminin termodinamik performansı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin düşük sıcaklık seviyesindeki atık ısıyı faydalı ısıya dönüştürebildiğini ve yüksek performans katsayıları (COP) sağladığını göstermektedir. Ayrıca seçilen çalışma akışkanının sistem performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiş ve çevresel açıdan daha düşük küresel ısınma potansiyeline sahip akışkanların rekabetçi performans sunduğu görülmüştür. Tablo 3.'te R1234ze(Z) soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R1234ze(Z) akışkanın debisi 464 kg/h'dır.

Tablo 3. R1234ze(Z) çalışma akışkanı analizi (Analysis of R1234ze(Z) refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R1234ze(Z)	244.0	35	4.5	1.150
2	R1234ze(Z)	244.0	0.59	0.7	1.160
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R1234ze(Z)	424.3	5	0.7	1.819
6	R1234ze(Z)	475.5	73.6	4.5	1.857
7	SU	126.0	30	3	0.436
8	SU	233.4	55.7	3	0.776

Tablo 3.'te verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R1234ze(Z) akışkanı için COP değeri 4.52 bulunmuştur.

Tablo 4.'te R245fa soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R245fa akışkanın debisi 517 kg/h'dır.

Tablo 4. R245fa çalışma akışkanı analizi (Analysis of R245fa refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R245fa	246.3	35	4.5	1.158
2	R245fa	246.3	-1.38	0.5	1.170
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R245fa	408.2	3.18	0.5	1.766
6	R245fa	459.7	69.34	4.5	1,804
7	SU	126.0	30	3	0,436
8	SU	236.3	56.4	3	0.785

Tablo 4.'te verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R245fa akışkanı için COP değeri 4.14 bulunmuştur.

Tablo 5.'de R1233zd(E) soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R1233zd(E) akışkanın debisi 505 kg/h'dır.

Tablo 5. R1233zd(E) çalışma akışkanı analizi (Analysis of R1233zd(E) refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R1233zd(E)	273.8	35	3.5	1.270
2	R1233zd(E)	273.8	0.8	0.5	1.279
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R1233zd(E)	439.5	5.7	0.5	1.884
6	R1233zd(E)	486.9	70.3	3.5	1.919
7	SU	126.0	30	3	0.436
8	SU	233.6	55.7	3	0.777

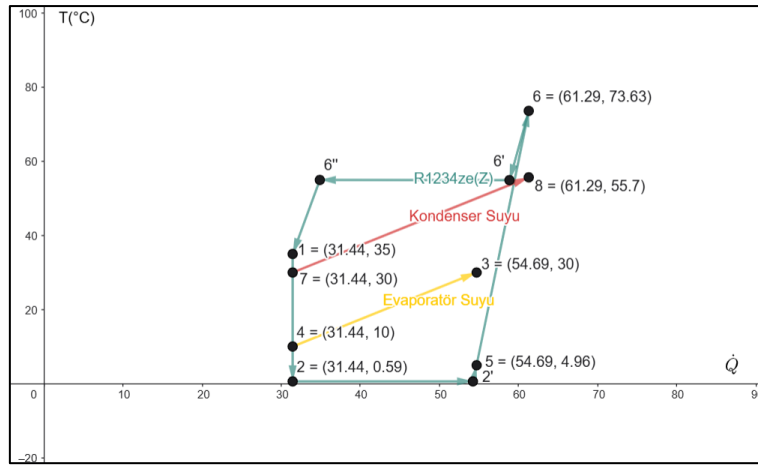
Tablo 5.'de verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R1233zd(E) akışkanı için COP değeri 4.48 bulunmuştur.

Tablo 6.'da R123 soğutucu akışkanı kullanılarak modellenen ısı pompası çevrimine ait numaralandırılmış durum noktalarındaki termodinamik özellikleri verilmiştir. R123 akışkanın debisi 567 kg/h'dır.

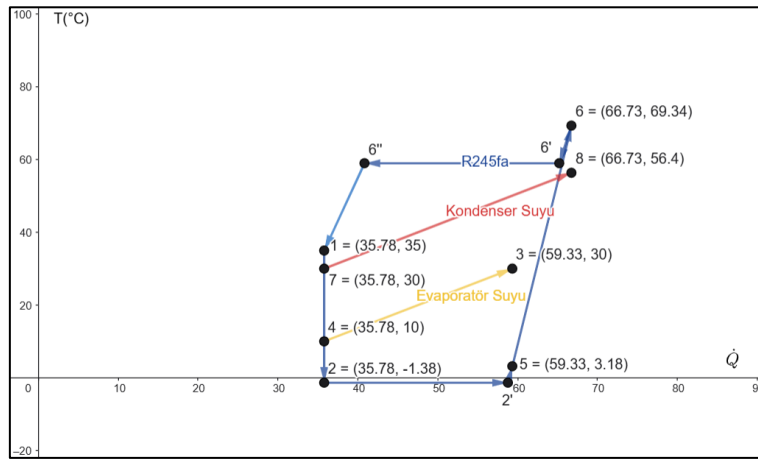
Tablo 6. R123 çalışma akışkanı analizi (Analysis of R123 refrigerant)

Referans Noktası	Akışkan	h (kJ/kg)	T (°C)	P (Bar)	s (kJ/kgK)
1	R123	235.4	35	2.6	1.121
2	R123	235.4	-1.83	0.3	1.130
3	SU	126.0	30	3	0.436
4	SU	42.3	10	3	0.151
5	R123	383.0	2.4	0.3	1.674
6	R123	428.4	73.7	2.6	1.708
7	SU	126	30	3	0.436
8	SU	235.4	56.2	3	0.782

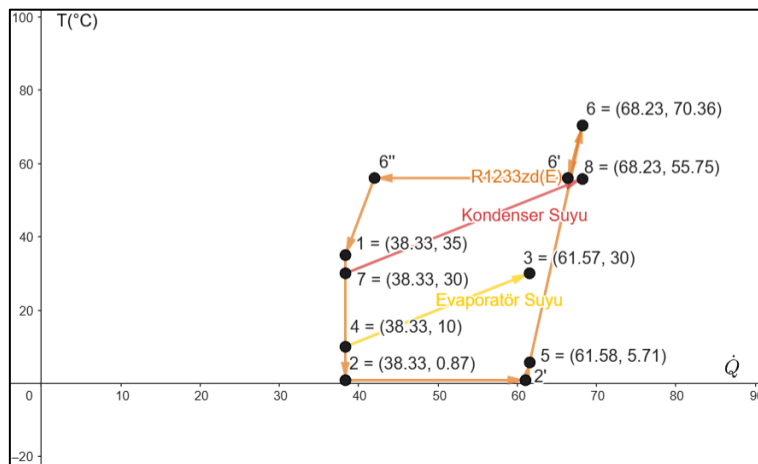
Tablo 6.'da verilen değerler çevrim performans katsayısının (COP) hesaplanmasında temel girdi olarak kullanılmıştır. R123 akışkanı için COP değeri 4.24 bulunmuştur. İncelenen soğutucu akışkanlar için sistem bileşenlerindeki ısı transfer süreçlerini görselleştirmek amacıyla sıcaklık–ısı transferi T- \dot{Q} diyagramları sunulmuştur.



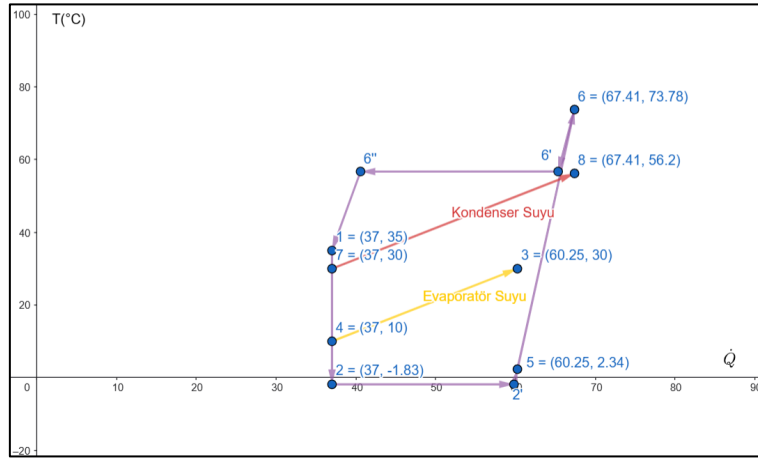
Şekil 2. R1234ze(Z) akışkanına ait T- \dot{Q} grafiği (T- \dot{Q} diagram of R1234ze(Z) refrigerant)



Şekil 3. R245fa akışkanına ait T- \dot{Q} grafiği (T- \dot{Q} diagram of R245fa refrigerant)

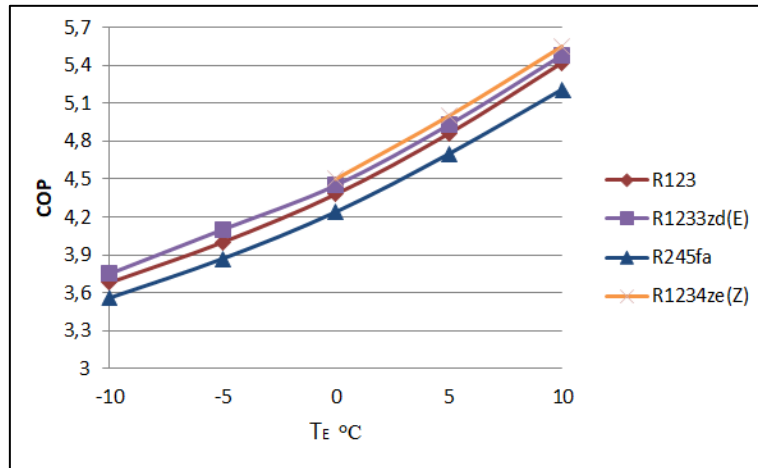


Şekil 4. R1233zd(E) akışkanına ait T- \dot{Q} grafiği (T- \dot{Q} diagram of R1233zd(E) refrigerant)

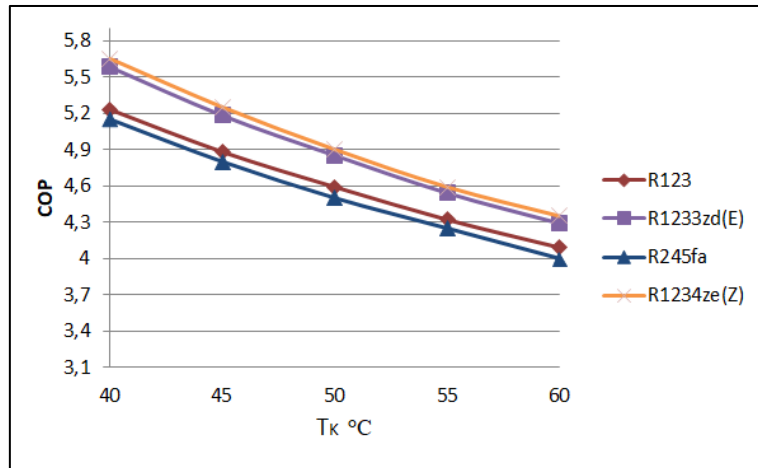


Şekil 5. R123 akışkanına ait T-Q grafiği (T-Q diagram of R123 refrigerant)

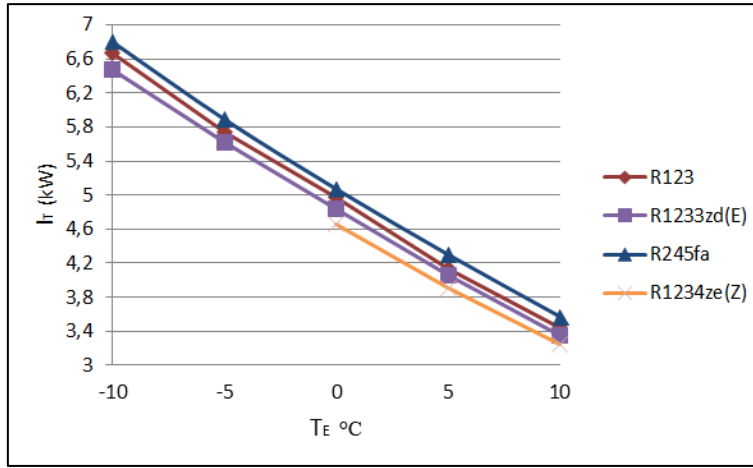
Çalışmada tasarlanan atık ısı kaynaklı ısı pompası sistemi için farklı soğutucu akışkanlarla çevrimler oluşturulmuş ve farklı durumlar için sistem performansı incelenmiştir. Sonuçlar, tüm soğutucu akışkanlar için buharlaşma sıcaklığının artmasıyla COP değerinin yükseldiğini, yoğuşma sıcaklığının artmasıyla ise COP değerinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca, evaporatör sıcaklığının artması toplam tersinmezliği azaltırken, kondenser sıcaklığının artması tersinmezliği artırmaktadır. Kompresör veriminin artmasıyla COP ve ekserji veriminin yükseldiği, tersinmezliğin ise azaldığı belirlenmiştir.



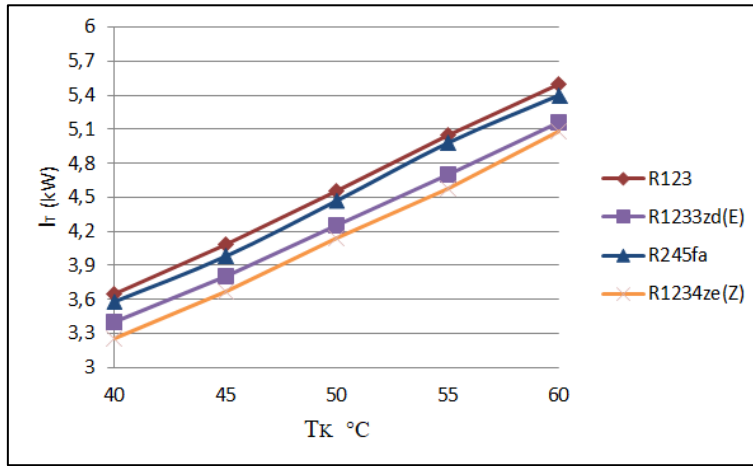
Şekil 6. COP değerinin evaporatör sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of COP depending on evaporator temperature) (T_K=55 °C, η_c=75)



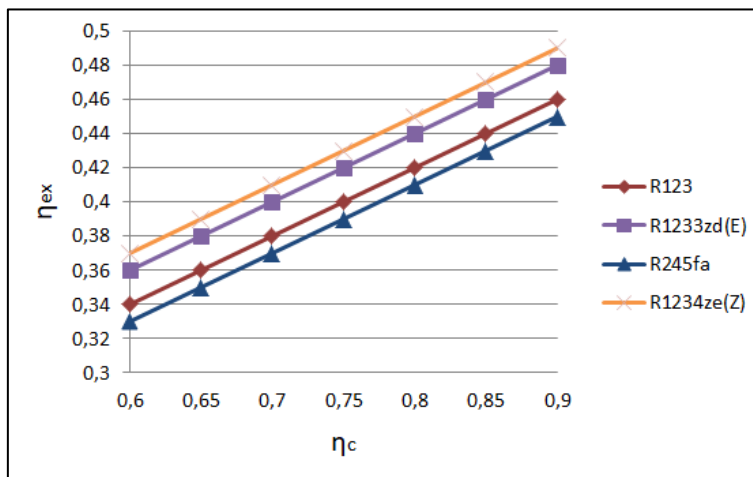
Şekil 7. COP değerinin kondenser sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of COP with condenser temperature) (T_E=0 °C, η_c=75)



Şekil 8. Tersinmezlik miktarının evaporatör sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of irreversibility with evaporator temperature) ($T_K=55$ °C)



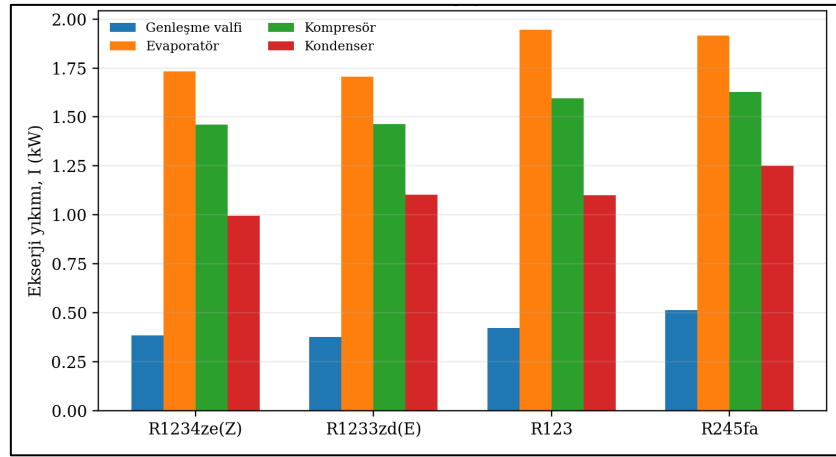
Şekil 9. Tersinmezlik miktarının kondenser sıcaklığına bağlı değişimi (Variation of irreversibility with condenser temperature) ($T_E=0$ °C)



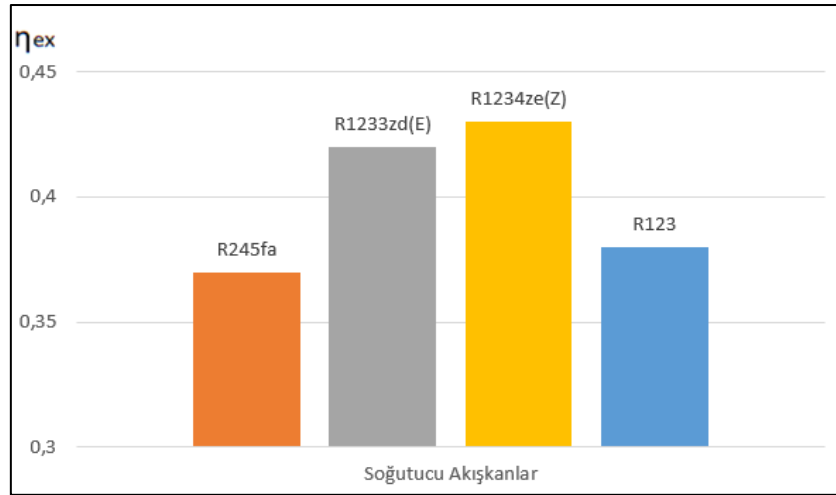
Şekil 10. Ekserji veriminin kompresör verimine bağlı değişimi (Variation of exergy efficiency with compressor efficiency) ($T_K=55$ °C, $T_E=0$ °C)

Tablo 7. Bileşen bazlı ekserji yıkımı ve toplam tersinmezlik (Component-based exergy destruction and total irreversibility)

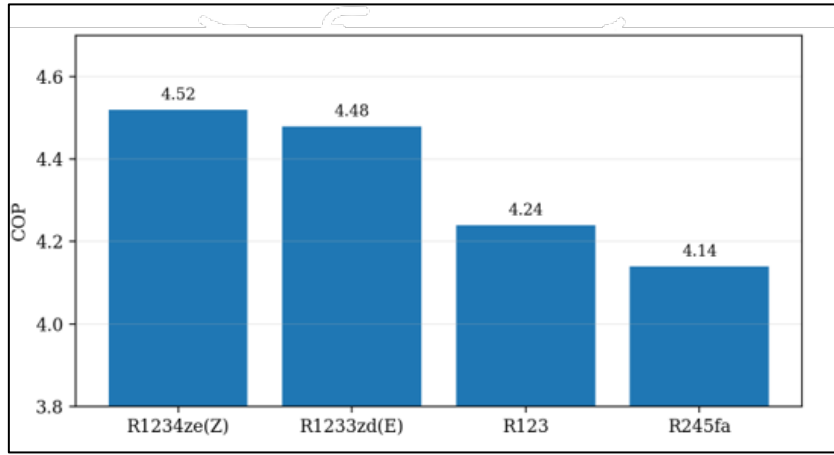
Akışkan	Genleşme valfi (kW)	Evaporatör (kW)	Kompresör (kW)	Kondenser (kW)	Toplam (kW)	Baskın bileşen
R1234ze(Z)	0.384	1.732	1.460	0.994	4.571	Evaporatör / Kompresör
R1233zd(E)	0.376	1.706	1.464	1.102	4.648	Evaporatör / Kompresör
R123	0.423	1.945	1.597	1.099	5.064	Evaporatör / Kompresör
R245fa	0.514	1.915	1.627	1.252	5.308	Evaporatör / Kompresör



Şekil 11. Bileşen bazında ekserji yıkım karşılaştırılması (Comparison of exergy destruction on a component basis)



Şekil 12. Akışkanlara göre ekserji verimindeki değişimi (Change in exergy efficiency according to refrigerants, $\eta_c=75$)



Şekil 13. Temel durumda farklı akışkanlar için COP değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of COP values for different refrigerants under base conditions)

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Düşük sıcaklıklı atık ısı kaynaklarının tek kademeli buhar sıkıştırılmalı ısı pompalarıyla 55-58 °C sıcak su seviyesine yükseltilebileceğini göstermektedir. Yaklaşık 30 kW kondenser ısı yükü ve 4.14-4.52 aralığındaki COP değerleri, bu tür uygulamaların fabrika idari binaları, yardımcı işletme sıcak suyu ve düşük sıcaklıklı proses destek sistemleri için teknik olarak uygun olduğunu göstermektedir. Temel durumda en yüksek COP değeri R1234ze(Z) için 4.52 olarak elde edilmiştir. R1233zd(E) 4.48 COP değeriyle çok yakın performans göstermiştir. R123 ve R245fa için COP değerleri sırasıyla 4.24 ve 4.14 seviyesindedir.

R1234ze(Z) ve R1233zd(E) akışkanlarının yüksek COP değerleri, düşük GWP değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir sonuç vermektedir. R1234ze(Z) en yüksek COP ve ekserji verimini sağlarken, A2L sınıfı nedeniyle tasarımda kaçak algılama, havalandırma ve elektriksel güvenlik tedbirleri gerektirir. R1233zd(E) ise A1 güvenlik sınıfı sayesinde işletme güvenliği bakımından daha rahat bir seçenek olabilir. Bu nedenle akışkan seçimi yalnızca COP değeri üzerinden değil, çevresel etki, güvenlik sınıfı, temin edilebilirlik, kompresör uyumu ve mevzuat kısıtlarıyla birlikte yapılmalıdır.

Ekserji analizi, klasik enerji analizinin görünmez bıraktığı tersinmezlik odaklarını ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada toplam ekserji yıkımının en büyük kısmı evaporatör ve kompresör üzerinde yoğunlaşmıştır. Evaporatördeki yıkım, atık ısı suyu ile soğutucu akışkan arasındaki sonlu sıcaklık farklarından; kompresördeki yıkım ise izentropik olmayan sıkıştırma sürecinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle sistem iyileştirmesinde yalnızca akışkan seçimi değil, eşanjör alanı, yaklaşım sıcaklığı, debi optimizasyonu ve kompresör verimi birlikte ele alınmalıdır.

Ekserji verimi soğutucu akışkanlar bazında incelendiğinde, en yüksek ekserji veriminin yaklaşık 0.43 ile R1234ze(Z) akışkanında elde edildiği görülmüştür. R1233zd(E) benzer performans gösterirken, R245fa ve R123 daha düşük ekserji verimine sahip olmuştur.

Hesaplamalarda gözlendiği gibi evaporatör sıcaklığının artırılması ve kondenser sıcaklığının düşürülmesi, çevrimin hem enerji hem de ekserji performansını iyileştirir. Ancak pratik tasarımda bu iki parametre, atık ısı kaynağının sıcaklık seviyesi ve ısıtma suyunun gerektirdiği minimum çıkış sıcaklığı tarafından sınırlandırılır. Bu nedenle optimum tasarım, yalnızca maksimum COP arayışı değil, kaynak-yutak uyumu ve kullanılabilir ısı ihtiyacının birlikte sağlanmasıdır.



Çalışmanın teorik olması, basınç kayıpları ve çevreye ısı kayıplarının ihmal edilmesi, sonuçların deneysel prototip veya saha ölçümü ile doğrulanmasını gerekli kılmaktadır. Gelecek çalışmalarda plakalı ısı değiştirici yaklaşım sıcaklıkları, kısmi yük davranışı, yıllık işletme saati, elektrik-birim fiyatı, doğal gaz ikame kazancı ve CO₂ azaltım potansiyeli ekonomik analizle birlikte değerlendirilmelidir.

5. Kaynaklar (References)

- [1] ENVER, Isı pompası kılavuzu, <<https://enerjiverimliliği.enerji.gov.tr/template/dist/pdf/IPkilavuzu.pdf>>, (accessed 10 September 2025).
- [2] S. Erdoğan, M. Yılmaz, B. Şahin, Ö. Özyurt, Isı pompası sistemleri seçimi, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 92 (2006) 40-49.
- [3] Termodinamik Güneş-toprak kaynaklı ısı pompaları 1. Bölüm, <https://www.termodinamik.info/arastirma/gunes-toprak-kaynakli-isi-pompalari-1-bolum>>, (accessed 10 September 2025).
- [4] Y. A. Çengel, A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill Education, New York, 2015.
- [5] H. Arat, *Jeotermal Kaynaklı Isı Pompasının Bölgesel Isıtma Sisteminde Kullanımının Araştırılması Ve Termodinamik Analizi*, Master's Thesis, Dumlupınar University, Kütahya, Türkiye, 2016.
- [6] Ö. Saçkan, *Deniz Suyu Kaynaklı Isı Pompası Sisteminin Termodinamik Analizi: Bir Otel Uygulaması*, Master's Thesis, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, Türkiye, 2018.
- [7] S. Toksöz, S. Soyhan, Y. Topaçoğlu, İ. Taymaz, E. Büyükkaya, Toprak kaynaklı ısı pompasında ikinci yasa verimi, <www1.mmo.org.tr>, (accessed 12 August 2025)
- [8] C. Aktemur, S. G. Hacıpaşaoğlu, M. Akbıyık, Buhar sıkıştırılmalı soğutma sistemlerinde R123'e alternatif olarak düşük küresel ısınma potansiyel soğutucu akışkanların termodinamik analizi, 23rd International Congress of Heat Science and Technology, 8–10 September 2021, Gaziantep, Türkiye, pp. 523–538.
- [9] F. Afshari, Ö. Çomaklı, Ş. Karagöz, H. G. Zavaragh, A thermodynamic comparison between heat pump and refrigeration device using several refrigerants, *Energy and Buildings*, 168 (2018) 272–283, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.037>.
- [10] Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Delpech, B., Olabi, V., El Samad, T., & Sayma, A. (2024). High-temperature heat pumps: Fundamentals, modelling approaches and applications. *Energy*, 303, 131882. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131882>
- [11] Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018). High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy*, 152, 985-1010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>
- [12] Mateu-Royo, C., Arpagaus, C., Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., & Bertsch, S. S. (2021). Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study. *Energy Conversion and Management*, 229, 113752. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752>
- [13] Fukuda, S., Kondou, C., Takata, N., & Koyama, S. (2014). Low GWP refrigerants R1234ze(E) and R1234ze(Z) for high temperature heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 40, 161-173. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.10.014>
- [14] Kondou, C., & Koyama, S. (2015). Thermodynamic assessment of high-temperature heat pumps using low-GWP HFO refrigerants for heat recovery. *International Journal of Refrigeration*, 53, 126-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.018>
- [15] Hu, B., Li, Y., Cao, F., & Xing, Z. (2017). Exergy analysis of R1234ze(Z) as high temperature heat pump working fluid. *Frontiers in Energy*, 11, 493-502. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0510-6>
- [16] Arpagaus, C., & Bertsch, S. S. (2021). Experimental comparison of HCFO and HFO R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(Z), and HFC R245fa in a high temperature heat pump up to 150 °C. *Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference*, Jeju, Korea.



GİRESUN İLİ KOŞULLARINDA ŞEBEKEYE BAĞLI 100 KWP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TEKNİK PERFORMANS, EKONOMİK FİZİBİLİTE VE SERA GAZI EMİSYON ANALİZİ

*Emre ÇOLAK¹, Emre Aşkın ELİBOL²

¹Bağımsız Araştırmacı, Merkez, Giresun

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara

(Geliş/Received: 22.03.2026, Kabul/Accepted: 29.04.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Giresun ili koşullarında 100 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistemin teknik performansı, ekonomik fizibilitesi ve sera gazı azaltım potansiyeli PVsyst V7.4.7 yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Meteonorm 8.1 veri tabanına göre Giresun ilinin yıllık yatay küresel ışınım değeri 132,59 MWh/m² olup bu değer Türkiye'nin güney illerinin belirgin biçimde altında kalmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre sistem yıllık yaklaşık 134,31 MWh enerji üretmekte ve %90,28 performans oranı sergilemektedir. Bu değer, Türkiye genelindeki benzer çalışmaların üzerinde olup Karadeniz ikliminin termal avantajını açıkça yansıtmaktadır. P50-P90 analizi yıllık üretim aralığını 126,71-134,31 MWh olduğunu göstermiştir. Ekonomik analiz iki farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Şebekeye satış senaryosunda (2,59 TL/kWh) geri ödeme süresi 14,4 yıl, öz tüketim senaryosunda (5,54 TL/kWh) ise 6,2 yıldır. Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE), %20 iskonto oranı ve 30 yıllık sistem ömrü esas alınarak 8,85 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, mevcut tarife yapısında öz tüketim modelinin tek ekonomik seçenek olduğunu ortaya koymaktadır. IPCC Tier 1 metodolojisiyle gerçekleştirilen sera gazı analizi, sistemin yıllık 59,4-83,9 tCO₂ aralığında emisyon önlediğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik sistem, PVsyst, Performans oranı, LCOE, Sera gazı emisyonu.

TECHNICAL PERFORMANCE, ECONOMIC FEASIBILITY, AND GREENHOUSE GAS EMISSION ANALYSIS OF A 100 KWP GRID-CONNECTED PV SYSTEM: CASE OF GİRESUN, TURKIYE

ABSTRACT

This study examined the technical performance, economic viability, and greenhouse gas mitigation potential of a 100 kWp grid-connected solar system in Giresun province, situated in the Eastern Black Sea Region of Türkiye, utilizing PVsyst V7.4.7 software. The Meteonorm 8.1 database indicates that the annual horizontal global radiation value for Giresun province is 132.59 MWh/m², considerably lower than that of southern provinces in Türkiye. Simulation outcomes indicate that the system generates approximately 134.31 MWh of energy per annum and demonstrates a performance efficiency of 90.28%. This value surpasses that of comparable research throughout Türkiye and distinctly illustrates the thermal benefits of the Black Sea environment. The P50-P90 study indicated an annual production range of 126.71 to 134.31 MWh. An economic analysis was conducted for two distinct scenarios. In the grid-to-grid scenario (2.59 TL/kWh), the payback period is 14.4 years; conversely, in the self-consumption scenario (5.54 TL/kWh), it is 6.2 years. The Levelized Cost of Energy (LCOE) was determined to be 8.85 TL/kWh, utilizing a 20% discount rate and a 30-year system lifespan. The results indicate that the self-

consumption model is the sole cost-effective alternative under the existing tariff framework. Analysis of greenhouse gases conducted using the IPCC Tier 1 methodology indicates that the system mitigates emissions between 59.4 and 83.9 tCO₂ per year.

Keywords: Photovoltaic system, PVsyst, Performance ratio, LCOE, Greenhouse gas emissions.

Giriş (Introduction)

Küresel enerji talebinin hızla artması ve fosil yakıt kullanımına bağlı çevresel sorunların derinleşmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik politika dönüşümlerini kaçınılmaz kılmaktadır [1]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre 2023 yılında küresel yenilenebilir enerji kurulu gücü bir önceki yıla kıyasla %50 artarak 295 GW'a ulaşmış; bu büyümenin yaklaşık üçte ikisi güneş enerjisinden kaynaklanmıştır [2]. Fotovoltaik (FV) teknolojisindeki hızlı gelişim ve birim maliyetlerdeki düşüş, güneş enerjisini yalnızca güneş kuşağındaki ülkeler için değil, ılıman ve yarı bulutlu iklimlere sahip bölgeler için de ekonomik açıdan değerlendirilebilir bir seçenek haline getirmektedir [3].

Türkiye, yıllık ortalama 1.527 kWh/m² güneş ışınımı ve günlük ortalama 7,2 saatlik güneşlenme süresiyle önemli bir FV potansiyeline sahiptir [4]. Bu potansiyeli değerlendirmek amacıyla Türkiye, 2035 yılına kadar toplam güneş enerjisi kurulu gücünü 52,9 GW'a ulaştırmayı hedeflemektedir [5]. Nitekim 2024 yılı sonu itibarıyla Türkiye'de toplam güneş enerjisi kurulu gücü 19,6 GW düzeyine erişmiş olup sektör büyümesini sürdürmektedir [6]. Bununla birlikte, Türkiye genelinde gerçekleştirilen FV fizibilite çalışmalarının coğrafi dağılımı incelendiğinde, araştırmaların büyük ölçüde Güney Doğu, Akdeniz ve İç Anadolu Bölgeleri'ne yoğunlaştığı; yüksek nem, bulutluluk oranı ve görece düşük güneşlenme süresiyle karakterize edilen Karadeniz bölgesinin ise literatürde yeterince ele alınmadığı görülmektedir [7].

Karadeniz bölgesinin FV açısından göz ardı edilmesinin temel gerekçesi, bölgenin iklimsel dezavantajı olarak öne sürülen düşük güneş ışınımı değerleridir [8]. Ancak bu yaklaşım, bölgedeki gerçek ekonomik fizibiliteyi nicel olarak ortaya koyan kapsamlı çalışmaların yokluğuna dayandığından sorgulanmaya açıktır. Enerji Atlası verilerine göre Giresun ili yıllık yaklaşık 957 GWh elektrik tüketmekte olup bu tüketimin tamamını yerel yenilenebilir kaynaklardan karşılamak bölgesel enerji politikası açısından stratejik bir hedef niteliği taşımaktadır [9]. Giresun ilinin mevcut elektrik üretiminin, tüketim miktarının 2,66 katına ulaşması, hidroelektrik ağırlıklı bir üretim yapısına işaret etmekte; buna karşın güneş enerjisinden yararlanma potansiyelinin sistematik biçimde değerlendirilmediği görülmektedir [9].

Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmak amacıyla Giresun ili iklim koşulları altında 100 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı bir FV sistemin teknik performansını ve ekonomik fizibilite analizini sunmaktadır. Sistem simülasyonları PVsyst V7.4.7 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; Longi Solar LR5-72HH-550M G2 modülleri ile Huawei SUN2000-50KTL-ZHM3-400V invertörleri temel alınmıştır. Ekonomik değerlendirme kapsamında iki farklı kullanım senaryosu (şebekeye enerji satışı ve öz tüketim) karşılaştırmalı olarak incelenmiş; geri ödeme süresi (PBP) ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra; sistemin üretim kapasitesi ile il genelindeki elektrik tüketimi ilişkilendirilmiş, bu şekilde bölgesel ölçekte FV sistemlerinin yaygınlaşma ve enerji karşılama potansiyeli değerlendirilmiştir.

Çalışmanın özgün katkısı üç boyutludur. Birincisi, Karadeniz iklimi nedeniyle dezavantajlı olduğu öngörülen bir ilde FV sistem performansının ve ekonomik uygulanabilirliğinin nicel olarak belgelenmesidir. İkincisi, şebekeye satış ile öz tüketim senaryolarının karşılaştırmalı analiziyle bölgeye özgü optimum yatırım modelinin ortaya konmasıdır. Üçüncüsü ise çalışmanın, benzer iklimsel koşullara sahip Karadeniz illerinde yürütülecek FV fizibilite çalışmaları için tekrarlanabilir bir metodolojik çerçeve sunmasıdır. Bu sayede bölgede yatırım planlaması yapan karar vericilere, araştırmacılara ve politika yapıcılara kanıta dayalı bir bilimsel temel sunulmaktadır.

1. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Çalışma alanı: Giresun ilinin coğrafi ve iklimsel özellikleri (Field of study: Geographical and climatic characteristics of giresun province)

Bu çalışma, Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Giresun ili merkezi esas alınarak gerçekleştirilmiştir. İl merkezi 40,92° K enlemi ve 38,39° D boylamı üzerinde konumlanmakta olup rakımı 113 m'dir. Giresun, yüksek yıllık yağış miktarı, yüksek bağıl nem oranı ve görece sınırlı güneşlenme süresi ile karakterize edilen tipik Doğu Karadeniz iklim özelliklerine sahip bir yerleşim yeridir [10, 11]. Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre Giresun'un yıllık ortalama yağış miktarı, yaklaşık 1400 mm olup bu değer, Türkiye uzun yıllar ortalaması olan 643 mm'nin yaklaşık iki katıdır. Bu durum Doğu Karadeniz kıyı kuşağının yüksek yağışlı iklim karakterini açıkça ortaya koymaktadır [12].

Çalışmada kullanılan meteorolojik veriler Meteororm 8.1 veri tabanından elde edilmiş olup 2003–2013 yıllarını kapsayan tipik meteorolojik yıl (TMY) verilerine dayalı sentetik saatlik ışınım ve sıcaklık değerlerini içermektedir. Simülasyonda esas alınan yatay düzlemde yıllık küresel ışınım (GlobHor) değeri 1.325,9 kWh/m², yatay difüz ışınım (DiffHor) değeri ise 667,23 kWh/m² olarak belirlenmiştir.

Yıllık ortalama çevre sıcaklığı 16,85°C olup kolektör düzleminde yıllık küresel ışınım (GlobInc) değeri 1.486,3 kWh/m²'ye ulaşmaktadır. Bu değerler Türkiye'nin güney bölgelerinde rapor edilen yıllık küresel ışınım değerlerinin (yaklaşık 1700–1900 kWh/m²) altında olmakla birlikte, FV sistemlerin teknik ve ekonomik fizibilite analizlerinin gerçekleştirilmesi açısından yeterli düzeydedir [13, 14].

2.2. Sistem konfigürasyonu (System configuration)

Bu çalışmada şebekeye bağlı, lisanssız üretim kapsamında değerlendirilen 100 kWp kurulu güce sahip bir FV sistemi incelenmiştir. Sistem, sabit düzlem tipi montaj yapısı üzerine 30° eğim açısı ve 0° azimut açısıyla (güney yönelimli) kurgulanmıştır. Sistem bileşenlerine ilişkin teknik parametreler Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. Sistem teknik parametreleri (System technical parameters)

Parametre	Değer
PV Modül	Longi Solar LR5-72HH-550M G2
Modül Nominal Gücü (STC)	550 Wp
Modül Sayısı	182 adet
Toplam Nominal Güç (STC)	100 kWp
Dizi Konfigürasyonu	14 modül seri × 13 zincir
Panel Yüzeyi	470 m ²
İnvertör	Huawei SUN2000-50KTL-ZHM3-400V
İnvertör Sayısı	2 adet
Toplam İnvertör Gücü	100 kWac
DC/AC Güç Oranı	1,00
Çalışma Gerilimi	200-1000 V
İşletme Koşullarında (50°C) P _{mpp}	91,7 kWp

Sistemde, iki invertör paralel konfigürasyonda çalışmaktadır. Birinci invertöre 6 zincir, ikinci invertöre ise 7 zincir bağlanmış olup her zincir 14 modülden oluşmaktadır. FV sistem tasarımında paneller, literatürde Türkiye'nin orta enlemleri için önerilen optimum değerler dikkate alınarak 30° eğim açısı ve 0° azimut açısı (güney yönelimli) olacak şekilde konumlandırılmıştır [15, 16].

2.3. PVsyst simülasyon metodolojisi (PVsyst simulation methodology)

Sistem performansının tahmininde PVsyst V7.4.7 yazılımı kullanılmıştır. PVsyst, uluslararası alanda yaygın biçimde kabul görmüş, saatlik simülasyon temeline dayanan bir FV sistem analiz yazılımıdır

[17]. Yazılım, ışınım transpoze modeli olarak Perez modelini, difüz ışınım için Perez-Meteonorm yaklaşımını ve circumsolar bileşen için ise ayrı bir hesaplama yöntemi kullanmaktadır [18].

Simülasyon sürecinde dikkate alınan başlıca kayıp mekanizmaları şunlardır: ışınım seviyesine bağlı PV kaybı (%1,10), sıcaklık kaynaklı PV kaybı (%3,00), modül kalite kaybı (+%0,75), modül ve dizi uyumsuzluk kaybı (%2,05), omik kablolama kaybı (%0,92), invertör verimi kaybı (%1,99) ve gece tüketimi (%0,03). Üretim tahminindeki belirsizlik değerlendirmesi amacıyla P50-P90 analizi gerçekleştirilmiş; yıldan yıla değişkenlik %4,0, küresel değişkenlik (kuvadratik toplam) ise %4,4 olarak belirlenmiştir.

Çalışmada 3 boyutlu gölgeleme analizi gerçekleştirilmemiştir. Bu durum, simülasyon sonuçlarının iyimser yönde sapmasına yol açabilecek bir sınırlılık olarak kabul edilmekte ve bulgular yorumlanırken göz önünde bulundurulmalıdır.

2.4. Ekonomik Analiz Yöntemi (Economic analysis methodology)

Çalışmada üç temel ekonomik gösterge hesaplanmıştır: PBP (Denklem1) ve LCOE (Denklem 2).

$$PBP = \frac{CAPEX}{G_{yillik}} \quad (1)$$

Denklem1’de, CAPEX başlangıç yatırım maliyetini, G_{yillik} ise yıllık net geliri veya tasarrufu ifade etmektedir.

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

Denklem 2’de, n sistem ömrünü (30 yıl), r iskonto oranını (%20), $OPEX_t$ t yılındaki işletme ve bakım maliyetini, E_t ise yıllık degradasyon (%1) dikkate alınarak hesaplanan t yılındaki enerji üretimini ifade etmektedir.

Ekonomik analizde iki farklı senaryo karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Senaryo 1’de üretilen enerjinin tamamının EPDK lisanssız üretim tarifesi kapsamında şebekeye satıldığı varsayılmıştır. Senaryo 2’ de ise üretilen enerjinin tamamının öz tüketim amacıyla kullanıldığı ve elektrik faturasından tasarruf sağlandığı kabul edilmiştir.

2.5. Kullanılan ekonomik parametreler ve kaynakları (Economic parameters and sources used)

Ekonomik analizde kullanılan parametreler ve ilgili kaynaklar Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Ekonomik analiz parametreleri (Economic analysis parameters)

Parametre	Değer	Kaynak
CAPEX	100.000 USD	[19]
CAPEX (TL)	4.377.000 TL	[20]
OPEX (yıllık)	43.770 TL	[19]
Şebeke Satış Fiyatı	2,59 TL/kWh	[21]
Öz Tüketim Fiyatı	5,54 TL/kWh	[21]
İskonto Oranı	%20	[22]
Sistem Ömrü	30 yıl	Bu makale
Yıllık Degradasyon	%1	Bu makale
Yıllık Üretim	134.308 kWh	Bu makale

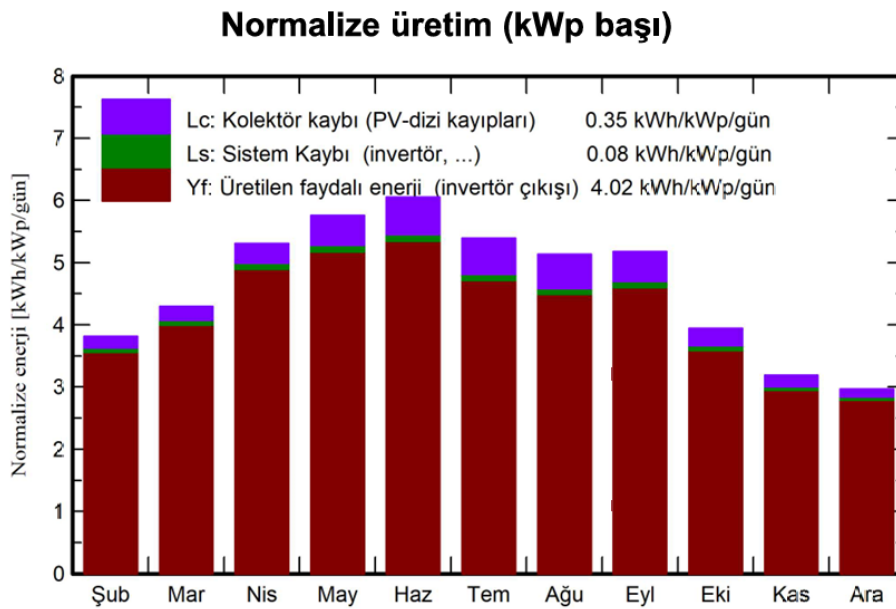
(Not: Türkiye’de 2024–2026 döneminde yüksek faiz ortamı hâkimdir ve politika faizi %45 seviyelerine kadar yükselmiştir [22]. Bu nedenle yatırım projelerinin ekonomik analizinde iskonto oranı %20 olarak kabul edilmiştir. Ekonomik analizde kullanılan döviz kuru, çalışmanın gerçekleştirildiği Şubat 2026 dönemi TCMB gösterge kuru olan 43,77 TL/USD esas alınmıştır [20]).

3. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

3.1. Yıllık enerji üretimi ve genel performans (Annual energy production and overall performance)

PVsyst V7.4.7 yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyon sonucunda sistemin şebekeye enjekte ettiği yıllık toplam enerji miktarı 134.308 kWh olarak hesaplanmıştır. 100 kWp kurulu güç için normalize edilmiş yıllık üretim değeri 1.342 kWh/kWp olup sistem performans oranı (PR) %90,28 düzeyinde gerçekleşmiştir. Bu PR değeri, uluslararası literatürlerde iyi bir performans göstergesi olarak kabul edilen %75-85 aralığının üzerinde olup sistemin verimli biçimde tasarlandığına işaret etmektedir [23, 24].

Aylık bazda normalize edilmiş enerji üretimi Şekil 1’de sunulmaktadır. Grafikte her aya ait kolektör kayıpları (L_c), sistem kayıpları (L_s) ve invertör çıkışındaki faydalı enerji (Y_f) ayrı ayrı gösterilmektedir.

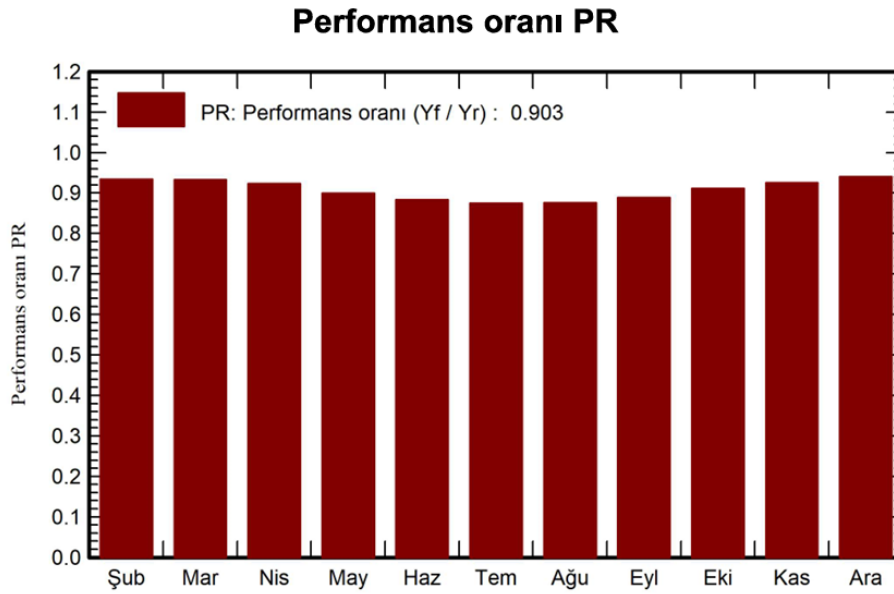


Şekil 1. Aylık normalize üretim dağılımı (kWh/kWp/gün) (Normalizing monthly production status (kWh/kWp/day))

Şekil 1 incelendiğinde en yüksek günlük üretimin Mart–Nisan döneminde gerçekleştiği, yaz aylarında ise artan çevre ve hücre sıcaklıklarına bağlı olarak ortaya çıkan termal kayıplar nedeniyle beklenenin altında bir üretim profili olduğu görülmektedir. FV modüllerin çalışma sıcaklığındaki artış, hücre veriminde ve çıkış gücünde azalmaya neden olmakta olup bu durum özellikle yüksek sıcaklık koşullarında enerji üretimini sınırlayan önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. Bu bulgu, Karadeniz Bölgesi’nin ılıman iklim karakteri ile uyumlu olup yüksek sıcaklık değerlerinin görüldüğü güney bölgelerinden farklı bir üretim davranışına işaret etmektedir [25, 26].

3.2. Performans oranı (PR) analizi (Performance ratio (PR) analysis)

Sistemin aylık PR değerleri Şekil 2’de verilmektedir. Yıllık ortalama PR değeri 0,903 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Aylık PR dağılımı (Monthly PR distribution)

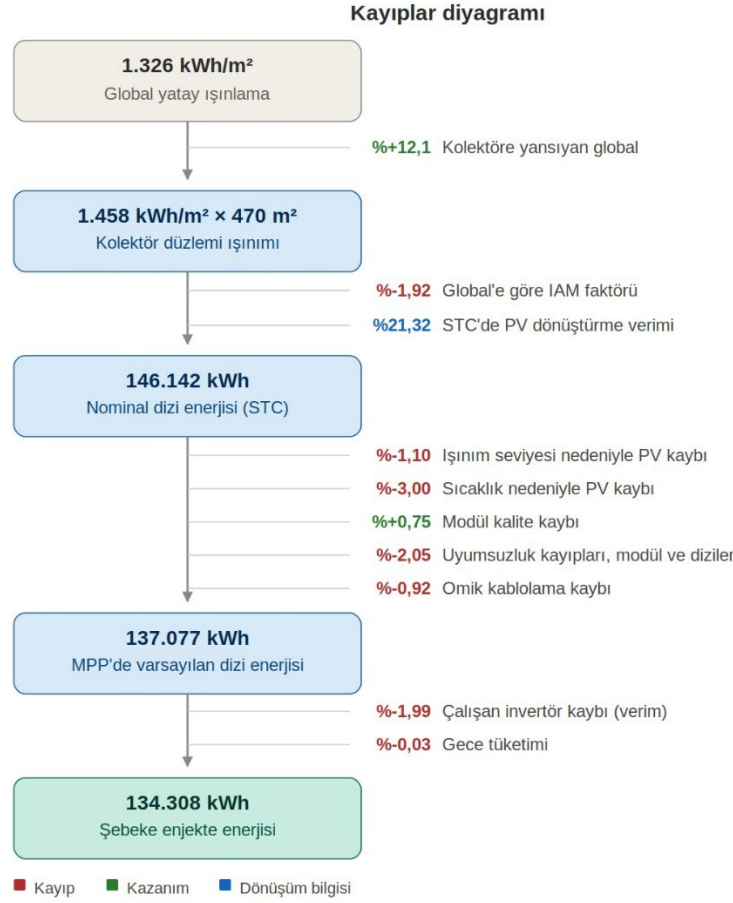
Aylık enerji bilanço değerleri Tablo 3'te sunulmaktadır. Simülasyon Şubat 2026 koşulları esas alınarak yürütülmüş olup aylık dağılım bu dönemden itibaren raporlanmıştır. PR değerinin en yüksek Aralık (0,940) ve Şubat (0,934) aylarında, en düşük ise Temmuz (0,875) ve Ağustos (0,876) aylarında gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, yaz aylarında yükselen çevre sıcaklığının modül verimliliğini olumsuz etkilemesiyle açıklanmaktadır. PVsyst raporunda işletme koşullarında (50°C) modül gücünün STC değerinin (100 kWp) yaklaşık %8,3 altına düştüğü (91,7 kWp) görülmektedir.

Tablo 3. Aylık enerji bilanço sonuçları (Monthly energy balance results)

Ay	GlobHor (kWh/m ²)	GlobInc (kWh/m ²)	EArray (kWh)	E_Grid (kWh)	PR
Şubat	32,0	42,0	4002	3924	0,934
Mart	110,6	133,1	12.671	12.425	0,933
Nisan	147,4	159,3	15.007	14.711	0,923
Mayıs	179,9	178,5	16.412	16.078	0,900
Haziran	189,4	181,6	16.400	16.059	0,884
Temmuz	172,2	167,2	14.948	14.634	0,875
Ağustos	152,9	159,1	14.246	13.953	0,876
Eylül	131,8	155,4	14.120	13.829	0,889
Ekim	92,8	122,3	11.382	11.155	0,911
Kasım	62,6	95,8	9.051	8871	0,925
Aralık	54,2	92,1	8.839	8669	0,940
Yıllık	1325,9	1486,3	137.077	134.308	0,903

3.3. Kayıp diyagramı analizi (Missing diagram analysis)

Sistemdeki enerji kayıplarının dağılımı Şekil 3'te sunulan kayıplar diyagramında detaylı biçimde gösterilmektedir.

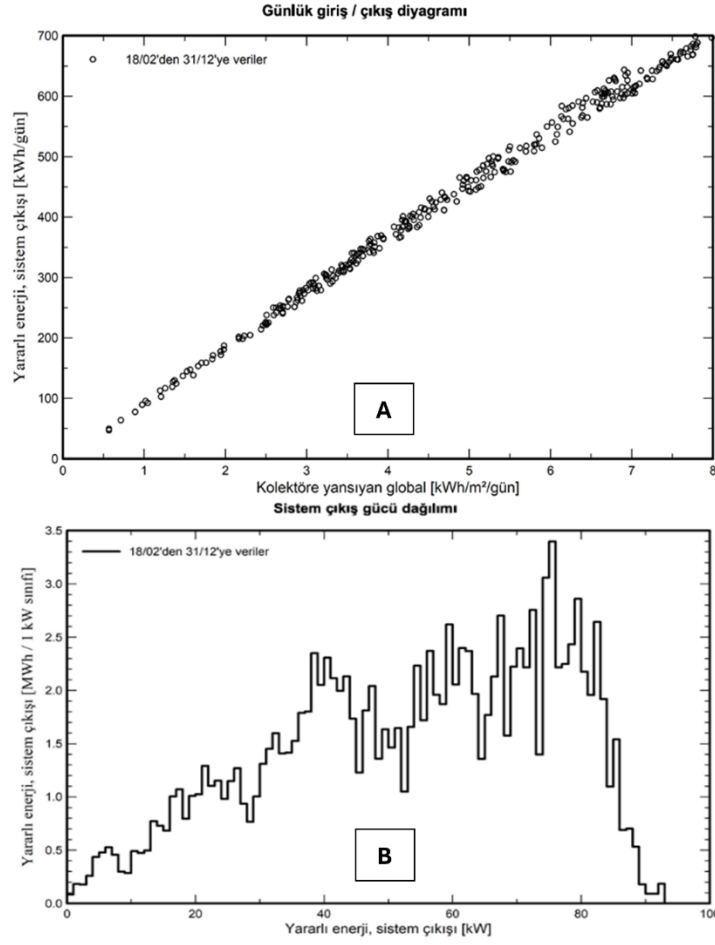


Şekil 3. Sistem enerji kayıpları (KWh cinsinden) diyagramı (Diagram showing system energy losses (in kWh))

Diyagram incelendiğinde toplam kayıp mekanizmaları içinde en büyük payın sıcaklık kaynaklı FV kaybına (%3,00) ait olduğu görülmektedir. Bunu modül ve dizi uyumsuzluk kaybı (%2,05) ve invertör verim kaybı (%1,99) izlemektedir. Yatay global ışınlımdan (1326 kWh/m²) başlayarak kolektör düzlemine yansıyan ışınlımın %12,1 artış gösterdiği, ardından IAM faktörü nedeniyle %1,92 kayıp yaşandığı görülmektedir. Tüm kayıplar düşüldükten sonra şebekeye enjekte edilen enerji 134.308 kWh olarak gerçekleşmiştir. Dikkat çekici bir bulgu olarak modül kalite kaybının pozitif yönde (+%0,75) katkı sağladığı görülmektedir; bu durum kullanılan modüllerin nominal değerinin üzerinde performans sergilediğine işaret etmektedir.

3.4. Sistem çıkış karakteristikleri (System output characteristics)

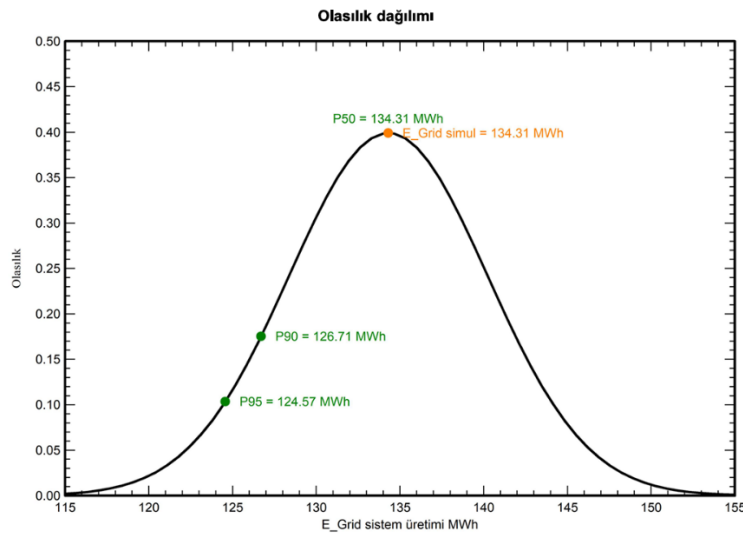
Günlük giriş-çıkış ilişkisi Şekil 4A'da saçılım grafiği formatında sunulmaktadır. Şekil 4A'da kolektöre yansıyan günlük global ışınlım ile sistemin günlük enerji çıkışı arasında yüksek doğrusallık gözlemlenmektedir. Bu durum sistemin geniş bir ışınlım aralığında (0-8 kWh/m²/gün) tutarlı biçimde çalıştığını doğrulamakta; invertör kayıpları veya aşırı yük durumlarının oluşmadığına işaret etmektedir. Sistem çıkış gücünün dağılımı Şekil 4B'de histogram formatında sunulmaktadır. Histogram incelendiğinde sistemin büyük bölümünün 40–90 kW aralığında çalıştığı görülmektedir. Bu dağılım, invertörün nominal çıkış gücü olan 100 kWAC kapasitesinin etkin biçimde kullanıldığını ve sistemde meydana gelebilecek inverter güç kırpmaya kayıplarının sınırlı düzeyde kaldığını göstermektedir. FV inverter kapasitesinin aşılması durumunda oluşan kesme kayıpları, FV dizisinin ürettiği DC gücün invertör tarafından AC güce dönüştürülemeyen kısmını ifade etmekte olup uygun inverter boyutlandırması bu kayıpların minimize edilmesinde kritik bir tasarım parametresidir [27, 28].



Şekil 4. Günlük giriş/çıkış diyagramı (A), sistem çıkış gücü dağılımı (B) (Daily input/output diagram (A), system output power distribution (B))

3.5. P50-P90 belirsizlik analizi (P50-P90 Uncertainty analysis)

Üretim tahminindeki istatistiksel belirsizlik değerlendirmesi Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5. Yıllık üretim olasılık dağılımı (MWh cinsinden) (P50-P90) (Annual production probability distribution (in MWh) (P50-P90))

Simülasyon ve parametre belirsizlikleri (FV modül model belirsizliği %1,0, invertör verimliliği belirsizliği %0,5, kirlenme ve uyumsuzluk %1,0, degradasyon belirsizliği %1,0) ile hava durumu değişkenliği (%4,0) bir arada değerlendirildiğinde yıllık üretim olasılık değerleri Tablo 4'te sunulan şekildeki gibi elde edilmiştir.

Tablo 4. P50-P90 yıllık üretim tahminleri (P50-P90 annual production estimates)

Olasılık Düzeyi	Yıllık Üretim
P50 (beklenen)	134,31 MWh
P90	126,71 MWh
P95	124,57 MWh

P90 değerinin P50'ye oranı yaklaşık %94,3 olup bu değer sistemin görece düşük belirsizlik profiline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Finans kurumları genellikle proje finansmanında P90 değerini esas almaktadır; bu çerçevede sistemin garantilenmiş üretim tabanı 126,71 MWh/yıl olarak kabul edilebilir [29, 30].

4. Ekonomik Analiz (Economic Analysis)

4.1. Ekonomik analiz varsayımları (Assumptions of economic analysis)

Ekonomik analizde kullanılan tüm parametreler Bölüm 2.5'te sunulan Tablo 2'de detaylı biçimde verilmiştir. Analizin temel varsayımları şu şekilde özetlenebilir: sistem ömrü boyunca yıllık %1 oranında performans düşüşü (degradasyon) yaşanmakta, işletme ve bakım maliyetleri sabit kabul edilmekte, elektrik fiyatlarının analiz dönemi boyunca sabit kaldığı varsayılmaktadır. Elektrik fiyatlarının sabit tutulması, gerçek koşullarda muhtemel fiyat artışlarını göz ardı ettiğinden sonuçları muhafazakâr yönde etkilemektedir. Bu yaklaşım, analizin iyimser senaryolara değil gerçekçi alt sınır değerlerine dayanmasını sağlamaktadır.

4.2. Senaryo 1 (şebekeye enerji satışı) (Scenario 1 (selling energy to the grid))

Bu senaryoda üretilen enerjinin tamamının EPDK lisanssız üretim tarifesi kapsamında şebekeye satıldığı varsayılmaktadır. Şubat 2026 itibarıyla geçerli olan birim satış fiyatı 2,59 TL/kWh olarak esas alınmıştır [21].

Yıllık gelir:

$$G_1 = 134.308 \times 2,59 = 347.858 \text{ TL/yıl}$$

Basit geri ödeme süresi:

$$PBP_1 = \frac{4.377.000}{347.858 - 43.770} = \frac{4.377.000}{304.088} \approx 14,4 \text{ yıl}$$

Bu sonuç, şebekeye satış modelinin Giresun ili koşullarında ekonomik açıdan sınırdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır. 30 yıllık sistem ömrünün yaklaşık yarısının geri ödemeye ayrılması, bu modelin yatırımcılar açısından cazip olmadığına işaret etmektedir.

4.3. Senaryo 2 (öz tüketim) (Scenario 2 (self-consumption))

Bu senaryoda üretilen enerjinin tamamının tesis bünyesinde tüketildiği ve şebekeden çekilecek elektriğin ikame edildiği varsayılmaktadır. Şubat 2026 itibarıyla ticarethane tarifesi kapsamındaki elektrik alış fiyatı 5,54 TL/kWh olarak esas alınmıştır [21].

Yıllık tasarruf:

$$G_2 = 134.308 \times 5,54 = 744.066 \text{ TL/yıl}$$

Basit geri ödeme süresi:

$$PBP_2 = \frac{4.377.000}{744.066 - 43.770} = \frac{4.377.000}{700.296} \approx 6,2 \text{ yıl}$$

Öz tüketim senaryosunda sistemin geri ödeme süresi yaklaşık 6,2 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Türkiye’de gerçekleştirilen FV sistem fizibilite çalışmalarında rapor edilen yaklaşık 5–8 yıllık geri ödeme süresi aralığı ile uyum göstermektedir ve söz konusu modelin ekonomik açıdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır [31, 32].

4.4. Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) analizi (Levelized cost of energy (LCOE) analysis)

LCOE, farklı enerji teknolojilerinin ekonomik karşılaştırılmasında yaygın biçimde kullanılan bir göstergedir [33]. Bu çalışmada LCOE hesabında %20 iskonto oranı, %1 yıllık degradasyon ve 30 yıllık sistem ömrü esas alınmıştır.

İskonto edilmiş toplam enerji üretimi:

$$E_{\text{toplam}} = \sum_{t=1}^{30} \frac{134.308 \times (1 - 0,01)^{t-1}}{(1 + 0,20)^t} \approx 519.000 \text{ kWh}$$

İskonto edilmiş toplam maliyet:

$$C_{\text{toplam}} = 4.377.000 + \sum_{t=1}^{30} \frac{43.770}{(1 + 0,20)^t} \approx 4.377.000 + 218.000 \approx 4.595.000 \text{ TL}$$

$$LCOE = \frac{4.595.000}{519.000} \approx 8,85 \text{ TL/kWh}$$

4.5. İki senaryonun karşılaştırması ve değerlendirme (Comparison and evaluation of the two scenarios)

İki senaryoya ait ekonomik göstergeler Tablo 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 5. Senaryo karşılaştırması (Scenario comparison)

Gösterge	Senaryo 1 (Şebeke Satışı)	Senaryo 2 (Öz Tüketim)
Birim Fiyat (TL/kWh)	2,59	5,54
Yıllık Gelir/Tasarruf (TL)	347.858	744.066
Net Yıllık Nakit Akışı (TL)	304.088	700.296
PBP (yıl)	14,4	6,2
LCOE (TL/kWh)	8,85	8,85
Ekonomik Uygulanabilirlik	Sınırdadır	Uygulanabilir

Tablo 5 incelendiğinde iki senaryo arasındaki temel farkın kullanım modeline bağlı olduğu açıkça görülmektedir. LCOE değeri her iki senaryo için aynı olmakla birlikte zira üretim miktarı ve sistem maliyeti değişmemektedir şebekeye satış fiyatının (2,59 TL/kWh) LCOE değerinin (8,85 TL/kWh) belirgin biçimde altında kalması, Senaryo 1'in mevcut tarife koşullarında ekonomik sürdürülebilirlikten uzak olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın öz tüketim senaryosunda tasarruf edilen elektrik maliyeti (5,54 TL/kWh) da LCOE değerinin altında kalmakta; ancak düşük CAPEX maliyeti ve yüksek tasarruf hacmi nedeniyle geri ödeme süresi kabul edilebilir düzeyde gerçekleşmektedir.

4.6. Bölgesel enerji karşılama potansiyeli (Regional energy meeting potential)

Enerji Atlası verilerine göre Giresun ili yıllık yaklaşık 957 GWh elektrik tüketmektedir [9]. Çalışmada incelenen 100 kWp sistemin yıllık üretimi olan 134.308 kWh, il geneli tüketiminin yalnızca %0,014'üne karşılık gelmektedir. Bu oran, tek bir sistemin bölgesel enerji dengesine doğrudan etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, Giresun ilinin mevcut çatı alanı potansiyeli değerlendirildiğinde farklı bir tablo ortaya çıkmaktadır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre kentsel çatı alanlarının FV kurulum için uygun bölümünde sistem yoğunluğu 100 kWp/1.000 m² olarak kabul edildiğinde, il genelinde yaygınlaştırılacak çatı üstü GES uygulamalarının bölgesel tüketimin kayda değer bir bölümünü karşılama potansiyeline sahip olduğu değerlendirilebilir. Bu bulgu, Karadeniz bölgesinde FV yaygınlaşmasını teşvik edecek politika araçlarının geliştirilmesinin önemine dikkat çekmektedir.

5. Sera gazı emisyon analizi (Greenhouse gas emission analysis)

Bu çalışmada sera gazı emisyon analizi, Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) Tier 1 metodolojisi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Tier 1, ulusal düzeyde yayımlanan ortalama emisyon faktörlerinin faaliyet verisiyle çarpılmasına dayanan basitleştirilmiş ancak uluslararası alanda kabul görmüş bir yaklaşımdır [34]. Bu yöntemde tesis düzeyinde ölçüm gerekmemekte, hesaplamalar ulusal şebeke emisyon faktörleri esas alınarak yapılmaktadır.

Çalışmada iki farklı emisyon faktörü kullanılmıştır. Birincisi, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı (EVÇED) tarafından yayımlanan 2023 yılı Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi birleşik marj emisyon faktörü olan 0,6242 tCO₂/MWh (= 624,2 gCO₂/kWh) değeridir. Bu faktör, FV sistemin şebekeye enjekte ettiği her kWh'in önlediği emisyon miktarının hesaplanmasında kullanılmıştır [35]. İkincisi ise tüketim noktası emisyon faktörü olan 442 gCO₂e/kWh değeridir; bu faktör öz tüketim senaryosunda şebekeden ikame edilen elektriğin karbon değerinin hesaplanmasında esas alınmıştır [36].

5.1. Yıllık önlenen emisyon hesabı (Annual prevented emissions calculation)

Senaryo 1: Şebekeye Satış (Birleşik Marj Faktörü):

$$E_{\text{önlenen},1} = 134.308 \text{ kWh} \times 0,6242 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$E_{\text{önlenen},1} \approx 83,9 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

Senaryo 2: Öz Tüketim (Tüketim Noktası Faktörü):

$$E_{\text{önlenen},2} = 134.308 \text{ kWh} \times 0,442 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$$

$$E_{\text{önlenen},2} \approx 59,4 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$$

5.2 Sistem ömrü boyunca kümülatif emisyon tasarrufu (Cumulative emission savings over the system lifecycle)

30 yıllık sistem ömrü ve %1 yıllık degradasyon dikkate alındığında kümülatif önlenen emisyon miktarları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır ve sonuçlar Tablo 6'da özetlenmektedir.

$$E_{\text{kümülatif}} = \sum_{t=1}^{30} E_{\text{önlenen}} \times (1 - 0,01)^{t-1}$$

Senaryo 1:

$$E_{\text{kümülatif},1} = 83.854 \times \frac{1 - (0,99)^{30}}{1 - 0,99} \approx 2.164 \text{ tCO}_2$$

Senaryo 2:

$$E_{\text{kümülatif},2} \approx 59.364 \times 25,81 \approx 1.532 \text{ tCO}_2$$

Tablo 6. Sera gazı emisyon analizi özeti (Summary of greenhouse gas emission analysis)

Gösterge	Senaryo 1	Senaryo 2
Kullanılan Emisyon Faktörü	624,2 gCO ₂ /kWh	442 gCO ₂ /kWh
Yıllık Önlenebilir Emisyon	83,9 tCO ₂	59,4 tCO ₂
30 Yıllık Kümülatif Tasarruf	~2.164 tCO ₂	~1.532 tCO ₂
Eşdeğer Araç (15.000 km/yıl)*	~37 araç/yıl	~26 araç/yıl

(Not: *Binek araç ortalama CO₂ emisyonu: ~ 2,27 tCO₂/yıl [34].)

Gerçekleştirilen Tier 1 emisyon analizi, Giresun ili koşullarında 100 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı FV sistemin yıllık 59,4-83,9 tCO₂ aralığında sera gazı emisyonunu önlediğini ortaya koymaktadır. Bu değer, kullanım modeline (şebekeye satış veya öz tüketim) ve uygulanan emisyon faktörüne bağlı olarak farklılaşmakta; ancak her iki senaryoda da çevresel faydanın anlamlı düzeyde olduğu görülmektedir.

Şebekeye satış senaryosunda ETKB-EVÇED tarafından güneş ve rüzgâr enerjisi santralleri için yayımlanan 2023 yılı birleşik marj emisyon faktörü (0,6242 tCO₂/MWh) esas alınmıştır [35]. Bu faktör, yenilenebilir enerji üretiminin elektrik sisteminde marjinal üretim birimlerini ikame ederek oluşan emisyon azaltımını temsil eden bir göstergedir ve genellikle şebekede çalışmakta olan fosil yakıtlı santrallerin emisyon yoğunluğu üzerinden hesaplanır [37]. Bu nedenle marjinal veya birleşik şebeke emisyon faktörleri, yenilenebilir enerji projelerinin sera gazı azaltım potansiyelinin belirlenmesinde ve karbon azaltım politikalarının değerlendirilmesinde yaygın biçimde kullanılan bir yöntemdir [38, 39]

Sistem ömrü boyunca kümülatif emisyon tasarrufu değerlendirildiğinde, %1 yıllık bozulma varsayımı altında şebekeye satış senaryosunda yaklaşık 2164 tCO₂, öz tüketim senaryosunda ise yaklaşık 1532 tCO₂ önlenebileceği hesaplanmaktadır. Bu değerleri somutlaştırmak amacıyla binek araç eşdeğeri karşılaştırması yapıldığında, IPCC [34] binek araç ortalama emisyon katsayısına (2,27 tCO₂/yıl, 15.000 km/yıl) göre sistemin yıllık bazda 26-37 otomobilin atmosfere saldıgı CO₂ miktarını önlediği hesaplanmaktadır.

Söz konusu bulgular, Giresun ilinin iklimsel koşullarının yarattığı görece düşük enerji üretim kapasitesine karşın FV sistemin çevresel katkısının göz ardı edilemeyeceğini ortaya koymaktadır. Türkiye'nin güney illerinde benzer ölçekteki sistemlerin yıllık 160.000-190.000 kWh üretim gerçekleştirebildiği dikkate alındığında, Giresun ilinin sistemin 134.308 kWh'lik üretim değeriyle bu potansiyelin yaklaşık %75-84'üne ulaşabildiği görülmektedir. Dolayısıyla Karadeniz bölgesindeki iklimsel dezavantaj, çevresel performans açısından tam bir engel teşkil etmemekte; üretim kaybı oranıyla orantılı, kabul edilebilir bir azalmayla sınırlı kalmaktadır.

Son olarak, emisyon azaltım değerlerinin yorumlanmasında bazı sınırlılıkların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tier 1 metodolojisi gereği tesis düzeyinde ölçüm yerine ulusal ortalama faktörler kullanılmış; bu durum bölgesel şebeke bileşimindeki farklılıkları yansıtmamaktadır. Bunun yanı sıra çalışmada modülün üretim sürecindeki gömülü karbon ve sistem ömrü sonundaki atık yönetiminden kaynaklanan emisyonlar kapsam dışı tutulmuştur. Kapsamlı bir yaşam döngüsü analizi (LCA), bu bileşenlerin de hesaba katılmasıyla daha bütüncül bir çevresel değerlendirme imkânı sunacaktır. Söz konusu analiz, gelecek çalışmalar için öncelikli bir araştırma alanı olarak önerilmektedir.

6. Tartışma (Discussion)

Bu çalışmada elde edilen simülasyon bulguları, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerinde gerçekleştirilen benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde Giresun'un özgün konumu daha net biçimde ortaya çıkmaktadır.

Konya ilinde gerçekleştirilen agrivoltaik potansiyel çalışmasında yıllık yatay küresel ışınım değeri 1.764 kWh/m² olarak raporlanmıştır [40]. Bu değer, mevcut çalışmada elde edilen Giresun ışınım değerinin (1.325,9 kWh/m²) yaklaşık %33 üzerindedir. Benzer şekilde, Konya ilinin Altınekin ilçesinde kurulan 203 kWp'lik şebeke bağlantılı sistemin yıllık 351.350 kWh enerji ürettiği ve bu değer PVsyst simülasyon sonuçlarıyla yalnızca %5 sapma gösterdiği bildirilmiştir [41]. Söz konusu sistem kWp başına yaklaşık 1.730 kWh üretim gerçekleştirmiş olup bu değer mevcut çalışmada elde edilen 1.342

kWh/kWp değerinin yaklaşık %29 üzerindedir. Bu karşılaştırma, Giresun ilindeki düşük ışınım değerlerinin sistem çıktısını doğrudan ve öngörülebilir biçimde sınırladığını nicel olarak ortaya koymaktadır.

PR açısından değerlendirildiğinde, mevcut çalışmada elde edilen %90,28 değeri uluslararası literatürde raporlanan değerlerin belirgin biçimde üzerindedir. Doğu Anadolu Bölgesi için yapılan bir çalışmada arazi sistemi için ise %81,15 oranında PR değeri elde edildiği bildirilmiştir [4]. Giresun ili sisteminin yüksek PR değeri, Karadeniz bölgesinin ılıman iklim koşullarına özellikle yaz aylarında güney illerine kıyasla görece düşük çevre sıcaklıklarına bağlanabilir. Bu bulgu, düşük ışınım değerlerine sahip olmakla birlikte termal açıdan avantajlı bir konumda bulunan Giresun ilinin, sistem verimliliği açısından beklenenden daha olumlu bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Simülasyon sonuçları incelendiğinde performans oranının yaz aylarında belirgin biçimde düştüğü görülmektedir. Temmuz'da 0,875 ve Ağustos'ta 0,876 olarak hesaplanan PR değerleri, yıllık ortalama değer olan 0,903'ün yaklaşık %3 altında kalmaktadır. FV sistemlerde yaz döneminde gözlenen bu tür PR düşüşlerinin temel nedeni modül sıcaklığındaki artışa bağlı verim kayıplarıdır; artan hücre sıcaklığı FV modüllerinin elektriksel verimini düşürerek performans oranında azalmaya yol açmaktadır [42]. Bu durum PVsyst kayıplar diyagramında sıcaklık kaynaklı FV kaybı olarak raporlanan %3,00'lük değer ile tutarlıdır. Benzer şekilde saha verilerine dayalı çalışmalar da yüksek modül sıcaklıklarının yaz aylarında performans oranını düşürdüğünü ve sistem kayıpları içinde sıcaklık kaynaklı kayıpların önemli bir paya sahip olduğunu göstermektedir [43].

Silikon bazlı FV modüllerin sıcaklık katsayısı genellikle $-0,3$ ile $-0,5$ $\%/^{\circ}\text{C}$ aralığında rapor edilmekte olup, modül sıcaklığının standart test koşullarında tanımlanan referans sıcaklık olan 25°C 'nin üzerine çıkması durumunda çıkış gücünde yaklaşık doğrusal bir azalma meydana gelmektedir [44, 45]. Kristal silikon modüller için maksimum güç sıcaklık katsayısının yaklaşık $-0,45$ $\%/^{\circ}\text{C}$ civarında olduğu ve sıcaklık artışının hücre içindeki taşıyıcı yeniden birleşme oranını artırarak elektriksel verimi düşürdüğü çeşitli deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [46, 47]. PVsyst raporunda işletme koşullarında (50°C) modülün nominal gücünün 100 kWp'ten $91,7$ kWp'e gerilediği görülmektedir; bu durum yalnızca termal etkinin %8,3'lük bir güç kaybına neden olduğuna işaret etmektedir.

Bununla birlikte, Giresun ilinin ortalama çevre sıcaklığının (yıllık ortalama $16,85^{\circ}\text{C}$) Konya (yaklaşık $11,5^{\circ}\text{C}$ yıllık ortalama) veya Antalya (yaklaşık $18,5^{\circ}\text{C}$) gibi illerle karşılaştırıldığında orta düzeyde kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla yaz aylarındaki PR düşüşünün, ışınım miktarındaki artışın doğal bir eşliği olduğu ve sistematik bir tasarım sorununa işaret etmediği değerlendirilmektedir. Nitekim termal kayıpların en yoğun yaşandığı temmuz ayında sistem, yıllık en yüksek aylık üretim değerlerine yakın bir performans sergilemiştir (14.634 kWh). Bu durum, termal kaybın artmasına karşın artan ışınımın toplam etkiyi dengeleyebildiğini göstermektedir [42, 48].

Bu çalışmada PVsyst simülasyonu 3B gölgeleme analizi yapılmadan gerçekleştirilmiş; yakın gölgeleme etkisi gölgelemesiz olarak tanımlanmıştır. Bu durum çalışmanın en önemli metodolojik sınırlılığını oluşturmaktadır.

Giresun ili coğrafi açıdan engebeli bir topografyaya sahip olup il merkezinde yoğun kentsel yapılaşma bulunmaktadır. Dağlık arazi yapısı ve yüksek bitki örtüsü yoğunluğu, gerçek saha koşullarında uzak gölgeleme etkisinin FV sistem performansı üzerinde önemli bir kayıp kaynağı oluşturabileceğine işaret etmektedir. FV sistemlerde çevresel engellerden kaynaklanan gölgeleme etkileri, modüller üzerinde düzensiz ışınım dağılımına yol açarak enerji üretiminde önemli kayıplara neden olabilmektedir [49].

Literatürde kentsel alanlarda binalar, ağaçlar veya topografik engellerden kaynaklanan gölgeleme etkisinin sistem tasarımına ve konuma bağlı olarak yıllık enerji üretiminde yaklaşık %5–15 arasında kayba yol açabildiği rapor edilmektedir [50, 51]. Örneğin, kentsel çevrede gerçekleştirilen gölge analizleri, çevredeki yapı ve engellerden kaynaklanan gölgelemenin FV sistemlerin yıllık enerji veriminde yaklaşık %7–11 düzeyinde azalmaya neden olabildiğini göstermektedir [50]. Bu çerçevede mevcut çalışmada elde edilen 134.308 kWh'lik üretim tahmini, gölgeleme etkisi göz ardı edildiğinden gerçek saha performansının üzerinde kalabilir. Söz konusu sınırlılığın pratik yansımaları, geri ödeme sürelerinin fiili koşullarda hesaplanan değerlerden daha uzun olabileceğidir; özellikle Senaryo 1 için raporlanan $14,4$ yıllık değer bu bağlamda temkinli bir alt sınır olarak değerlendirilmesi önerilmektedir. Gelecek çalışmalarda ufuk profili ve 3B sahne modellenmesini içeren kapsamlı gölgeleme analizinin

gerçekleştirilmesi, sonuçların gerçekçiliğini artıracaktır. Bu sınırlılığın ekonomik yansıması göz ardı edilmemelidir. Kentsel alanlarda gölgeleme etkisinin yıllık enerji üretiminde yaklaşık %5–15 oranında kayba yol açabildiği dikkate alındığında [50, 51], mevcut çalışmada hesaplanan geri ödeme sürelerinin fiili koşullarda daha uzun gerçekleşebileceği öngörülmektedir. Özellikle Senaryo 1 için raporlanan 14,4 yıllık geri ödeme süresinin, gölgeleme etkisi hesaba katıldığında 15–17 yıl aralığına uzayabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle söz konusu değerler gerçek saha performansı için bir alt sınır tahmini olarak yorumlanması önerilmektedir.

PVsyst simülasyonunda kullanılan meteoroloji verisi, Meteonorm 8.1 veri tabanından elde edilen sentetik saatlik serilerden oluşmakta olup 2003-2013 yıllarını kapsayan ölçüm dönemini temel almaktadır. Bu yaklaşım, gerçek ölçüm istasyonu verisinin mevcut olmadığı koşullarda yaygın biçimde başvurulan bir yöntem olmakla birlikte bazı önemli kısıtları beraberinde getirmektedir:

- Birincisi, sentetik veri üretiminde kullanılan interpolasyon ve istatistiksel oluşturma süreçleri, yerel iklim değişkenliğini tam olarak yansıtmayabilmektedir. Meteonorm üreticileri, aylık ışınım değerlerinin interpolasyonunda karesel ortalama hata değerinin %7 düzeyinde olduğunu bildirmektedir.
- İkincisi, 2003-2013 döneminin referans alınması, iklim değişikliğinin son yıllarda Karadeniz Bölgesi'nin güneşlenme örüntüleri üzerinde oluşturduğu olası etkileri kapsam dışında bırakmaktadır.
- Üçüncüsü, P50-P90 analizinde yıldan yıla değişkenlik %4,0 olarak raporlanmış olup bu değer sentetik veri kaynaklı belirsizliği de içeren toplam sistem belirsizliğinin (%4,4) büyük bölümünü oluşturmaktadır. Giresun ili için Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) gözlem istasyonlarından elde edilecek uzun dönemli gerçek ölçüm verisinin kullanılması, simülasyon güvenilirliğini artıracak ve bu sınırlılığı önemli ölçüde giderecektir. Bu husus, çalışmanın gelecek araştırmalara yönelik temel önerilerinden birini oluşturmaktadır.

7. Politika Önerileri (Policy Recommendations)

Çalışmanın bulguları, Karadeniz Bölgesi'nde FV yaygınlaşmasını desteklemek amacıyla çeşitli politika önerilerini gündeme taşımaktadır.

Bölgesel tarife farklılaştırması: Mevcut şebekeye satış fiyatının (2,59 TL/kWh), LCOE değerinin (8,85 TL/kWh) çok altında kalması, düşük güneş potansiyeline sahip bölgelerde şebekeye satış modelini ekonomik olarak işlevsiz kılmaktadır. EPDK'nın bölgesel ışınım koşullarını dikkate alan farklılaştırılmış tarife yapıları oluşturması, bu bölgelerde yatırımcı cazibesini artıracak ve ulusal yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmayı kolaylaştıracaktır.

Öz tüketime yönelik teşvik mekanizmaları: Çalışma, öz tüketim modelinin Giresun ilinin koşullarında ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Sanayi tesisleri, kamu binaları ve hastaneler gibi yüksek elektrik tüketimine sahip kurumlar için çatı üstü GES kurulumuna yönelik düşük faizli kredi ve vergi avantajı mekanizmalarının geliştirilmesi, bu potansiyelin hayata geçirilmesini hızlandıracaktır.

İklim politikası entegrasyonu: Sistem, yılda 60-84 tCO₂ emisyon önleme kapasitesiyle Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefine katkı sunmaktadır. Karadeniz Bölgesi'ndeki yerel yönetimlerin iklim eylem planlarına çatı üstü FV hedeflerini dahil etmesi ve bu hedeflerin ulusal iklim taahhütleriyle ilişkilendirilmesi önerilmektedir.

Veri altyapısının güçlendirilmesi: Karadeniz Bölgesi'nde MGM gözlem ağının genişletilmesi ve il bazında güneş ışınımı atlas çalışmalarının güncellenmesi, bölgesel FV yatırım planlamasının bilimsel temelini güçlendirecektir. Bu yatırım hem araştırma kalitesini hem de özel sektör karar verme süreçlerini doğrudan iyileştirecektir.

Farkındalık ve kapasite geliştirme: Karadeniz Bölgesi'nde FV teknolojisine yönelik ön yargı, kısmen bölgenin iklimsel koşullarına ilişkin yanlış algılardan kaynaklanmaktadır. Bu çalışmanın ortaya koyduğu üzere bölge, ekonomik uygulanabilirlik eşiğini karşılayan bir FV potansiyeline sahiptir. Yerel üniversiteler, meslek odaları ve belediyeler iş birliğiyle düzenlenecek kapasite geliştirme programları bu algının dönüştürülmesine katkı sunabilecektir.

8. Gelecekteki Çalışmalar (Future Studies)

Bu çalışmanın bulguları ve sınırlılıkları ışığında aşağıdaki araştırma alanları öncelikli gelecek çalışmalar olarak önerilmektedir.

Çok lokasyonlu Karadeniz Bölgesi analizi: Mevcut çalışma tek bir ile odaklanmıştır. Trabzon, Rize, Ordu ve Samsun illerini kapsayan karşılaştırmalı bir çalışma, Karadeniz Bölgesi genelinde FV fizibilite haritasının oluşturulmasına olanak tanıyacak ve bölgesel politika kararlarına güçlü bir bilimsel zemin sunacaktır.

Gerçek saha verisiyle doğrulama: Meteorolojik sentetik verisi yerine MGM gözlem istasyonlarından elde edilecek uzun dönemli gerçek ışınım ve sıcaklık verileri kullanılarak simülasyon sonuçlarının doğrulanması, tahmin güvenilirliğini artıracaktır. Bu yaklaşım aynı zamanda iklim değişikliğinin bölgesel güneşlenme örüntüleri üzerindeki etkisinin de değerlendirilmesine imkân tanıyacaktır.

3B gölgeleme analizi: Giresun ili engebeli arazi yapısı ve yoğun kentsel dokusu göz önünde bulundurulduğunda, ufuk profili ve yakın çevre gölgelemesini içeren kapsamlı 3B sahne modellemesi gerçekleştirilmesi, üretim tahminlerinin doğruluğunu artıracak kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Yaşam döngüsü analizi (LCA): Bu çalışmada hesaplanan emisyon azaltımları yalnızca işletme dönemi operasyonel emisyonlarını kapsamaktadır. Modül üretimi, nakliye, kurulum ve ömür sonu atık yönetimini de içeren tam yaşam döngüsü analizi, sistemin net çevresel etkisini daha bütüncül biçimde ortaya koyacaktır.

Hibrit sistem optimizasyonu: Karadeniz Bölgesi'nin yüksek hidrolojik potansiyeli dikkate alındığında, FV sistemin küçük ölçekli hidroelektrik veya batarya depolama sistemleriyle hibritleşmesinin teknik ve ekonomik fizibilitesinin araştırılması bölgeye özgü ilginç sonuçlar üretebilecektir.

Elektrik tarifesi duyarlılık analizi: Mevcut çalışmada fiyatlar sabit kabul edilmiştir. Türkiye'nin yüksek enflasyon ortamında tarife değişkenliğini içeren duyarlılık analizi ve Monte Carlo simülasyonu, yatırım kararlarının güçlendirilmesine önemli katkı sunacaktır.

9. Sonuç (Conclusion)

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alan Giresun ili koşullarında 100 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı bir FV sistemin teknik performansı ve ekonomik fizibilitesi PVsyst V7.4.7 yazılımı kullanılarak incelenmiş; elde edilen bulgular IPCC Tier 1 metodolojisi çerçevesinde sera gazı emisyon analizi ile desteklenmiştir.

Teknik açıdan sistem, yıllık 134.308 kWh enerji üretimi ve %90,28 performans oranıyla bölgenin iklimsel koşulları dikkate alındığında güçlü bir performans sergilemiştir. Elde edilen PR değeri, Türkiye'nin farklı bölgelerinde gerçekleştirilen benzer çalışmalarda raporlanan değerlerin üzerinde kalmış; bu durum Karadeniz Bölgesi'nin düşük ışınım değerlerine karşın termal avantajının sistem verimliliğine olumlu yansıdığı ortaya koymuştur. P50-P90 analizi, sistemin yıllık üretim tahmininin 126,71-134,31 MWh aralığında gerçekleşeceğini ve belirsizlik profilinin kabul edilebilir düzeyde kaldığını göstermiştir.

Ekonomik analiz, yatırımın karlılığının büyük ölçüde kullanım modeline bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Şubat 2026 tarife koşullarında öz tüketim senaryosunda geri ödeme süresi yaklaşık 6,2 yıl olarak hesaplanırken şebekeye satış senaryosunda bu süre 14,4 yıla uzamaktadır. LCOE değeri her iki senaryoda da 8,85 TL/kWh olarak hesaplanmış olup bu değer mevcut şebeke satış tarifesinin (2,59 TL/kWh) üzerinde kalmaktadır. Bu bulgu, mevcut tarife yapısının Karadeniz Bölgesi'nde şebekeye satış modelini ekonomik açıdan sürdürülemez kıldığını açıkça ortaya koymakta; öz tüketime yönelik yatırımların ise makul bir ekonomik ufuk sunduğunu göstermektedir.

Sera gazı analizi, sistemin yıllık 59,4-83,9 tCO₂ aralığında emisyon önlediğini; 30 yıllık sistem ömrü boyunca ise toplam 1.532-2.164 tCO₂ kümülatif tasarruf sağlayacağını göstermektedir. Bu değerler, ekonomik getirisinin ötesinde sistemin iklim politikası açısından da anlamlı bir katkı sunduğuna işaret

etmektedir. Aynı zamanda çalışma, PVsyst simülasyon raporundaki hatalı sıfır emisyon faktörünü ETKB-EVÇED resmi verileriyle düzelterek metodolojik bir katkı da sağlamaktadır.

Finansal Destek (Financial Support)

Bu çalışma için herhangi bir kurum veya kuruluşun finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Referanslar (References)

- [1] A. Elkhataf, S. Al-Muhtaseb, Climate change and energy security: a comparative analysis of the role of energy policies in advancing environmental sustainability, *Energies* 17(13) (2024) 3179.
- [2] I.E.A., International Energy Agency (I.E.A.), *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>, (2024).
- [3] F. Mandys, M. Chitnis, S.R.P. Silva, Levelized cost estimates of solar photovoltaic electricity in the United Kingdom until 2035, *Patterns* 4(5) (2023).
- [4] M. Cubukcu, H. Gumus, Performance analysis of a grid-connected photovoltaic plant in eastern Turkey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 39 (2020) 100724.
- [5] A. Özcan, A.S.M. Algburi, H.A. Abdulwahid, S. Jasim, A detailed analysis of the utilization of wind energy globally and specifically in the nation of Türkiye, *International Journal of Energy Applications and Technologies* 11(1) (2025) 40-52.
- [6] E.E., Ember Energy (E.E.) Türkiye surpasses 2025 solar target as capacity doubles in 2.5 years <https://ember-energy.org/latest-insights/turkiye-surpasses-2025-solar-target-as-capacity-doubles-in-2-5-years/>, (2025).
- [7] M. İspir, M.H. Aksoy, M. Kalyoncu, Estimation of solar radiation and photovoltaic power potential of Türkiye using ANFIS, *Journal of King Saud University–Engineering Sciences* 37(1) (2025) 2.
- [8] O. Ayan, B.E. Turkey, Techno-economic comparative analysis of grid-connected and islanded hybrid renewable energy systems in 7 climate regions, Turkey, *IEEE Access* 11 (2023) 48797-48825.
- [9] E.A., Enerji Atlası (E.A.) Giresun İli Elektrik Tüketim Verileri. <https://www.enerjiatlas.com>, (2024).
- [10] E. Eris, N. Agiralioglu, Homogeneity and trend analysis of hydrometeorological data of the Eastern Black Sea Region, Turkey, *Journal of Water Resource and Protection* 4(2) (2012) 99-105.
- [11] İ. Taşkolcu, R. Acar, B. Çırağ, Trend analysis of precipitation and temperatures in the Black Sea Region using the innovative trend analysis, *Journal of Studies in Advanced Technologies* 2(2) (2024) 74-82.
- [12] M.G.M., Meteoroloji Genel Müdürlüğü (M.G.M.) Türkiye İklim Verileri. Ankara. <https://www.mgm.gov.tr>, (2024).
- [13] C. Monokroussos, Y. Zhang, E.W. Lee, F. Xu, A. Zhou, Y. Zhang, W. Herrmann, Energy performance of commercial c-Si PV modules in accordance with IEC 61853-1,-2 and impact on the annual specific yield, *EPJ Photovoltaics* 14 (2023) 6.
- [14] D.D. Milosavljević, T.S. Kevkić, S.J. Jovanović, Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study, *Open Physics* 20(1) (2022) 431-451.
- [15] S. Kazemzadehmarand, A. Sözen, Determining the optimum photovoltaic installation angle for provinces in turkey, *Politeknik Dergisi* (2024) 1-1.
- [16] M.H. Aksoy, İ. Çiylez, M. İspir, Effect of azimuth angle on the performance of a small-scale on-grid PV system, *Turkish Journal of Nature and Science* 11(4) (2022) 42-49.
- [17] B. Bhuvaneshwari, W.A. Memala, Performance analysis of stand-alone photovoltaic system using PVsyst, *Electrochemical Society Transactions* 107(1) (2022) 11533-11541.

- [18] PVsyst, <https://www.pvsyst.com/help/physical-models-used/irradiation-models/transposition-model.html#accuracy-and-validations>, (2026).
- [19] M.E.S., My Enerji Solar (M.E.S.) <https://www.myenerjisolar.com/yillara-gore-elektrik-tarife-fiyatlari/>, (2024).
- [20] T.C.M.B., Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (T.C.M.B.) <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/TR/TCMB+TR/Main+Menu/Istatistikler/Doviz+Kurlari>, (2026).
- [21] E.P.D.K., Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (E.P.D.K.) <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-167/resmi-istatistikler>, (2026).
- [22] T.C.M.B., Türkiye Cumhuriyeti Merkez Bankası (T.C.M.B.) <https://www.tcmb.gov.tr/>, (2025).
- [23] S. Lindig, J. Ascencio-Vasquez, J. Leloux, D. Moser, A. Reinders, Performance analysis and degradation of a large fleet of PV systems, *IEEE journal of photovoltaics* 11(5) (2021) 1312-1318.
- [24] A. Marcos-Castro, C. Sanz-Saiz, J. Polo, N. Martín-Chivelet, Performance ratio estimation for building-integrated photovoltaics—thermal and angular characterisation, *Applied Sciences* 15(12) (2025) 6579.
- [25] S. Dubey, J.N. Sarvaiya, B. Seshadri, Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review, *Energy procedia* 33 (2013) 311-321.
- [26] A. Amelia, Y. Irwan, W. Leow, M. Irwanto, I. Safwati, M. Zhafarina, Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance, *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol* 6(5) (2016) 682-688.
- [27] J. Allen, W. Hobbs, The effect of short-term inverter saturation on modeled hourly PV output using minute DC power measurements, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 14(6) (2022).
- [28] D. Díaz-Bello, C. Vargas-Salgado, J. Águila-León, F. Lara-Vargas, Methodology to estimate the impact of the DC to AC power ratio, azimuth, and slope on clipping losses of solar photovoltaic inverters: Application to a PV system located in valencia Spain, *Sustainability* 15(3) (2023) 2797.
- [29] M.J. Prilliman, C.W. Hansen, J.M. Keith, S. Janzou, M. Theristis, A. Scheiner, E. Ozakyol, Quantifying uncertainty in pv energy estimates final report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), 2023.
- [30] D. Gören, O. Taylan, P50/P90 Analysis of a solar photovoltaic plant in METU NCC using the empirical method, 2020 2nd International Conference on Photovoltaic Science and Technologies (PVCon), IEEE, 2020, pp. 1-8.
- [31] M. Dağtekin, D. Kaya, H.H. Öztürk, F.Ç. Kiliç, A study of techno-economic feasibility analysis of solar photovoltaic (PV) power generation in the province of Adana in Turkey, *Energy exploration & exploitation* 32(4) (2014) 719-735.
- [32] K. Basaran, Performance and Techno-economic Analysis of a Hybrid Photovoltaic/thermal System for Building Application in Turkey, (2021).
- [33] M. Vázquez-Vázquez, A.B. Alonso-Conde, J. Rojo-Suárez, Are the Purchase Prices of Solar Energy Projects under Development Consistent with Cost of Capital Forecasts?, *Infrastructures* 6(7) (2021) 95.
- [34] I.P.C.C., Intergovernmental Panel on Climate Change (I.P.C.C.) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy. IGES, Japan., (2006).
- [35] E.V.Ç.E.D.B., Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı (E.V.Ç.E.D.B.) . Türkiye Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü. Ankara., (2023).
- [36] E.T.K.B., Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (E.T.K.B.). Ulusal Sera Gazı Emisyon Faktörleri. Ankara., (2022).
- [37] R.C. Thomson, G.P. Harrison, J.P. Chick, Marginal greenhouse gas emissions displacement of wind power in Great Britain, *Energy Policy* 101 (2017) 201-210.
- [38] P. Muangjai, W. Wongsapai, R. Bunchuaidee, N. Tridech, D. Damrongsak, C. Ritkrerkkrai, Marginal abatement cost of electricity generation from renewable energy in Thailand, *Energy Reports* 6 (2020) 767-773.
- [39] F. Nobert, T. Weis, A. Leach, S.A. García, A wind offset paradox: Alberta's wind fleet displacing greenhouse gas emissions and depressing future offset values, *Wind* 5(1) (2025) 2.

- [40] A.E. Coşgun, M.S. Endiz, H. Demir, M. Özcan, Agrivoltaic systems for sustainable energy and agriculture integration in Turkey, *Heliyon* 10(11) (2024).
- [41] O. Karadogan, T. Kilicarslan, M.S. Celiktas, The Actual Performance Value of Photovoltaic Solar System In Turkey and Compare with Software Result, *Solar Energy Institute, Ege University* (2014).
- [42] S.U. Rehman, M. Farooq, A. Qamar, M. Usman, G. Ahmad, M. Sultan, M.W. Saleem, I. Hussain, M. Imran, Q. Ali, Experimental investigation to thermal performance of different photo voltaic modules for efficient system design, *Alexandria Engineering Journal* 61(12) (2022) 12623-12634.
- [43] R. Dabou, F. Bouchafaa, A.H. Arab, A. Bouraiou, M.D. Draou, A. Neçaibia, M. Mostefaoui, Monitoring and performance analysis of grid connected photovoltaic under different climatic conditions in south Algeria, *Energy Conversion and Management* 130 (2016) 200-206.
- [44] P. Dash, N. Gupta, Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules, *International Journal of Engineering Research and Applications* 5(1) (2015) 148-151.
- [45] A. Alkuhayli, A. Telba, Effect of high temperature on the efficiency of grid-connected pv system, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2021, pp. 7-9.
- [46] O.K. Segbefia, Temperature profiles of field-aged photovoltaic modules affected by optical degradation, *Heliyon* 9(9) (2023).
- [47] E. Radziemska, The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renewable energy* 28(1) (2003) 1-12.
- [48] L. Zaghba, M. Khennane, A. Fezzani, A. Borni, I.H. Mahammed, Experimental outdoor performance evaluation of photovoltaic plant in a Sahara environment (Algerian desert), *International Journal of Ambient Energy* 43(1) (2022) 314-324.
- [49] P. Kuznetsov, L. Yuferev, D. Voronin, V.A. Panchenko, M. Jasiński, A. Najafi, Z. Leonowicz, V. Bolshev, L. Martirano, Methods improving energy efficiency of photovoltaic systems operating under partial shading, *Applied Sciences* 11(22) (2021) 10696.
- [50] J. Appelbaum, A. Peled, A. Aronescu, Shadow Analysis of Photovoltaic Systems Deployed Near Obscuring Walls, *Energies* 18(18) (2025) 4839.
- [51] V. Bocullo, L. Martišauskas, D. Pupeikis, R. Gatautis, R. Venčaitis, R. Bakas, Uav photogrammetry application for determining the influence of shading on solar photovoltaic array energy efficiency, *Energies* 16(3) (2023) 1292.



SLAG, LIME AND FLY ASH EFFECT ON STRENGTH OF LOW PLASTICITY CLAY

*Emrah DAĞLI¹, Ömer Faruk ÇAPAR²

¹Zonguldak Bülent Ecevit University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Zonguldak

² Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Adana

(Geliş/Received: 27.03.2026, Kabul/Accepted: 26.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ABSTRACT

The mechanical properties of clayey soils may be insufficient to sustain the loads imposed by structures such as embankments, buildings, and similar constructions. In such cases, soil properties can be improved through chemical reactions that occur when traditional binders such as fly ash, lime, and slag are mixed with the soil. In this study, the index properties of the Çatalağzı clay sample were determined using pycnometer, Atterberg limits, hydrometer, and standard Proctor tests. Soil mixtures were prepared by adding lime (2.5%, 5%, 7.5%, and 10%), fly ash (5%, 10%, 15%, and 20%), and slag (3%, 6%, 9%, and 12%) to the soil. Unconfined compressive strength (UCS) and California Bearing Ratio (CBR) tests were conducted on the prepared mixtures. The natural soil was tested uncured (0 days), whereas all stabilized mixtures were tested after 28 days of curing. According to the UCS results, the optimum binder contents were determined as 5% for lime, 15% for fly ash, and 9% for slag. The corresponding strength increases were calculated as 91.92% for lime, 23.22% for fly ash, and 37.97% for slag. The CBR test results of the mixtures prepared at these optimum binder contents were found to be consistent with the UCS findings. The addition of 5% lime increased the CBR value of the soil by 35.7 times, while 9% slag increased it by 12.32 times. Although the improvement achieved with fly ash was relatively lower, significant enhancement in soil strength was observed with the addition of lime and slag.

Keywords: Blast furnace slag, CBR, Fly Ash, Lime, UCS

CÜRUF, KİREÇ VE UÇUCU KÜLÜN DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİLİN DAYANIMINA ETKİSİ

ÖZ

Killi zeminlerin mekanik özellikleri, üzerlerine inşa edilen dolgu, bina ve benzeri yapıların yüklerini karşılamak için yeterli olmayabilir. Bu gibi durumlarda, uçucu kül, kireç ve cüruf gibi geleneksel bağlayıcıların zeminle karıştırılması sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sayesinde zemin özellikleri iyileştirilebilir. Bu çalışmada, Çatalağzı kili numunesinin indeks özellikleri; piknometre, Atterberg limitleri, hidrometre ve standart Proktor deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Zemin karışımları, zemine kireç (%2.5, %5, %7.5 ve %10), uçucu kül (%5, %10, %15 ve %20) ve cüruf (%3, %6, %9 ve %12) ilave edilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar üzerinde serbest basınç dayanımı (UCS) ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Doğal zemin kür uygulanmadan (0 gün) test edilmiş, buna karşılık tüm stabilize edilmiş karışımlar 28 günlük kür süresinin ardından test edilmiştir. UCS sonuçlarına göre optimum bağlayıcı oranları; kireç için %5, uçucu kül için %15 ve cüruf için %9 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık gelen dayanım artışları sırasıyla kireç için %91.92, uçucu kül için %23.22 ve cüruf için %37.97 olarak hesaplanmıştır. UCS deneylerine göre belirlenen optimum bağlayıcı

oranlarında hazırlanan karışımların CBR deney sonuçları da UCS bulgularıyla uyumlu çıkmıştır. %5 kireç ilave, zeminin CBR değerini 35.7 katına, % 9 cüruf katkısı ise 12.32 katına çıkarmıştır. Uçucu kül için artış daha düşük olmakla birlikte, cüruf ve kireç katkısı ile zemin dayanımında önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Cüruf, CBR, Uçucu kül, Kireç, UCS

1. Introduction

Various ground-related problems have been encountered in construction sites to date, and different solution methods have been developed to address these issues. In some construction areas, the existing soil conditions may create problems of such magnitude that they determine the feasibility of the project. In such cases, improvement of in-situ ground conditions becomes one of the primary engineering alternatives. Rapid population growth, urbanization, and industrialization processes that began in the twentieth century and continue today have led to a decrease in areas suitable for construction. Accordingly, it has become inevitable to utilize geologically unsuitable soils with low bearing capacity for construction purposes [1–4].

Low bearing capacity and excessive deformation problems encountered in weak foundation soils have necessitated the development and implementation of ground improvement methods. In recent years, the chemical stabilization of weak soils has attracted considerable attention. Traditional stabilizers (fly ash, lime, slag etc.) have long been successfully used for this purpose.

Fly ash, as an industrial by-product, has been widely utilized in soil improvement applications [5–13]. The use of fly ash instead of cement not only reduces CO₂ emissions but also contributes to sustainable geotechnical practices by promoting the recycling of industrial waste materials [14–16]. Fly ash is classified based on its CaO and the combined proportions of SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ as Class C and Class F. Class C fly ash is more prone to cementitious reactions, whereas Class F fly ash, due to its low CaO content. Consequently, it is frequently combined with activators or supplementary additives, such as (lime, cement, tire granules, zeolite etc.) to promote pozzolanic reactions and improve engineering performance [17–19].

Lime is an effective stabilization agent on its own. It is well known that lime increases the strength of clayey soils and reduces settlement [20]. Lime is very effective when stabilizing clayey soils since strong pozzolanic and cementation reactions occur and it provides cementing products that help enhancement of strength parameters [21–22]. However, along with strength improvement, reaching peak stress at lower strain levels and the subsequent sudden loss of strength may cause brittle behavior in the soil [23–24]. In addition, approximately 0.94 kg of CO₂ is emitted per 1 kg of hydrated lime produced [25]. These limitations made researchers think about other sustainable waste materials.

Slag, on the other hand, has a high CaO content and is another widely used additive material in ground improvement applications [26]. At the Erdemir company, at least 300,000 tons of steelmaking slag are generated annually during steel production [27]. The generated slag can be utilized in road construction applications. In the study [27] conducted the use of steel slag at a ratio of 3.33% increased the CBR value from 6 to 21. Replacement of blast furnace slag with fly ash improved the UCS performance of soil in a research [28]. It was also observed that finer blast furnace slag enhanced the strength and usage of ground granulated blast furnace slag (GGBS) was effective as portland cement while trying to solve erosion problems [29]. Another study [30] found 9% slag to be optimum as a result of UCS and CBR test.

In this study, it is aimed to improve a low-plasticity clay soil using lime, fly ash, and slag additives in order to increase its bearing capacity while also ensuring the recycling of waste materials. This study contributes to the observing of the individual effects of lime, BFS, and fly ash on soil stabilization. It also provides a basis for future investigations involving combined-binder systems.

2. Material and Method

2.1. Materials

In this study, Çatalağzı clay was used. The clay was obtained from a field located in the Çatalağzı region of Kilimli district in Zonguldak. The soil, fly ash, lime, and slag used in the study are presented in Figure 1. The fly ash and lime used in this study were taken from the same sources characterised in Ref. [37], whereas the slag was obtained from the same source reported in Ref. [27]. Therefore, the chemical compositions were considered representative of the materials used.

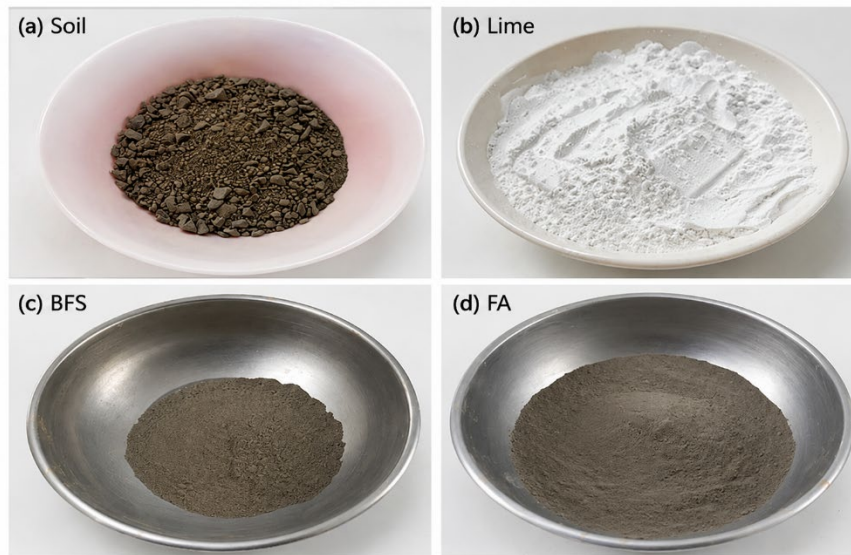


Figure 1. Materials used in the study **a)** soil **b)** lime **c)** blast furnace slag **d)** fly ash

Specific gravity, consistency limits, hydrometer, and standard Proctor tests were conducted on the Çatalağzı clay sample in accordance with ASTM D854 [31], ASTM D4318-17e1 [32], ASTM D7928-21e1 [33], and ASTM D698-12 [34], respectively. The obtained results are presented in Table 1. The classification results indicate that the Çatalağzı clay corresponds to low plasticity clay (CL) based on the Unified Soil Classification System (UCS) [35]. The specific gravity was determined as 2.63. The liquid limit, plastic limit, and plasticity index values were found to be 41.8%, 17.7%, and 24.1%, respectively. As a result of the Proctor test, optimum moisture content (w_{opt}) and maximum dry unit weight (γ_{dmax}) were determined as 16.97% and 16.50 kN/m³, respectively. According to the hydrometer test results, the soil consists of 31.5% clay and 68.5% silt.

Table 1. Index properties of Çatalağzı clay

Property	Value
G _s	2.63
Silt (%)	68.5
Clay (%)	31.5
LL (%)	41.8
PL (%)	17.7
PI (%)	24.1
w_{opt} (%)	16.97
γ_{dmax} (kN/m ³)	16.50
USCS	CL

The fly ash was obtained from the Eren Enerji company operating in the Kilimli district of Zonguldak. Based on the chemical properties presented in Table 2, as determined by XRF analysis, it is identified as a low-calcium fly ash. According to ASTM C618 [36], it is classified as Class F due to its CaO content being less than 18%. The lime was supplied from a locally operating commercial company. According

to the XRF analysis, the lime material is classified as CL 90-S ($\text{CaO} + \text{MgO} > 90\%$). The slag material was obtained from the Erdemir company located in the Ereğli district of Zonguldak. The properties of this material are also given in Table 2. In the table, the chemical composition of the slag was taken from Bilgen et al. [27], while the chemical compositions of the fly ash and lime were obtained from the doctoral thesis study of Dağlı [37].

Table 2. Chemical compound of soil and mixtures

Compound	Soil (%)	FA (%)	Lime (%)	Slag (%)
SiO_2	57.16	48.20	2.12	13.30
Al_2O_3	31.84	21.08	1.25	5.02
Fe_2O_3	4.65	18.32	0.45	20.49
CaO	0.00	2.49	92.50	46.57
SO_3	0.03	0.98	1.37	0.32
MgO	0.86	1.89	2.05	5.25
K_2O	3.32	3.88	0.16	0.17
TiO_2	2.14	2.35	0.00	0.47

2.2. Experimental program

Mixtures containing lime, slag, and fly ash were subjected to California Bearing Ratio (CBR) and unconfined compressive strength (UCS) experiments. While the same tests were performed on the untreated soil without any curing period, the mixtures were subjected to 28 day curing. The mixture proportions and the codes used for the mixtures in the tests are shown in Table 3.

Table 3. Mixture codes and details

Mixture Code	Mixture Detail
S	Soil
S2.5L	Soil + % 2.5 Lime
S5L	Soil + % 5 Lime
S7.5L	Soil + % 7.5 Lime
S10L	Soil + % 10 Lime
S5FA	Soil + % 5 Fly ash
S10FA	Soil + % 10 Fly ash
S15FA	Soil + % 15 Fly ash
S20FA	Soil + % 20 Fly ash
S3BFS	Soil + % 3 Blast Furnace Slag
S6BFS	Soil + % 6 Blast Furnace Slag
S9BFS	Soil + % 9 Blast Furnace Slag
S12BFS	Soil + % 12 Blast Furnace Slag

The testing program was designed to evaluate both the strength development and bearing-capacity performance of the stabilized soils. UCS testing was selected to determine the effectiveness of each stabilizer and identify the optimum binder content. Subsequently, CBR testing was conducted on the optimum mixtures to assess their suitability for subgrade applications and to directly address the research objective of comparing the performance of lime, BFS, and fly ash.

2.3. Standard proctor test

The specimens prepared for the CBR and UCS experiments for both soils and mixtures were compacted at the water contents obtained from the Proctor tests. The optimum moisture contents and maximum dry unit weights determined for both the soil and the mixtures are presented in Table 4. Accordingly, the addition of lime decreased the maximum dry unit weight while increasing the optimum moisture content. The addition of 5% fly ash did not result in a significant change in the maximum dry unit weight but caused an increase in the optimum moisture content. Higher fly ash contents led to a decrease in the optimum moisture content, while the maximum dry unit weight remained close to that of the natural

soil. A similar behavior was observed for slag as in the case of fly ash. The addition of 3% slag increased the optimum moisture content to 19.76%, whereas increasing the slag content to 12% reduced it to 18.79%. The maximum dry unit weight for S3BFS was 2.12% lower than that of the natural soil; it then slightly increased for S6BFS and remained nearly constant thereafter.

Table 4. Compaction characteristics of soil and mixtures

Mixture Code	w _{opt} (%)	γ _{dmax} (kN/m ³)
S	16.97	16.50
S2.5L	21.83	15.35
S5L	21.69	15.11
S7.5L	24.20	14.95
S10L	24.47	14.66
S5FA	19.76	16.39
S10FA	19.22	16.45
S15FA	19.17	16.47
S20FA	18.98	16.51
S3BFS	19.76	16.15
S6BFS	19.49	16.24
S9BFS	19.35	16.28
S12BFS	18.79	16.25

2.4. Unconfined compressive strength test

This test was performed in accordance with ASTM D2166/D2166M-16 [38] to evaluate the compressive strength of the soil and the mixtures. After determining the optimum moisture content, mixtures were prepared by adding lime at ratios of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%; fly ash at 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%; and slag at 0%, 3%, 6%, 9%, and 12%. The prepared mixtures were kneaded at their optimum moisture content and compacted using a Harvard Miniature Compaction apparatus to obtain cylindrical specimens. The specimens had an average height of 78.05 mm and diameter of 37.87 mm, resulting in a height-to-diameter ratio (H/D) of approximately 2.06. The mixture specimens were stored in a desiccator for 28 days. The obtained cylindrical specimens underwent unconfined compression tests using the apparatus shown in Figure 2 after 0 days for the natural soil and after 28 days of curing for the mixtures. The loading rate was adjusted to 1% strain rate/min.

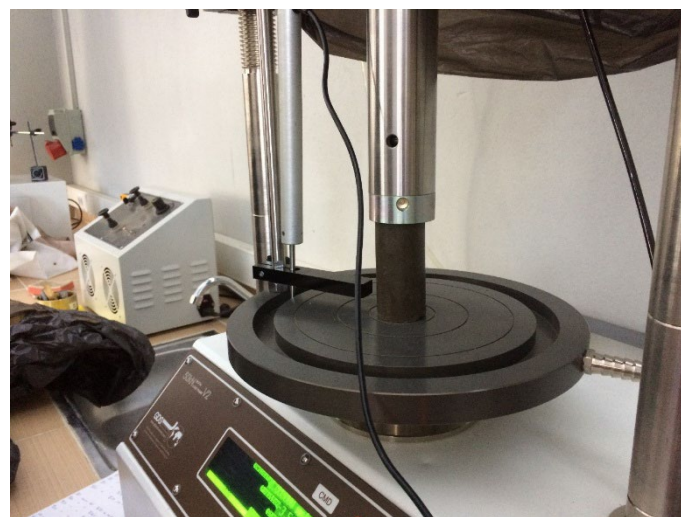


Figure 2. Unconfined compressive strength test device

2.5. California bearing ratio test

Clay specimens prepared with the determined optimum moisture content and appropriate unit weight, incorporating the specified percentages of chemical additives, were tested to determine their bearing ratios using the CBR test. The CBR test was conducted in accordance with ASTM D1883-16 [39]. The

specimens were prepared at their respective optimum moisture contents and subsequently compacted in CBR molds in three layers with 56 blows per layer. No curing period was applied to the natural soil (S), whereas the mixtures were cured for 28 days in an airtight, dark, and cool environment and then tested using the apparatus shown in Figure 3. Based on the evaluation of the unconfined compressive strength (UCS) results, CBR tests were conducted on the S5L, S9BFS, and S15FA mixtures, which exhibited the highest strength values among the lime-, BFS-, and fly ash-stabilized soils, respectively.



Figure 3. California bearing ratio test device

3. Research Finding

3.1. Unconfined compressive strength test

Stress–strain curves were obtained from the unconfined compressive strength tests. Accordingly, the natural soil (S), in the uncured condition, reaches its maximum stress at approximately 14% strain (Fig. 4). With the addition of lime, the strain corresponding to peak stress decreases to approximately 6–7% (Figs. 5). This behavior is expected for lime stabilization. Compared to the untreated soil, lime-treated mixtures exhibit more brittle behavior, higher strength, and reach peak stress at lower strain levels [40–41].

For mixtures containing fly ash, the S5FA sample exhibits stress–strain behavior at a strain level close to that of the natural soil (Fig. 6). However, with increasing fly ash content, the S10FA and S15FA mixtures reach peak stress at approximately 10% strain. One of the notable findings is that the S20FA mixture demonstrates highly ductile behavior, with the stress not decreasing even at nearly 20% strain. At this point, although fly ash provides a lower increase in strength compared to lime, it results in a more ductile response.

The stress–strain curves of slag mixtures are presented in Fig 7. Although the stress–strain behavior of slag-containing mixtures (S3BFS, S6BFS, S9BFS, and S12BFS) is similar to that of lime-treated mixtures, failure occurs at higher strain levels (approximately 13–14%). In addition, the strength increase is lower than that of lime but higher than that of fly ash. This behavior can be attributed to the CaO content of the slag.

Table 5. UCS results and strain values at failure

Mixture ID	Failure-Strain (%)	UCS (kPa)
S	13.75	173.28
S2.5L	7.33	167.52
S5L	6.33	236.66
S7.5L	7.00	214.15
S10L	6.92	175.63
S5FA	14.17	131.31
S10FA	10.50	137.28
S15FA	10.08	151.90
S20FA	19.00	145.06
S3BFS	14.08	135.01
S6BFS	14.23	157.82
S9BFS	13.13	170.09
S12BFS	12.29	165.89

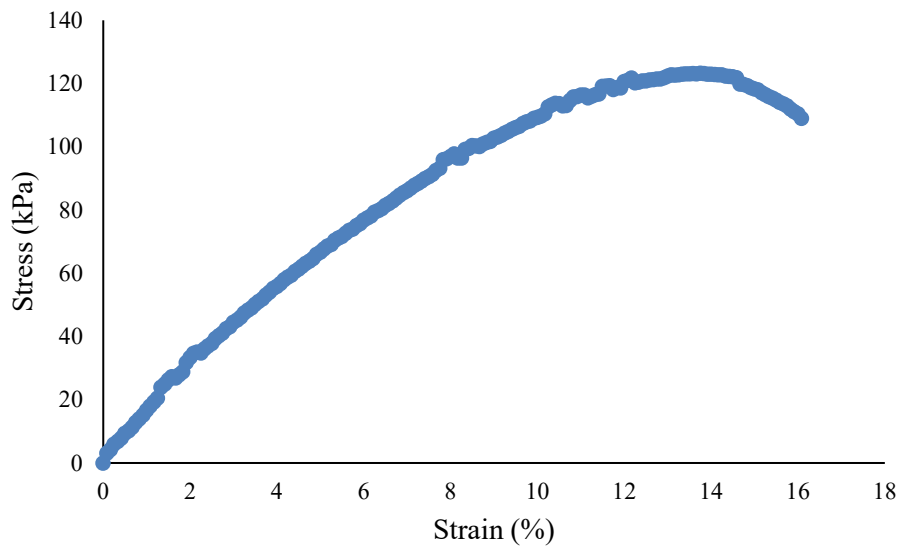


Figure 4. Stress – strain curve for untreated soil at 0 days of curing.

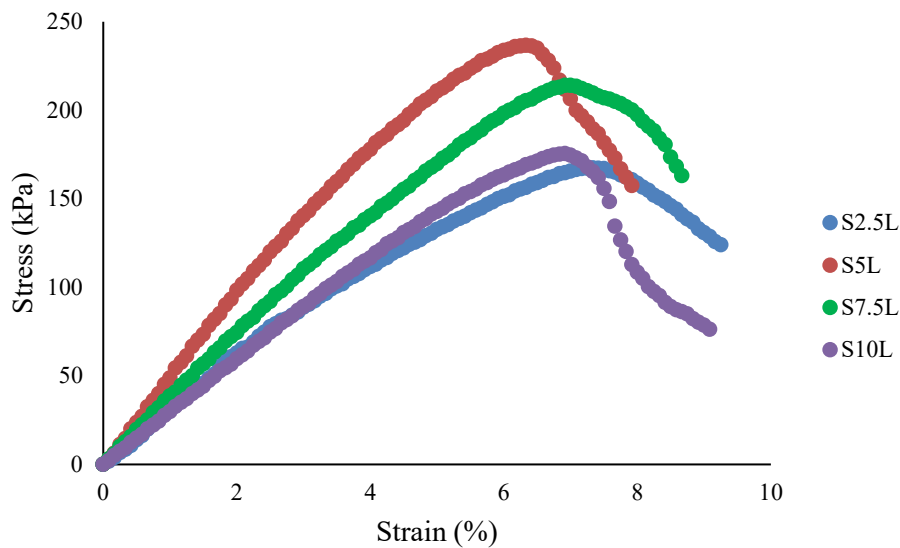


Figure 5. Stress – strain curve for lime stabilized mixtures cured for 28 days

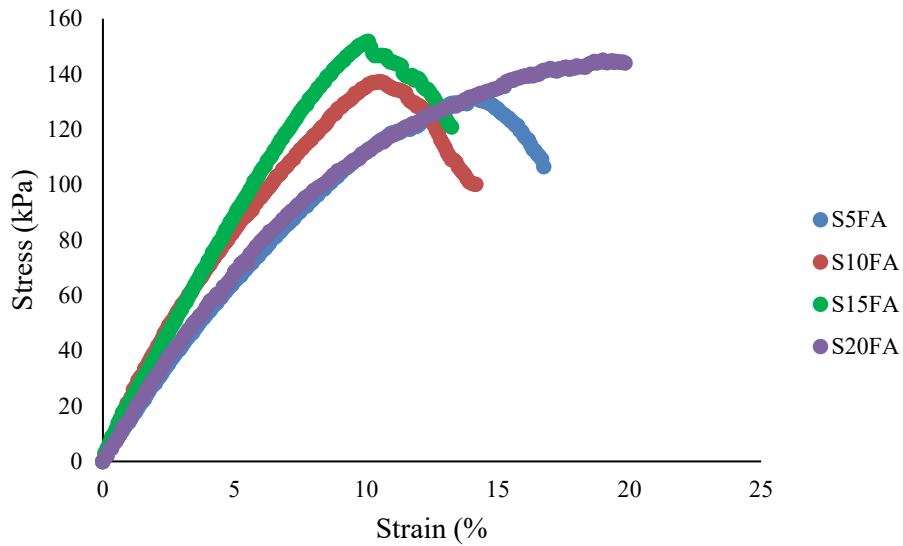


Figure 6. Stress – strain curve for fly ash stabilized mixtures cured for 28 days

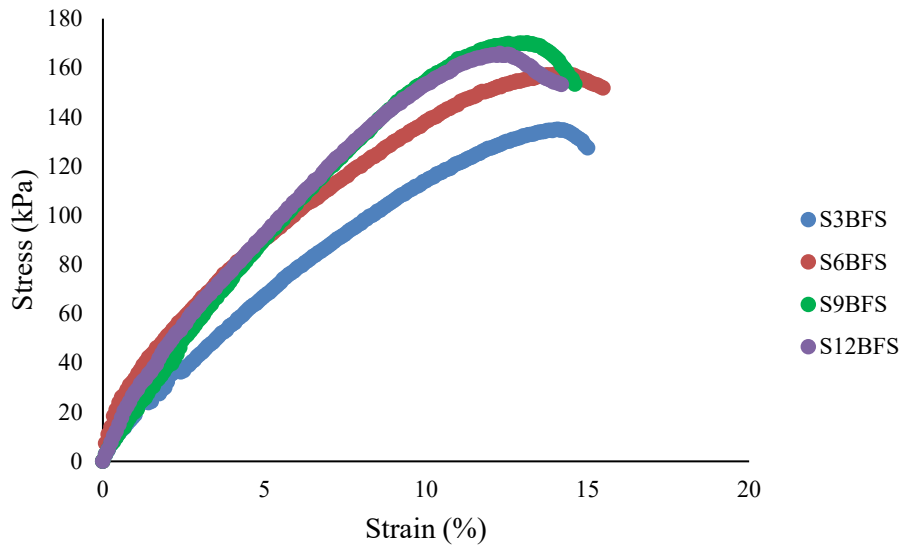


Figure 7. Stress – strain curve for slag stabilized mixtures cured for 28 days

The unconfined compressive strength (UCS) results are presented in Figure 8. Accordingly, the highest strength enhancement was seen in the lime-treated mixtures. The strength increased up to a 5% additive content and then began to decrease. The highest UCS value was obtained for the S5L mixture, which is approximately 1.92 times that of the natural soil. Fly ash addition did not result in a significant improvement in UCS, with the highest strength observed in the S15FA mixture (1.23 times that of the natural soil). This outcome can be attributed to the low CaO content of the fly ash. The UCS values of slag-containing mixtures are higher than those of fly ash mixtures but lower than those of lime-treated mixtures. The highest UCS value among the slag mixtures was obtained for the S9BFS mixture, which is approximately 1.38 times that of the natural soil.

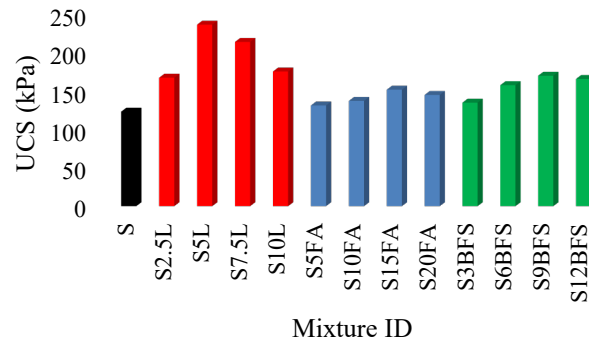


Figure 8. Unconfined compressive strength of soil and mixtures

3.2. California bearing ratio

The California Bearing Ratio (CBR) is a mechanical strength parameter used to evaluate whether materials employed in road embankments can sustain the applied loads. Based on CBR values, soils are classified into five categories as “very poor, poor to fair, fair, good, and excellent” [39]. In this study, the CBR test was conducted on selected mixtures (S5L, S9BFS, and S15FA) as well as on the natural soil as shown in Fig 18. According to the experimental results, the CBR value of the natural soil was determined as 2.11%. The highest CBR value was obtained for the S5L mixture with 75.39%. The CBR values for the S15FA and S9BFS mixtures were found to be 3.59% and 26%, respectively. Based on these results, the S5L and S9BFS mixtures meet the required criteria for use as fill material. Among the other mixtures, the fly ash-containing mixture exhibits a CBR value close to that of the natural soil. According to [42], CBR values below 3% are classified as "very poor", values between 20% and 50% as "good", and values above 50% as "excellent" as shown in Table 6. Accordingly, the natural soil falls into the "very poor" category, the S9BFS mixture falls into the "good" category, and the S5L mixture falls into the "excellent" category.

Table 6. CBR classification criteria used for evaluating subgrade performance [39]

CBR (%)	Rating
< 3	Very poor
3 – 7	Poor to fair
7 – 20	Fair
20 – 50	Good
> 50	Excellent

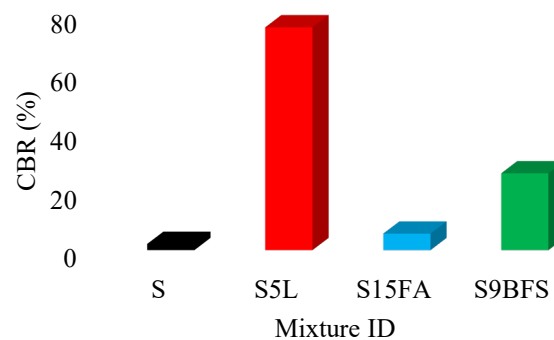


Figure 18. California bearing ratio of soil and mixtures

4. Results and Discussion

In this study, the effects of conventional stabilizers on the unconfined compressive strength (UCS) and California Bearing Ratio (CBR) of the soil were investigated. For this purpose, the curing period was

set as 28 days for the mixtures and 0 days for the natural soil. The obtained results are summarized below:

1. The addition of lime significantly increased the unconfined compressive strength of the soil but resulted in a more brittle behavior. In terms of the California Bearing Ratio, the lime-treated mixtures satisfied the required performance criteria.
2. The addition of fly ash did not lead to a significant improvement in UCS and CBR values (although a slight increase was observed); however, it resulted in a more ductile material behavior.
3. The addition of slag exhibited an intermediate effect between lime and fly ash. While it showed insufficient performance in terms of CBR, it performed better than fly ash in terms of UCS.
4. Considering that slag is an industrial by-product, higher strength improvements may be achieved through its use in combination with fly ash in different proportions. Furthermore, the combined use of fly ash, lime, and slag together can be investigated in future studies.
5. It should be noted that the soil was tested without curing. However, all stabilized mixtures were tested after 28 days of curing. Therefore, part of the observed strength improvement may be attributed to curing-related pozzolanic reactions and time-dependent processes, in addition to the effect of the stabilizing agents.
6. The optimum BFS mixture increased the CBR value to 26.03%, whereas [27] reported an increase from 6% to 21% using 3.33% steel slag, indicating a comparable improvement in bearing capacity.
7. The optimum slag content found in this study (9%) is consistent with the findings of [30], who also reported 9% slag as the optimum dosage based on UCS and CBR test results.
8. Lime stabilization produced the highest UCS value. However, it reduced the failure strain and it indicates a more brittle behaviour compared to other additives. From an engineering perspective, this represents a trade-off between strength increase and deformation tolerance. Higher strength is advantageous for load-bearing applications whereas enhancement in brittleness may lead to cracking problem under repeated loading conditions.
9. The contrasting behaviours observed in this study suggest that combined-binder systems may provide a balance between strength enhancement and ductility. Therefore, future research should investigate mixtures incorporating both lime and industrial by-products to optimise overall engineering performance.
10. When the mechanical strength improvements (UCS and CBR) are evaluated, the performance ranking is observed to be lime > blast furnace slag > fly ash. This trend is consistent with the CaO contents of the stabilizing agents presented in Table 2, which are 92.5% for lime, 46.57% for blast furnace slag, and 2.49% for fly ash. The higher CaO content promotes cation-exchange and pozzolanic reactions, resulting in the formation of cementitious compounds that enhance soil strength. Consequently, lime exhibited the greatest improvement in strength, followed by blast furnace slag and fly ash.
11. From a sustainability perspective, the use of industrial by-products such as BFS and FA may provide environmental benefits by reducing waste disposal and decreasing reliance on conventional stabilizers. Although lime exhibited the highest strength performance, BFS and fa represent potentially more sustainable alternatives due to their reuse of industrial waste materials.
12. Although environmental impacts were not quantitatively assessed in this study, blast furnace slag and fly ash may represent more sustainable alternatives to conventional stabilizers since they are industrial by-products that can be reused. Their utilization may help reduce the environmental burden associated with waste disposal and decrease reliance on materials with higher embodied carbon, such as lime and cement.

5. References



- [1] O. G. Ingles, J. B. Metcalf, Soil Stabilization: Principles and Practice. London: Butterworths, 1972.
- [2] M. R. Hausmann, Engineering Principles of Ground Modification. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [3] J. K. Mitchell, K. Soga, Fundamentals of Soil Behavior (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- [4] K. Kirsch, A. Bell, Ground Improvement. Boca Raton: CRC Press, 2012.

- [5] S. Arora, A. H. Aydilek, Class F Fly-Ash-Amended Soils as Highway Base Materials. *J. Mater. Civ. Eng.* 17(6), (2005). doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:6(640)
- [6] A. Misra, D. Biswas, S. Upadhyaya, Physico-Mechanical Behavior of Self-Cementing Class C Fly Ash-Clay Mixtures. *Fuel*. 84, (2005), 1410–1422, doi.org/10.1016/S0140-6701(06)80750-2
- [7] T. B. Edil, H. A. Acosta, C. H. Benson, Stabilizing Soft Fine-Grained Soils With Fly Ash. *J. Mater. Civ. Eng.* 18 (2), (2006), 283–294, doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(283).
- [8] B. R. P. Kumar, R. S. Sharma, Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 130 (7), (2004), 764–767, doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764).
- [9] F. Zha, S. Liu, Y. Du, K. Cui, Behavior of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash. *Nat. Hazards* 47, (2008), 509–523, doi.org/10.1007/s11069-008-9236-4.
- [10] R. M. Brooks, Soil Stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash. *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci.* 1 (3), (2009), 209–217.
- [11] S. Bin-Shafique, K. Rahman, M. Yaykiran, I. Azfar, The Long-Term Performance of Two Fly Ash Stabilized Fine-Grained Soil Subbases. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, (2010), 666–672, doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.007.
- [12] E. Dağlı, Ö. F. Çapar, Engineering Performance of Fly Ash Stabilized Çatalağzı Clay. *Eur. J. Sci. Technol.* 34, (2022), 267–272, doi.org/10.31590/ejosat.1081214.
- [13] R. M. Jumaa, A. K. Saeed, L. A. Al-Jaberi, Effect of Fly Ash and Nano-Silica Fume on Soft Clay Atterberg Limits, MDD and OMC. *Civ. Eng. J.* 12 (2), (2026), doi.org/10.28991/CEJ-2026-012-02-012.
- [14] S. Almuaythir, M. S. I. Zaini, M. Hasan, M. I. Hoque, Sustainable Soil Stabilization Using Industrial Waste Ash: Enhancing Expansive Clay Properties. *Heliyon* 10, (2024), e39124, doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39124.
- [15] P. Julphunthong, P. Joyklad, P. Manprom, T. Chompoorat, M.-T. Palou, T. Suriwong, Evaluation of Calcium Carbide Residue and Fly Ash as Sustainable Binders for Environmentally Friendly Loess Soil Stabilization. *Sci. Rep.* 14, (2024), 671, doi.org/10.1038/s41598-024-51326-x.
- [16] T. Yang, B. Huang, C. Zhan, C. Jiang, L. Zhang, X. Zhao, M. Zhao, Mechanical Properties and Mechanisms of Soda Residue and Fly Ash Stabilized Soil. *Sci. Rep.* 15, (2025), 1103, doi.org/10.1038/s41598-024-84170-0.
- [17] S. Abu Yosef, M. Balkaya, A. Abu Arra. Sustainable Stabilization of Expansive Soil Using Fly Ash, Olive Cake Ash, and Zeolite: An Experimental and Numerical Study. *Arab J Sci Eng.* 51, (2026), 4833–4854 <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10462-w>.
- [18] N. Ezekiel, J. Najjiby, D. Krishnan, E. Izere. Experimental Evaluation of Fly Ash and Lime Stabilization on the Geotechnical Characteristics of Expansive Clay for Road Subbase Applications. *Sci Rep.* (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-56611-5>.
- [19] E. Dağlı, Ö. F. Çapar, S. Sert. Lime–Fly Ash Binder Composition Controls Freeze–Thaw Durability of Stabilized Clays. *Sci Rep* (2026). <https://doi.org/10.1038/S41598-026-52479-7>.
- [20] F. G. Bell, Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Eng. Geol.* 42 (4), (1996), 223–237, doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2.
- [21] D. I. Boardman, S. Glendinning, C. D. F. Rogers, Development of Stabilization and Solidification in Lime-Clay Mixes. *Geotechnique* 51 (6), (2001), 533–544.
- [22] F. Zhu, Z. Li, W. Dong, Y. Ou, Geotechnical Properties and Microstructure of Lime-Stabilized Silt Clay. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 78, (2019), 2345–2354, doi.org/10.1007/s10064-018-1307-5.
- [23] T. Şengül, K. Yılmaz, A. Demir, M. Kaya, Effect of Freeze–Thaw Cycles on the Mechanical Behavior of Lime-Stabilized Soils. *Polymers* 17 (17), (2025), 2405, doi.org/10.3390/polym17172405.

- [24] L. Li, W. Liu, X. Fei, W. Li, Coconut Shell Fiber for Reinforcing Lime-Stabilized Soil. *Can. Geotech. J.* (2026), doi.org/10.1139/cgj-2025-0243.
- [25] A. Laveglia, L. Sambataro, N. Ukrainczyk, N. De Belie, E. Koenders, Hydrated Lime Life-Cycle Assessment: Current and Future Scenarios in Four EU Countries. *J. Clean. Prod.* 369, (2022), 133224, doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133224.
- [26] C. Shi, Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. *ChemInform* 36 (22), (2005), doi.org/10.1002/chin.200522249.
- [27] G. Bilgen, A. Kavak, Ö. F. Çapar, Düşük Plastisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Cürufunun Kullanılması ve Kireç ile Etkileşimi. *Karaelmas Fen Müh. Derg.* 2 (2), (2012), 30–38.
- [28] S. Gupta, S. S. Seehra, Studies on Lime-Granulated Blast Furnace Slag as an Alternative Binder to Cement. *Highw. Res. Board Bull.* 30, (1989), 81–97.
- [29] T. K. Wong, Use of Granulated Slag as a Stabilising Agent. *Proc. Aust. Road Res. Board Conf. Part 2*, (1992), 293–307.
- [30] L. Yadu, D. R. K. Tripathi, Effects of Granulated Blast Furnace Slag in the Engineering Behaviour of Stabilized Soft Soil. *Procedia Eng.* 51, (2013), 125–131, doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.019.
- [31] ASTM D854-23, Standard Test Methods For Specific Gravity Of Soil Solids By The Water Displacement Method. ASTM Standard, 2023.
- [32] ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods For Liquid Limit, Plastic Limit, And Plasticity Index Of Soils. ASTM Standard, 2017.
- [33] ASTM D7928-21e1, Standard Test Method For Particle-Size Distribution (Gradation) Of Fine-Grained Soils Using The Sedimentation (Hydrometer) Analysis. ASTM Standard, 2021.
- [34] ASTM D698-12, Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics Of Soil Using Standard Effort (12,400 Ft-Lbf/Ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM Standard, 2021
- [35] ASTM D2487-17, Standard Practice For Classification Of Soils For Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM Standard, 2017.
- [36] ASTM C618-19, Standard Specification For Coal Fly Ash And Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM Standard, 2019
- [37] E. Dağlı, Effect of Fly Ash Stabilization on Strength and Durability Properties of Clayey Soils, Ph.D. dissertation, Zonguldak Bülent Ecevit University, 2021.
- [38] ASTM D2166/D2166M-16, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM Standard, 2016.
- [39] ASTM D1883-16, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM Standard, 2016.
- [40] M. R. Abdi, A. Ghalandarzadeh, L. Shafiei Chafi, An Investigation into the Effects of Lime on Compressive and Shear Strength Characteristics of Fiber-Reinforced Clays. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 13 (4), (2021), 885–898, doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.008.
- [41] P. Yohanna, A. Q. Babatunde, R. Juwonlosi, A. O. Eberemu, P. T. Adekile, R. K. Etim, I. Kazeem, Assessing the Unconfined Compressive Strength of Lime Stabilized Soil Blended with Iron Ore Tailings Using Probabilistic and Artificial Neural Networks Approach. *Hybrid Adv.* 11, (2025), 100563, doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100563.
- [42] J. E. Bowles, *Engineering Properties of Soil and Their Measurements*, 4th ed., McGraw-Hill, Boston, 1992.



BETONARME OKUL BİNALARI İÇİN TBDY-2018 UYUMLU SİSMİK GÜÇLENDİRME ALTERNATİFLERİ: PERFORMANS VE OPERASYONEL SÜREKLİLİK ODAKLI BİR KARŞILAŞTIRMA

* İbrahim SAİL¹ , Mehmet Kevser DERDİMAN² 

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 31.03.2026, Kabul/Accepted: 26.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Türkiye gibi aktif sismik kuşaklarda yer alan ülkelerde, mevcut okul binalarının deprem güvenliği ve güçlendirme süreçlerindeki operasyonel süreklilik kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, 1997 deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış dört katlı betonarme bir okul binasının TBDY-2018 esaslarına göre sismik performansı değerlendirilmiş ve farklı güçlendirme alternatifleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Mevcut durumun analizinde doğrusal olmayan çok modlu itme analizi kullanılmış olup, yapının DD-1 ve DD-3 deprem yer hareketi düzeylerinde hedef performans kriterlerini sağlayamadığı ve "Göçme Bölgesinde" kaldığı tespit edilmiştir. Bu sismik yetersizliği gidermek amacıyla; içten perde eklenmesi (üç farklı konfigürasyon), kolon mantolama (10 cm ve 15 cm) ve dıştan perde eklenmesi stratejileri geliştirilmiştir. Analiz bulguları, kolon mantolama yönteminin DD-3 deprem düzeyinde "Sınırlı Hasar" hedefini karşılamada yetersiz kaldığını göstermiştir. Buna karşılık, içten ve dıştan perde ekleme yöntemlerinin her ikisi de yapısal performans hedeflerini başarıyla sağlamıştır. Ancak, operasyonel süreklilik kriteri dikkate alındığında; içten perde uygulamasının binanın tahliyesini gerektireceği ve eğitim faaliyetlerini kesintiye uğratacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak, hem TBDY-2018 sismik performans hedeflerini tam olarak karşılaması hem de eğitimde operasyonel sürekliliği güvence altına alması bakımından dıştan perde ekleme yöntemi en optimum ve sürdürülebilir çözüm olarak önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Sismik güçlendirme, performans analizi, doğrusal olmayan itme analizi, dıştan perdeleme, operasyonel süreklilik.

TBDY-2018 COMPLIANT SEISMIC RETROFITTING ALTERNATIVES FOR RC SCHOOL BUILDINGS: A COMPARISON FOCUSED ON PERFORMANCE AND OPERATIONAL CONTINUITY

ABSTRACT

In countries located in active seismic zones such as Turkey, the earthquake safety of existing school buildings and the operational continuity during retrofitting processes are of critical importance. In this study, the seismic performance of a four-story reinforced concrete school building designed according to the 1997 seismic code was assessed based on TBDY-2018 criteria, and different retrofitting alternatives were comparatively investigated. Non-linear multi-mode pushover analysis was employed for the evaluation of the existing state, revealing that the structure failed to meet the target performance criteria under DD-1 and DD-3 earthquake ground motion levels, remaining in the "Collapse Region". To mitigate this seismic inadequacy, strategies including the addition of internal shear walls (three different configurations), column jacketing (10 cm and 15 cm), and the addition of external shear walls were developed. Analytical findings indicated that the column jacketing method was insufficient in satisfying the "Limited Damage" target at the DD-3 earthquake level. In contrast, both internal and

external shear wall addition methods successfully met the structural performance targets. However, when the operational continuity criterion was considered, it was determined that the internal shear wall application would require the evacuation of the building and disrupt educational activities. Consequently, the addition of external shear walls is recommended as the optimum and most sustainable solution, as it not only fully satisfies the TBDY-2018 seismic performance objectives but also ensures operational continuity in education.

Keywords: Seismic retrofiting, performance analysis, nonlinear pushover analysis, external shear wall, operational continuity.

1. Giriş (Introduction)

Aktif fay hatları üzerinde yer alan Türkiye’de, yıkıcı depremlerin ardından mevcut yapı stokunun performansının değerlendirilmesi ve yetersiz yapıların güncel mühendislik standartlarına uygun hale getirilmesi hayati bir zorunluluktur [1]. Özellikle kamu binaları, deprem sonrası kullanım önceliği ve yüksek doluluk oranları nedeniyle stratejik bir öneme sahiptir; ancak geçmiş yıllardaki tasarım kodlarına göre inşa edilen bu yapıların, güncel sismik talep ve performans kriterlerini karşılama noktasında ciddi yetersizlikler barındırdığı bilinmektedir [2]. Literatürde mevcut okul ve atölye binalarının sismik güvenlikleri üzerine yapılan güncel araştırmalar; bu yapıların büyük çoğunluğunun yeni deprem yönetmeliklerinin öngördüğü performans hedeflerini (Kontrollü Hasar, Sınırlı Hasar vb.) sağlayamadığını, yapısal elemanlarda yetersiz kesme/eğilme kapasiteleri bulunduğunu ve acil güçlendirme gereksinimleri olduğunu somut verilerle ortaya koymaktadır [3–5]. Bu noktada, 2007 yılında yürürlüğe giren yönetmelik ile 2018 yılında güncellenen Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) [6] arasındaki felsefi ve teknik farklılıklar, mevcut binaların değerlendirilme sürecini doğrudan etkilemektedir. TBDY-2018 ile birlikte etkin kesit rijitliklerinin kullanımı ve şekil değiştirme esaslı değerlendirme kriterlerinin zorunlu hale gelmesi, yapıların deprem güvenliğinin belirlenmesinde daha hassas ancak daha sıkı bir denetim mekanizması oluşturmuştur [7].

Mevcut yapıların güvenliğinin tespit edilmesinde kullanılan doğrusal olmayan analiz yöntemleri, yapının gerçek sismik davranışını ve plastikleşme bölgelerini daha gerçekçi bir şekilde modelleme imkanı sunmaktadır [8]. Bu analizler sonucunda sismik performansı yetersiz bulunan binalar için çeşitli güçlendirme stratejileri geliştirilmekte; betonarme binaların güçlendirilmesinde özellikle perde duvar ilavesi, yapının rijitliğini ve yatay yük taşıma kapasitesini artırmada en etkin yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır [9]. Perde duvarların yapı sistemine entegrasyonu, hem eğilme hem de kesme etkilerine karşı yapının direncini artırırken, doğru konfigürasyon ve yerleşim ile yapının deprem altındaki tepe deplasmanlarını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır [10].

Bununla birlikte, bir binanın güçlendirilmesi sadece yapısal bir müdahale değil, aynı zamanda maliyet ve kullanım sürekliliği odaklı bir karar sürecidir. Güçlendirme projelerinde bina maliyet oranını ve yöntemin seçilebilirliğini etkileyen temel faktörler arasında binanın yaşı ve konumu kadar, müdahale süresince binanın kullanımına devam edilip edilemeyeceği de kritik rol oynamaktadır [11]. Özellikle okul binaları gibi eğitimin kesintisiz devam etmesi gereken yapılarda, binanın tahliyesini gerektiren içten müdahaleler yerine operasyonel sürekliliği sağlayan dıştan güçlendirme yaklaşımları sismik performans hedeflerini sağlamanın yanı sıra sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından da en rasyonel çözümü sunmaktadır.

Türkiye’deki mevcut yapı stoğunun karakteristik zayıflıkları göz önüne alındığında, dıştan güçlendirme yöntemleri binanın kullanımını kesintiye uğratmadan can güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Literatürdeki güncel çalışmalar, özellikle korozyon, eksik donatı ve 6-8 MPa gibi oldukça düşük beton dayanımına sahip, ülkemizde sıkça rastlanan "çıkmalı" binalar için yapıyı dıştan saran ve sırtlayan yenilikçi müdahalelerin zorunlu olduğunu vurgulamaktadır [12]. Bu bağlamda yapılan deneysel ve analitik araştırmalar, sünekliği yetersiz betonarme çerçevelere dışarıdan entegre edilen betonarme perde duvarların, en az iç perdeler kadar pozitif bir etki yaratarak sistemin yatay yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini ekonomik bir şekilde artırdığını kanıtlamaktadır [13].

Yapısal taşıyıcı sistemi makro düzeyde destekleyen dış perde duvar uygulamalarının yanı sıra, eleman bazlı güçlendirmede Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozitlerin kullanımı da öne çıkan bir diğer etkili dış müdahale yöntemidir. Yüksek çekme mukavemetine sahip olan FRP malzemeler, özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde deprem enerjisini tüketme kapasitesini ve yapının sünekliğini belirgin şekilde artırmaktadır [14]. Sonuç olarak, hem dış betonarme perdelerle sistemi kucaklayan sistem iyileştirmeleri

hem de FRP gibi ileri teknoloji malzemelerle yapılan yüzey sargılamaları, mevcut riskli yapıların yapısal kusurlarını telafi etmek ve yapıların ekonomik ömrünü uzatmak için güvenilir, kanıta dayalı alternatifler sunmaktadır.

Bu yapısal iyileştirmelerin ötesinde, dıştan güçlendirme stratejilerinin kesintisiz kullanım imkanı sunması, çağdaş deprem mühendisliğinin temel odak noktalarından biridir. Kaplan'ın çalışmalarında vurgulandığı üzere; kapasitesi düşük mevcut binaları içten zorlayarak güçlendirmek yerine, binayı dıştan adeta bir "sandık" gibi saran ve sismik talepleri mevcut zayıf çerçeveden bağımsız olarak sönmüleyen dış taşıyıcı sistemlerin inşası çok daha rasyonel bir yaklaşımdır [12]. Kaplan, geleneksel içten müdahalelerin gerektirdiği yıkım, hafriyat ve yeniden iskan gibi dolaylı maliyetler göz önüne alındığında; dıştan güçlendirmelerin fayda/maliyet oranını optimize ettiğini ve yapısal hasarı Sınırlı Hasar (SH) seviyelerinde tutarak TBDY-2018 hedeflerini başarıyla karşıladığını belirtmektedir [12].

Literatür incelendiğinde, mevcut betonarme yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve farklı güçlendirme tekniklerinin yapısal davranışa etkileri üzerine çok sayıda çalışmaya rastlanmaktadır [7,9,10]. Ancak bu çalışmaların büyük çoğunluğu, güçlendirme yöntemlerini yalnızca taşıma kapasitesi, rijitlik artışı ve tepe deplasmanı gibi saf yapısal parametreler üzerinden değerlendirmektedir. İster konut ister ticari veya kamu yapısı olsun, aktif kullanımda olan binaların güçlendirme sürecindeki en büyük engellerden biri tahliye zorunluluğudur. Tahliye sürecinin getirdiği sosyo-ekonomik maliyetler, barınma veya hizmet kesintileri ve operasyonel duraksamalar, mühendislik tasarımlarında çoğunlukla göz ardı edilmektedir. Bir güçlendirme projesinin başarılı sayılabilmesi için TBDY-2018 performans hedeflerini sağlaması teknik bir zorunluluk olsa da; uygulamanın binanın tahliyesini gerektirip gerektirmediği, yöntemin pratikteki uygulanabilirliğini ve kabul edilebilirliğini belirleyen asıl unsurdur. Sismik güvenlik ile tahliyesiz onarım (operasyonel süreklilik) kavramlarını eş zamanlı olarak optimize eden kapsamlı karşılaştırmalı çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, güçlendirme stratejilerini salt yapısal kapasite bağlamından çıkarıp "kullanım sürekliliği" filtresinden geçirerek söz konusu akademik boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu bağlamda çalışmanın temel argümanı; aktif sismik kuşakta yer alan mevcut binaların depreme karşı güçlendirilmesinde yalnızca güncel yönetmelik (TBDY-2018) hedeflerini sağlayan yapısal kapasite artışının yeterli olmadığı, tahliyesiz onarım kriterinin de tasarıma entegre edilmesi gerektiği ve bu çok boyutlu optimizasyonda dıştan perde duvar ilavesinin sosyal, ekonomik ve yapısal açılardan en sürdürülebilir çözüm olduğudur. Bu doğrultuda, 1997 yönetmeliğine göre tasarlanmış dört katlı bir kamu binası vaka çalışması olarak ele alınmış ve aşağıdaki temel araştırma hedefleri belirlenmiştir: (i) Eski deprem yönetmeliğine göre inşa edilmiş mevcut yapının TBDY-2018 esaslarına göre doğrusal olmayan çok modlu itme analizi ile sismik performans düzeyinin belirlenmesi, (ii) önerilen içten perde, dıştan perde ve kolon mantolama güçlendirme alternatiflerinin yapının yatay yük taşıma kapasitesi ve rijitliği üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve (iii) sismik performans hedeflerini sağlayan söz konusu alternatiflerin, binanın tahliye zorunluluğu ve operasyonel süreklilik kriterleri bağlamında uygulanabilirliklerinin değerlendirilmesidir.

2. Materyal ve Metot (Materials and Methods)

2.1. İncelenen binanın özellikleri (Properties of the investigated building)

Bu çalışmada, 1997 deprem yönetmeliği esaslarına göre tasarlanmış ve inşa edilmiş, Denizli ili merkez ilçesinde (Enlem: 37.77741°, Boylam: 29.08705°) bulunan, zemin kat ve üç normal kattan oluşan toplam dört katlı mevcut bir kamu (okul) binası vaka çalışması olarak ele alınmıştır. Binanın kat yüksekliği 3.5 metre, toplam yüksekliği ise 14 metredir. Taşıyıcı sistem bütünüyle betonarme çerçevelerden oluşmaktadır (Şekil 1). Döşemeler 15 cm kalınlığında tasarlanmış olup üzerlerinde karo kaplama yükü, kirişlerde ise duvar yükleri tanımlanmıştır. Yapı önem katsayısı (I) 1.5, hareketli yük katılım katsayısı (n) ise 0.6 olarak seçilmiştir.

Yapının malzeme özellikleri, inşa edildiği dönemin şartlarını yansıtacak şekilde beton sınıfı C13 ve donatı sınıfı S420 (boyuna), S220 (enine) olarak kabul edilmiştir. Orijinal donatı projesi temin edilemediği için yapının mevcut donatı detayları, STA4-CAD V14.1 programında [15] kendi zati ağırlığı altında, DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre yapılan doğrusal hesaplamalar neticesinde yönetmeliğin izin verdiği minimum donatı oranları baz alınarak oluşturulmuştur. İncelenen yapının

genel özellikleri ve malzeme parametreleri Tablo 1'de, mevcut donatı konfigürasyonunu temsil eden örnek eleman detayları Tablo 2'de sunulmuştur.

Sismik analizlerde kullanılacak tasarım parametreleri, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası verileri kullanılarak TBDY-2018 esaslarına göre belirlenmiştir. Yapının oturduğu yerel zemin sınıfı ZC olarak kabul edilmiş ve tasarım spektrumunu belirleyen sismik katsayılar ile konum bilgileri Tablo 3'te özetlenmiştir. Mevcut durumun performans analizi ile güçlendirme modellemeleri, bu parametreler doğrultusunda STA4-CAD V14.1 paket programı kullanılarak üç boyutlu ve şekil değiştirme esaslı yöntemlerle gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Mevcut binaya ait genel yapısal özellikler ve malzeme parametreleri (General structural properties and material parameters of the existing building)

Parametre	Değer
Bina Kullanım Amacı	Kamu (Okul) Binası
Yapı Önem Katsayısı (I) / Hareketli Yük Katsayısı (n)	1.5 / 0.6
Kat Sayısı / Kat Yüksekliği	4 / 3.5 m
Toplam Yapı Yüksekliği	14 m
Beton Sınıfı (Mevcut E2)	C13 ($f_{ck} = 130 \text{ kg/cm}^2$)
Boyuna Donatı Çeliği Sınıfı	S420 ($f_{yk} = 4200 \text{ kg/cm}^2$)
Enine Donatı Çeliği Sınıfı	S220 ($f_{ywk} = 2200 \text{ kg/cm}^2$)
Beton Hacim Ağırlığı	2.5 t/m ³
Zemin Yatak Katsayısı (K_0)	3000 t/m ³

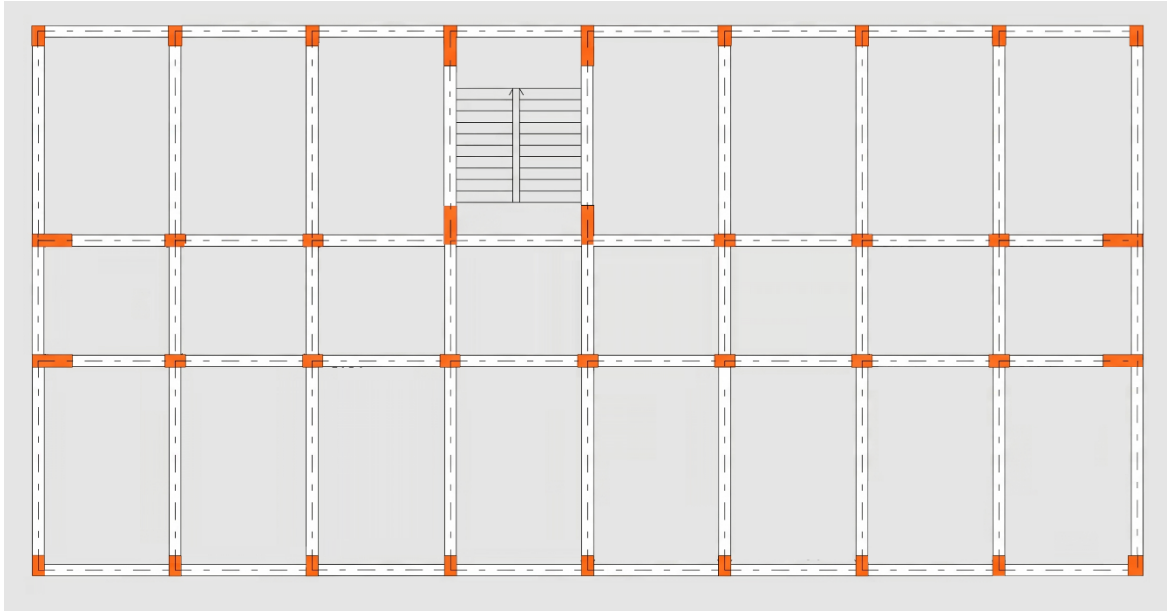
Tablo 2. Mevcut binayı temsil eden kolon ve kiriş donatı detayları (Column and beam reinforcement details representing the existing building)

Eleman Türü	Boyutlar (b/h) (cm)	Boyuna Donatı (Üst / Başlık)	Boyuna Donatı (Alt / Gövde)	Enine Donatı
Kolon	30 x 50 ve 50 x 30	2Ø14	1Ø14	Ø8 / 25
Kolon	25 x 100 ve 100 x 30	2Ø14	3Ø14	Ø8 / 25
Kiriş	25 x 50	2Ø14 (Montaj)	2Ø14 (Düz)	Ø8 / 25

Tablo 2'de mevcut taşıyıcı sistemi temsil eden farklı boyutlardaki kolon elemanları ile standart bir kirişin (K101) kesit ve donatı bileşenleri sunulmaktadır. Doğrusal hesaplamalar sonucunda elde edilen donatı analiz raporları incelendiğinde, taşıyıcı sistemde genel olarak 30 cm x 50 cm ve 50 cm x 30 cm boyutlarındaki standart kolonların bulunduğu, bununla birlikte taşıyıcı çerçeveyi destekleyen 25 cm x 100 cm ve 100 cm x 30 cm boyutlarında yatay yük taşıyıcı büyük elemanların da (kısa perde/kolon) yer aldığı görülmektedir. Donatı konfigürasyonları değerlendirildiğinde, tüm katlarda ve eleman türlerinde başlık donatısı olarak 2 adet Ø14 mm donatı kullanıldığı; gövde donatılarının ise standart kolonlarda 1 adet Ø14 mm, büyük boyutlu elemanlarda ise 3 adet Ø14 mm olarak zemin kattan dördüncü kata kadar sabit şekilde devam ettiği tespit edilmiştir. Tüm düşey taşıyıcılarda enine donatı olarak Ø8 mm çapında ve 25 cm aralıklı etriyeler kullanılmıştır. Sistemdeki bu donatı düzeni ve boyut farklılıkları, binanın doğrusal olmayan performans analizinde kapasite hesaplarının temelini oluşturmaktadır.

Tablo 3. Binaya ait konum ve sismik tasarım parametreleri TBDY-2018 (Location and seismic design parameters of the building TBDY-2018)

Parametre	Değer / Sınıf
Konum Koordinatları	37.77741° Enlem, 29.08705° Boylam
Yerel Zemin Sınıfı	ZC
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	1a
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	6
Harita Spektral İvme Katsayıları	$S_g = 1.140$; $S_1 = 0.263$
Tasarım Spektral İvme Katsayıları (DD-1)	$S_{DS} = 2.566$; $S_{D1} = 0.766$
Tasarım Spektral İvme Katsayıları (DD-2)	$S_{DS} = 1.368$; $S_{D1} = 0.395$
Tasarım Spektral İvme Katsayıları (DD-3)	$S_{DS} = 0.572$; $S_{D1} = 0.152$

**Şekil 1.** Modellenen okul binasının kat plan görünümü (Floor plan view of the modeled school building)

2.2. Doğrusal olmayan çok modlu itme analizi yöntemi (Nonlinear multi-mode pushover analysis method)

İncelenen mevcut yapının ve güçlendirme alternatiflerinin sismik performans düzeylerini belirlemek amacıyla, TBDY-2018 esaslarına uygun olarak şekil değiştirme esaslı "Doğrusal Olmayan Çok Modlu İtme Analizi" (Modal Artımsal İtme Analizi) yöntemi kullanılmıştır. Geleneksel kuvvet esaslı doğrusal hesap yöntemleri, deprem sırasında yapısal elemanlarda meydana gelen elastik ötesi (plastik) şekil değiştirmeleri, enerji sönümleme kapasitelerini ve hasar mekanizmalarını tam olarak yansıtamamaktadır [7]. Bu kısıtlamayı aşmak için tercih edilen çok modlu itme analizi, yapının kapasitesini ve deprem talebini gerçekçi bir şekilde modelleyerek yapısal performansın adım adım takip edilmesine olanak tanır.

Çok modlu itme analizinin temel mantığı; sadece birinci (hâkim) titreşim modunu dikkate alan tek modlu analizlerin aksine, yapının kütle ve rijitlik dağılımına bağlı olarak elde edilen birden fazla titreşim modunun etkisini (yüksek mod etkilerini) eş zamanlı olarak hesaba katmasıdır. Bu yöntemde, seçilen her bir titreşim modu için, o moda ait şekil değiştirmelerle orantılı olan yatay deprem yükleri yapıya adım adım artırılarak (artımsal olarak) etki ettirilir. Bu itme adımları boyunca taşıyıcı sistem elemanlarının akma sınırını aşarak plastik mafsallara (hasar) oluşturduğu bölgeler ardışık olarak tespit edilir ve yapının doğrusal olmayan kapasite eğrisi (taban kesme kuvveti - tepe yer değiştirmesi ilişkisi) elde edilir [8]. Standart itme analizlerinin yüksek binalardaki yetersizliklerini gidermek amacıyla literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen ve TBDY-2018'de de standartlaştırılan bu yaklaşım, literatürde "Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi" olarak da adlandırılmaktadır [7,16]. Bu yöntemin geleneksel analizlerden en büyük farkı, yapısal sistemde mafsallaşma (akma) meydana geldikçe yapının rijitlik matrisinin ve dolayısıyla dinamik karakteristiklerinin (periyot ve mod şekillerinin) sürekli olarak

değiştiğini hesaba katmasıdır. TBDY-2018 esaslarına göre uygulanan çok modlu itme analizinin temel algoritması şu aşamalardan oluşmaktadır:

- Başlangıçta yapının çatlamış kesit etkin rijitlikleri kullanılarak doğrusal elastik durum için özdeğer (modal) analizi yapılır ve ilk titreşim modları belirlenir.
- Dikkate alınan her bir mod için, o modun şekline ve kütle katılımına orantılı yatay yük vektörleri oluşturulur.
- Yatay yükler veya modal tepe yer değiştirmeleri, taşıyıcı sistemdeki herhangi bir elemanda ilk plastik mafsalsal (akma) oluşana kadar orantısız olarak artırılır.
- Akma durumunda, ilgili elemanın rijitliği güncellenerek (azaltılarak) tüm yapının teğet rijitlik matrisi yeniden oluşturulur ve değişen sistem için yeni bir özdeğer analizi yapılarak güncel mod şekilleri ve periyotlar hesaplanır.
- Yeni sistem dinamikleri üzerinden itme adımına devam edilir ve ardışık her akma durumunda (kapasite eğrisi boyunca) elde edilen modal tepkiler (yer değiştirme, iç kuvvet ve plastik dönmeler) kümülatif olarak toplanır.
- Hedeflenen performans noktasına (yer değiştirmesine) ulaşıldığında, farklı modlardan elde edilen kümülatif tepkiler "Karelerin Toplamının Karekökü (SRSS)" veya tam karesel birleştirme (CQC) gibi istatistiksel kurallarla birleştirilerek nihai sismik talepler tayin edilir.

2.3. Güçlendirme modellerinin tasarımı (Design of retrofitting models)

Mevcut durum analizinde tespit edilen yapısal yetersizlikleri (Göçme Bölgesi durumu) gidermek amacıyla üç farklı güçlendirme stratejisi geliştirilmiş ve STA4-CAD üzerinde modellenmiştir:

- **İçten Perde Eklenmesi:** Yapı rijitliğini artırmak amacıyla mimari plana uygun olarak üç farklı konfigürasyonda (farklı akslara yerleştirilmiş) betonarme iç perde duvarlar modele entegre edilmiştir.
- **Kolon Mantolama:** Çerçeve sistemin kesme ve eğilme kapasitesini artırmak için mevcut kolonlara 10 cm ve 15 cm kalınlıklarında iki farklı betonarme mantolama uygulaması tasarlanmıştır.
- **Dıştan Perde Eklenmesi:** Binanın dış cephesine, mevcut taşıyıcı sistemle ankrajlanarak beraber çalışması sağlanan dış perde duvarlar eklenmiştir.

Uygulanan tüm güçlendirme modellerinde, yeni eklenen elemanların beton sınıfı C30 olarak kabul edilmiş ve yapısal analizler TBDY-2018 limitleri dahilinde tekrarlanmıştır.

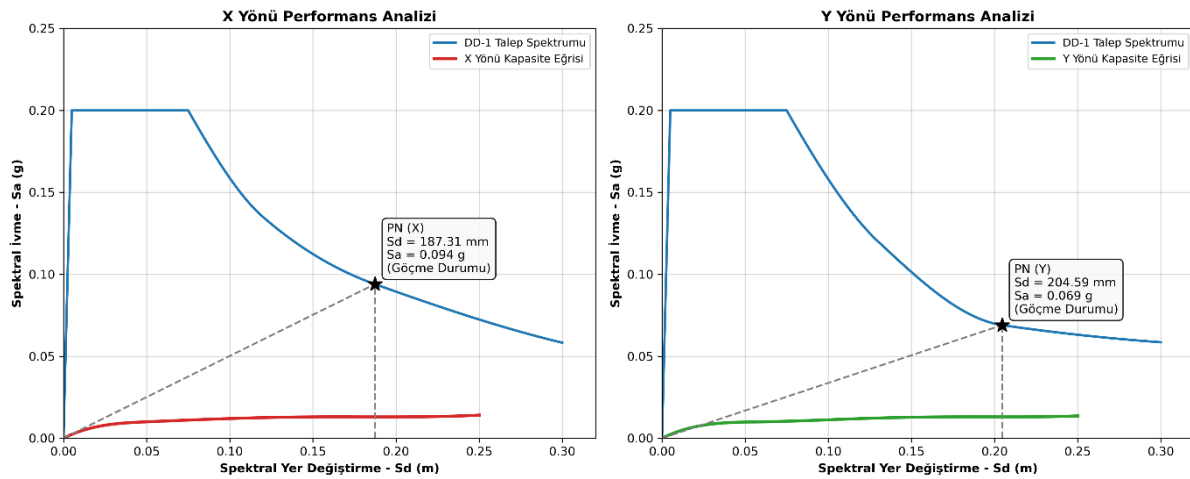
2.4. Operasyonel süreklilik ve tahliye kısıtı değerlendirme prosedürü (Evaluation procedure for operational continuity and evacuation constraint)

Çalışmanın en temel argümanını oluşturan en idealin seçilmesi aşamasında, sismik açıdan yeterli bulunan güçlendirme alternatifleri "operasyonel süreklilik" filtresinden geçirilmiştir. Bu prosedürde, bir güçlendirme yönteminin uygulanabilirliği; yapısal müdahalenin bina iç mekan kullanımına olan fiziksel müdahale seviyesi, eğitim faaliyetlerini kesintiye uğratma potansiyeli ve binanın tamamen tahliye edilme zorunluluğu parametreleri üzerinden kalitatif olarak değerlendirilmiştir. Sadece TBDY-2018 hedef performans seviyesini sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda tahliye gerektirmeyen ve eğitim kesintisine (operasyonel duraksamaya) yol açmayan yöntem, optimum ve sürdürülebilir çözüm olarak sınıflandırılmıştır.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. Mevcut durum performans analizi bulguları (Performance analysis findings of the existing state)

1997 deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış mevcut 4 katlı okul binasının doğrusal olmayan çok modlu itme analizi sonuçları, yapının TBDY-2018 sismik performans hedeflerini sağlamada ciddi yetersizlikleri olduğunu ortaya koymuştur. DD-1 (50 yılda aşılma olasılığı %2) deprem yer hareketi altında yapılan analizde; yapının X yönündeki taban kesme kuvveti kapasitesi $V_{bmax} = 157$ ton, Y yönünde ise $V_{bmax} = 113$ ton olarak hesaplanmıştır (Şekil 2). Bu düşük dayanım seviyeleri altında, performans noktasına karşılık gelen spektral yer değiştirme (S_d) değerleri X ve Y yönleri için sırasıyla 187.28 mm ve 204.55 mm olarak belirlenmiştir. Bu durum, yapının DD-1 seviyesi için öngörülen Kontrollü Hasar (KH) performans hedefini karşılayamadığını ve "Göçme Durumu (GÖ)" bölgesine geçtiğini kanıtlamaktadır. Nitekim eleman bazında yapılan incelemelerde, DD-1 depremi altında göçme bölgesindeki kiriş hasar oranı %54.2'ye ulaşarak yönetmelik sınırını (%20) ihlal etmiş, kolon kesme kuvveti (V_c) oranı ise %100'e ulaşarak taşıyıcı sistemin gevrek kesme göçmesi riskini doğrulamıştır. Okul binaları için servis depremi olan DD-3 düzeyinde ise hedef Sınırlı Hasar (SH) olmasına karşın bina bu hedefi de sağlayamayarak KH performans seviyesinde kalmıştır. Bu bulgular ışığında, mevcut yapının güçlendirilmesinin teknik bir zorunluluk olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Mevcut yapının DD-1 deprem düzeyi için birleştirilmiş X ve Y yönleri doğrusal olmayan kapasite ve talep spektrumları (Combined non-linear capacity and demand spectra of the existing structure for the DD-1 earthquake level in X and Y directions)

3.2. Kolon mantolama ve içten perde güçlendirme bulguları (Column jacketing and internal shear wall retrofitting findings)

Mevcut yapının sismik yetersizliklerini gidermek amacıyla ilk olarak eleman bazlı kolon mantolama yöntemleri (10 cm ve 15 cm kalınlığında) incelenmiştir. 10 cm mantolama uygulanan modelde, yapı DD-1 deprem düzeyi altında düşey taşıyıcı elemanları göçme bölgesinden uzaklaştırırsa da, artan rijitliğin sismik talebi kirişlere yöneltmesi sonucu kiriş hasar oranı %39.0'a ulaşarak yönetmelik sınırını aşmış ve KH hedefini sağlayamamıştır. 15 cm mantolama modelinde ise taban kesme kuvveti X yönünde 454 tona, Y yönünde 420 tona çıkarılmış ve yapı DD-1 depremi altında KH hedefini başarıyla sağlamıştır. Ancak okul binaları için kritik olan DD-3 deprem seviyesi incelendiğinde; her iki mantolama modeli de kiriş ve kolon hasar limitlerini aşarak zorunlu SH performans hedefini sağlamada yetersiz kalmıştır.

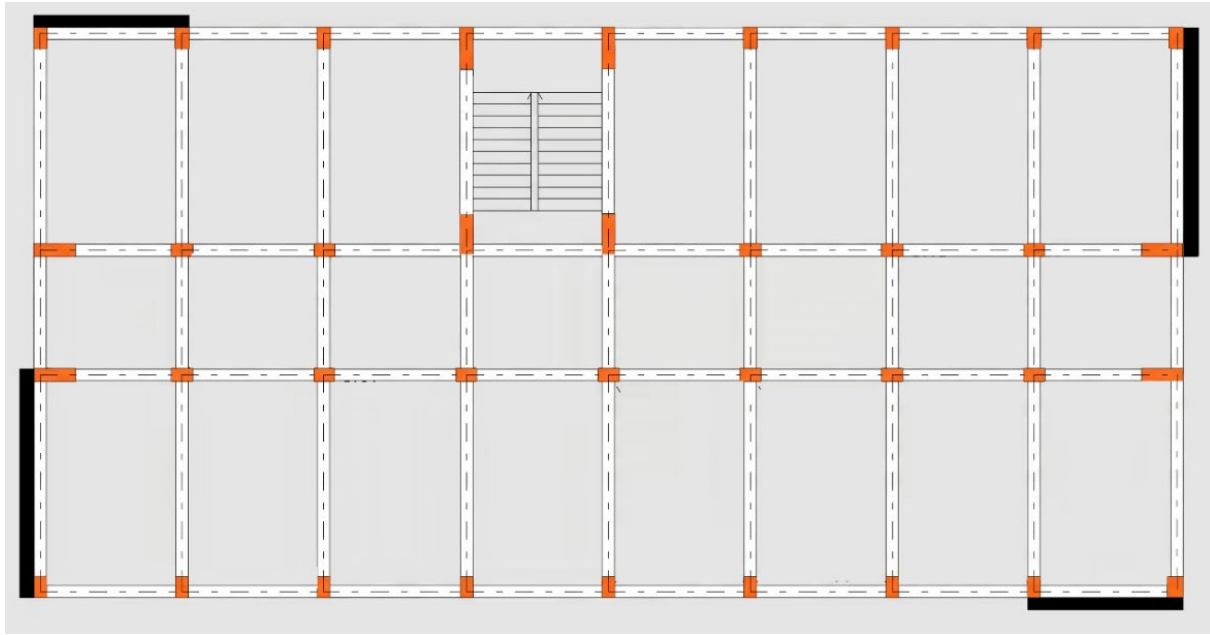
Sistem bazlı bir güçlendirme yaklaşımı olarak yapıya simetrik konumlandırılmış içten betonarme perdeler (3 farklı konfigürasyon) eklenerek analizler tekrarlanmıştır. Geliştirilen Modeller (Özellikle Model 1), taşıyıcı sistemin yan rijitliğini ve yatay yük taşıma kapasitesini (Y yönünde $V_{bmax} = 1171$ ton) önemli ölçüde artırmıştır. Analiz sonuçlarına göre içten perde uygulaması, hem DD-1 seviyesindeki KH hedefini hem de DD-3 seviyesindeki toleranssız SH hedefini başarıyla sağlayarak kiriş ve kolon hasarlarını yönetmelik limitleri (%0) içerisine çekmiştir.

3.3. Dıştan perde duvar güçlendirme ve operasyonel süreklilik bulguları (External shear wall retrofitting and operational continuity findings)

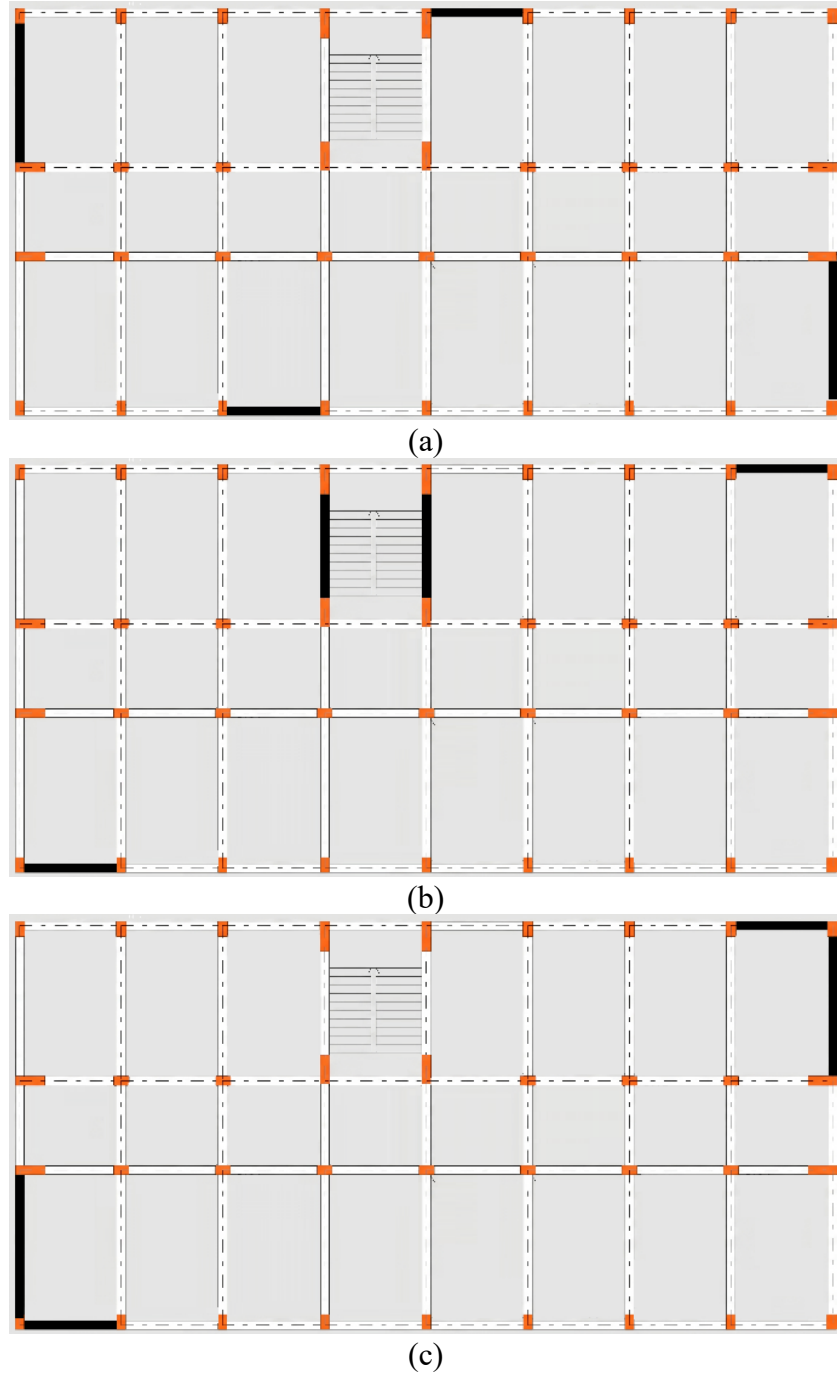
Çalışmanın temel araştırma problemi olan "tahliyesiz onarım ve operasyonel süreklilik" kısıtları doğrultusunda, binanın dış çeperlerine betonarme perdeler ilave edilerek dıştan güçlendirme modeli analiz edilmiştir (Şekil 3). Bulgulara göre, dıştan perdeli sistem DD-1 deprem düzeyi altında X yönünde 660 ton, Y yönünde ise 1218 ton gibi çok yüksek bir taban kesme kuvveti kapasitesine ulaşmıştır (Şekil 5).

Şekil 4'te, taşıyıcı sistemin yanal rijitliğini artırmak ve burulma etkilerini minimize etmek amacıyla 30 cm kalınlığında 4 adet betonarme iç perde duvarın kullanıldığı üç farklı konfigürasyon sunulmaktadır. Model 1 (Şekil 4.a), perdelerin dış aksların orta bölgelerine simetrik olarak yerleştirildiği konfigürasyonu; Model 2 (Şekil 4.b), perdelerin dış aksların köşelerine yakın konumlandırıldığı düzeni; Model 3 (Şekil 4.c) ise perdelerin yapının iç akslarında (çekirdek bölgesinde) konumlandırıldığı tasarımı temsil etmektedir.

İçten perde ilavesinin yanı sıra, çalışma kapsamında iki farklı güçlendirme stratejisi daha tasarlanarak modellenmiştir. Bunlardan ilki, çerçeve sistemin kesme ve eğilme kapasitesini artırmak amacıyla yapıda bulunan 36 adet mevcut kolona dört taraftan saracak şekilde uygulanan 10 cm ve 15 cm kalınlığındaki betonarme kolon mantolama yöntemidir. İkincisi ise, binanın dış çeperindeki köşe akslarına, mevcut taşıyıcı sistemle ankrajlanarak beraber çalışması sağlanan 30 cm kalınlığında betonarme dış perde duvar eklenmesi stratejisidir.

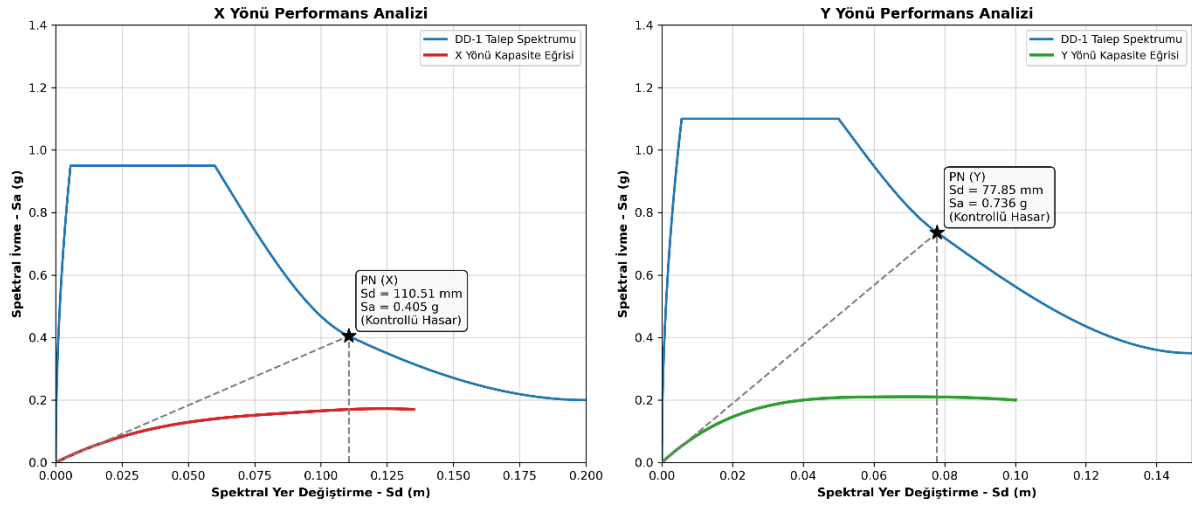


Şekil 3. Dıştan perde eklenerek güçlendirme kat plan görünümü (Floor plan view of the retrofitting with added external shear walls)

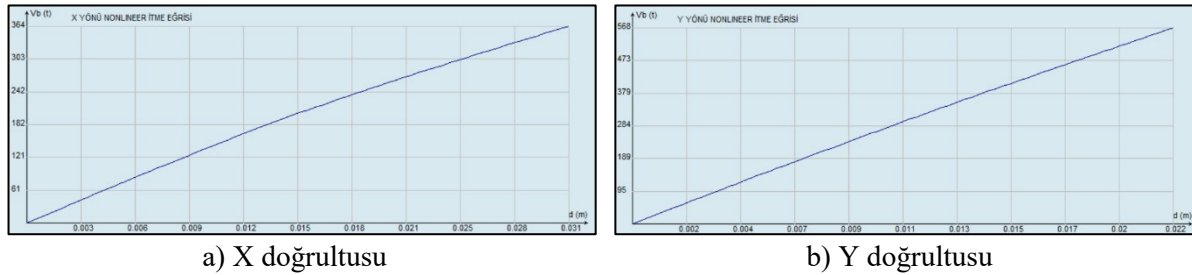


Şekil 4. İçten perde eklenmesi güçlendirme modellerine ait kat planı görünümüleri: a) Model 1 konfigürasyonu, b) Model 2 konfigürasyonu, c) Model 3 konfigürasyonu (Floor plan views of interior shear wall retrofitting models: a) Model 1 configuration, b) Model 2 configuration, c) Model 3 configuration)

Uygulanan tüm güçlendirme modellerinde, yeni eklenen elemanların (iç/dış perdeler ve mantolar) beton sınıfı C30 olarak kabul edilmiştir. Yeni eklenen elemanların donatı detaylandırması (boyuna ve enine donatılar), mevcut bina donatısı belirlenirken izlenen yöntemle benzer şekilde, sistemin DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre yapılan doğrusal analiz sonuçları doğrultusunda ve TBDY-2018'de belirtilen minimum pürsantaj sınırları dikkate alınarak analiz yazılımı (STA4-CAD) tarafından boyutlandırılmıştır.



Şekil 5. Dıştan perde eklenerek güçlendirilen yapının DD-1 deprem düzeyi için birleştirilmiş X ve Y yönleri doğrusal olmayan kapasite ve talep spektrumları (Combined non-linear capacity and demand spectra of the structure retrofitted with external shear walls for the DD-1 earthquake level in X and Y directions)



Şekil 6. Dıştan perde ile güçlendirilmiş yapının DD-3 deprem düzeyi altındaki kapasite eğrileri: a) X doğrultusu, b) Y doğrultusu (Capacity curves of the structure retrofitted with external shear walls under the DD-3 earthquake level: a) X direction, b) Y direction)

Şekil 6'da, dıştan perde eklenerek güçlendirilmiş yapının DD-3 (sık tekrarlanan) deprem yer hareketi altındaki taban kesme kuvveti - tepe yer değiştirmesi (kapasite) ilişkisi sunulmaktadır. Grafikler incelendiğinde, kapasite eğrilerinin belirgin bir akma veya plastikleşme platosu oluşturmayarak büyük ölçüde doğrusal (lineer-elastik) bir eğilim sergilediği dikkat çekmektedir. Bu doğrusal trend, yapının DD-3 servis depremi talepleri altında elastik sınırlarını aşmadığını, taşıyıcı elemanlarda inelastik şekil değiştirmelerin (hasarın) meydana gelmediğini ve sistemin hedeflenen Sınırlı Hasar (SH) performans kriterini başarıyla sağladığını fiziksel olarak kanıtlamaktadır.

Sayısal bulgular değerlendirildiğinde; X yönünde sistemin 31 mm tepe yer değiştirmesi sınırında 364 ton taban kesme kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Buna karşılık Y yönünde, yapısal perde elemanlarının yerleşim konfigürasyonundan kaynaklanan daha yüksek bir yanıl rijitlik etkisiyle, 22 mm gibi oldukça sınırlı bir deplasman seviyesinde 568 ton yatay yük taşıma kapasitesine erişilmiştir. Taşıyıcı sistemin her iki doğrultuda da yüksek rijitlik ve doğrusal davranış sergilemesi, güçlendirilmiş okul binasının servis depremleri sonrasında yapısal bütünlüğünü koruyarak operasyonel sürekliliğini kesintisiz bir biçimde sürdürebileceğini doğrulamaktadır.

Performans değerlendirmesinde; dıştan perdeleme uygulanan yapının DD-1 deprem düzeyinde kiriş ve kolonlarının hiçbirisi göçme veya ileri hasar seviyesine geçmemiş (%0.0) ve bina KH performans hedefini başarıyla sağlamıştır. Okul binaları için en kritik denetim olan DD-3 deprem seviyesinde ise, tüm taşıyıcı elemanların %100'ü Sınırlı Hasar (SH) bölgesinde kalarak, belirgin hasar bölgesini aşan hiçbir kolon veya kiriş rastlanmamıştır.

Tablo 4. Dıştan perde ile güçlendirilmiş yapının DD-1 deprem düzeyi için kiriş ve kolon hasar yüzdeleri ile kesme kuvveti dağılımları (Beam and column damage percentages and shear force distributions for the DD-1 earthquake level of the structure retrofitted with external shear walls)

Kat No	Eleman Türü	-X (SH / BH) %	+X (SH / BH) %	-Y (SH / BH) %	+Y (SH / BH) %
4	Kiriş	66.1 / 33.9	66.1 / 33.9	32.2 / 67.8	32.2 / 67.8
	Kolon	99.1 / 0.9	100.0 / 0.0	100.0 / 0.0	100.0 / 0.0
3	Kiriş	49.2 / 50.8	49.2 / 50.8	6.8 / 93.2	6.8 / 93.2
	Kolon	100.0 / 0.0	100.0 / 0.0	100.0 / 0.0	100.0 / 0.0
2	Kiriş	49.2 / 50.8	49.2 / 50.8	6.8 / 93.2	6.8 / 93.2
	Kolon	28.6 / 71.4	28.6 / 71.4	10.2 / 89.8	10.2 / 89.8
1	Kiriş	49.2 / 50.8	49.2 / 50.8	6.8 / 93.2	6.8 / 93.2
	Kolon	20.4 / 79.6	13.0 / 87.0	56.8 / 43.2	46.9 / 53.1

Not: Yapılan analizler sonucunda hiçbir kat ve doğrultuda kiriş ile kolon elemanlarının İleri Hasar (İH) veya Göçme Bölgesi (GB) seviyesine geçmediği (%0.0) tespit edilmiş olup, tablodaki tüm elemanlar Sınırlı Hasar (SH) ve Belirgin Hasar (BH) bölgelerinde dağılım göstermektedir.

Çalışma kapsamında dıştan perde eklenerek güçlendirilen modelin DD-1 deprem yer hareketi (50 yılda aşılma olasılığı %2) altındaki eleman bazlı hasar dağılımları Tablo 4'te özetlenmiştir. Yapılan performans değerlendirmesi sonucunda, binanın zemin katı dahil tüm katlarında ve her iki asal doğrultusunda (-X, +X, -Y, +Y) kiriş ve kolon elemanlarının hiçbirinin İleri Hasar (İH) veya Göçme Bölgesi (GB) seviyesine geçmediği (%0.0) tespit edilmiştir. Tüm taşıyıcı elemanlar, yapısal güvenliğin korunduğunu ifade eden Sınırlı Hasar (SH) ve Belirgin Hasar (BH) sınırları içerisinde kalmıştır. TBDY-2018'de Kontrollü Hasar (KH) performans hedefi için kirişlerde %35'e kadar İH oluşumuna izin verildiği göz önüne alındığında, elde edilen %0.0'lık İH oranı, uygulanan dıştan perde modelinin yatay taşıyıcı eleman kapasitelerini güvenlik sınırlarının oldukça üstüne taşıdığını kanıtlamaktadır.

Düşey taşıyıcılar özelinde incelendiğinde ise tüm kolonların %0.0 göçme riskiyle SH ve BH bölgelerinde çalıştığı görülmektedir. Zemin katta BH oranlarının daha yüksek olması (Örneğin -Y yönünde %89.8), sisteme kazandırılan yüksek rijitliğin taban kesme kuvvetlerini karşılamadaki başarısını yansıtmakta olup; DD-1 deprem seviyesinde beklenen doğrusal olmayan davranışla (enerji sönmüleme) tamamen uyumludur. Bu veriler, güçlendirilmiş yapının TBDY-2018 KH performans kriterlerini eksiksiz bir biçimde karşıladığını ve yönetmelikçe kabul edilebilir sınırların çok altında hasar alarak can güvenliğini sağladığını doğrulamaktadır.

TBDY-2018 kapsamında okul binaları için DD-3 (sık tekrarlanan) deprem yer hareketi düzeyinde hedeflenen Sınırlı Hasar (SH) performans hedefi doğrultusunda yapılan değerlendirmeler, dıştan perde eklenerek güçlendirilen modelin yüksek bir sismik başarı gösterdiğini kanıtlamaktadır. Analiz sonuçlarına göre, binanın tüm katlarında ve her iki asal doğrultusunda (-X, +X, -Y, +Y) kiriş ve kolon elemanlarının tamamı (%100) Sınırlı Hasar (SH) bölgesinde kalmıştır. Taşıyıcı sistemin hiçbir elemanında Belirgin Hasar (BH), İleri Hasar (İH) veya Göçme Bölgesi (GB) seviyelerine geçiş gözlenmemiştir (%0.0). Yönetmeliğin okul binaları için DD-3 deprem düzeyinde bilhassa düşey taşıyıcılarda aradığı "hiçbir kolonun hasar sınırını aşmaması (%0 tolerans)" kuralı, kolonların istisnasız bir şekilde Sınırlı Hasar (SH) bölgesinde yer almasıyla eksiksiz olarak sağlanmıştır. Bu durum, güçlendirilmiş yapının DD-3 depremi talepleri altında doğrusal olmayan davranışının son derece sınırlı kaldığını ve taşıyıcı elemanlarında onarım gerektirecek herhangi bir yapısal hasar oluşmayacağını açıkça göstermektedir.

Doğrusal olmayan performans analizi sonuçları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, dıştan perde duvar uygulamasının incelenen okul binasını her iki deprem düzeyinde de (DD-1 ve DD-3) TBDY-2018 hedeflerine ulaştırdığı tespit edilmiştir. DD-1 deprem yer hareketi altında Kontrollü Hasar (KH) hedefi sağlanırken, "Güçlü Kolon – Zayıf Kiriş" tasarım prensibinin etkili biçimde korunduğu ve sismik enerjinin beklendiği üzere sünük davranış gösteren kiriş elemanlarında sönmülendiği görülmüştür. İH veya GB seviyesine ulaşan kiriş (%0.0 < %35) ve kolon (%0.0 < %20) oranlarının yönetmelikçe izin verilen sınırların çok altında kaldığı, ayrıca plastikleşen kolonlarda gevrek kesme hasarı riskinin bulunmadığı (%0.0 < %30) doğrulanmıştır. DD-3 deprem düzeyinde ise hedeflenen SH performansının %100 oranında sağlanması, binanın genelinde elastik davranışın hâkim olduğunu kanıtlamıştır.

Çalışma kapsamında 4 katlı mevcut okul binası için analiz edilen üç farklı güçlendirme stratejisinin (mantolama, içten perde ve dıştan perde) sismik yeterlilik ve uygulanabilirlik bağlamındaki karşılaştırması belirgin bulgular ortaya koymuştur:

- Eleman bazlı bir yaklaşım olan 10 cm ve 15 cm kolon mantolama yöntemleri, yapısal rijitliği bir miktar artırsa da, artan sismik taleplerin kirişlere veya alt kat kolonlarına yığılması sebebiyle yönetmeliğin öngördüğü KH ve SH performans hedeflerini karşılamada yetersiz kalmıştır.
- Buna karşılık, sistem bazlı güçlendirmeler olan içten ve dıştan perde ekleme yöntemlerinin her ikisi de sismik talepleri başarıyla karşılayarak yapıyı hem DD-1 hem de DD-3 seviyeleri için kritik hasar olmaksızın güvenli sınırlara taşımıştır.

Sismik performans açısından birbirine eşdeğer bulunan bu iki başarılı perde yönteminin uygulanabilirlik ve operasyonel kısıtlar üzerinden kıyaslanması, çalışmanın nihai karar mekanizmasını oluşturmaktadır. İçten perde yönteminin mevcut mimari düzeni bozması, kullanım alanlarını daraltması ve en önemlisi inşaat sürecinde eğitim-öğretim faaliyetlerinin tamamen durdurularak binanın tahliyesini zorunlu kılması, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından ciddi bir dezavantaj teşkil etmektedir. Sonuç olarak; dıştan perde ekleme yöntemi, eğitim faaliyetlerinde operasyonel devamlılığı güvence altına alması, tahliye ve geçici iskan gerektirmemesi ve mevcut mimari dokuya asgari düzeyde müdahalede bulunması yönleriyle, incelenen yapı türü (okul binaları) için en avantajlı, sürdürülebilir ve inşa edilebilir optimum güçlendirme alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, dıştan perde bağlantılarının mevcut çerçeve ile olan kompozit çalışmasının etkinliği, ileriki çalışmalarda deneysel verilerle de desteklenmeli ve doğrulanmalıdır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, 1997 deprem yönetmeliğine göre tasarlanmış dört katlı betonarme bir okul binasının sismik performansı TBDY-2018 kapsamında doğrusal olmayan çok modlu itme analizi ile değerlendirilmiş ve üç farklı güçlendirme stratejisinin (kolon mantolama, içten perde ekleme ve dıştan perde ekleme) yapısal ve operasyonel etkinliği karşılaştırılmıştır. Araştırma bulguları ve yapılan genel değerlendirmeler doğrultusunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Mevcut Durumun Sismik Yetersizliği: Mevcut okul binası, DD-1 (50 yılda aşılma olasılığı %2) deprem yer hareketi altında beklenen Kontrollü Hasar (KH) hedefini sağlayamamış ve "Göçme Durumu (GÖ)" bölgesinde kalmıştır. Bina genelinde kirişlerin %54.2'sinin göçme bölgesine geçmesi ve kolonlarda görülen yüksek kesme kırılması riskleri (%100 V_c oranı), yapının taşıyıcı sistem bütünlüğünün tehlikede olduğunu ve güçlendirmenin acil bir teknik zorunluluk olduğunu kanıtlamıştır.
- Kolon Mantolama Yönteminin Sınırları: 10 cm ve 15 cm kalınlığındaki eleman bazlı kolon mantolama uygulamaları, yapının yanal rijitliğini artırarak kolon göçme risklerini azaltmada etkili olsa da, sisteme yansıyan yüksek sismik taleplerin kirişlere ve zemin kat kolonlarına yığılmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, okul binaları için zorunlu olan DD-3 düzeyi Sınırlı Hasar (SH) performansı her iki mantolama alternatifinde de sağlanamamıştır.
- İçten Perde Ekleme Yönteminin Yapısal Başarısı: Taşıyıcı sisteme içten betonarme perdeler eklenmesiyle elde edilen üç farklı konfigürasyonda (Model 1, Model 2, Model 3), yapının yanal ötelenmeleri etkin bir şekilde sınırlandırılmıştır. Uygulama, hem DD-1 yer hareketi altındaki KH hedefini hem de DD-3 yer hareketi altındaki SH hedeflerini yapısal elemanlarda kritik hasar (%0.0 İH ve GB oranı) oluşturmaksızın karşılamıştır. Ancak, bu yöntem binanın tamamen tahliyesini, kullanım alanlarının daraltmasını ve eğitim faaliyetlerinin durdurulmasını zorunlu kıldığı için "operasyonel süreklilik" hedefini sağlamamıştır.
- Dıştan Perde Ekleme ve Operasyonel Süreklilik: Dıştan perde ekleme yöntemi; X yönünde 660 ton, Y yönünde 1218 ton gibi yüksek bir taban kesme kuvveti kapasitesi sunarak yapının rijitlik talebini eksiksiz karşılamıştır. DD-1 (KH) ve DD-3 (SH) performans hedefleri hasar oranları %0 sınırında tutularak başarıyla sağlanmıştır. İçten perdeleme yöntemi ile eşdeğer sismik performans sunan bu alternatif, inşaat faaliyetlerini binanın dış cephesine taşıyarak iç mekân kullanımının kesintisiz devamına olanak tanımış ve tahliyesiz onarım hedefini gerçekleştirmiştir.

Sonuç olarak; mevcut okul binalarının sismik performanslarının güncel yönetmelik standartlarına (TBDY-2018) yükseltilmesinde, dıştan perde ekleme yöntemi; sismik güvenlik, ekonomik uygulanabilirlik ve eğitimde operasyonel devamlılığı bir arada sunan optimum güçlendirme alternatifi olarak belirlenmiştir. İleriki çalışmalarda, bu modelin saha koşullarındaki kompozit davranışının doğrulanması amacıyla dıştan perde ile mevcut çerçeve arasındaki ankraj bağlantılarının deneysel yöntemlerle incelenmesi önerilmektedir.

Kaynaklar (References)

- [1] M.K. Altınay, R.T. Erdem, Mevcut Betonarme Bir Kamu Binasının Taşıyıcı Sistem Güvenliğinin Araştırılması, *J. Sci. Technol. Eng. Res.* 4 (2023) 112–123. <https://doi.org/10.53525/jster.1361250>.
- [2] N. Mert, TBDY-2018 ile DBYBHY- 2007 yönetmelik hükümlerine göre tasarımı yapılan binaların performansının incelenmesi, (2025) 284–312.
- [3] M.S. Orak, Z. Celep, Gedikbulak okul binasının sismik performansı hakkında, *Tek. Dergi* 28 (2017) 7889–7896. <https://doi.org/10.18400/tekderg.304103>.
- [4] A. Gündoğay, H. Ulutaş, H. Tekeli, Mevcut atölye binalarının deprem güvenliğinin incelenmesi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Derg.* 10 (2019) 755–768. <https://doi.org/10.24012/dumf.432136>.
- [5] T. Kap, E. Özgan, M.M. Uzunoğlu, Betonarme bir okul binasının 2018 deprem yönetmeliğine göre incelenmesi, *Duzce Univ. J. Sci. Technol.* 7 (2019) 1140–1150. <https://doi.org/10.29130/dubited.506373>.
- [6] AFAD, Türk Bina Deprem Yönetmeliği (Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar), Ankara, 2018. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf>.
- [7] I. Dalyan, B. Sahin, Evaluation of the Structural System Performance of an Existing Reinforced Concrete Building under Earthquake Loads According to the 2007 and 2018 Turkish Earthquake Codes, *Türk Deprem Arastirma Derg.* 1 (2019) 134–147. <https://doi.org/10.46464/tdad.631998>.
- [8] D. Tursun, Ö.F. Taş, E. Sayın, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY-2018) göre betonarme bir binanın perde elemanlarının hasar sınır bölgelerinin tespit edilmesi, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.* 35 (2023) 581–595. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1287311>.
- [9] B. Erdil, Y. Gündüz, Betonarme Binalar için Perde Duvar Etkinliğinin Belirlenmesi, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilim. Derg.* 10 (2021) 655–669. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.898353>.
- [10] Y. Efe, İ. Bedirhanoglu, Betonarme Perde Duvarların Eğilme ve Kesme Etkilerine Karşı Güçlendirilmesi Üzerine Literatür Değerlendirmesi, *DÜMF Mühendislik Derg.* 3 (2024) 663–675. <https://doi.org/10.24012/dumf.1420105>.
- [11] Z. Yılmaz, F. Çankaya, A. Karakaya, Bina maliyet oranı ve bina güçlendirme maliyetini etkileyen faktörler arasındaki ilişki 1, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.* 51 (2018) 151–174.
- [12] S.A. Kaplan, Mevcut binaların depreme karşı güvenceye alınmasında binayı sırtlayıp, kucaklayıp depremi emniyetle savacak yeni bir güçlendirme yöntemi, *Türkiye Mühendislik Haberleri Derg.* 459–460 (2010) 47–55.
- [13] Ü.S. YILMAZ, M.H. ARSLAN, M.Y. KALTAKCI, Betonarme Dış Perde Duvarla Güçlendirilmiş Çerçevelerin Dayanım Parametrelerinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle İrdelenmesi, *TUBAV Bilim Derg.* 3 (2010) 11–22.
- [14] M.M. Maraş, Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi, *Eur. J. Sci. Technol.* (2021) 108–119. <https://doi.org/10.31590/ejosat.797437>.
- [15] Sta4Cad, STA4CAD (Versiyon 14) [Bilgisayar yazılımı], (2023). <https://www.sta.com.tr>.
- [16] M.N. Aydınoglu, An Incremental Response Spectrum Analysis Procedure Based on Inelastic Spectral Displacements for Multi-Mode Seismic Performance Evaluation, *Bull. Earthq. Eng.* 1 (2003) 3–36. <http://www.springerlink.com/openurl.asp?id=doi:10.1023/A:1024853326383>.



ÇİMENTO YERİNE ATIK BAZALT TOZU İKAMESİNİN BETONUN MEKANİK VE GEÇİRGENLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

*Yusuf Tahir ALTUNCI¹, Abide GENÇER¹

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Yapı Yalıtım Teknolojisi Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 08.04.2026, Kabul/Accepted: 02.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Atık bazalt tozunun (ABT) çimento ikame malzemesi olarak kullanılması, sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Bu bağlamda çalışmada, çimento yerine %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ABT'ü ikame edilerek, ABT'ü ikameli beton numuneleri hazırlanmıştır. Üretilen beton numuneleri 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. 28 günün sonunda sırasıyla sertleşmiş birim hacim ağırlık, basınç altında su geçirimsizliği, yarma ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. ABT'nun %20 oranına kadar ikame edilmesi basınç dayanımını yalnızca %8.17 oranında ve birim hacim ağırlığında ise %1.98 oranında azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, ikame oranı arttıkça betonun basınç altındaki su emme oranı yükselmiş, bu da ABT içeren betonların suya doğrudan maruz kalan yapılarda kullanılmaması gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca bu çalışma, ABT kullanımıyla geleneksel çimentoya kıyasla daha düşük karbon ayak izine sahip hafif beton üretiminin mümkün olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Atık bazalt tozu (ABT), Çimento ikamesi, Beton dayanımı, Permeabilite.

EFFECT OF WASTE BASALT POWDER AS A CEMENT REPLACEMENT ON THE MECHANICAL AND PERMEABILITY PROPERTIES OF CONCRETE

ABSTRACT

The use of waste basalt powder (WBP) as a cement replacement material is significant in terms of sustainability. In this context, concrete specimens incorporating WBP were prepared by replacing cement at rates of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20%. The produced concrete samples were cured in a water tank for 28 days. At the end of the curing period, hardened unit weight, water permeability under pressure, splitting tensile strength, and compressive strength tests were conducted. Replacing cement with WBP up to 20% resulted in only an 8.17% decrease in compressive strength and a 1.98% decrease in unit weight. However, as the replacement ratio increased, the water permeability of the concrete under pressure also increased, indicating that concretes containing WBP may not be suitable for structures directly exposed to water. Additionally, this study demonstrates that the use of ABT makes it possible to produce lightweight concrete with a lower carbon footprint compared to conventional cement.

Keywords: Waste basalt powder (WBP), Cement replacement, Concrete strength, Permeability.

1. Giriş (Introduction)

Bazalt, siyah, gri veya kahverengi renkte olan volkanik kökenli magmatik bir kaya türüdür [1]. Atık bazalt tozu (ABT) ise, genellikle bazalt taşının kırılması veya öğütülmesi sırasında ortaya çıkan yüksek dayanıklılık özelliklerine sahip ince atık bir malzemedir [2].

ABT, yolların veya diğer altyapı projelerinin yapımında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilir [2]. Ayrıca ABT, çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilen alternatif bir malzemedir. Literatürde ABT'nun, beton üretiminde çimento yerine kısmi olarak ikame edilmesiyle ilgili çalışmalar mevcuttur [3-4]. Bu çalışmalarda genel amaç çimento yerine kullanılacak, alternatif malzemelerin araştırılmasıdır. Ancak, karışımlardaki malzeme oranları ve diğer özellikler, projenin gereksinimlerine bağlı olarak tasarlanmalıdır. Özellikle kaliteli malzeme kullanmak, düşük su/çimento oranları belirlemek, doğru katkı maddeleri kullanmak ve iyi karıştırma ve sıkıştırma işlemleri uygulamak gerekmektedir.

Konu ile ilgili literatürde yapılmış bazı önemli çalışmalar şu şekildedir: Kaçak vd. (2024) yapmış oldukları çalışmalarında; baraj çıkış bölgesine yerleştirilen palplanş duvarlarının, sızıntı oranını en aza indiren ve düşey emniyet katsayısını en üst düzeye çıkaran çözüm olduğu sonucuna varmışlardır [5]. Chen vd. (2024), geçirgen betonun mezo yapısının tanımlanmasına yönelik olarak önerilen yöntemlerin, yalnızca işlem verimliliği bakımından değil; aynı zamanda tanıma doğruluğu ile agregalar, gözenekler ve çimento bağlayıcı fazlarını ayırt etme ve doğru biçimde tanımlama kabiliyeti açısından da geleneksel tekniklere kıyasla üstün performans sergilediğini belirlemişlerdir [6]. Özalp (2023), yüksek sıcaklıkta uygulanan etüv kürünün, SIFCON'un mekanik özellikleri ile kırılma enerjisi değerlerini buhar kürüne kıyasla daha fazla iyileştirdiği; buna karşılık etüv kürünün, kılcal su emme değerlerini artırarak buhar kürüne göre geçirgenlik performansını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir [7]. Yiğiter (2022) uçucu kül özelinde mineral katkıların; puzolanik aktiviteleri ve beton bünyesinde oluşturdukları boşluk yapısındaki değişimler nedeniyle numunelerin su geçirimsizlik değerlerini azalttığı belirlenmiştir [8]. Özocak (2021) beton üretiminde çimento yerine %5, 10, 15 ve 20 oranlarında fındık kabuğu külü kullanarak ürettiği betonlara uygulanan taze ve sertleşmiş harç deneyleri kapsamında gerçekleştirdiği permeabilite deneyi sonucunda, kül kullanımının betonun permeabilite değerlerini azalttığını gözlemlemiştir [9]. Tuyan (2019), atık tuğla tozu ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen beton numuneleri üreterek, numunelerin karakteristik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla taze ve sertleşmiş harç numuneleri üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir [10]. Thomas ve Gupta (2016) atık lastik katkısı içeren betonların basınç, eğilme, çekme ve basınçlı su geçirimsizliği değerlerinin referans numuneye göre daha düşük olduğunu, aşınma ve su emme değerlerinin ise %10 ikame oranına kadar daha iyi değerler verdiği belirlemişlerdir [11]. Sevim ve Okumuş (2011) yapmış oldukları çalışmalarında, zeolit katkısının betonun su işleme derinliği değerini düşürerek su geçirgenliğini azalttığını; buna karşılık silis dumanı katkısının su işleme derinliği ile su geçirgenliğini artırdığını tespit etmişlerdir [12]. Binici, vd. (2010), pomzanın boşluklu yapısı ve yüksek fırın cürufunun ise agrega çimento ara yüzeyini homojen hale getirerek betonun boşluk miktarını azalttığını gözlemlemiştir [13].

Betonun birim hacim ağırlığının ve karbon ayak izinin fazla olması probleminden yola çıkarak yapılan bu çalışmada; ilk olarak çimento yerine %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ABT ikame edilerek ABT ikameli çimentolar üretilmiş, ardından ise beton numuneler üretilmiştir. ABT'nun betonun taze özelliklerine (işlenebilirlik ve birim hacim ağırlık) ve sertleşmiş özelliklerine (basınç altında su geçirimsizliği, yarma dayanımı ve basınç dayanımı) olan etkisi araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen veriler, lineer regresyon analizi ile formülize edilmiştir [2].

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

ABT ikameli betonların üretiminde; su, geleneksel akışkanlaştırıcı, CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu ile ABT ve agregalar kullanılmıştır. ABT'nun kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir [2].

Tablo 1. ABT kimyasal içeriği

Oksit	%	Oksit	%	Oksit	%
SiO ₂	47.20	CaO	10.67	TiO ₂	2.71
Al ₂ O ₃	17.51	MgO	6.95	K ₂ O	0.42
Fe ₂ O ₃	8.81	Na ₂ O	3.33	MnO	0.69

ABT'ü içeriğinde bulunan; SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ toplamı %70'i geçtiği için çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte çalışmada CEM I 42.5 R çimentosu yerine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ABT ikamesi edilmiş olup; su/bağlayıcı oranı 0.52, akışkanlaştırıcı oranı bağlayıcı ağırlığının %1'i, agregalar %65 kum ve %35 çakıl olarak belirlenmiş olup, numuneler B0, B5, B10, B15 ve B20 notasyonlarıyla tanımlanmıştır. 1m³ karışıma ait malzeme miktarları Tablo 2'de verilmiştir [2].

Tablo 2. 1m³ karışıma ait malzeme miktarları

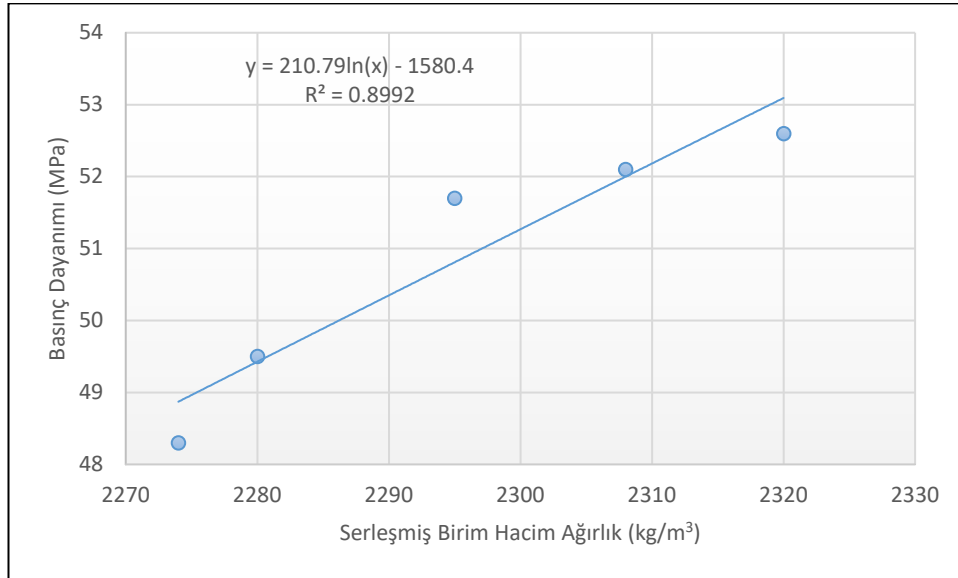
	Çimento	ABT	Su	Akışkanlaştırıcı	Kum	Çakıl
B0	320	0	166.1	3.2	1287.1	694.9
B5	304	16	166.1	3.2	1287.1	694.9
B10	288	32	166.1	3.2	1287.1	694.9
B15	272	48	166.1	3.2	1287.1	694.9
B20	256	64	166.1	3.2	1287.1	694.9

Üretim sürecinde önce agregalar beton mikserinde homojen şekilde karıştırılmış olup, ardından bağlayıcı malzeme eklenerek karışım homojen hale getirilmiştir. Sonrasında su ve akışkanlaştırıcı ilave edilerek karıştırma işlemi 5 dakika devam ettirilmiştir. Taze beton karışım sürecine ait görsel Şekil 1'de sunulmuştur [2].

**Şekil 1.** Taze beton karışım sürecine ait görsel

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Çalışma kapsamında üretilen ABT ikameli 150×150×150 mm boyutlarındaki küp numunelere, sertleşmiş birim hacim ağırlık, TS EN 12390-8 (2019) standardına göre basınç altında su işleme derinliği [14], TS EN 12390-6 (2024) standardına göre yarma dayanımı [15] ve TS EN 12390-3 (2019) standardına göre 28 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş birim hacim ağırlık ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki Şekil 2'de verilmiştir [2].

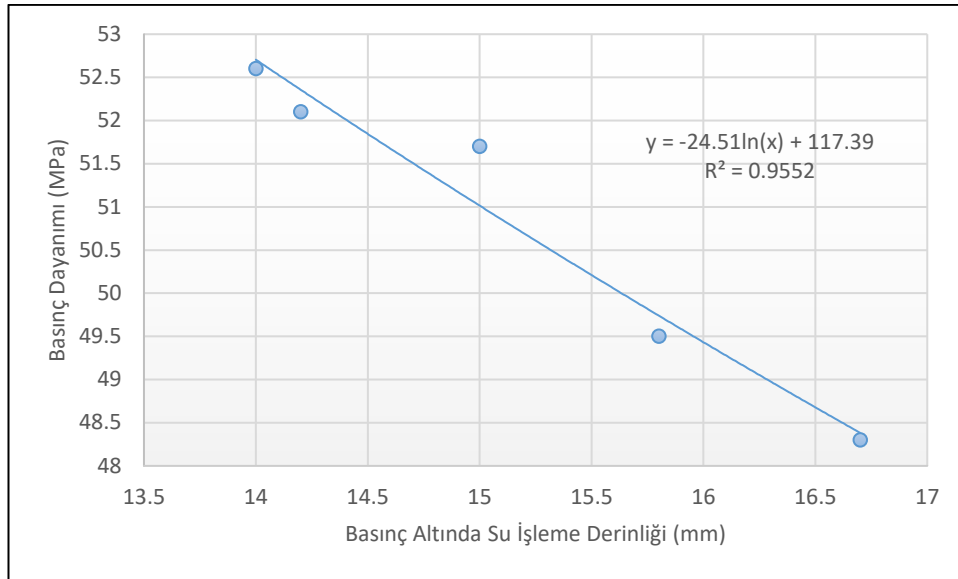


Şekil 2. Sertleşmiş birim hacim ağırlık ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki

ABT ikameli betonların sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri ile basınç dayanımları arasındaki en yüksek ilişki ($R^2=0.8992$) Denklem 1’de verilen logaritmik eğri denklemi ile elde edilmiştir [2].

$$y = 210.79\ln(x) - 1580.4 \quad (1)$$

Denklem 1’e göre artış logaritmiktir. Bu yüzden; sertleşmiş birim hacim ağırlıktaki küçük artışlar dayanımı olumlu yönde etkiler ve belli bir noktadan sonra etki giderek azalır. Basınç altında su işleme derinliği ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki Şekil 2’de verilmiştir [2].

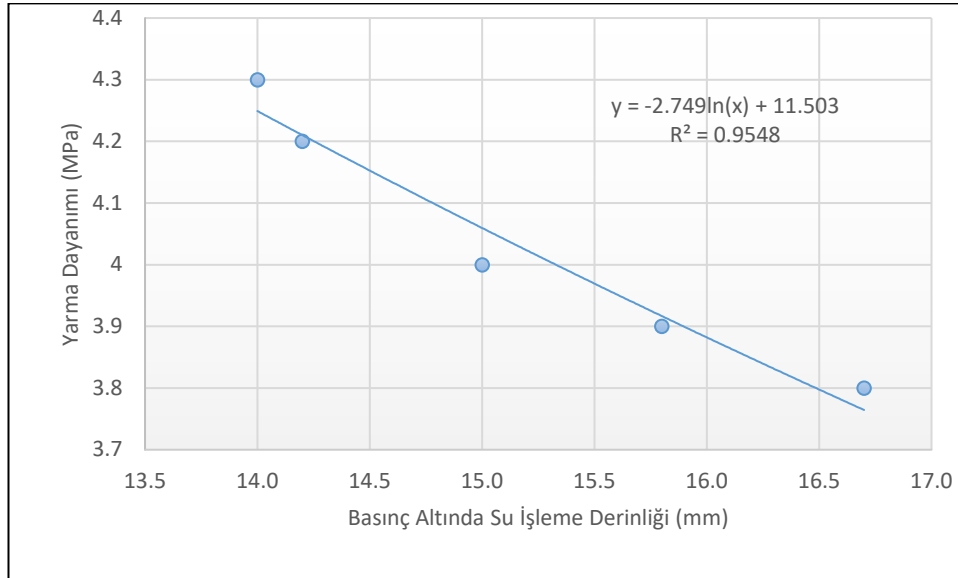


Şekil 2. Basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanımı değerleri arasındaki ilişki

ABT ikameli betonların basınç altında su işleme derinliği ile basınç dayanım değerleri arasındaki en yüksek ilişki ($R^2=0.9552$) Denklem 2’de verilen logaritmik eğri denklemi ile elde edilmiştir [2].

$$y = -24.51\ln(x) + 117.39 \quad (2)$$

Şekil 2’ye göre su işleme derinliği arttıkça basınç dayanımının azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, geçirgenliğin artması ile iç yapının olumsuz etkilediğini göstermektedir. Basınç altında su işleme derinliği ile yarma dayanımı deney sonuçları arasındaki ilişki Şekil 3’de verilmiştir [2].



Şekil 3. Basınç altında su işleme derinliği ile yarma dayanımı değerleri arasındaki ilişki

ABT ikameli betonların basınç altında su işleme derinliği ile yarma dayanımı değerleri arasındaki en yüksek ilişki ($R^2=0.9548$) Denklem 3’de verilen logaritmik eğri denklemi ile elde edilmiştir [2].

$$y = -2.749\ln(x) + 11.503 \quad (3)$$

Şekil 3’den su işleme derinliği arttıkça yarma dayanımının azaldığı anlaşılmaktadır. Bu negatif logaritmik ilişki, betonun suya karşı geçirgenliğinin arttığı durumlarda yarma dayanımının da azaldığını göstermektedir [2].

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

ABT’nun çimento ikame malzemesi olarak değerlendirilmesi ve çimento üretiminden kaynaklanan karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamak amacıyla yapılan bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur [2].

- Sertleşmiş birim hacim ağırlık deney sonuçlarına göre en yüksek değer B0, en düşük değer B20 numunesinde elde edilmiştir; B0’a kıyasla B5’te %0,52, B10’da %1,29, B15’te %3,41 ve B20’de %4,05 azalma görülmüştür.
- Basınç altında su işleme derinliği deney sonuçlarına göre en düşük değer B0, en yüksek değer B20 numunesine aittir; B0’a göre B5’te %1,43, B10’da %7,14, B15’te %12,86 ve B20’de %19,29 artış meydana gelmiştir.
- Yarma dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek değer B0, en düşük değer B20 numunesinde ölçülmüş; B0’a kıyasla B5’te %2,33, B10’da %6,98, B15’te %11,63 ve B20’de %13,95 azalma belirlenmiştir.
- 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarına göre en yüksek değer B0, en düşük değer B20 numunesine aittir; B0’a göre B5’te %0,95, B10’da %1,71, B15’te %5,89 ve B20’de %8,17 azalma tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, %20’ye kadar ABT’u ikamesi betonun birim hacim ağırlığında yaklaşık %1,98 oranında azalma sağlamakta; bu durum betonun hafifletilmesine katkı sunarken mekanik dayanımda belirgin bir kayba yol açmadan çevre dostu bir alternatif oluşturmaktadır. Elde edilen bulgular, çevresel etkilere dayanıklı ve yüksek performanslı beton karışımlarının tasarımı için önemli bir bilimsel temel sunmaktadır [2].

5. Teşekkür (Acknowledgements)

Bu çalışma, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi öğrencisi Abide GENÇER'in yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

6. Kaynaklar (References)

- [1] S.A. Özgünler, Tarihi yapılarda kullanılan volkanik tüflerin konservasyonu üzerine bir araştırma: Od taşı örneği, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [2] A. Gençer, Atık Bazalt Tozu (ABT) ikameli betonların geçirimsizlik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2025.
- [3] M. Uysal, Mineral katkıları kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının incelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [4] V. Akyüncü, M.T. Cihan, Bazalt tozu katkılı harçların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2) (2019), 697–707. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.636998>
- [5] B. Kaçak, E. Ordu, R. Mutlu, Sonlu farklar yöntemi kullanılarak geçirimsiz baraj tabanına yerleştirilen palplanş perdesinin yerinin belirlenmesi, International Journal of Engineering Research & Development, 16(1) (2024), 356–372.
- [6] D. Chen, Y. Li, J. Tao, Y. Li, S. Zhang, X. Shan, Z. Zhou, Deep learning-based segmentation model for permeable concrete meso-structures, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 39 (2024), 3626–3645. <https://doi.org/10.1111/mice.13300>
- [7] F. Özalp, Kür koşullarının çimento bulamacı modifiye lifli betonun (SIFCON) kırılma enerjisi ve geçirimsizlik özelliklerine etkileri, Journal of the Institute of Science and Technology, 13(1) (2023), 406–418. <https://doi.org/10.21597/jist.1195890>
- [8] H. Yiğiter, Farklı bağlayıcılarla üretilmiş betonların geçirimsizlik karakteristiklerinin değişik test yöntemleri ile incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(6) (2022), 812–817.
- [9] M. Özocak, Fındık kabuğu külünün puzolan malzeme olarak kullanılması ile üretilen betonun tarımsal yapılarda kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [10] M. Tuyan, Atık tuğla tozunun mineral katkı olarak kullanımının kendiliğinden yerleşen betonun taze hal, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(2) (2019), 540–548. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.547882>
- [11] B.S. Thomas, R.C. Gupta, Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber, Journal of Cleaner Production, 113 (2016), 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>
- [12] U.K. Sevim, N. Okumuş, Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(2) (2011), 57–63.
- [13] H. Binici, A.H. Sevinç, M.Y. Durgun, Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri, KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1) (2010), 1–14.
- [14] TS EN 12390-8. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 8: Basınç Altında Su İşleme Derinliğinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2019.
- [15] TS EN 12390-6. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2024.
- [16] TS EN 12390-3. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2019.



MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE VERİ KALİTESİ KURALLARININ OTOMATİK OLUŞTURULMASI VE UYGULANMASI: BANKACILIK SEKTÖRÜ ÖRNEĞİ

Arif KOYUN¹, *Mehmet Halit UÇAN¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 09.04.2026, Kabul/Accepted: 01.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Dijital bankacılık ekosisteminde artan veri hacmi, veri kalitesinin finansal karar süreçleri üzerindeki etkisini daha görünür hâle getirmiştir. Özellikle müşteri bazlı analizlerde eksik, hatalı veya tutarsız veriler; kredi risk değerlendirmeleri, fiyatlama stratejileri ve kârlılık hesaplamaları üzerinde doğrudan etkiler yaratmaktadır. Bu çalışma, bankacılık sektöründe müşteri verilerine ilişkin veri kalitesi problemlerinin makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşımla otomatik olarak tespit edilmesini ve uygun veri kalitesi kurallarının önerilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada senaryo (sentetik) müşteri veri seti kullanılmış, veri kalitesi etiketleri tanımlanmış ve makine öğrenmesi modeli aracılığıyla kolon bazlı kural öneri mekanizması geliştirilmiştir. Kullanıcı onayı sonrasında uygulanan veri kalitesi kuralları ile müşteri ve terim bazlı veri kalite skorları hesaplanmış ve iyileştirme etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, makine öğrenmesi destekli veri kalitesi yönetiminin manuel süreçlere kıyasla daha sistematik, ölçeklenebilir ve izlenebilir bir yapı sunduğunu göstermektedir. Ayrıca veri kalitesi iyileştirmelerinin müşteri kârlılığı analizlerinin doğruluğunu artırarak finansal performansa olumlu katkı sağlayabileceği ortaya konulmuştur. Çalışma, veri kalitesi yönetimini teknik bir kontrol mekanizması olmaktan çıkarak stratejik ve finansal bir değer unsuru olarak ele almaktadır. Geliştirilen Rastgele Orman (Random Forest) modeli kural önerisinde test veri seti üzerinde yüksek başarı göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Veri kalitesi, Makine öğrenmesi, Müşteri kârlılığı, Otomatik kural üretimi, Veri kalitesi skora, Bankacılık analitiği.

AUTOMATIC GENERATION AND IMPLEMENTATION OF DATA QUALITY RULES USING MACHINE LEARNING: A CASE STUDY IN THE BANKING SECTOR

ABSTRACT

The increasing volume of data in the digital banking ecosystem has made the impact of data quality on financial decision-making processes more visible. In customer-based analyses, incomplete, inaccurate, or inconsistent data directly affect credit risk assessments, pricing strategies, and profitability calculations. This study aims to automatically detect data quality issues in customer data within the banking sector using a machine learning-based approach and to propose appropriate data quality rules. A scenario-based (synthetic) customer dataset was used, data quality labels were defined, and a column-level rule recommendation mechanism was developed through a machine learning model. After user approval, data quality rules were applied, and both customer-level and attribute-level data quality scores were calculated to analyze improvement effects. The findings demonstrate that machine learning-supported data quality management provides a more systematic, scalable, and traceable structure compared to manual processes. Furthermore, improvements in data quality enhance the accuracy of customer profitability analyses and contribute positively to financial performance. The study approaches data quality management not merely as a technical control mechanism but as a strategic and financial value driver. The developed Random Forest model demonstrated high success in proposing rules on the test dataset.

Keywords: Data quality, Machine learning, Customer profitability, Automated rule generation, Data quality scoring, Banking analytics.

1. Giriş (Introduction)

Dijital dönüşümün hızlanmasıyla birlikte bankacılık sektörü, en yoğun veri üreten alanlardan biri hâline gelmiştir. Günlük müşteri işlemleri, kredi tahsis ve izleme süreçleri, ödeme sistemleri, dijital bankacılık kanalları ve çoklu temas noktalarındaki müşteri etkileşimleri sonucunda oluşan veriler, bankaların hem operasyonel hem de stratejik karar mekanizmalarının temelini oluşturmaktadır. Bu gelişim, bankaları yalnızca finansal hizmet sağlayıcı kurumlar olmaktan çıkarak, büyük ölçekli veri yöneten ve ileri analitik kapasiteye sahip teknoloji odaklı organizasyonlara dönüştürmüştür. Böyle bir yapıda veriye dayalı karar alma yaklaşımı artık bir tercih değil, zorunluluk hâline gelmiştir.

Ancak veri hacmindeki artış tek başına rekabet avantajı sağlamamaktadır. Asıl belirleyici unsur, verinin kalitesidir. Güvenilir, tutarlı, doğru ve güncel olmayan veriler üzerine inşa edilen analizler, hatalı sonuçlar üretebilmekte ve bu durum doğrudan karar süreçlerine yansımaktadır. Bankacılık sektöründe veri kalitesi problemleri; yanlış müşteri segmentasyonu, hatalı kredi risk skorlama sonuçları, eksik gelir-gider eşleştirmeleri, yanlış kârlılık analizleri ve düzenleyici raporlama hataları gibi ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Özellikle müşteri bazlı kârlılık hesaplamaları, farklı sistem ve veri kaynaklarının entegrasyonunu gerektirdiğinden veri kalitesi sorunlarına karşı son derece hassas bir yapı sergilemektedir.

Veri kalitesi; doğruluk, bütünlük, tutarlılık, geçerlilik ve güncellik gibi birden fazla boyutu içeren çok boyutlu bir kavramdır. Bu boyutlardan herhangi birinde ortaya çıkan bir aksaklık, finansal analizlerin güvenilirliğini zedeleyebilmektedir. Örneğin müşteriye ait gelir bilgisinin eksik ya da hatalı kaydedilmesi, müşterinin bankaya sağladığı gerçek katkının yanlış hesaplanmasına neden olabilir. Bu durum yalnızca operasyonel hatalara değil, aynı zamanda stratejik seviyede yanlış kaynak tahsisine ve hatalı fiyatlama kararlarına da yol açabilmektedir.

Geleneksel veri kalitesi yönetimi yaklaşımları çoğunlukla uzman bilgisine dayalı olarak tanımlanan manuel iş kurallarına dayanmaktadır. Ancak veri hacminin, veri çeşitliliğinin ve veri üretim hızının artması, bu statik ve manuel yapıların sürdürülebilirliğini zorlaştırmıştır. Büyük veri ortamlarında kural tanımlama, izleme ve bakım süreçleri hem yüksek maliyetli hem de zaman alıcı hâle gelmektedir. Bu nedenle veri kalitesi yönetiminde daha otomatik, dinamik ve ölçeklenebilir yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Makine öğrenmesi teknikleri, son yıllarda veri kalitesi problemlerinin tespiti ve yönetimi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu yöntemler, büyük veri setleri içerisinde yer alan örüntüleri, sapmaları ve anormallikleri tespit ederek veri kalitesi açısından riskli alanların otomatik biçimde belirlenmesine imkân tanımaktadır. Böylece yalnızca mevcut hatalar saptanmakla kalmamakta, aynı zamanda veri kalitesi kurallarının veri odaklı ve sistematik bir şekilde üretilmesi mümkün olmaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımlar, manuel süreçlere kıyasla daha esnek, uyarlanabilir ve ölçeklenebilir çözümler sunarak veri kalitesi yönetiminde yeni bir paradigma oluşturmaktadır.

Bununla birlikte veri kalitesi çalışmalarının yalnızca teknik açıdan değil, finansal etkileri bakımından da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bankacılık sektöründe veri kalitesi iyileştirme faaliyetleri çoğu zaman operasyonel verimlilik veya hata azaltımı perspektifinden ele alınmaktadır. Ancak bu çalışmaların müşteri bazlı kârlılık, gelir optimizasyonu ve genel finansal performans üzerindeki etkilerinin nicel olarak ölçülmesi, veri kalitesinin stratejik önemini daha görünür kılmaktadır. Veri kalitesinin iyileştirilmesi sayesinde müşteri kârlılığı analizlerinin doğruluğu artmakta, bu da bankaların kaynak tahsisini ve fiyatlama stratejilerini daha etkin biçimde yönetmesine katkı sağlamaktadır.

Literatürde veri kalitesi ile finansal performans arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, makine öğrenmesi temelli otomatik veri kalitesi kural üretimini ve bu kuralların finansal etkilerini birlikte ele alan araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, veri kalitesi yönetimi ile finansal performans arasındaki ilişkinin bütüncül bir yaklaşımla incelenmesini önemli ve güncel bir araştırma alanı hâline getirmektedir.

Wang ve Strong (1996), veri kalitesini doğruluk, bütünlük ve tutarlılık gibi çok boyutlu bir kavram olarak tanımlamıştır [1]. Batini ve Scannapieco (2016), özellikle büyük ve dağınık sistemlerde veri kalitesi sorunlarının arttığını ve entegrasyonun kritik rol oynadığını belirtmiştir [2]. Redman (2013) ile

Huang vd. (1999), düşük veri kalitesinin hatalı kararlar, maliyet artışı ve gelir kaybına yol açtığını göstermiştir [3][4].

Son çalışmalar, veri kalitesinin regülasyon ve risk yönetimi açısından önemini vurgulamaktadır. Wong ve Wong (2021), makine öğrenmesi ile veri kalitesi tahmininin mümkün olduğunu; Martins vd. (2022) ise BCBS 239 kapsamında veri yönetişiminin stratejik hale geldiğini ortaya koymuştur [5][6]. Tiukhova vd. (2025) ise XAI tekniklerinin veri kalitesi tespitinde ve regülasyon uyumunda kritik olduğunu göstermiştir [7].

Son dönemde yapılan çalışmalar, yapay zekâ ile veri kalitesi arasındaki ilişkinin yalnızca model performansı değil, aynı zamanda operasyonel sürdürülebilirlik açısından da kritik olduğunu göstermektedir. Wang vd. (2024), veri kalitesi farkındalığı içeren derin öğrenme yaklaşımlarının eksik ve hatalı veri kaynaklı performans kayıplarını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur [10]. Zhang vd. (2025) tarafından önerilen veri kalitesi odaklı makine öğrenmesi çerçevesi ise veri kalitesi metriklerinin model geliştirme süreçlerine entegre edilmesinin daha güvenilir ve açıklanabilir sonuçlar ürettiğini göstermektedir [9].

Venkatesh vd. (2026) ise üretken yapay zekâ tekniklerinin veri temizleme, eksik veri tamamlama ve veri zenginleştirme süreçlerini otomatikleştirerek veri kalitesini hem operasyonel hem de stratejik düzeyde iyileştirdiğini ortaya koymuştur [8].

Genel olarak literatür, veri kalitesinin makine öğrenmesi destekli ve regülasyon uyumlu yaklaşımlarla ele alınması gerektiğini göstermekte; ancak otomatik kural üretimi ile finansal etkiyi birlikte inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Katkısı

Bu çalışmanın temel amacı, bankacılık sektöründe veri kalitesi problemi olan alanların makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak otomatik olarak tespit edilmesi, bu alanlara yönelik veri kalitesi kurallarının oluşturulması ve gerçekleştirilen veri kalitesi iyileştirme çalışmalarının müşteri kârlılığı üzerindeki finansal etkisinin analiz edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda bankacılık süreçlerini temsil edecek şekilde oluşturulmuş senaryo (sentetik) veri setleri kullanılmıştır.

Çalışmanın özgün katkıları şu şekilde özetlenebilir:

1. Bankacılıkta veri kalitesi ihtiyacı olan alanların makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşımla otomatik olarak belirlenmesi,
2. Makine öğrenmesi çıktılarının veri kalitesi kurallarına dönüştürülerek ETL ve SQL tabanlı süreçlerde uygulanması,
3. Veri kalitesi skorlarının iş zekâsı araçları aracılığıyla düzenli olarak izlenmesi
4. Veri kalitesi iyileştirme çalışmalarının müşteri bazlı kârlılık üzerindeki finansal etkisinin nicel olarak ortaya konulması.

Bu yönleriyle çalışma, veri kalitesi yönetimini yalnızca teknik bir süreç olarak ele almakla kalmayıp, finansal etki boyutunu da bütüncül bir çerçevede değerlendirmektedir. Elde edilen bulguların, bankacılık sektöründe veri kalitesi yönetimi ve veri odaklı karar alma süreçlerine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Araştırma tasarımı (Research Design)

Bu çalışma, bankacılık sektöründe müşteri verilerine ilişkin veri kalitesi problemlerinin makine öğrenmesi tabanlı bir yaklaşımla tespit edilmesi ve ilgili veri kalitesi kurallarının otomatik olarak önerilmesini amaçlayan uygulamalı bir araştırmadır. Araştırma nicel yöntemlere dayalı olup, senaryo (sentetik) veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın metodolojisi; müşteri veri setinin oluşturulması, veri kalitesi etiketlerinin tanımlanması, makine öğrenmesi modeli ile uygun veri kalitesi kuralının önerilmesi, kullanıcı onayı süreci ve veri kalitesi uygulamalarının gerçekleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır.

2.2. Veri Seti (Dataset)

Araştırmada kullanılan veri seti, bankacılık sektöründe müşteri bilgi yönetimi süreçlerini temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Veri seti; müşteri adı-soyadı, adres bilgileri, meslek bilgisi, telefon numarası, iletişim kanalları ve benzeri tanımlayıcı müşteri bilgilerini içermektedir.

Veri seti, gerçek bankacılık uygulamalarında karşılaşılan veri kalitesi problemlerini yansıtacak şekilde kurgulanmıştır. Bu kapsamda eksik alanlar, format hataları, tutarsız kayıtlar ve mantıksal hatalar bilinçli olarak veri setine eklenmiştir. Ayrıca her bir veri alanı için veri kalitesi durumu önceden etiketlenmiş ve bu etiketler makine öğrenmesi modelinin eğitilmesinde kullanılmıştır.

Müşteri veri seti müşteri tablosunda bulunmaktadır. Tablo 2’de müşterilerin temel bilgilerinin tutulduğu tablonun bilgileri yer alır. Müşterinin id bilgisi, künye ve iletişim bilgileri yer almaktadır.

Müşteri veri setinde ise müşterilerin bilgileri tutulmaktadır. Tablo 1’de bu verilerin detaylı gösterimi yer almaktadır. İd bilgisi sıralı halde isim ve soyisim bilgileri customer_name ve customer_surname alanlarında tutulmaktadır. Her müşterinin tckn bilgisi mevcuttur fakat önkontrol mekanizması oluşturulmadığı için kurlsız ve kontrolsüz bir şekilde giriş yapılmıştır. Doğum tarihi, cinsiyet, telefon ve e-mail bilgileri veri setindeki diğer alanlardır.

Tablo 1’de yer alan veriler, tüm veri setinin tamamını değil, yalnızca veri yapısını ve karşılaşılan hataları göstermek amacıyla seçilmiş 12 satırlık temsili bir kesiti ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan asıl sentetik veri seti, makine öğrenmesi modelinin eğitilebilmesi için hacimli olarak üretilmiş olup toplam 10.000 adet müşteri kaydından oluşmaktadır. Veri seti, bankacılık gerçeklerine uygun olarak dengesiz (imbalanced) bir yapıda kurgulanmıştır; yani hatasız kayıtların oranı, hatalı kayıtlara göre daha yüksektir.

Tablo 1. Müşteri veri seti

customer_id	customer_name	customer_surname	tckn	birth_date	gender	phone	mail
1001	Murat	Yılmaz	37432596248	16.05.2006	E	905999999999	mrtyilmaz@gmail.com
1002	Fatma	Demir	23456789036	15.06.1999	K	905312345678	fdemir@hotmail.com
1003	Serkan	Kaya	4567890123	1.01.1971	E	905388569524	serkaya25@gmail.com
1004	Buse	Çetin	56789012328	12.06.2001	K	90505987654P	yok@gmail.com
1005	Emre	Arslan	7890123466	4.08.1979	W	905454985620	emre.arslan@gmail
1006	Merve	Koç	78901234504	14.02.1988	E	905321234567	mkoc@hotmail.com
1007	Tolga	Uçan	31590123580	12.13.1999	K	905059876543	tucan12gmail@com
1008	Zeynep	Bal	22222222222	25.12.1990	E	90321234567	zbal@gmail.com
1009	Onur	Barlas	17890123466	30.01.200	K	905436265842	barlasonur@gmail.com
101	Derya	Ulusoy	78901234504	18.06.1995	E	905378781485	dsoy7@hotmail.com
1011	Burak	Güleç	67890 123456	3.11.1982	K	90532123 4567	bgüleç@gmail.com
1012	Elvan	Kurt	56789012328	32.02.1971	W	905312984351	kurtelv@hotmail.com

Tablo 2. Müşteri tablosu kolon açıklamaları

Kolon Adı	Kolon Açıklaması
customer_id	Müşteri id bilgisidir.
customer_name	Müşteri ad bilgisidir.
customer_surname	Müşteri soyad bilgisidir.
tckn	Müşteri kimlik no bilgisidir.
birth_date	Doğum tarihi bilgisidir.
gender	Cinsiyet bilgisidir.
phone	Müşteri telefon numarası bilgisidir.
mail	Müşteri mail adresi bilgisidir.

2.3. Veri kalitesi etiketleri ve kural seti (data quality labels and rule set)

Çalışmada kullanılan veri kalitesi etiketleri, bankacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan veri kalitesi boyutlarına göre tanımlanmıştır. Bu etiketler; zorunlu alan eksikliği, format hatası, değer aralığı ihlali, tutarlılık problemi ve geçerlilik ihlali gibi kategorilerden oluşmaktadır.

Ayrıca Tablo 3’de literatür ve bankacılık uygulamaları doğrultusunda oluşturulmuş bir veri kalitesi kural seti kullanılmıştır. Bu kural seti, müşteri verileri için uygulanabilecek standart veri kalitesi kontrollerini içermektedir. Makine öğrenmesi modeli, bu kural seti içerisinde hangi kuralın hangi veri alanı için uygun olduğunu belirlemek üzere eğitilmiştir.

Tablo 3. Veri kalitesi seti

Kural Terimi	Kural Açıklaması
customer_id	Sayıardan oluşmalıdır.
customer_id	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.
customer_id	4 haneli olmalıdır.
customer_id	Benzersiz olmalıdır.
customer_name	Harflerden oluşmalıdır.
customer_name	Boş olmamalıdır.
customer_surname	Harflerden oluşmalıdır.
customer_surname	Boş olmamalıdır.
tckn	Sayıardan oluşmalıdır.
tckn	TCKN formatına uygun olmalıdır.
tckn	11 haneli olmalıdır.
tckn	Benzersiz olmalıdır.
tckn	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.
birth_date	dd.mm.yyyy formatında olmalıdır.
birth_date	0 < dd < 32 olmalıdır.
birth_date	0 < mm < 13 olmalıdır.
birth_date	yyyy < (systemdate (year - 18)) olmalıdır. (18 yaşından büyük olmalıdır.)
birth_date	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.
gender	E veya K olmalıdır.
gender	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.
phone	Telefon formatına uygun olmalıdır.
phone	12 haneli olmalıdır.
phone	Sayıardan oluşmalıdır.
phone	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.
mail	Mail formatına uygun olmalıdır.
mail	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.

2.4. Makine öğrenmesi tabanlı kural öneri çalışması (Machine learning-based rule proposal study)

Makine öğrenmesi modeli, her bir veri alanını kolon adı, veri tipi ve veri değerlerinin istatistiksel özelliklerini dikkate alarak analiz etmektedir. Bu çalışmada, kural öneri sınıflandırması için Rastgele Orman (Random Forest) algoritması tercih edilmiştir. Karar ağaçlarının topluluğuna dayanan bu algoritma, aşırı öğrenmeyi (overfitting) engelleyerek yüksek doğruluk oranları sunması sebebiyle seçilmiştir.

Modelin genellenebilirliğini ve performansını ölçmek amacıyla, oluşturulan veri seti %80 eğitim (train) ve %20 test (test) seti olacak şekilde rastgele ikiye ayrılmıştır. Eğitim veri seti ile modelin örüntüleri öğrenmesi sağlanmış, test veri seti ile ise modelin hiç görmediği veriler üzerindeki kural önerme başarısı değerlendirilmiştir.

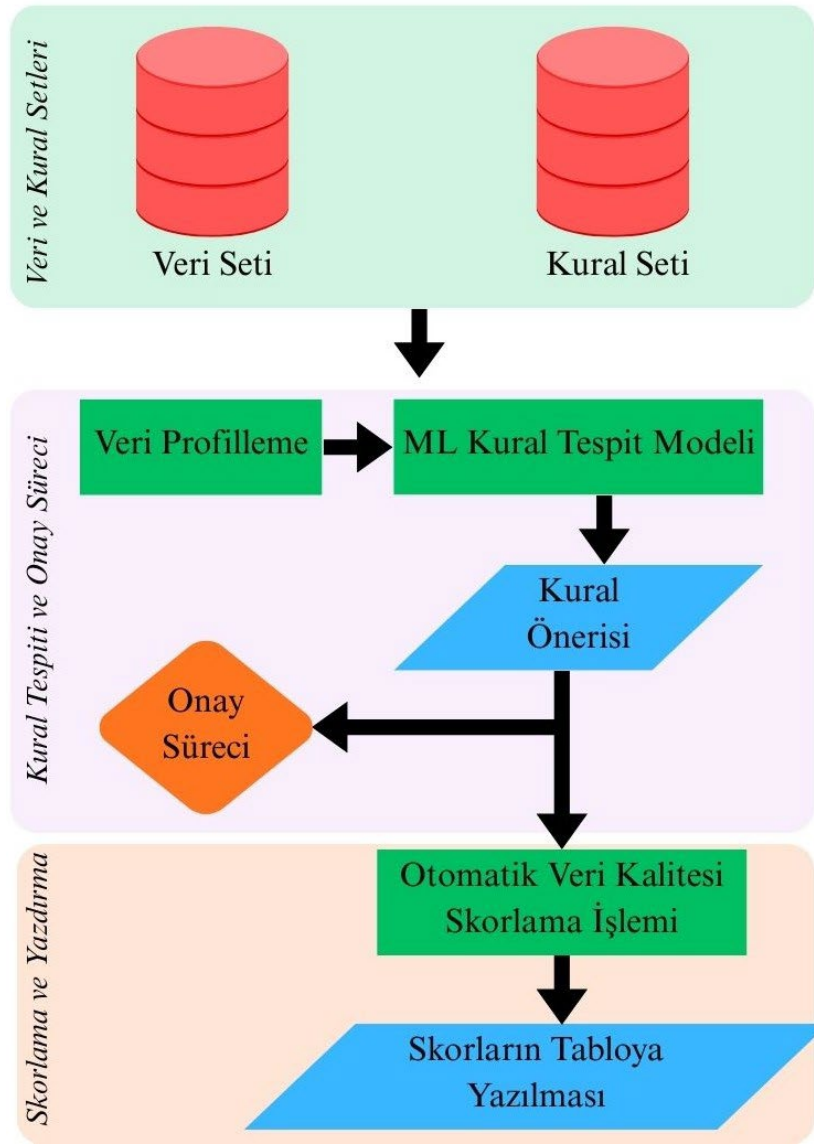
Kural öneri mekanizmasının başarısını ölçmek ve değerlendirmek için modelin test veri seti üzerindeki performansı Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall) ve F1-Skoru metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu metrikler sayesinde modelin doğru kuralı önerme yeteneği ile yanlış kural atama oranları analiz edilmiştir.

Bu yaklaşımda model, doğrudan kuralı otomatik olarak uygulamak yerine, kural önerisini kullanıcı onayına sunmaktadır. Kullanıcı, önerilen kuralı kabul edebilir, reddedebilir veya düzenleyebilir. Bu mekanizma, veri kalitesi yönetiminde insan uzmanlığının korunmasını ve hatalı otomatik kararların önlenmesini amaçlamaktadır.

2.5. Veri kalitesi uygulamaları ve skora (Data quality applications and scoring)

Kullanıcı tarafından onaylanan veri kalitesi kuralları, ETL ve SQL tabanlı süreçler aracılığıyla veri setine uygulanmıştır. Kural ihlali bulunan kayıtlar işaretlenmiş ve gerekli veri kalitesi iyileştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Veri kalitesi iyileştirme çalışmalarının etkinliğini ölçmek amacıyla doğruluk, bütünlük, tutarlılık ve geçerlilik boyutlarını içeren veri kalitesi skorları hesaplanmıştır. Hesaplanan skorlar, iş zekâsı araçları aracılığıyla görselleştirilmiş ve veri kalitesi iyileştirmelerinin etkisi düzenli olarak izlenmiştir. Süreçte Şekil 1’de gösterilen aşamalar sırayla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Süreç diyagramı

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1 Kural setinin müşteri veri seti üzerinde uygulanması (Applying the rule set on the customer dataset)

Bu çalışmada oluşturulan Tablo 1'deki müşteri veri seti önceden tanımlı Tablo 3'deki veri kalitesi kural seti kullanılarak analiz edilmiştir. Kural seti; kimlik bilgileri, iletişim bilgileri ve demografik alanlara ilişkin format, uzunluk, zorunluluk ve tutarlılık kontrollerini içermektedir.

Veri kalitesi kuralları, makine öğrenmesi tabanlı kural öneri mekanizması tarafından önerilen ve kullanıcı onayı sonrasında kesinleştirilen kurallar arasından seçilerek müşteri veri seti üzerinde çalıştırılmıştır. Uygulama sonucunda, veri setinde yer alan hatalı kayıtlar ve kural ihlalleri kolon bazında tespit edilmiştir.

Tablo 4'de ilgili kural setinin müşteri verileri üzerinde uygulandıktan sonra tespit edilen hatalı kayıtlar işaretlenmiştir.

Tablo 5'deki kurallar ilgili alanlar üzerinde uluslararası geçerliliği olan standartlar gerçekleştirilmiş ve uygulanmıştır. Hatalı verilerin tespitinde kullanılan kurallar kişisel olmamalı ve uluslararası geçerliliği olan standartlaşmış kurallar olmalıdır.

Tablo 4. Tespit edilen hatalı kayıtlar

customer_id	customer_name	customer_surname	tckn	birth_date	gender	phone	mail
1001	Murat	Yılmaz	37432596248	16.05.2006	E	905999999999	mrtyilmaz@gmail.com
1002	Fatma	Demir	23456789036	15.06.1999	K	905312345678	fdemir@hotmail.com
1003	Serkan	Kaya	4567890123	1.01.1971	E	905388569524	serkaya25@gmail.com
1004	Buse	Çetin	56789012328	12.06.2001	K	90505987654P	yok@gmail.com
1005	Emre	Arslan	7890123466	4.08.1979	M	905454985620	emre.arslan@gmail.com
1006	Merve	Koç	78901234504	14.02.1988	E	905321234567	mkoc@hotmail.com
1007	Tolga	Uçan	31590123580	12.13.1999	K	905059876543	tucan12gmail.com
1008	Zeynep	Bal	22222222222	25.12.1990	E	90321234567	zbal@gmail.com
1009	Onur	Barlas	17890123466	30.01.200	K	905436265842	barlasonur@gmail.com
101	Derya	Ulusoy	78901234504	18.06.1995	E	905378781485	dsoy7@hotmail.com
1011	Burak	Güleç	67890 123456	3.11.1982	K	905321234567	bgüleç@gmail.com
1012	Elvan	Kurt	56789012328	32.02.1971	W	905312984351	kurtelv@hotmail.com

Tablo 5. Hatalı kayıtların tespitinde kullanılan kurallar

Hatalı Kayıt	Uygulanan Kural	Hata Nedeni
101	4 haneli olmalıdır.	3 hanelidir
4567890123	11 haneli olmalıdır.	10 hanelidir
7890123466	11 haneli olmalıdır.	10 hanelidir
22222222222	TCKN formatına uygun olmalıdır.	TCKN formatı ile eşleşmez
67890 123456	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.	Boşluk içermektedir
12.13.1999	0 < mm < 13 olmalıdır.	mm değeri 13 olamaz
30.01.200	dd.mm.yyyy formatında olmalıdır.	yyy değil yyyy formatında olmalıdır
32.02.1971	0 < dd < 32 olmalıdır.	dd değeri 32 olamaz
M	E veya K olmalıdır.	E veya K değildir
W	E veya K olmalıdır.	E veya K değildir
905999999999	Telefon formatına uygun olmalıdır.	Telefon formatı ile eşleşmez
90505987654P	Sayıardan oluşmalıdır.	Harf içermektedir
90321234567	12 haneli olmalıdır.	11 hanelidir
90532123 4567	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.	Boşluk içermektedir
yok@gmail.com	Mail formatına uygun olmalıdır.	“yok” adresi kullanılamaz
emre.arslan@gmail.com	Boş olmamalı ve boşluk içermemelidir.	Boşluk içermektedir
tucan12gmail@com	Mail formatına uygun olmalıdır.	“.com” şeklinde olmalıdır
bgüleç@gmail.com	Mail formatına uygun olmalıdır.	Türkçe karakter içeremez

3.2. Müşteri ve terim veri kalite skorları hesaplama (Calculation of customer and term data quality scores)

Tablo 4’de bulunan müşteri bilgilerinde tespit edilen hatalı kayıtların skorlaması yapıp görsel olarak hazırlanması ve yönetime sunulması gerekmektedir. Müşterilerin verilerinin skorlarını takip etmek ve düzeltilen veriler sonrası skorların trend analizlerde arttığını görmek çalışma açısından önemlidir.

Kalite skoru hesaplamada Tablo 1’deki müşteri tablosunda bulunan bilgilerin hatalı kayıtları genel kayıt toplamına göre oranlanarak hatalı olmayan kayıt sayısı yüzdesi çıkartılır ve skorlama yapılır.

Müşteri bazlı veri kalite skoru hesaplanırken, Tablo 1’deki her bir müşteriye ait sütunlar (kolonlar) kontrol edilmiştir. Skolama işlemi; müşterinin hatasız (kurallara uygun) veri barındıran kolon sayısının, toplam kolon sayısına oranlanması ve 100 ile çarpılmasıyla matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\text{Müşteri Kalite Skoru} = \left(\frac{\text{Hatasız Kolon Sayısı}}{\text{Toplam Kolon Sayısı}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Örneğin 1003 no’lu müşteri için toplam 8 kolon değerlendirilmiş, 1 kolonda hata tespit edilmiş ve 7 kolon başarılı bulunmuştur. Skor hesaplaması: $(7 / 8) \times 100 = 87,5$ olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 6. Örnek müşteri veri kalite skoru hesaplama

cust ome r_id	custo mer_n ame	custo mer_s urna me	tckn	birth_date	gen der	phone	mail	skor
1003	Serkan	Kaya	4567890123	1.01.1971	E	905388569524	<u>serkaya25@gmail.com</u>	87,5
1004	Buse	Çetin	56789012328	12.06.2001	K	90505987654P	<u>yok@gmail.com</u>	75

Tablo 7’de kalite skorları hesaplamaları sonucu elde edilen skorların müşteri id bilgisiyle karşılaştırılması bulunmaktadır.

Tablo 8’de ise terimlere göre kalite skorlarının hesaplamaları yapılmıştır.

Tablo 7. Müşteri veri kalite skorları

customer_id	skor
1001	87,5
1002	100
1003	87,5
1004	75
1005	62,5
1006	100
1007	75
1008	75
1009	87,5
1010	87,5
1011	62,5
1012	75

Tablo 8. Terim veri kalite skorları

Kolon Adı	Skor
customer_id	91,67
customer_name	100
customer_surname	100
tckn	66,67
birth_date	75
gender	83,34
phone	66,67
mail	66,67

3.3. Makine öğrenmesi model performansı (Machine learning model performance)

Yöntem bölümünde kural öneri sınıflandırması için tercih edildiği belirtilen Rastgele Orman (Random Forest) algoritmasının performansı, oluşturulan test veri seti (%20) üzerinde değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda model; doğru kuralı önerme yeteneğini gösteren Doğruluk (Accuracy) metriğinde %94.2 Kesinlik (Precision) metriğinde %92.5, Duyarlılık (Recall) metriğinde %93.1 ve F1-Skoru metriğinde ise %92.8 başarı elde etmiştir. Bu yüksek skorlar, kurulan makine öğrenmesi yapısının uzman kurallarına olan bağımlılığı azaltarak doğru veri kalitesi kuralını yüksek güvenilirlikle önerebildiğini kanıtlamaktadır.

Tablo 9. Model Performans Sonuçları

Performans Metriği	Değer (%)
Doğruluk (Accuracy)	94.2
Kesinlik (Precision)	92.5
Duyarlılık (Recall)	93.1
F1-Skoru	92.8

3.4. Veri kalitesinin müşteri kârlılığına finansal etkisi (Financial impact of data quality on customer profitability)

Veri kalitesindeki iyileşmenin finansal etkisini somutlaştırmak amacıyla, veri düzeltme öncesi ve sonrası iletişim bilgilerinin doğruluğuna dayalı bir kampanya simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Hatalı telefon ve e-posta verileri nedeniyle ulaşılamayan müşterilerin veri düzeltmesi sonrasında kampanyalara dâhil edilmesiyle sağlanan potansiyel kârlılık artışı Tablo 9'da özetlenmiştir.

Tablo 10. Müşteri Karlılık Sonuçları

Durum	Toplam Müşteri Sayısı	Ulaşılabilir Müşteri Sayısı	Ulaşılabilirlik Oranı	Kampanya Geri Dönüş Oranı	Dönüş Yapan Müşteri Sayısı	Müşteri Başına Ortalama Kar Artışı	Toplam Potansiyel Karlılık Artışı
Veri düzeltme öncesi	5.000.000	3.650.000	%73	%1,20	43.800	180 TL	7.884.000 TL
Veri düzeltme sonrası	5.000.000	4.150.000	%83	%1,25	51.875	180 TL	9.337.500 TL

Veri kalitesi iyileştirmesi ile ulaşılabilir müşteri sayısı 500.000 artmış, bu da kampanyaya katılımı doğrudan yükseltmiştir. Sınırlı bir geri dönüş artışına rağmen toplam kârlılık 7,88 milyon TL'den 9,34 milyon TL'ye çıkarak yaklaşık %18 artmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Bu çalışmada, müşteri veri kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan skorlar üzerinden mevcut durum analiz edilmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda çeşitli çıkarımlar yapılmıştır. Yapılan analizler, müşteri ve terim bazlı veri kalitesinin farklı seviyelerde olduğunu ve bazı alanlarda iyileştirme ihtiyacının bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, müşteri veri kalitesi müşteri ve terim bazlı skorlar üzerinden değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular veri kalitesinin farklı seviyelerde olduğunu ortaya koymuştur. Analiz sonuçlarına göre, 0–70 aralığındaki müşterilerin kritik risk taşıdığı ve öncelikli veri düzeltme çalışmalarına ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir. 70–90 aralığındaki müşteriler için ise planlı iyileştirme aksiyonlarının uygulanması gerekmektedir. Bununla birlikte, hatasız veri oranının artırılması ve ortalama kalite skorunun yükseltilmesi, veri kalitesinin sürdürülebilirliği açısından önemli bir hedef olarak öne çıkmaktadır.

Terim bazlı incelemelerde özellikle TCKN, telefon ve e-posta alanlarında hata oranlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, veri giriş süreçlerinde yeterli kontrol mekanizmalarının bulunmadığını göstermekte olup, müşteri kayıt süreçlerinin yeniden ele alınmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda, veri giriş aşamasında otomatik doğrulama kurallarının uygulanması ve hata önleyici kontrollerin sistemlere entegre edilmesi kritik önem taşımaktadır. Özellikle bankacılık gibi müşteri odaklı sektörlerde, veri kalitesi tüm operasyonların verimliliğini doğrudan etkileyen temel bir unsurdur.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. İlk olarak, müşteri veri gizliliği politikaları gereği gerçek banka verileri yerine özellikleri ve kural ihlalleri önceden belirlenmiş 10.000 kayıttan oluşan senaryo (sentetik) bir veri seti kullanılmıştır. Gerçek dünya verilerindeki gürültü oranları model performansını farklı yönde etkileyebilir. İkinci olarak, kural öneri mekanizması, çalışma kapsamında oluşturulan ve Tablo 3'te sunulan standart veri kalitesi kural seti ile sınırlandırılmıştır; daha karmaşık iş kurallarının kapsama alınması farklı bir araştırma konusudur. Son olarak, veri kalitesi iyileştirmelerinin finansal etkisi yalnızca bir iletişim kampanyası simülasyonu üzerinden kârlılık bağlamında incelenmiş olup, kredi risk maliyetleri ve operasyonel iş yükü düşüşü gibi faktörler kapsam dışında tutulmuştur. Gelecek çalışmalarda gerçek veri setleri ve daha geniş kural kütüphaneleri ile modelin performansının değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma müşteri verileri üzerinden otomatik kural üretimi ile veri kalitesi problemlerinin tespit edilebileceğini ve bu problemlere yönelik aksiyonların sistematik şekilde planlanabileceğini göstermektedir. Gelecekte, veri kalitesi süreçlerinin gerçek zamanlı izlenmesi, makine öğrenmesi tabanlı tahminleme yöntemlerinin kullanılması ve veri kalitesi yönetiminin kurum kültürüne entegre edilmesi önerilmektedir. Bu doğrultuda, veri kalitesi çalışmalarının kurumların stratejik öncelikleri arasında yer alması, uzun vadede operasyonel verimlilik ve güvenilirlik açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

5. Kaynaklar (References)

- [1] Y. W. Wang, D. M. Strong, Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers, *Journal of Management Information Systems*, 12(4), 5–33 (1996).
- [2] C. Batini, M. Scannapieco, *Data and Information Quality: Dimensions, Principles and Techniques*, Springer (2016).
- [3] T. C. Redman, *Data Driven: Profiting from Your Most Important Business Asset*, Harvard Business Review Press (2013).
- [4] K. T. Huang, Y. W. Lee, D. M. Wang, *Quality Information and Knowledge*, Prentice Hall (1999).
- [5] K. Y. Wong, R. K. Wong, Big data quality prediction informed by banking regulation, *International Journal of Data Science and Analytics*, 12, 147–164 (2021).
- [6] J. Martins, H. S. Mamede, J. Correia, Risk compliance and master data management in banking – A novel BCBS 239 compliance action-plan proposal, *Heliyon* (2022).

- [7] E. Tiukhova, A. Salcuni, C. Oguz, M. Niglio, G. Storti, F. Forte, B. Baesens, M. Snoeck, Boosting credit risk data quality using machine learning and eXplainable AI techniques, ECML PKDD (2025).
- [8] S. K. Venkatesh, R. Sharma, P. Gupta, Enhancing Data Quality through Generative AI: An Empirical Study, Journal of Data and Information Quality (2026).
- [9] L. Zhang, M. Chen, Y. Li, A Data Quality-Aware Machine Learning Framework for Reliable AI Systems, Information Sciences (2025).
- [10] H. Wang, J. Li, X. Zhao, Data Quality-Aware Deep Learning: A Survey on Challenges and Techniques, IEEE Access (2024).



ANALYSIS OF TURBULENT HEAT TRANSFER IN A PARTIALLY WAVY CHANNEL WITH TURBULATOR

*Selma AKÇAY¹ 

¹Çankırı Karatekin University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering,
Çankırı

ABSTRACT

This study numerically examined turbulent heat transfer in a partially wavy channel containing a circular turbulator. The simulations are performed using the ANSYS Fluent program. The inlet and outlet surfaces of the channel are flat and adiabatic. A partially wavy section containing a circular turbulator exists in the middle of the channel. The wavy surfaces are maintained at a constant heat flux $q'' = 2000 \text{ W/m}^2$. The working fluid in this study is air. The standard $k-\varepsilon$ turbulence model was used as the viscous model. The Reynolds number varied in the range of $3000 \leq Re \leq 6000$. For different Reynolds numbers, the outlet temperature, surface temperature, heat transfer coefficient, Nusselt number, pressure drop, friction factor and thermohydraulic performance were calculated for both the with/without turbulator cases. The effect of the circular turbulator on velocity and temperature distributions in the channel is shared. The findings show that as the Re increases, the outlet temperature, surface temperature, and friction coefficient decrease. In addition, increasing the Re increased the heat transfer coefficient, Nusselt number, and pressure drop. In the channel containing turbulator, heat transfer and pressure drop were higher than in the channel without turbulator. The highest Nusselt number was calculated as $Nu = 55.81$ at $Re = 6000$ and in the channel with turbulator. At $Re = 6000$, heat transfer in the channel with turbulator improved by 15% compared to the channel without turbulator, but the pressure drop increased slightly. The highest THP was obtained as 1.041 at $Re=5000$ in the channel with turbulator.

Keywords: Partially wavy channel, Circular turbulator, Heat transfer enhancement, Numerical study.

TÜRBÜLATÖR İÇEREN KİSMİ DALGALI BİR KANALDA TÜRBÜLANSLI ISI TRANSFER ANALİZİ

ÖZ

Bu çalışma, dairesel türbülator içeren kısmi dalgalı bir kanalda türbülanslı ısı transferini sayısal olarak araştırmaktadır. Simülasyonlar, ANSYS Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilir. Kanalın giriş ve çıkış bölümleri düz ve adyabatiktir. Kanalın ortasında dairesel türbülator içeren kısmi dalgalı bir bölüm mevcuttur. Dalgalı yüzeyler $q'' = 2000 \text{ W/m}^2$ sabit ısı akısında tutulmaktadır. Çalışmada iş yapan akışkan havadır. Viskoz model olarak standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Reynolds sayısı $3000 \leq Re \leq 6000$ aralığında değişmiştir. Farklı Reynolds sayılarında, türbülatorlü ve türbülatorsüz durum için çıkış sıcaklığı, yüzey sıcaklığı, ısı transfer katsayısı, Nusselt sayısı, basınç düşüşü, sürtünme faktörü ve termohidrolik performans hesaplanmıştır. Kanalda dairesel türbülatorün hız ve sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi paylaşılmıştır. Elde edilen bulgular, Re artması ile çıkış sıcaklığının, yüzey sıcaklığının ve sürtünme katsayısının düştüğünü göstermiştir. Bunun yanında, Re artması, ısı transfer katsayısını, Nusselt sayısını ve basınç düşüşünü artırmıştır. Türbülatorlü kanalda ısı transferi ve basınç düşüşü türbülatorün olmadığı kanala göre daha yüksektir. En yüksek Nusselt sayısı, $Re=6000$ ve türbülatorlü durumda $Nu=55,81$ olarak hesaplanmıştır. $Re=6000$ 'de türbülatorlü kanalda ısı transferi türbülatorsüz kanala göre %15 iyileşmiş ancak basınç düşüşü biraz artış göstermiştir. En yüksek THP, $Re=5000$ 'te türbülatorlü kanalda 1,041 olarak elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kısmi dalgalı kanal, Dairesel türbülator, Isı transferi iyileştirme, Sayısal çalışma.

1. Introduction

Heat transfer enhancement is vital for many industrial processes, such as electronic circuit cooling systems, heat exchangers, thermal control of nuclear reactors, and the chemical and food industries [1, 2]. Efficient heat transfer significantly contributes to energy sustainability by increasing system efficiency and reducing costs. Accordingly, researchers are turning to different heat transfer enhancement approaches. Among these approaches, passive methods stand out in many engineering applications due to their lack of need for additional energy, simpler design, and economic advantages [3].

Wavy channels are among the most commonly used passive methods. These surfaces significantly contribute to heat transfer improvement by enlarging the surface area. Therefore, flow structure and heat transfer characteristics in wavy/corrugated channels with different geometries have been investigated in many numerical and experimental studies. As a result of these studies, it has been reported that heat transfer in this channels is higher than in straight channels, along with an increase in pressure drop [4, 5]. Wave geometries used in wavy channels include triangular geometries [6, 7], semi-circular geometries [8, 9], rectangular geometries [10], trapezoidal geometries [11], sinusoidal geometries [12, 13], and new wave geometries formed by combinations of other geometries [14, 15].

In a numerical study, Zhang and Che [16] investigated the hydraulic and thermal characteristics of grooved channels with triangular trapezoidal, rectangular, sinusoidal and elliptical profiles, and reported that the trapezoidal profile provided higher heat transfer but also increased pressure drop. Ahmed et al. [17] investigated the heat transfer and flow structure of triangular, trapezoidal and sinusoidal grooved channels and stated that the highest thermohydraulic performance was obtained in the sinusoidal channel. In their study, Salami et al. [18] reported that trapezoidal geometry provided the most heat transfer in channels with different wave geometries, while sinusoidal geometry had the best thermohydraulic performance. In another study, Shahsavari et al. [19] stated that among triangular, sinusoidal, and trapezoidal waveforms, the sinusoidal channel had the most suitable wave profile in terms of heat transfer. From these studies, it is understood that there is a general consensus that the sinusoidal wave profile is the most suitable geometry among wave channel profiles in terms of heat transfer, pressure drop, and therefore thermohydraulic performance.

Modifications such as the addition of turbulator or fins to the channel are another passive method. These modifications direct the flow in a certain direction and improve the flow mixing. Therefore, they are frequently used in improving heat transfer [20, 21]. However, these changes create resistance to the flow, leading to increased pressure loss. Studies are investigating geometries that improve heat transfer with the least pressure drop [5, 22]. Zheng et al. [23] studied the heat transfer and flow dynamics of triangular and circular turbulators with several heights in a rectangular channel. They reported that increasing the turbulator height increases the pressure drop, and that circular turbulators are more advantageous than triangular turbulators in terms of heat transfer. Naderifar et al. [24] examined the effects of the number of grooves (1-5) and the length of the fins placed in the channel (5-10 mm) on heat transfer in a rectangular grooved channel and reported that heat transfer was highest when the number of grooves was 2 and the fin height was 7.5 mm. In a numerical study, Akçay [25] examined the hydraulic and thermal performance of solid and perforated baffles added perpendicularly to rectangular, circular, triangular, and trapezoidal grooved channels, and reported that solid baffles increased heat transfer and pressure drop. Çelik and Akçay [2] numerically investigated the effects of wave amplitude (s : 20 mm, 30 mm, and 40 mm) and the size of circular obstacles (d : 4 mm, 6 mm, and 8 mm) on flow and heat transfer in a sinusoidal channel. Their study found that increasing the diameter of the circular obstacles increased heat transfer but also caused a slight increase in pressure drop. They reported that heat transfer improved by 1.82 times compared to a straight channel at the highest wave amplitude ($s = 40$ mm) and the obstacle diameter ($d = 8$ mm). Akçay et al. [26] studied the effects of the position (t : 7 mm, 9 mm, and 11 mm) and diameter (d : 2 mm, 4 mm, and 6 mm) of circular obstacles on turbulent heat transfer in a grooved channel with an asymmetric trapezoidal profile in the range of $3000 \leq Re \leq 10000$. In their studies, the grooved channel walls were kept at a constant temperature of $T_s = 340$ K. As a result, they declared that heat transfer improved by 1.31 times compared to a channel without turbulators for parameters $Re = 10000$, $d = 6$ mm and $t = 7$ mm.

Previous studies have shown that the wave profile, wave number, geometry of the obstacles added to the channel, and flow characteristics affect flow structure and heat transfer behavior. In corrugated/wavy

channels, it is understood that increasing the wave number enhances heat transfer but also increases pressure drop. These studies also report that the wave profile with sinusoidal geometry and obstacles with circular geometry added to the channel result in lower pressure drop. Therefore, in this study, a partially wavy channel structure with a sinusoidal profile was preferred, and the turbulator added to the channel was chosen with a circular geometry. In this numerical study, flow structure and heat transfer behavior were analyzed in a partially wavy channel containing a circular turbulator for different Reynolds numbers ($3000 \leq Re \leq 6000$).

2. Material and Method

2.1. Geometry of the numerical model

Figure 1 shows the two-dimensional geometry of the numerical model. Previous studies shown that two-dimensional models can predict heat transfer and pressure drop trends with acceptable accuracy for similar turbulator geometries. This approach allows for reliable investigation of fundamental flow and thermal performance characteristics while significantly reducing computational costs [2, 4, 21, 26]. Therefore, the solution domain was modeled in two dimensions. The diameter of the circular turbulator placed in the partially wavy channel section is $D = 18$ mm. Other geometric properties of the channel are defined considering the turbulator diameter. Accordingly, the height of the channel is $2D$. The amplitude and wavelength of the wavy channel are determined as $D/2$ and $4D$, respectively. The channel contains straight sections of lengths of $6D$ and $12D$ at the inlet and outlet, respectively. The sinusoidal wave-shaped top and bottom surfaces of the channel, which are $4D$ in length, are preserved at a constant heat flux.

Previous studies have investigated the effects of obstruction/turbulator height within the channel on flow and heat transfer, reporting that heat transfer and pressure loss increase with increasing height [2, 26]. Therefore, the turbulator diameter was determined to be half the channel height to avoid excessively blocking the flow. When the main fluid from the channel inlet is directed into the corrugated cavities, it creates flow cycles in the cavity. Increasing the wave amplitude creates stagnant fluid regions in the cavity that are not reached by the flow cycles [10]. Therefore, the wave amplitude was determined to be half the turbulator diameter.

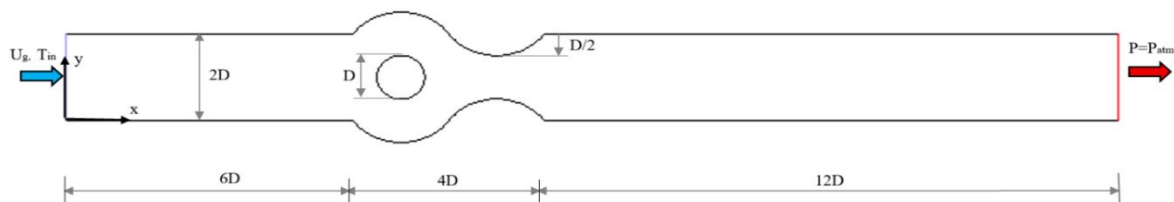


Figure 1. Geometry of the numerical model

2.2. Numerical method

In this study, flow and heat transfer in a partially wavy channel containing a circular turbulator are numerically analyzed in different Reynolds number ($3000 \leq Re \leq 6000$). The analyses were conducted using the ANSYS Fluent program, which solves using the finite volume approach. The details of the solution method are shared in detail in Table 1.

Table 1. Solution parameters used for the numerical study

Parameters	Setting
Geometry	Partially wavy channel with circular turbulator
Turbulence model	Standard k-ε, enhanced wall function
Material	Solid: aluminum Fluid: air
Discretization scheme	Second order upwind
Pressure-velocity coupling	SIMPLE algorithm
Convergence criteria	Energy equation: 1.0E-8 Other equations: 1.0E-5

The velocity-pressure relationship was addressed using the SIMPLE algorithm and convection terms were discretized using a second-order upwind scheme. The convergence criterion was set to 10^{-8} for the energy equations and 10^{-5} for the other equations.

2.3. Governing equations

In this study, the working fluid is air. In the analyses, air is incompressible, and Newtonian type properties. The fluid flows under steady conditions and in a turbulent regime. There is no heat generation within the channel. Viscous terms, the effects of gravitational forces, and heat transfer by radiation are neglected. The standard k-ε model is used as the turbulence model. Accordingly, the governing equations are presented by Equations (1-3) [10]:

Continuity equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum equation:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{u}_i) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \overline{u_i' u_j'} \quad (2)$$

Energy equation:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (c\bar{T}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\Gamma + \Gamma_t) \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

The equations for the standard k-ε turbulence model are given by Equations (4-5):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (k) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (k \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

In the solutions, the program's default values were set for the constants in the turbulence model.

2.4. Meshing process and boundary conditions

The numerical geometry and mesh processing were constituted using Gambit program. In the mesh structure, a boundary layer mesh consisting of 8 layers (growth factor: 1.2) was applied to the wall surfaces to keep the dimensionless wall distance less than 1 ($y^+ < 1$). Elements with triangular geometry were used in the other solution area. The mesh structure is presented in Figure 2. To specify the optimal element number, the mesh independence test was performed at $Re = 6000$ for the channel with turbulator, and the results are given in Table 2. After the number of elements was increased to 67618, the change in Nu value was found to be less than 3%. To reduce computational cost and time, it was decided that 67618 elements were sufficient at the solutions. The number of elements adapted to the channel without turbulator is 70814.

Table 2. Result of the mesh independence test ($Re = 6000$ and the channel with turbulator)

Element number	Nusselt number (Nu)	Difference (%)
42812	52.46	-
54716	54.53	3.79
67618	55.81	2.29
82884	56.47	1.17

The velocity inlet boundary condition was defined at the channel entrance. The air enters the channel at a constant velocity (U_g) and temperature $T_{in} = 300K$. The straight parts at the channel inlet and outlet are adiabatic. The partially wavy part of the channel is kept at a constant heat flux $q'' = 2000$ W/m². The circular turbulator is adiabatic. The pressure at the channel outlet is equalized to atmospheric pressure. Non-slip boundary conditions are defined for all surfaces. The mathematical definition and the boundary conditions applied to the numerical model are given in Table 3.

Table 3. Boundary conditions applied to the solution domain

Boundary type	Boundary description	Mathematical definition
The channel inlet	Velocity inlet	$u_i = U_g, u_j = 0, \text{ and } T = T_{in} = 300 \text{ K}$
The channel outlet	Pressure outlet	$\frac{\partial u_i}{\partial x} = \frac{\partial u_j}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \text{ and } P_{out} = P_{atm}$
The partially wavy section	Constant heat flux	$u_i = u_j = 0, \text{ and } q = q'' = 2000 \text{ W/m}^2$
The straight inlet length of the channel	Adiabatic wall, no-slip	$u_i = u_j = 0, \text{ and } \frac{\partial T}{\partial y} = 0$
The straight outlet length of the channel	Adiabatic wall, no slip	$u_i = u_j = 0, \text{ and } \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

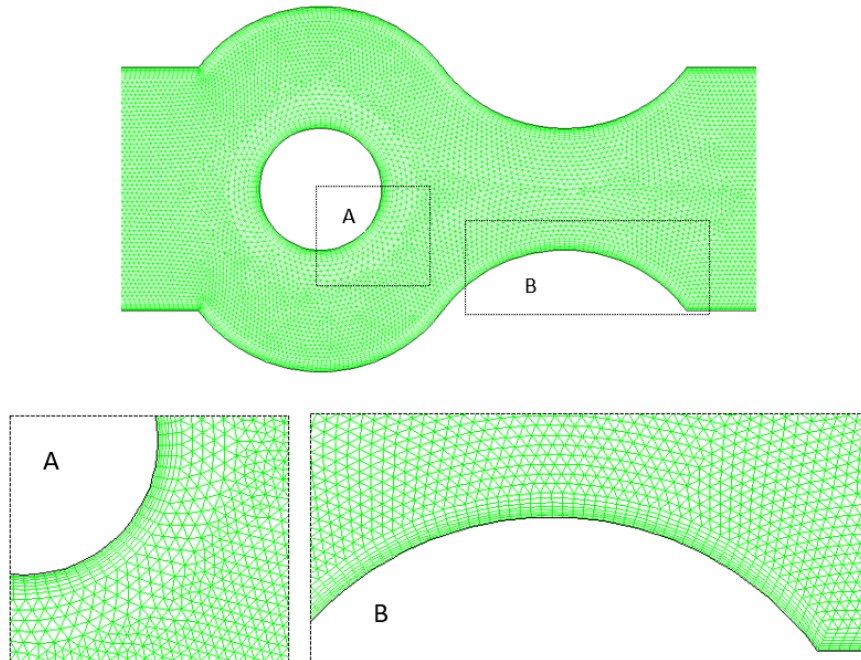


Figure 2. Mesh view of channel geometry

2.5.Data reduction

In this study, the Reynolds number varied between $3000 \leq Re \leq 6000$. The channel inlet velocity was calculated using the Reynolds number (Equation 6) [25].

$$Re = \frac{\rho U_g D_h}{\mu} \quad (6)$$

Here, ρ , U_g , and μ represent the fluid density, fluid inlet velocity, and dynamic viscosity, respectively.

The convective heat transfer coefficient (h) is calculated by Equation 7 [27]:

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_m)} \quad (7)$$

Here, q'' , T_w and T_m are constant heat flux, the surface temperature and bulk temperature, respectively. The bulk temperature of the fluid is the arithmetic mean of the inlet and outlet temperatures (Equation 8):

$$T_m = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (8)$$

The Nusselt number (Nu) is given in Equation 9 [15]:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (9)$$

Here, k is the heat conduction coefficient.

The Darcy friction factor (f) was calculated using Equation 10 as a function of the pressure drop (ΔP) [2]:

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho U_g^2 L} \quad (10)$$

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (11)$$

Here, P_{in} and P_{out} represent the pressures obtained at the channel inlet and outlet, respectively.

Pumping power (W_{power}) is obtained as a function of pressure drop using Equation 12 [27].

$$\dot{W}_{power} = \left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)\Delta P \quad (12)$$

Thermohydraulic performance (THP) is defined to evaluate the improvement in heat transfer in the channel, taking into account the friction factor (Equation 13) [2,10]:

$$THP = \left(\frac{Nu_t}{Nu_o}\right) \left(\frac{f_t}{f_o}\right)^{\left(-\frac{1}{3}\right)} \quad (13)$$

Where, Nu_t and Nu_o represent the Nusselt numbers obtained in channels with and without turbulator, respectively. Similarly, f_t and f_o show the friction factors obtained in channels with and without turbulator, respectively. The THP value above 1 indicates improved heat transfer despite the pressure drop.

3. Research Findings

The Dittus-Boelter correlation (Equation 14) is commonly used to determine the Nusselt number in straight channels, and the Petukhov correlation (Equation 15) is used to determined the friction factor. The Nusselt number and friction factor values obtained from numerical studies for straight channels were compared with these empirical relationships. The comparison of the analysis results with these correlations is presented in Figure 3, and the agreement between the results is demonstrated.

Dittus-Boelter correlation is calculated using Equation 14 [2, 15, 27]:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (14)$$

Petukhov correlation is given by Equation 15 [2, 15, 27]:

$$f = [0.79 \ln(\text{Re}) - 1.64]^{-2} \tag{15}$$

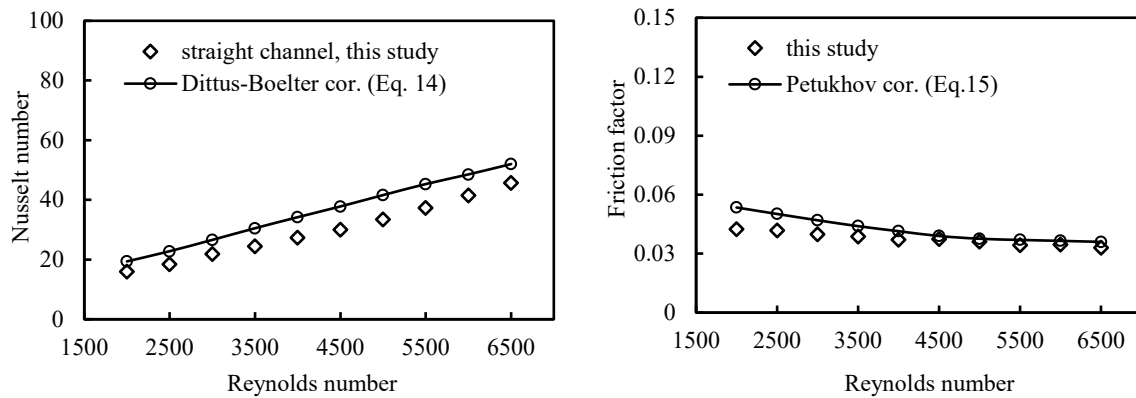


Figure 3. Validation of the numerical model

This section presents velocity and temperature distributions to demonstrate the effects of the partially wavy channel geometry and the circular turbulator on flow and heat transfer. Subsequently, channel outlet temperature, surface temperature, local and average heat transfer coefficients, Nusselt number, pressure drop, skin friction coefficient, and Darcy friction factor values were obtained and presented graphically for channels with and without turbulator at different Reynolds numbers.

Figure 4 shows the velocity vectors (a) and the temperature contours (b) in the partially wavy channel with and without turbulator at $\text{Re}=6000$. It is clearly seen that the wave profile and turbulator affect the velocity and temperature distribution.

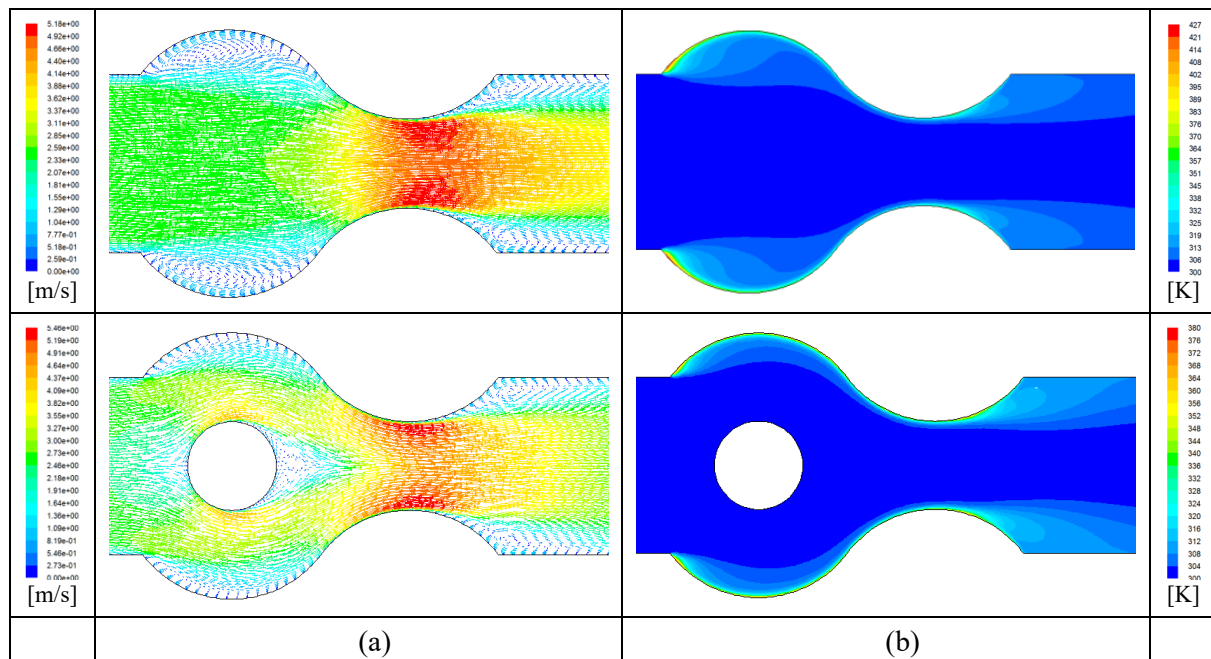


Figure 4. (a) Velocity vectors, (b) temperature distribution in the case with/without turbulator for $\text{Re} = 6000$

In the absence of the turbulator, the main flow velocity vectors passing through the center of the channel change direction in the widening section of the cavity, causing the formation of secondary flow cycle. Subsequently, the narrowing of the wavy section leads to an increase in velocity. In the presence of the turbulator, it is observed that the main flow splits into two branches, and the flow passing around the turbulator is directed into the widening cavities. A stagnation point is observed in front of the turbulator where the velocity slows down and stops, while an eddy region is formed behind it due to the low-pressure

area. In the narrowing section of the channel, the flow recombines and the velocity increases (Figure 4a). When the temperature distributions are examined (Figure 4b), the temperature of the wavy wall is higher in the channel without turbulator, while the temperatures are significantly lower in the channel with turbulator. The highest temperature in the channel without turbulator is 427 K, while in the channel with turbulator it is 380 K, as can be seen from the color scale. It is observed that a larger temperature gradient forms in the expanding cavity in the channel without turbulator, while the temperature gradient thins out in the channel with turbulator. Adding the turbulator to the channel resulted in the decrease in surface temperature.

Figure 5 shows (a) the outlet temperature and (b) the surface temperature in the channel with/without turbulator for different Reynolds numbers. The outlet temperature and surface temperature decreased as Re increased. However, while the channel outlet temperature was quite close in the channel with and without turbulator, the surface temperature in the channel with turbulator was found to be lower than in the channel without turbulator. At Re = 6000, the surface temperatures in the channel with and without turbulator were found to be 363.03 K and 354.89 K, respectively. The presence of the turbulator reduced the surface temperature by 8.14 K at Re = 6000.

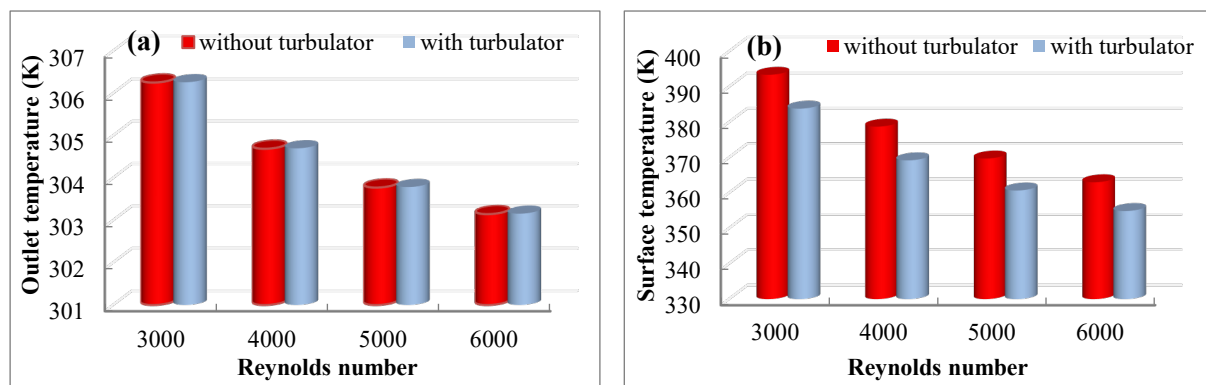


Figure 5. (a) Outlet temperature, (b) surface temperature in the case with/without turbulator with Re

Figure 6 plots the variation of the surface heat transfer coefficient at several Re in the channels without turbulator (a) and with turbulator (b). In both channels, the heat transfer coefficient increased with increasing Re. The increment in the heat transfer coefficient in the channel with turbulator was higher than in the case without turbulator. In both cases, the heat transfer coefficient tended to increase in the flow direction. Along the length of the wavy cavity containing turbulator (0.108 m-0.144 m), the heat transfer coefficient was higher than in the case without turbulator, and the curve was observed to be more horizontal. Along the narrowing cross-section of the wavy channel (0.144 m-0.168 m), the heat transfer coefficient formed a peak due to the increase in flow velocity. In both cases, a decrease occurred in the curve at x = 0.168 m. This situation is thought to be caused by the widening of the channel's cross-sectional area.

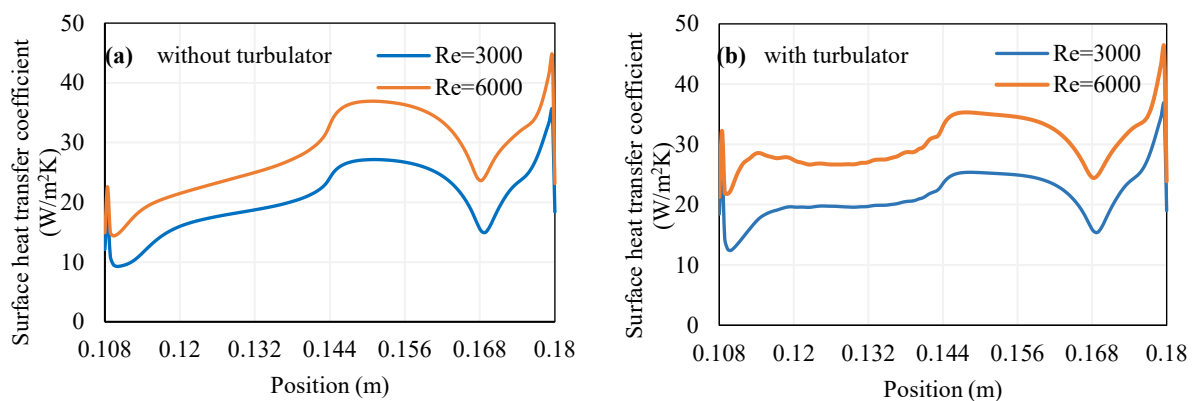


Figure 6. Surface heat transfer coefficient along the wall: (a) without turbulator, (b) with turbulator

Figure 7 shows (a) the averaged heat transfer coefficient and (b) the Nusselt number with Re for the cases with and without turbulator. The averaged heat transfer coefficient and Nusselt number increased with Re for all cases. However, this increase was found to be higher in the case with turbulator compared to the case without turbulator. The highest heat transfer coefficient was found at Re = 6000 and in the case with turbulator, with $h = 37.51 \text{ W/m}^2\text{K}$. At Re = 6000, the highest Nusselt numbers were found to be $Nu = 55.81$ and $Nu = 48.41$ in the case with and without turbulator, respectively. At Re = 6000, the heat transfer in the case with turbulator showed an improvement of more than 1.15 compared to the case without turbulator.

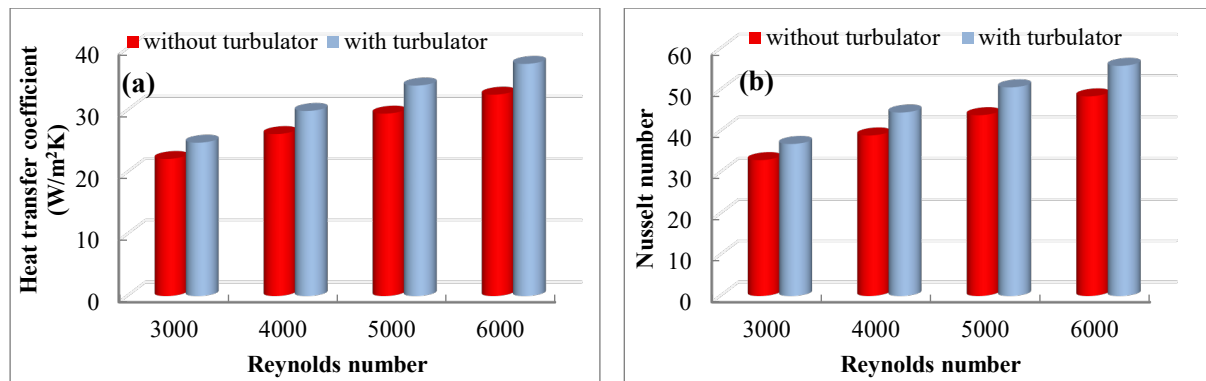


Figure 7. (a) Heat transfer coefficient and (b) Nusselt number with Re

Figure 8 indicates the turbulent kinetic energy contours at Re = 6000 for the channel with/without turbulator. The addition of a circular turbulator to the wavy channel significantly affected the kinetic energy distribution. In the channel without turbulator, kinetic energy increased in the expanding cavities of the wavy cavity and at the end of the wavy section. Similarly, in the presence of the turbulator, kinetic energy increased in the expanding cavities of the wavy cavity and at the end of the wavy section. In addition to the increase in kinetic energy in these regions, a significant increase in kinetic energy is observed behind the turbulator. This is because the turbulator increases the turbulence and fluctuations in the flow.

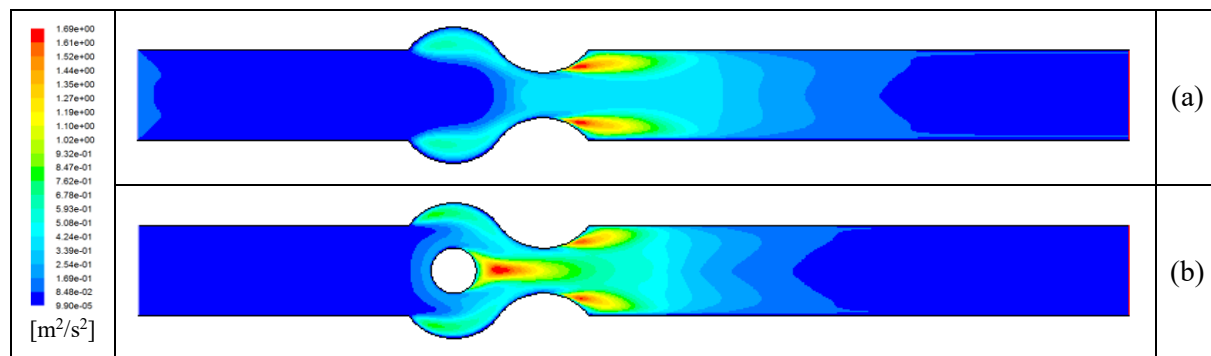


Figure 8. Turbulent kinetic energy contours at Re = 6000: (a) without turbulator, (b) with turbulator

Figure 9 plots the variation of the skin friction coefficient at Re = 3000 and Re = 6000 in the channels without turbulator (a) and with turbulator (b). In both channels, the skin friction coefficient increased with increasing Re. The skin friction coefficient curves are smoother in the channel without turbulator, while they are more wavy in the channel with turbulator. In the channel without turbulator, the skin friction coefficient reached a peak along the narrowing section of the wavy channel (0.144 m–0.168 m). In the channel with turbulator, this peak started at 0.132 m and ended at 0.168 m. The circular turbulator increased surface friction.

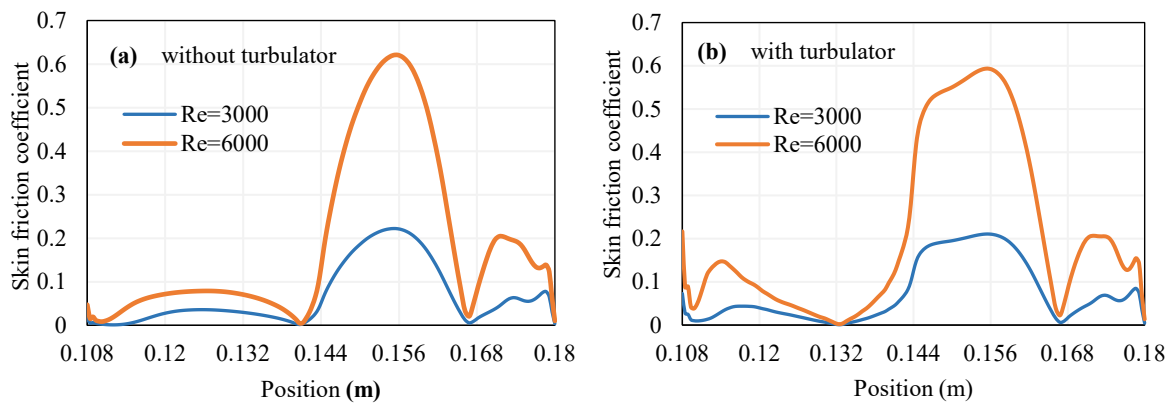


Figure 9. Skin friction coefficient with Re: (a) without turbulator, (b) with turbulator

Figure 10 shows (a) the pressure drop and (b) the Darcy friction factor with Re for the cases with/without turbulator. The pressure drop increased with increasing Reynolds number in both cases. However, this increase was found to be higher in the case with turbulator compared to the case without turbulator. At $Re = 6000$, the pressure drop was 2.74 Pa and 3.72 Pa, respectively, for the cases without turbulator and with turbulator (Fig. 10a). The friction factor declined with Re for all cases. In the case with turbulator, the friction factor is higher than in the case without turbulator (Figure 10b).

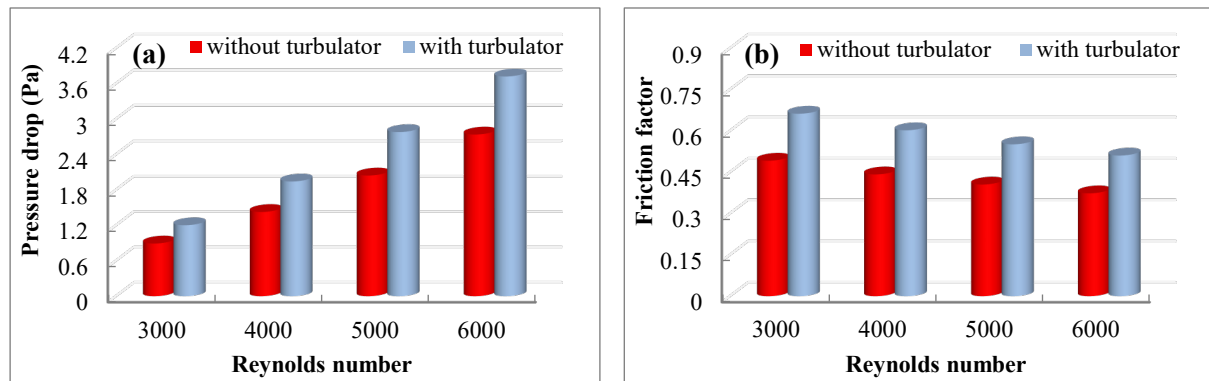


Figure 10. (a) Pressure drop, (b) friction factor in the channel with/without turbulator with Re

Figure 11a presents the variation of pumping power with Reynolds number for the channels with and without turbulator. In both cases, increasing the Re increased the pumping power. However, this increase is higher in the channel with turbulator. The increased in pressure drop in the channel containing the turbulator resulted in an increase in pumping power. At $Re=6000$, it was determined that the pumping power in the turbulator case was approximately 1.36 times greater than in the non-turbulator case.

Figure 11b shows the change in THP with Reynolds number in the channels with and without turbulator. The case without turbulator was considered as a reference and its value was taken as 1. In the channel with turbulator, THP values were found to be higher than the reference value at all Reynolds numbers. This indicates that the heat transfer improvement in the channel with turbulator overcomes the pressure drop. In addition, THP values increased with increasing Reynolds number. However, the THP value showed a slight decreasing trend at $Re=6000$. In the channel with turbulator, the highest THP was obtained as 1.041 at $Re=5000$

This study is conducted numerically in two dimensions and is valid for the given flow and thermal conditions. In future studies, the effects of geometric parameters such as channel waveform, turbulator geometry, size, and location on flow and heat transfer can be investigated for different flow and fluid properties

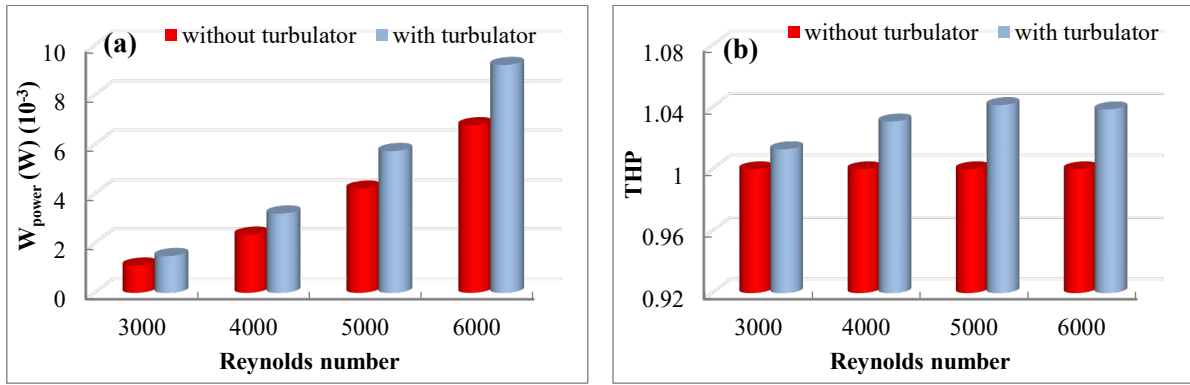


Figure 11. (a) Pumping power, (b) THP in the channel with/without turbulator with Re

4. Results and Discussion

The numerical study results are compared with the previous studies in Table 4. In an experimental study, Nakhchi [13] investigated the effects of wave number ($5 \leq N_w \leq 15$), wave/amplitude ratio ($0.2 < b/H < 0.6$), and phase angle ($0^\circ < \varphi < 180^\circ$) on flow and heat transfer in a sinusoidal channel without turbulators at Reynolds numbers in the range of $1106 \leq Re \leq 2530$. They obtained $Nu = 40.6$ and $\Delta P = 35.07$ Pa for $Re = 2530$, $N_w = 10$, $b/H = 0.6$, and $\varphi/\pi = 0.5$ parameters.

Table 4. Comparison of numerical results with previous studies

Ref.	Method	Fluid	Wave/turbulator geometry	Parameters	Findings
[13]	Exp.	Water	Sinusoidal wavy, Non-turbulator	$1106 \leq Re \leq 2530$ $5 \leq N_w \leq 15$ $0.2 < b/H < 0.6$ $0^\circ < \varphi < 180^\circ$	<i>Non-turbulator</i> $Re = 2530$, $N_w = 10$, $b/H = 0.6$, $\varphi/\pi = 0.5$ $Nu = 40.6$, $\Delta P = 35.07$ Pa
[2]	Num.	Air	Sinusoidal wavy, one wave, Circular turbulator	$3000 \leq Re \leq 8000$ $d: 4\text{mm}, 6\text{mm}, 8\text{mm}$ $s: 20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}$	<i>Non-turbulator</i> $Re = 6000$, $s = 40\text{mm}$ $Nu = 32.31$, $\Delta P = 2.82$ Pa <i>With turbulator</i> $Re = 6000$, $s = 40\text{mm}$, $d = 6\text{mm}$ $Nu = 37.32$, $\Delta P = 4.73$ Pa
[26]	Num.	Air	Asimetrik trapezoidal wavy, 8 wave, Circular turbulator	$3000 \leq Re \leq 10000$ $d: 2\text{mm}, 4\text{mm}, 6\text{mm}$ $t: 7\text{mm}, 9\text{mm}, 11\text{mm}$	<i>Non-turbulator</i> At $Re = 6000$ $Nu = 24.91$, $\Delta P = 37.28$ Pa <i>With turbulator</i> $Re = 6000$, $d = 6\text{mm}$, $t = 7\text{mm}$ $Nu = 31.65$, $\Delta P = 61.18$ Pa
this study	Num.	Air	Sinusoidal wavy, partially wavy, Circular turbulator	$Re = 3000 \leq Re \leq 6000$ $D = 18\text{mm}$	<i>Non-turbulator</i> $Re = 6000$ $Nu = 48.41$, $\Delta P = 2.74$ Pa <i>With turbulator</i> $Re = 6000$ $Nu = 55.81$, $\Delta P = 3.72$ Pa

Çelik and Akçay [2] numerically investigated the effects of Reynolds number ($3000 \leq Re \leq 8000$), wave amplitude ($s: 20\text{mm}, 30\text{mm}, 40\text{mm}$), and circular turbulator diameter ($d: 4\text{mm}, 6\text{mm}, 8\text{mm}$) in a sinusoidal wavy channel containing circular turbulators. They found $Nu = 32.31$ and $\Delta P = 2.82$ Pa for $s = 40\text{mm}$ at $Re = 6000$ in a channel without turbulators. For $s = 40\text{mm}$ at $Re = 6000$, they obtained $Nu = 37.32$ and $\Delta P = 4.73$ Pa with $d = 6\text{mm}$ turbulator diameter. Akçay et al. [26] investigated the effects of diameter ($d: 2\text{mm}, 4\text{mm}, 6\text{mm}$) and position ($t: 7\text{mm}, 9\text{mm}, 11\text{mm}$) of circular obstacles in an asymmetric trapezoidal wavy channel at different Reynolds numbers ($3000 \leq Re \leq 10000$). In the wavy

channel without circular obstacles, $Nu = 24.91$ and $\Delta P = 37.28$ Pa were obtained at $Re = 6000$, while $Nu = 31.65$ and $\Delta P = 61.18$ Pa were found with the $d = 6$ mm obstacle diameter and $t=7$ mm obstacle position. In this study, in the partially wavy channel without turbulator, $Nu = 48.41$ and $\Delta P = 2.74$ Pa were obtained at $Re = 6000$, while in the channel with circular turbulator, $Nu = 55.81$ and $\Delta P = 3.72$ Pa were obtained. It is noteworthy that the Nusselt numbers are higher and the pressure drop is lower in channels with and without turbulators than in other studies. The partially wavy channel geometry and the presence of a single turbulator provided an advantage in terms of pressure drop.

The study results show that adding a turbulator to a partially wavy channel can reduce the surface temperature and enhance heat transfer. However, a slight increase in pressure drop and friction factor is inevitable due to the turbulator creating an obstacle to the flow. The aim of this study is to provide a guide for channel designers and researchers interested in this topic.

5. Conclusion

This study numerically examined turbulent heat transfer for Reynolds numbers in the range of $3000 \leq Re \leq 6000$ in a partially wavy channel with a circular turbulator. Outlet temperature, surface temperature, surface and averaged heat transfer coefficient, surface and averaged friction factor, Nusselt number, pressure drop, pumping power and THP were calculated for the cases with/without turbulator, and the results are presented graphically. Furthermore, the effects of the circular turbulator on velocity and temperature distribution in the partially wavy channel were examined. The main findings of the study are as follows:

- As Re increased, the outlet temperature, surface temperature, and friction factor decreased. The presence of the turbulator reduced the surface temperature by 8.14 K at $Re = 6000$.
- In both channels, increasing Re increased the Nusselt number. However, in the channel with turbulator, the Nusselt number was higher than in the channel without turbulator. At $Re = 6000$, the highest Nusselt numbers were found to be $Nu = 55.81$ and $Nu = 48.41$ in the case with and without turbulator, respectively. At $Re = 6000$, the heat transfer in the case with turbulator showed an improvement of more than 1.15 compared to the case without turbulator.
- For both channels, increasing Re increased the pressure drop and pumping power. However, in the channel with turbulator, the pressure drop and pumping power were higher than in the channel without turbulator. At $Re = 6000$, the pressure drop was 2.74 Pa and 3.72 Pa, respectively, for the cases without and with turbulator. At $Re=6000$, the pumping power in the channel with turbulator was nearly 1.36 times greater than in the non-turbulator case.
- In the channel with turbulator, THP values were obtained to be higher than the channel without turbulator at all Reynolds numbers. THP values increased with increasing Reynolds number (except for $Re = 6000$). The highest THP was obtained as 1.041 at $Re = 5000$ in the channel with turbulator

6. References

- [1] J. Zhang, X. Zhu, M.E. Mondejar, F. Haglind, A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 101 (2019) 305–328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.017>
- [2] E. Çelik, S. Akcay, Investigation of the effect of wave amplitude and circular obstacles on flow and heat transfer in a sinusoidal wave channel, *Gümüşhane Univ. J. Sci. Techn.*, 15 (1) (2025) 36–50. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1563367>
- [3] S.S. Ajarostaghi, M. Zaboli, H. Javadi, B. Badenes, J.F. Urchueguia, A review of recent passive heat transfer enhancement methods, *Energies*, 15 (3) (2022) 986. <https://doi.org/10.3390/en15030986>
- [4] N. Kurtulmus, B. Sahin, A review of hydrodynamics and heat transfer through corrugated channels, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 108 (2019) 104307. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104307>
- [5] M.A. Alfellag, H.E. Ahmed, M.G. Jehad, A.A. Farhan, The hydrothermal performance enhancement techniques of corrugated channels: A review, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 147 (2022) 10177–10206. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11247-1>

- [6] E.N. Krishnan, H. Ramin, A. Guruabalan, C.J. Simonson, Experimental investigation on thermo-hydraulic performance of triangular cross-corrugated flow passages, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 122 (2021) 105160. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105160>
- [7] Z.-X. Li, S.-Q. Sung, C. Wang, C.-H. Liang, S. Zeng, T. Zhong, W.-P. Hud, C.-N. Feng, The effect of trapezoidal baffles on heat and flow characteristics of a cross-corrugated triangular duct, *Case Stud. Therm. Eng.*, 33 (2022) 101903. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101903>
- [8] R.K. Ajeel, W.I. Salim, K. Hasnan, Design characteristics of symmetrical semicircle-corrugated channel on heat transfer enhancement with nanofluid, *Int. J. Mech. Sci.*, 151 (2019) 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.022>
- [9] H. Töğun, R.Z. Homod, Z.M. Yaseen, A.M. Abed, J.M. Dhabab, R.K. Ibrahim, S. Dhahbi, M.M. Rashidi, G. Ahmadi, W.A. Yaäci, J.M. Mahdi, Efficient heat transfer augmentation in channels with semicircle ribs and hybrid nanofluids, *Nanomaterials*, 12 (15) (2022) 2720. <https://doi.org/10.3390/nano12152720>
- [10] H. Zontul, H. Hamzah, N. Kurtulmuş, B. Şahin, Investigation of convective heat transfer and flow hydrodynamics in rectangular grooved channels, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 126 (2021) 105366. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105366>
- [11] R.K. Ajeel, W. Saiful-Islam, K.B. Hasnan, Thermal and hydraulic characteristics of turbulent nanofluids flow in trapezoidal-corrugated channel: Symmetry and zigzag shaped, *Case Stud. Therm. Eng.*, 12 (2018) 620–635. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.08.002>
- [12] M. Khoshvaght-Aliabadi, Influence of different design parameters and Al₂O₃-water nanofluid flow on heat transfer and flow characteristics of sinusoidal-corrugated channels, *Energy Convers. Manag.*, 88 (2014) 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.042>
- [13] M.E. Nakhchi, Experimental optimization of geometrical parameters on heat transfer and pressure drop inside sinusoidal wavy channels, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 9 (2019) 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.11.006>
- [14] M. Khan, I.N. Alsaduni, M. Alluhaidan, W.-F. Xia, M. Ibrahim, Evaluating the energy efficiency of a parabolic trough solar collector filled with a hybrid nanofluid by utilizing double fluid system and a novel corrugated absorber tube, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 124 (2021) 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.045>
- [15] D. Uysal, S. Akçay, Numerical study of thermal and hydrodynamic characteristics of turbulent flow in hybrid corrugated channels with different wave profiles, *J. Mech. Eng. Sci.* 18 (2) (2024) 10026–10045. <https://doi.org/10.15282/jmes.18.2.2024.5.0792>
- [16] L. Zhang, D. Che, Influence of corrugation profile on the thermal-hydraulic performance of cross-corrugated plates, *Numer. Heat Transf. A*, 59 (4) (2011) 267–296. <https://doi.org/10.1080/10407782.2011.540963>
- [17] M. Ahmed, M. Yusoff, K. Ng, N. Shuaib, Effect of corrugation profile on the thermal–hydraulic performance of corrugated channels using CuO–water nanofluid, *Case Stud. Therm. Eng.*, 4 (2014) 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2014.07.001>
- [18] M. Salami, M. Khoshvaght-Aliabadi, A. Feizabadi, Investigation of corrugated channel performance with different wave shapes, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 138 (5) (2019) 3159–3174. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08361-y>
- [19] A. Shahsavari, S.S. Alimohammadi, I.B. Askari, H.M. Ali, Numerical investigation of the effect of corrugation profile on the hydrothermal characteristics and entropy generation behavior of laminar forced convection, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 121 (2021) 105117. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105117>
- [20] L.K. Nitturi, V.K.S. Kapu, R. Gugulothu, A. Kaleru, V. Vuyyuri, A. Farid, Augmentation of heat transfer through passive techniques, *Heat Transfer* 52 (6) (2023) 4422–4449. <https://doi.org/10.1002/htj.22877>
- [21] B.K. Kanchan, G.K. Chandan, J. Kumar, Effect of obstacle configuration in sinusoidal BFSC on hydrothermal performance and irreversibility characteristics: A numerical study, *Iran J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng.*, 48 (2024) 145–162. <https://doi.org/10.1007/s40997-023-00649-7>

- [22] A. Raza, J. Hasnain, S.S. Shah, R.U. Haq, A. Alhushaybari, Influence of solid cylinders on fluid flow and thermal analysis in a curved channel with constant magnetic field, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 158 (2024) 107887. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107887>
- [23] Y. Zheng, H. Yang, H. Mazaheri, A. Aghaei, N. Mokhtari, M. Afrand, An investigation on the influence of the shape of the vortex generator on fluid flow and turbulent heat transfer, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 143 (2021) 1425–1438. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09415-2>
- [24] A. Naderifar, M. Nikian, K. Javaherdeh, M. Borji, Numerical investigation of the effect of fins on heat transfer enhancement of a laminar non-Newtonian nanofluid flow through a corrugated channel, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 147 (2022) 9779–9791. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11222-w>
- [25] S. Akçay, Numerical study of turbulent heat transfer process in different wavy channels with solid and perforated baffles, *Heat Transf. Res.*, 54 (18) (2023) 53–82. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2023046621>
- [26] S. Akçay, N.A.H. Ismael, M.A.S. Sadeq, Thermohydraulic performance analysis in an asymmetric trapezoidal wavy channel with circular turbulators, *Sinop Üniv. J. Natural Sci.*, 10 (1) (2025) 149–164. <https://doi.org/10.33484/sinopfd.1631618>
- [27] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Literatur Publishing, Istanbul, 2000.



BİR DEMİR ÇELİK FABRİKASINDA KULLANILAN TAV FIRINININ ENERJİ YÖNETİMİ AÇISINDAN İNCELENMESİ

*Tansel KOYUN¹ 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 06.05.2026, Kabul/Accepted: 09.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Ülkelerin gelişmişlik düzeyinin en önemli göstergelerinden biri çelik tüketimidir. Bu nedenle ülkemizde de demir çelik fabrikalarına verilen önem her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'deki bir demir çelik fabrikasında bulunan tav fırını enerji analizi yapılarak enerji yönetimi açısından incelenmiştir. Çalışmada öncelikle demir çelik fabrikalarında kullanılan tav fırınlarında enerji kaybının görüldüğü başlıca kısımlar ele alınmış, enerji verimlilik analizi yapılmış ve termal verim bulunarak fırının enerji akışını gösteren Sankey diyagramı oluşturulmuştur. Ortaya çıkan sonuçlar tablolar halinde verilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki farkın hangi tür kayıplar olduğu ve miktarları Sankey diyagramında gösterilmiştir. Analiz sonunda fırındaki kayıpların azaltılmasına yönelik görüş ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tav Fırın, Çelik, Enerji Yönetimi.

ENERGY MANAGEMENT EXAMINATION OF AN ANNEALING FURNACE USED IN A STEEL FACTORY

ABSTRACT

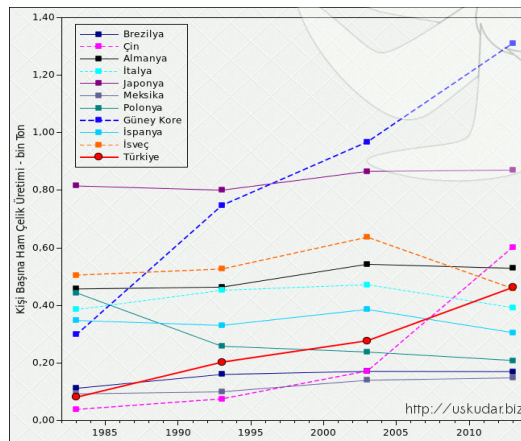
Steel consumption is one of the most important indicators of a country's level of development. Therefore, the importance given to iron and steel factories in our country is increasing day by day. In this study, an energy analysis of an annealing furnace in an iron and steel factory in Turkey was conducted and examined from an energy management perspective. The study first addresses the main areas where energy loss occurs in annealing furnaces used in iron and steel factories, performs an energy efficiency analysis, determines the thermal efficiency, and creates a Sankey diagram showing the energy flow of the furnace. The results are presented in tables and interpreted. The types and amounts of losses resulting from the difference between the input energy and the energy transferred to the product are shown in the Sankey diagram. Finally, opinions and suggestions for reducing losses in the furnace are presented.

Keywords: Annealing Furnace, Steel, Energy Management.

1. Giriş (Introduction)

Enerjinin verimli kullanımı, gerek ülkemizde gerekse dünyada üzerinde önemle durulan konulardan biridir. Endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlar, kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Enerji verimliliğinin artırılması, ısı kayıplarının yerlerinin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Fırınlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse çevreye verdiği atık gazların oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir [1].

Türkiye’de demir-çelik sektöründe artan talep doğrultusunda, üretim kapasiteleri 60 bin ton ile 2 milyon ton arasında değişen 16 ark ocaklı tesisin yanı sıra, 1 milyon ton ile 3 milyon ton kapasiteye sahip 3 entegre tesis faaliyet göstermektedir. Son yıllarda sektörde kullanılan üretim teknolojileri önemli bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu dönüşümün arkasında; nitelikli hammaddelerin giderek azalması, çevreye duyarlılığın artması ve buna bağlı koruma gereksinimleri, müşteri beklentilerindeki değişim, daha kaliteli ürün talebinin yükselmesi, daha düşük maliyetle daha yüksek verim elde etme isteği, çelik üretiminin ekonomik yönüne ilişkin çalışmalar ve bilgi teknolojilerindeki ilerlemeler gibi faktörler yer almaktadır. Tüm bu gelişmeler, demir-çelik üretiminde değişimin hız kesmeden sürmesine neden olmaktadır [2]. Şekil 1.'de yıllara göre ülkelerin kişi başına düşen çelik üretim miktarları gösterilmiştir.



Şekil 1. Tav fırını şematik gösterimi(Schematic representation of a annealing furnace) [1]

Şekil 1.'den de görüldüğü üzere ülkelere göre kişi başına düşen çelik üretimi dönem dönem azalsa da genel olarak yıllara göre artış göstermektedir. Olaya endüstriyel işletmeler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlar, kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli ölçüde katkıda bulunurlar. Enerji verimliliğinin artırılması, ısı kayıplarının yerlerinin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Fırınlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan tavlama fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse çevreye verdiği atık gazların oluşturduğu kirlilik açısından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir [1].

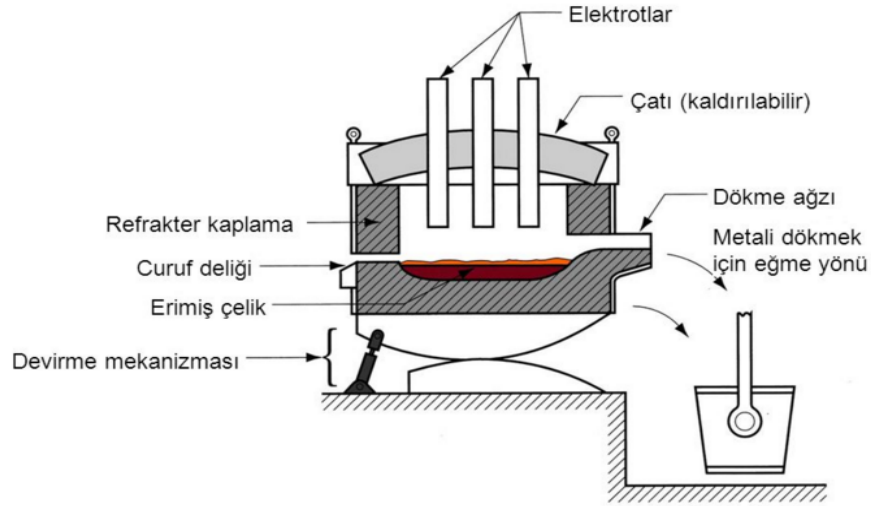
Literatürde endüstriyel kazan ve fırınlar ve fırınlarda enerji verimliliğine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Fırınlarda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak ya bütün kazan ya da sadece kazanların belirli kısımları incelenmiştir. Endüstriyel kazan dairelerinde enerji tasarrufu çalışmalarında, öncelikle sistem tasarımı ve tesiste en uygun kullanım şartlarının sağlanması, sistemin çalışması esnasında iyi bir yanmanın sağlanması, atık duman gazı, atık sudan ve flaş buhardan geri kazanımının sağlanması gerektiği ve son olarak da işletmelerde periyodik bakım sistemlerinin olmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda görülmektedir. Osman ve ark. yaptıkları çalışmada endüstriyel tav fırınlarında enerji kaybının görüldüğü başlıca kısımları incelemiş, enerji verimlilik analizi yapmış, ısı verimi bulmuş ve kayıpları tespit etmişlerdir. Giren enerji ile ürüne aktarılan enerji arasındaki farkın hangi tür kayıplar olduğu ve miktarları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ısı verim %20,85 olarak bulunmuştur. Kayıplar ise %31,6 ile baca gazı kayıpları, %10,4 ile yüzey kayıpları, %13 ile açıklık kayıpları ve %6,7 ile diğer kayıplar olarak belirlenmiştir [3]. Manatura ve Tangtrakul yaptıkları çalışmada reküperatör ile birleştirilmiş rejeneratif burner'lerin (yakıcıların)

kullanıldığı bir tav fırınında enerji kullanımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada tav fırınının özgül enerji tüketimi 1.042 MJ/t olarak bulunmuş ve fırın verimi %80,1 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada enerji tasarruf oranı sadece reküperatör kullanılan tav fırınları ile karşılaştırıldığında %43,4 olarak bulunmuş ve rejeneratif burner ile önemli bir verim değeri elde edilmiştir [4]. Ertem ve ark. yaptıkları çalışmada Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları'nın 3 nolu yassı kütük fırınında kullanılan özgül enerjinin iyileştirilmesi potansiyelini incelemişlerdir. Prosesdeki kayıp enerjinin hesaplanması için bir enerji giriş ve çıkış modeli oluşturmuşlar ve yassı kütük fırınının enerji verimliliğini %64,26 olarak hesaplamışlardır. Yapılan çalışmada enerji tasarrufu potansiyeli olarak fırına şarj edilen kütüklerin sıcak şarj edilmesi ve reküperatörden sonra atılan baca gazı ısısının geri kazanılmasını belirlemişlerdir. Baca gazının enerji potansiyelini 81.590 kcal/TEP olarak hesaplamışlardır [5]. Chen ve ark. yaptıkları çalışmada bir sıcak haddehanenin tav fırınlarının performansını ve enerji tüketimini hem sayısal tahminler hem de pratik ölçümler ile analiz etmişlerdir. Sayısal tahminlerde fırınların artan üretim hızının yakıtı daha verimli olarak kullandığını gösterirken pratik çalışma ise fırın içerisindeki ısının %80'inin yakıtın yanması, %15,7'sinin ise sıcak baca gazı ile sağlandığını göstermiştir. Ayrıca pratik ölçümler ısı geri kazanımı bölgesindeki ısı değişimi ve ısı geri kazanımı verimlerinin sırasıyla %86,66 ve %47,76 olduğunu göstermiştir [6]. Si ve ark. yaptıkları çalışmada Kanada, Manitoba'da bulunan bir çelik fabrikasının enerji verimliliğini değerlendirmiş ve atık ısı geri kazanımının olabilirliğini analiz etmişlerdir. Proses ısıtma değerlendirmesi ve gözden geçirme aracı (PHAST) ile yapılan çalışmada tav fırını verimi %60 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada baca gazı kayıpları toplam enerji kayıplarının %29,5'i ile tav fırınındaki en büyük enerji kaybını oluşturmuştur. Çalışma sonucunda enerji verimliliğinin artırılması için kütüklerin 315°C'ye ön ısıtılması gerektiği belirtilmiştir [7].

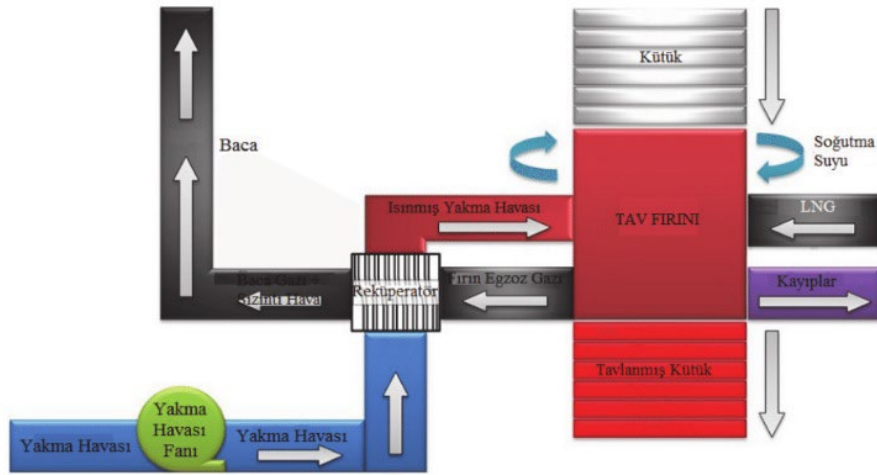
Bu çalışmada, endüstride faaliyet gösteren bir demir-çelik sektörüne ait tav fırını verileri kullanılarak fırına giren kütük çeliklerin enerji yönetimi açısından incelenmesi amaçlanmıştır. Tav fırını için yapılan kabuller doğrultusunda ısı kayıpları hesaplanmış ve fırının verimi belirlenmiştir. Elde edilen bulgular tablo halinde sunularak yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Günümüzde çelik üretimi temelde iki ana yöntem üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, entegre tesislerde demir cevherinden yüksek fırınlar aracılığıyla pik demir elde edilmesi ve ardından bu pik demirin Bazik Oksijen Fırınlarında (BOF) işlenerek çeliğe dönüştürülmesidir. İkinci yöntem ise, mevcut çelik hurdalarının elektrik ark ocaklarında (EAF) eritilerek yeniden çelik üretiminin sağlanmasıdır. Elektrik ark ocaklarında, hurda çelik yüksek sıcaklık altında eritilerek tekrar kaliteli çeliğe dönüştürülür. Modern EAF sistemlerinin temel amacı, katı haldeki hammaddeleri mümkün olan en kısa sürede sıvı metale çevirmektir. Günümüzde dünya çelik üretiminin yaklaşık üçte biri bu yöntemle gerçekleştirilmektedir. EAF teknolojisi sayesinde, özellikle paslanmaz çelikler olmak üzere düşük ve yüksek alaşımlı birçok çelik türü üretilebilmektedir. Bu ocakların kapasitesi genellikle 50 ile 150 ton arasında değişirken, bir üretim çevrimi yaklaşık 45 dakika ile 2 saat arasında sürmektedir. Ergitme tamamlandığında fırın içi sıcaklık 1650°C'nin üzerine çıkmaktadır. Üretim sürecinde ilk olarak hurda çelik ve demir içeren diğer malzemeler fırına yüklenir ve ardından kapak kapatılır. Fırın kapağında yer alan grafit elektrotlar aşağı doğru indirilerek elektrik akımı verilir. Bu akım, elektrotlar ile hurda arasında güçlü bir elektrik arkı oluşturur ve ortaya çıkan yoğun ısı, metalin erimesini sağlar. Bu işlem oldukça yüksek enerji gerektirir; kullanılan elektrik miktarı yaklaşık 100.000 nüfuslu bir yerleşimin ihtiyacına eşdeğerdir. Ergitme sırasında, istenen kimyasal bileşimi elde edebilmek için farklı alaşım elementleri ilave edilir. Aynı zamanda, çeliği arındırmak amacıyla oksijen üflenerek safsızlıklar giderilir. Demir dışı bileşenlerin bağlanarak uzaklaştırılması için cüruf oluşturuç katkıları da sürece dahil edilir. Kimyasal analiz için alınan numuneler sonrasında, sıvı metal yüzeyindeki cüruf temizlenir ve elde edilen çelik ya ikincil metalurjik işlemlere ya da sürekli döküm hattına gönderilir. Günümüzde modern elektrik ark ocaklarında tek bir ergitme işlemiyle yaklaşık 150 ton çelik üretilebilmekte ve bu işlem ortalama 90 dakika sürmektedir. Bu yöntemin önemli avantajlarından biri, doğrudan ve temiz bir ısıtma sağlamasıdır. Bu nedenle, özellikle elektriğin bol ve düşük maliyetli olduğu ülkelerde elektrik ark ocakları yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 2.'de elektrik ark fırınına ait şematik bir çizim verilmiştir [8].

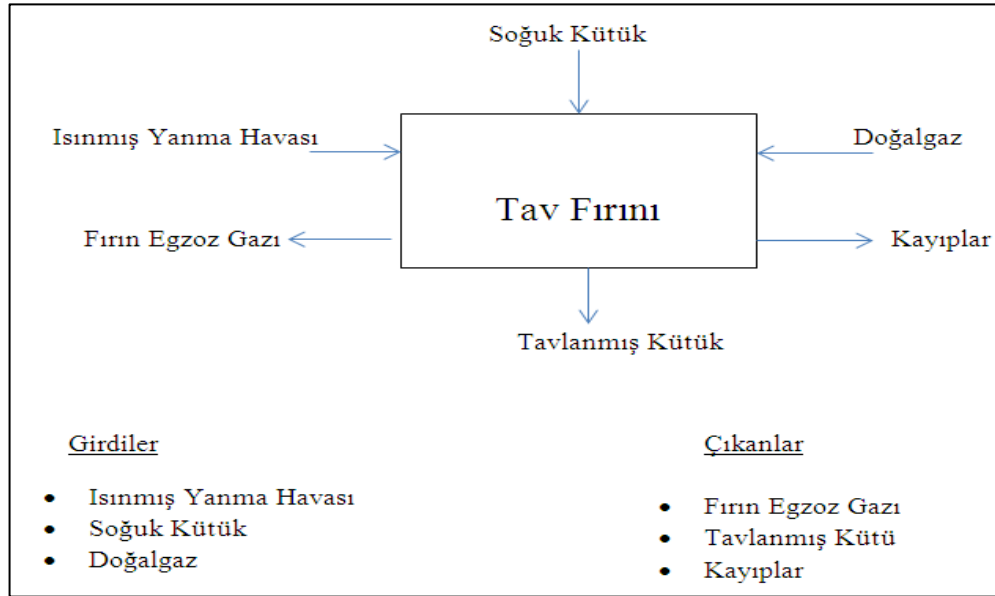


Şekil 2. Çelik üretimi için elektrik ark fırını (Electric arc furnace for steel production) [8]



Şekil 3. İncelenen tav fırına ait şematik gösterim (Schematic representation of the examined temperature furnace) [9]

Çalışmada incelenilen Tav fırına ait taslak görünüm Şekil 3.'de verilmiştir. Bu sisteme girenler yakıt olarak doğalgaz ve ısınmış yanma havası, ürünler ise yanma sonucu oluşan, fırın baca gazı ve kayıplardır. Bu sayede fırına giren soğuk kütük, tavlama kütük olarak sistemden çıkmaktadır. Fırın Sürekli Akışlı Açık Sistem (SAAS) kabul edilerek Şekil 4.'te ayrıca şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Sürekli akışlı açık sistem kabul edilen fırının şematik gösterimi
(Schematic Representation of a as a Continuous Flow Open System)

Fırın için enerji dengesi hesapları sistem sürekli akışlı açık sistem olarak kabul edilerek yapılmıştır. Hesaplama yapılırken ele alınan değerleri ölçülen, kabul edilen sabit ve hesaplanan olmak üzere üçe ayırabiliriz. Tüm bu değerler tablolarda açık bir şekilde belirtilmiştir.

Aşağıda verilen (1) ve (2) nolu denkleme göre Tablo 1.' de verilen veriler kullanılarak tav fırınına giren ısı miktarı hesaplanmıştır.

$$Q_g = V_{gn} \cdot H_u \quad (1)$$

Burada V_{gn} ideal gaz hacimlerinin normal şartlara (atmosfer basıncı 10332 mmSS ve normal sıcaklık 273 K) indirgenmesi için kullanılan bir denklemdir. Bu kapsamda kullanılan yakıt için V_{gn} eşitliği, aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$V_{gn} = (V(g) \cdot (10332 + P_g) \cdot 273) / (10332 \cdot (273 + T_g)) \quad (2)$$

(1) ve (2) nolu denkleme yer alan Q_g , V_{gn} , V_g , P_g , T_g ve H_u sırasıyla, tav fırınına giren ısı miktarı (kJ, yanma sonucu açığa çıkan ısı miktarı), 1 atm ve 0°C' de yakıt hacmi (Nm³), ölçüm sonucu yakıt hacmi (m³), ölçülen ortalama yakıt basıncı (bar), yakıt sıcaklığı (°C) ve yakıt net alt ısıl değeri (kJ/Nm³) olarak verilmektedir.

Bu çalışmada çeliğin ısıl içeriği hesaplanırken literatürde yaygın olarak kullanılan referans sıcaklık yaklaşımı benimsenmiştir. Buna göre hesaplamalar, 50°C referans sıcaklığına göre iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada çeliğin başlangıç sıcaklığı T_s 'den 50°C'ye kadar olan sıcaklık farkı q_2 ile ifade edilmiş, ikinci aşamada ise 50°C'den son sıcaklık T_1 'e kadar olan ısıl içerik q_1 olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşımın tercih edilmesinin nedeni, çelik için ısıl içerik değerlerinin genellikle belirli bir referans sıcaklığa göre verilmesi ve mühendislik hesaplarında bu referansın kullanılmasının standart bir yöntem olmasıdır. Bu çalışmada ısıl içerik hesabı basitleştirilerek sabit özgül ısı kabulü ile yapılmış olup, bu nedenle hesaplamalar yaklaşık sonuç vermektedir.

Aşağıda verilen (3) ve (4) nolu denkleme göre Tablo 1.'de verilen veriler kullanılarak sırasıyla çeliğin bulunduğu sıcaklıktaki sahip olduğu toplam ısıl enerjisi (Q_1 , kJ) iki aşamalı olarak hesaplanmıştır.

$$Q_1 = (q_1 + q_2) \cdot w_1 \quad (3)$$

$$q_2 = (50 - T_s) \cdot C \quad (4)$$

Burada, q_1 ve q_2 çeliğin kg başına ısıl içeriğini (kJ/kg) gösteren değerler olup q_1 , çeliğin 50 °C ile 1200 °C arasındaki ısıl içeriğini, q_2 ise çeliğin ilk sıcaklığı ile referans seçilen 50 °C arasındaki ısıl içeriğini göstermektedir. Buradaki w ve C değerleri ise sırasıyla, çeliğin kütlesini (kg) ve ısı iletim katsayısını

(W/m°C) göstermektedir. Çelik için özgül ısı sıcaklığa bağlı değişmekle birlikte bu çalışmada ortalama değer olarak 0,5 kJ/kg·°C alınmıştır.

Baca gazıyla atılan ısı kayıp miktarını (Q_2 , kJ) hesaplamak için ise aşağıda verilen (5) ve (6) nolu denklemler kullanılmıştır.

$$Q_2 = V_1 \cdot c_p \cdot T_2 \quad (5)$$

$$V_1 = V_{gn} \cdot V_2 \quad (6)$$

Burada, V_1 , V_2 ve c_p sırasıyla, toplam baca gaz miktarı (Nm^3), gerçek toplam baca gaz miktarı (Nm^3), baca gazı hacimsel özgül ısısı (kJ/ Nm^3 °C) dir. Değerler tablodan alınarak denklem (6)'da yerine yazılarak toplam kur baca gazı miktarı hesaplanır.

Fırın duvarlarından ve ocaktan iletim, taşınım, ışınlama kayıp olan ısı transferi ise,

$$Q_3 = S \cdot C \cdot x \frac{T-T_s}{D} \cdot A \cdot \theta \quad (7)$$

Bu modelde fırın duvarlarından olan taşınım ve ışınlama etkileri ayrı ayrı $h_{\text{taşınım}}$ ve $h_{\text{ışınlama}}$ olarak ifade edilmek yerine, $h_{\text{eşdeğer}}$ içerisinde birleşik olarak verilmiş ve ısı transferi hesapları (9) nolu denkleme göre yapılmıştır. Ocaktan olan ısı transferi ise (7) nolu denkleme göre hesaplanmış olup burada S, fırın şekil katsayısını; θ (saat), ısı dengesi için gerekli zamanı; C (W/m °C), ocak ısı iletim katsayısını; D (m) ise ocak iç duvarlar arası mesafeyi göstermektedir.

$$h_{\text{eşdeğer}} = S \cdot C \cdot \frac{\theta}{D} \quad (8)$$

Böylece (7) numaralı denklem aşağıda belirtilen (9) numaralı denkleme dönüşür.

$$Q_3 = h_{\text{eşdeğer}} \cdot A \cdot (T - T_s) \quad (9)$$

Fırından olan toplam ısı transferi ise, ($Q_3 = Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,3} + Q_{3,4} + Q_{3,5} + Q_{3,6}$) (kJ) şeklinde hesaplanmıştır. Burada,

- $Q_{3,1}$ = Fırının ön duvarından olan ısı transfer miktarı
- $Q_{3,2}$ = Fırının arka duvarından olan ısı transfer miktarı
- $Q_{3,3}$ = Fırının sağ duvarından olan ısı transfer miktarı
- $Q_{3,4}$ = Fırının sol duvarından olan ısı transfer miktarı
- $Q_{3,5}$ = Fırın üst duvarından olan ısı transfer miktarı
- $Q_{3,6}$ = Fırın ocağından olan ısı transfer miktarıdır

Fırından olan toplam ısı transfer miktarı (Q_3) içerisinde tüm ocak duvarlarından ve ocaktan olan ısı transfer miktarı yer almaktadır.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu bölümde çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu bölümlerden olan ısı transferi hesapları için gerekli olan tüm taşınım ve ışınlama ısı transfer katsayıları ve sıcaklık değerleri Tablo 1.'de verilmiştir. Elde edilen hesap sonuçları ise Tablo 2.'de verilmiştir.

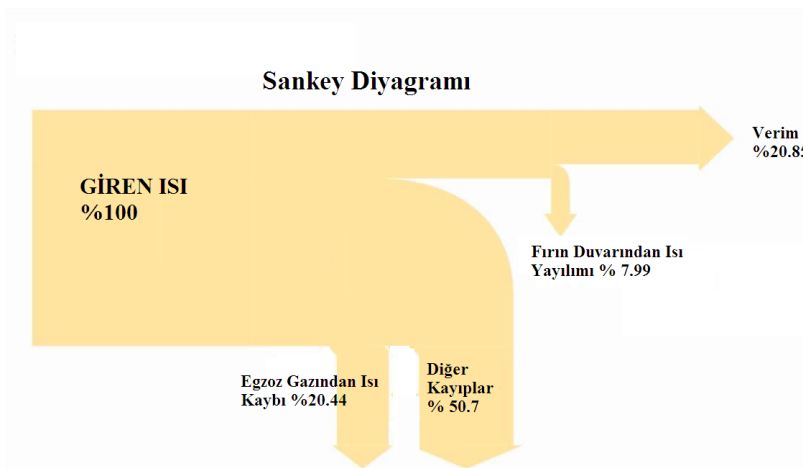
Tablo 1. Tav fırına ait ölçülen, sabit kabul edilen ve verilen değerler (Measured, assumed constant and given values for the annealing furnace)

<u>Ölçülen Değerler</u>		<u>Sabit Kabul Edilen Değerler</u>	
Fırın duvarında ortalama sıcaklık + 273 (Ön T ₃)	452,2 K	Isı taşınım katsayısı hc ₁ Isı ışıınım katsayısı hr ₁	7,89 kcal/m ² h ⁰ C 8,77 kcal/m ² h ⁰ C
Fırın duvarında ortalama sıcaklık + 273 (Arka T ₄)	434 K	Isı taşınım katsayısı hc ₂ Isı ışıınım katsayısı hr ₂	7,67 kcal/m ² h ⁰ C 8,07 kcal/m ² h ⁰ C
Fırın duvarında ortalama sıcaklık + 273 (Sol duvarı T ₅)	510 K	Isı taşınım katsayısı hc ₄ Isı ışıınım katsayısı hr ₄	8,51 kcal/m ² h ⁰ C 11,29 kcal/m ² h ⁰ C
Fırın duvarında ortalama sıcaklık + 273 (Sağ duvarı T ₆)	455 K	Isı taşınım katsayısı hc ₅ Isı ışıınım katsayısı hr ₅	7,93 kcal/m ² h ⁰ C 8,88 kcal/m ² h ⁰ C
Fırın üst duvarında ortalama sıcaklık+273 (T ₇)	599 K	Isı taşınım katsayısı hc ₆ Isı ışıınım katsayısı hr ₆	7,93 kcal/m ² h ⁰ C 16,17 kcal/m ² h ⁰ C
<u>Verilen Değerler</u>		Fırın ocağının yüzey alanı A	11,25 m ²
		Isı dengesi için gerekli zaman θ	3,5 h
		Ocak ısı iletim katsayısı C	1,52 W/mC
		Ocak şekil faktörü S	4,2
		Ocak iç duvarlar arası mesafe D	6,584 m
Ortalama ocak sıcaklığı (T ₈)	1173 °C	Çeliğin 50 °C den son sıcaklığa ısı içeriği[10] Çeliğin 50 °C ve altında ısı içeriği[10]	326 kJ/kg 16,974 kJ/kg
Yakıt basıncı (P)	160mmHg	Çeliğin standart sıcaklıktan 50 °C ye ısı içeriği[10]	0,46 kJ/kg°C
Yakıt sıcaklığı (Tyakıt)	13,1 °C		
Yakıt tüketimi (V)	2895,85 m ³	Baca gazı hacimsel özgül ısı değeri (cp)	1,39 kJ/Nm ³ °C
Standart sıcaklık (Ts)(Kışın fırına girmeden önce ölçülen kütük ilk sıcaklığı)	13,1 °C	Teorik hava miktarı	11 Nm ³
Son sıcaklık (T ₁)(Kütüğün fırından çıktıktan sonraki sıcaklığı)	1200 °C	Yakıt alt ısı değeri (Hu)	35572,5 kJ/Nm ³
		Teorik kuru baca gazı miktarı	10 Nm ³
		Baca gazı içindeki oksijen (O ₂) yoğunluğu	%6,8
		Ortalama baca gaz sıcaklığı ile standart sıcaklık (°C) arasındaki fark	312,9 °C
		Çelik kütük kütlesi (27x2200)	60700 kg

Tablo 2. Tablo 1.'deki verilere göre yapılan hesap sonuçları (Calculation results based on the data in Table 1)

Hesap sonuçları	
Yakıt yanma ısısı, ($Q_g = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$)	99818059,81 kJ
Çeliğin ısı içeriği, (Q_1)	20818521,8 kJ
Baca gazı ısı kaybı, (Q_2)	20405694,13 kJ
Fırından olan toplam ısı transferi, ($Q_3 = Q_{3,1} + Q_{3,2} + Q_{3,3} + Q_{3,4} + Q_{3,5} + Q_{3,6}$)	
Ön fırın duvarından olan ısı transferi, ($Q_{3,1}$)	836599,91 kJ
Arka fırın duvarından olan ısı transferi, ($Q_{3,2}$)	703794,83 kJ
Sağ fırın duvarından olan ısı transferi, ($Q_{3,3}$)	1414946,49 kJ
Sol fırın duvarından olan ısı transferi, ($Q_{3,4}$)	2740021,74 kJ
Fırın üst duvarından olan transferi, ($Q_{3,5}$)	2194952,98 kJ
Fırın ocağından olan ısı transferi, ($Q_{3,6}$)	93151,40 kJ
Fırından olan toplam ısı transferi, (Q_3)	7983467,35 kJ
Diğer kayıplar, (Q_4)	50610376,53 kJ
$Q_g = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$	99818059,81 kJ

Tablo 2.'deki hesap değerlerine göre fırın için ısı denge hesaplanarak Şekil 5.'de görüldüğü üzere Sankey diyagramı ile de sistemin enerji akışı görsel olarak analiz edilmiştir.



Şekil 5. Sankey diyagramı

Fırın termal verimi (η) ve Yakıt Tüketim Oranı (YTO) ise eşitlik (8) ve (9) a göre hesaplanmıştır. Sonuçlar tartışma ve sonuç başlığı altında yorumlanmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Tav fırınlarının termal verim değerleri genellikle %15 (optimize edilmemiş sistemlerde) ile %55 (İyileştirilmiş veya özel tasarım) arasında değişmektedir. İlave ısı geri kazanımlı kazanlarda ise bu değer %60 a kadar çıkabilmektedir [10]. Çalışmada incelenen fırında ise termal verim yaklaşık olarak %21 hesaplanarak literatürde endüstriyel tavlama ve ısıtma fırınları için bildirilen %20-30 değeri ile uyumlu çıkmıştır [10]. Termal verim değerinin bu aralıkta çıkması kazanın optimize edilmemiş olmasından yani kazanda ısı geri kazanımı olmaması, baca kaybının yüksek olması, izolasyonun zayıf olması, yanma sırasında kontrolsüz hava fazlalığı olması ve kazanın eski tip kazan olması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Çalışmada Yakıt Tüketim Oranı (YTO) ise 1644,44 kJ/kg olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer (1,644 GJ/ton) literatürdeki endüstriyel tavlama ve ısıtma fırınları için verilen 1-3 GJ /ton aralığı ile uyum göstermektedir [11]. Bu durum sistemin orta- düşük verim seviyesinde çalıştığını ve ısı kayıplarının azaltılması ile önemli iyileştirme potansiyeli bulunduğunu göstermektedir [12]. Siyambalapitiya ve ark. yaptıkları çalışmada yeniden ısıtma fırını için geliştirdikleri ısı dengesi modelinde, toplam enerji kaybının en büyük kısmının baca gazlarından (%25) ve fırın yüzeylerinden

(%17) olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışma fırın alt bölgesindeki yalıtım iyileştirmelerinin önemli enerji tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir [13].

Bu nedenle, çalışma enerji yönetimi açısından ele alındığında yapılması gerekenler sırasıyla belirtilmiştir. Kazandaki kayıplar en çok baca gazından olmaktadır, bunun nedeni tav fırınlarının işlevleri gereği çok yüksek sıcaklıklarda ısıtma yapması, bunun için brülörlerde gerçekleşen yanma sonucunda sistemden dışarıya atılan gazın yüksek sıcaklıkta olmasıdır. 650°C civarında olan baca gazı enerjisi baca gazı debisi çok düşük olmamak kaydıyla muhtelif ekonomizer ve eşanjör uygulamaları ile ortam ısıtmasında, sistem girdilerinin ön ısıtmasında, kızgın su buharı ihtiyacının karşılanmasında ya da sıcak su üretiminde kullanılabilir. Reküperasyon adı verilen uygulama bazı brülör tiplerinde brülöre entegre olarak yer almakta, yanma havası sisteme ortam sıcaklığında verilse de sistem içerisinde ön ısıtması sağlanmaktadır. Ayrıca enerji dengesinin verim artırıcı yönde iyileştirilmesi mümkündür. Yüzey kayıplarının azaltılması için fırın iç yüzeyinin yalıtımı artırılarak bu sayede fırın yüzeyinden gerçekleşen taşınım ve ışınım ile olan ısı transferi kayıplarının önüne geçilebilir. Dış yüzeyden yapılacak bir yalıtım fırının dışarıya atması gereken ısıyı atamamasından dolayı iç kabin sıcaklığını olması gereken değerin üzerine çıkarır, bu durum malzeme kalitesinin düşmesine ve iç yalıtımın aşınmasına sebebiyet verir. Baca gazı bileşenlerinin değerleri tamamen brülör verimi ile ilintilidir. Bu nedenle Tav fırınlarında kullanılan brülörlerin verimlerini yüksek tutmak için yapılacak çalışmalar önem kazanmaktadır. Giriş açıklığından oluşan kayıp ise, sisteme malzeme sürekli giriş yapmadığından yüklenme bitiminde otomatik olarak kapanan, yüklenme başlarken de kütük ebadına göre minimum seviyede açılan otomatik kapı montajı ile tamamen giderilmese de azaltılabilmektedir. Fırının enine uygun en uzun kütük ile çalışmak en ekonomik durumdur. Yakıt tüketimi hesaplanırken kütük ısı ihtiyacı ile fırın ve baca kayıpları göz önüne alınmalıdır. Bu kayıpları azaltmak için fırını tam doldurmak ve düzenli yüksek kapasite de çalıştırmak hedef olmalıdır. Ancak fırını, kapasitesinin üzerinde çalıştırmak ise yüksek enerji gerektirdiğinden fırın ve baca kayıpları doğru orantılı olarak artacaktır. Bu durum da ayrıca göz önüne alınmalıdır.

5. Kaynaklar (References)

- [1] G. Ertem, B. Çelik, S. Yeşilyurt, Endüstriyel tav fırınlarında ısı denkliği hesaplamaları ve enerji verimliliğinin belirlenmesi. IV. Ege Enerji Sempozyumu, (2008), İzmir.
- [2] https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2a.pdf 2026 (accessed 01.05.26).
- [3] O. Kara, E. Hürdoğan, Ö. Kaşka, Endüstriyel bir fırının atık ısısının enerji verimliliğine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12(4) (2015) 95-101.
- [4] K. Manatura, M. Tangtrakul, A study of specific energy consumption in reheating furnace using regenerative burners combined with recuperator. Silpakorn University Science and Technology Journal, 4(2), (2010), 7–13. doi.org/10.14456/sustj.2010.6
- [5] M.E. Ertem, S. Şen, G. Akar, C. Pamukçu, S. Gürgen, Energy balance analysis and energy saving opportunities for Erdemir slab furnace. Energy Sources, Part A, 32(11), (2010) 979–994. doi.org/10.1080/15567030903436863
- [6] W.H. Chen, Y.C. Chung, J.L. Liu, Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. International Communications in Heat and Mass Transfer, 32(5), (2005) 695–706. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.019
- [7] M. Si, S. Thompson, K. Calder, Energy efficiency assessment by Process Heating Assessment and Survey Tool (PHAST) and feasibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at a steel company. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(6), (2011) 2904–2908. doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.035
- [8] C.G. Salmon, J.E. Johnson, F.A. Malhas, Steel Structures: Design and Behavior (5th ed.). Pearson (2009).
- [9] M. Eyidoğan, K. Durmuş, D. Şükrü, T. Dursun, Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 29(4), (2014) 735–743. <https://doi.org/10.17341/gummfd.76579>
- [10] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.), 2018, Wiley.

- [11] Y. Wang, X. Zhang, J. Li, Y. Chen, H.Liu, H. Effects of furnace length on the thermal performance of a walking beam reheating furnace. *Metals*, 13(12), (2023). <https://doi.org/10.3390/met13121946>
- [12] European Commission, Joint Research Centre (JRC), Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production (Iron & Steel BREF). Publications Office of the European Union. 2013, <https://cippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/iron-and-steel-production>
- [13] Siyambalapitiya, T., Brooks, G., Rhamdhani, M. A., King, A., Walter, L. Heat balance study in a walking hearth reheat furnace. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 52(10), 1382-1396. <https://doi.org/10.1177/03019233251374809>



FARKLI BETON TÜRLERİNDE MERMER TOZU KULLANIMININ SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

*Ayşe BÜYÜKÜNSAL¹ 

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 17.05.2026, Kabul/Accepted: 08.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Bu çalışmada mermer tozu katkılı farklı beton türlerinin sürdürülebilirlik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında pomza agregalı hafif beton numunelerine ait deneysel veriler kullanılmış, ayrıca literatürde yer alan mermer tozu katkılı normal beton, kendiliğinden yerleşen hafif beton ve gazbeton çalışmaları incelenmiştir. Farklı beton türlerine ait mekanik ve fiziksel verilerin birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla “Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI)” adı verilen yeni bir değerlendirme yöntemi önerilmiştir. SPI yöntemi ile basınç dayanımı, mermer tozu kullanım oranı, birim hacim ağırlık ve çimento azaltımı parametreleri birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar mermer tozu kullanımının sürdürülebilir yapı malzemeleri açısından önemli avantajlar sağladığını göstermiştir. Özellikle pomza agregalı hafif betonlarda %20 mermer tozu kullanımının sürdürülebilirlik ve mekanik performans açısından optimum sonuç verdiği belirlenmiştir. Gazbeton çalışmalarında ise mermer tozunun ana hammadde olarak kullanılabilceği görülmüştür. Önerilen SPI yönteminin farklı beton türlerinin sürdürülebilirlik performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Mermer tozu, sürdürülebilir beton, hafif beton, SPI.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE USE OF MARBLE POWDER IN DIFFERENT TYPES OF CONCRETE FROM A SUSTAINABILITY PERSPECTIVE

ABSTRACT

In this study, the sustainability performances of different concrete types containing marble powder were comparatively evaluated. Experimental data obtained from pumice aggregate lightweight concrete mixtures were used within the scope of the study. In addition, marble powder incorporated normal concrete, self-compacting lightweight concrete and aerated concrete studies from the literature were also investigated. A new evaluation method called the “Sustainability Performance Index (SPI)” was proposed in order to evaluate the mechanical and physical properties of different concrete types together. In the SPI method, compressive strength, marble powder ratio, unit weight and cement reduction parameters were evaluated simultaneously. The results demonstrated that the use of marble powder provides significant advantages in terms of sustainable construction materials. Particularly, the use of 20% marble powder in pumice aggregate lightweight concrete provided optimum results in terms of sustainability and mechanical performance. In aerated concrete studies, marble powder was successfully used as the main raw material. It was concluded that the proposed SPI method is applicable for the comparative evaluation of sustainability performances of different concrete types.

Keywords: Marble powder, sustainable concrete, lightweight concrete, SPI.

1. Giriş (Introduction)

Beton, günümüzde yapı sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biri olmaktadır. Dayanım, ekonomik üretim, uzun servis ömrü ve uygulanabilirlik gibi avantajları nedeniyle altyapı, üstyapı, ulaşım ve kent mobilyaları gibi birçok alanda yoğun olarak kullanılmaktadır [1]. Ancak beton üretiminde kullanılan çimentonun yüksek enerji tüketimine ve önemli miktarda karbondioksit (CO₂) salınımına neden olmakta olup bu durum, sürdürülebilir yapı teknolojileri açısından önemli bir problem oluşturmaktadır [2].

Son yıllarda sürdürülebilir yapı malzemeleri üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve özellikle endüstriyel atıkların beton üretiminde değerlendirilmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [3]. Mermer işleme tesislerinde, üretim sırasında yüksek miktarda atık mermer tozu oluşmaktadır. Bu atıkların büyük kısmı depolama alanlarına bırakılmakta ve çevresel problemlere neden olmaktadır [4]. Mermer atıkları, yer altı sularının tıkanmasına, toprak yapısının bozulmasına ve ince partiküllerin havaya karışması sonucu çevre kirliliğine yol açabilmektedir [5]. Türkiye, dünya doğal taş rezervleri açısından önemli ülkelerden biri olup mermer üretiminde yüksek kapasiteye sahiptir. Buna bağlı olarak mermer işleme tesislerinde önemli miktarda atık oluşmaktadır. Kesim ve işleme işlemleri sonucunda mermer blokların yaklaşık %25-40'ı atık malzeme olarak ortaya çıkmaktadır [6]. Bu nedenle mermer atıklarının geri dönüşümü hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik kazanım açısından önem taşımaktadır. Sürdürülebilir yapı teknolojileri kapsamında atık malzemelerin beton üretiminde değerlendirilmesi, doğal kaynak tüketimini azaltmakta, depolama maliyetlerini düşürmekte ve karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [7]. Özellikle hafif beton üretiminde pomza agregası gibi doğal hafif agregalar ile birlikte atık mermer tozunun kullanılması, daha düşük yoğunluklu ve çevre dostu yapı elemanlarının üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Deprem etkilerinin önemli olduğu ülkelerde yapı elemanlarının hafifletilmesi büyük önem taşımaktadır. Yapı ağırlığının azalması, deprem sırasında oluşan sismik yüklerin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir [8]. Hafif beton teknolojileri bu nedenle yalnızca sürdürülebilirlik açısından değil aynı zamanda deprem güvenliği açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Hafif beton üretiminde kullanılan pomza agregası, düşük yoğunluğu sayesinde yapı elemanlarının ölü yükünü azaltırken yeterli mekanik performansın korunmasına katkı sağlamaktadır.

Literatürde mermer tozunun; normal beton, kendiliğinden yerleşen hafif beton ve gazbeton üretiminde kullanılabilirliği üzerine farklı çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmada, pomza agregası ve mermer tozu kullanılarak üretilen hafif betonların sürdürülebilirlik performansları ile farklı beton türlerinde mermer tozu kullanımının sürdürülebilirlik açısından etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla “Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI)” adı verilen yeni bir değerlendirme yöntemi önerilmiş ve uygulanmıştır. Önerilen yaklaşım ile mermer tozu katkısının farklı beton sistemlerindeki mekanik performans, hafiflik ve çimento azaltımı üzerindeki etkileri birlikte analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Deneysel çalışma ve karşılaştırmalı veri kaynakları (Experimental study and comparative data sources)

Bu çalışma kapsamında, pomza agregası ve mermer tozu kullanılarak üretilen hafif beton numunelerine ait deneysel veriler sürdürülebilirlik performansı açısından değerlendirilmiştir. Çimento yerine hacimsel olarak %0, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında mermer tozu ikamesi uygulanmış ve elde edilen mekanik ve fiziksel özellikler veri seti olarak kullanılmıştır. Her karışım serisi için en az üç numune test edilmiş ve sonuçlar ortalama değer olarak verilmiştir. Çalışmada elde edilen deneysel verilerin sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmesi amacıyla literatürde yer alan farklı mermer tozu katkılı beton çalışmaları da değerlendirmeye dahil edilmiştir. Bu kapsamda mermer tozu katkılı normal beton, kendiliğinden yerleşen hafif beton ve gazbeton çalışmalarına ait veri setleri incelenmiştir. Çalışmalarda uygulanan deney yöntemleri, ölçülen temel parametreler ve ilgili kaynaklar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. SPI analizinde değerlendirilen çalışmalar ve kullanılan parametreler (Studies Evaluated in the SPI Analysis and the Parameters Used)

Çalışma	Beton Türü	Kullanılan Agregat / Ana Malzeme	MT Kullanımı	Kullanılan Parametreler	Kaynak
DeneySEL Çalışma	Pomza agregalı hafif beton	Pomza agregası	%0–25 ikame	Basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, elastisite modülü	—
Referans Çalışma 1	Mermer tozu katkılı normal beton	Normal agregat	%0–20 ikame	Basınç dayanımı, yoğunluk, su emme	[4]
Referans Çalışma 2	Kendiliğinden yerleşen hafif beton	Asidik pomza agregası (Nevşehir bims)	%0–15 ikame	Basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, işlenebilirlik	[7]
Referans Çalışma 3	Gazbeton	Mermer tozu esaslı gazbeton karışımı	Ana hammadde olarak kullanım	Basınç dayanımı, yoğunluk	[5]

2.2. Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI) yöntemi (Sustainability Performance Index (SPI) method)

Literatürde mermer tozu katkılı beton çalışmalarının büyük bölümünde değerlendirmelerin genellikle basınç dayanımı, işlenebilirlik veya fiziksel özellikler üzerinden gerçekleştirildiği görülmektedir. Ancak sürdürülebilir yapı malzemelerinin değerlendirilmesinde yalnızca mekanik performansın değil, aynı zamanda çimento azaltımı, atık malzeme kullanımı ve birim hacim ağırlık gibi parametrelerin de birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Literatürde sürdürülebilir beton değerlendirmeleri çoğunlukla tek parametre üzerinden yapılırken, önerilen SPI yöntemi mekanik performans, hafiflik ve çimento azaltımını birlikte değerlendirmektedir. Bu nedenle, çalışmada farklı beton türlerinin sürdürülebilirlik performanslarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla “Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI)” yöntemi önerilmiştir. Farklı beton türlerine ait mekanik ve fiziksel verilerin birlikte değerlendirilebilmesi amacıyla “Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI)” adı verilen yeni bir değerlendirme yöntemi oluşturulmuştur. Önerilen indeks yöntemi ile mermer tozu katkısının;

- mekanik performans,
- hafiflik,
- çimento azaltımı,
- atık malzeme kullanım oranı,

üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmiştir. Önerilen SPI yöntemi ile deneysel Çalışma kapsamında elde edilen deneysel veriler ile literatürde yer alan farklı beton türlerine ait veri setleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

SPI hesabında Denklem (1)’deki eşitlik kullanılmıştır.

$$SPI = \frac{f_c \cdot MT}{\rho \cdot C} \times 10^4 \quad (1)$$

Burada;

f_c 28 günlük basınç dayanımını (MPa),
 MT mermer tozu oranını (%),
 ρ birim hacmin kütlesini (kg/m^3),
 C çimento oranını (%) ifade etmektedir.

SPI hesaplamasında kullanılan veriler ve elde edilen SPI değerleri Tablo 2’de verilmiştir. MT-0 kontrol numunelerinde mermer tozu kullanılmadığı için SPI değeri 0 kabul edilmiştir.

Tablo 2. SPI hesaplamasında kullanılan veriler ve elde edilen SPI değerleri (Data Used in the SPI Calculation and the Obtained SPI Values)

Çalışma	Numune	Mermer Tozu (MT) Kullanımı [%]	Basınç Dayanımı (f_c) [MPa]	Birim Hacim Ağırlık (ρ) [kg/m ³]	Çimento Oranı (C) [%]	SPI
Deneyssel	MT-0	0	25,30	1114,87	100	0,000
Deneyssel	MT-10	10	25,52	1147,25	90	24,716
Deneyssel	MT-15	15	26,75	1170,07	85	40,344
Deneyssel	MT-20	20	28,07	1181,18	80	59,411
Deneyssel	MT-25	25	23,40	1191,10	75	65,486
Referans 1	MT-0	0	18,00	2181	100	0000
Referans 1	MT-10	10	16,90	2229	90	8,424
Referans 1	MT-15	15	19,80	2241	85	15,592
Referans 1	MT-20	20	21,30	2115	80	25,177
Referans 2	REF	0	15,20	1375	100	0,000
Referans 2	MT-5	5	14,09	1340	95	5,539
Referans 2	MT-10	10	12,97	1310	90	10,997
Referans 2	MT-15	15	11,53	1288	85	15,799
Referans 3	A	50	1,45	475	28	54,511
Referans 3	F	50	2,25	715	28	56,194
Referans 3	I	63,8	1,65	575	21,3	86,087
Referans 3	K	58,1	1,25	520	23,3	60,096

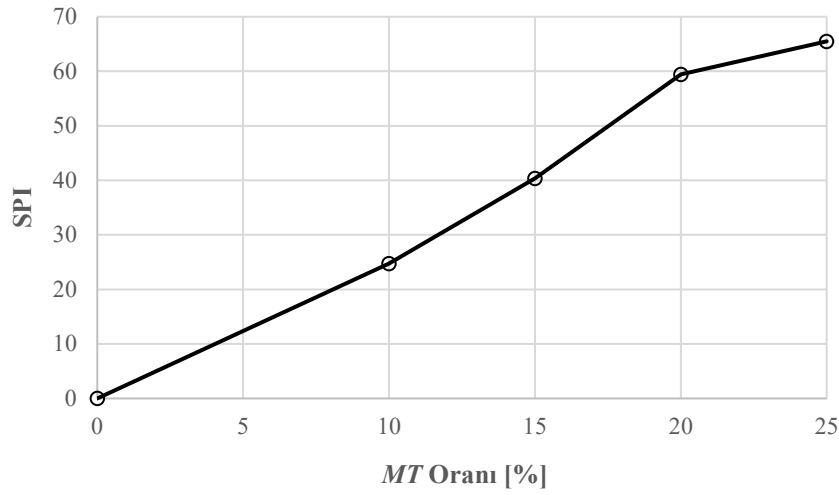
Referans Çalışma 3 için mermer tozu katkı malzemesi yerine gazbeton üretiminde ana ince malzeme olarak kullanılmıştır. Bu nedenle SPI hesaplamalarında mermer tozu kullanım oranı ve çimento oranı, karışım bileşenleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çimento oranları, karışım içerisindeki toplam bağlayıcı miktarı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Mermer tozu kullanım oranı ise toplam katı malzeme içerisindeki yaklaşık oran üzerinden belirlenmiştir.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Çalışmada değerlendirilen mermer tozu katkılı betonların sürdürülebilirlik performansları SPI yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde mermer tozu kullanımının belirli oranlara kadar beton performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Pomza agregalı hafif beton karışımlarında, mermer tozu oranının artmasıyla birlikte SPI değerlerinde önemli artış meydana gelmiştir.

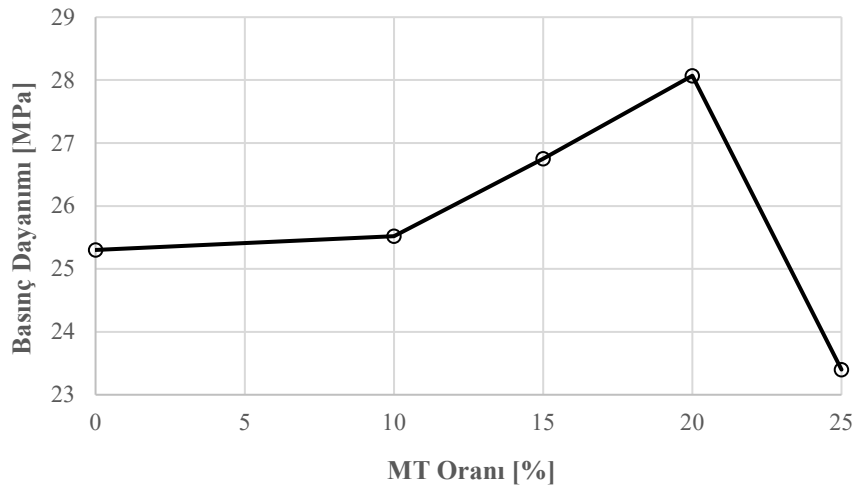
Çalışmada değerlendirilen farklı tip betonların sürdürülebilirlik performansları SPI yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde mermer tozu kullanımının belirli oranlara kadar beton performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Pomza agregası ve mermer tozu kullanılarak üretilen hafif beton numunelerinden elde edilen deneysel veriler ile literatürde yer alan farklı mermer tozu katkılı beton çalışmalarından elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir. Değerlendirmede basınç dayanımı, birim hacim kütlesi, çimento oranı, mermer tozu kullanım oranı ve Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI) değerleri esas alınmıştır.

Deneyssel çalışma kapsamında üretilen pomza agregalı hafif betonlarda mermer tozu oranının artmasıyla SPI değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Özellikle %20 mermer tozu içeren karışım, hem basınç dayanımı hem de sürdürülebilirlik performansı açısından optimum sonuç vermiştir. %25 mermer tozu içeren karışımın SPI değeri yüksek görünmesine rağmen basınç dayanımında düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum aşırı mermer tozu kullanımının bağlayıcı sistem üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Mermer tozu kullanım oranı ile SPI değerleri arasındaki değişim Şekil 1’de verilmiştir. Bu sonuçlar, mermer tozu kullanımının sürdürülebilirlik performansını artırdığını göstermektedir.



Şekil 1. Mermer tozu oranının SPI değerlerine etkisi (Effect of marble powder ratio on SPI values)

Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde MT-0 numunesinde 25,30 MPa olan dayanımın MT-10 numunesinde 25,52 MPa, MT-15 numunesinde 26,75 MPa ve MT-20 numunesinde 28,07 MPa değerine yükseldiği görülmüştür. Ancak MT-25 numunesinde basınç dayanımı 23,40 MPa değerine düşmüştür. Mermer tozu oranının basınç dayanımına etkisi Şekil 2’de görülmektedir. Bu nedenle mermer tozu kullanımının %20 seviyesine kadar mekanik performansı olumlu etkilediği, %25 seviyesinde ise dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir.

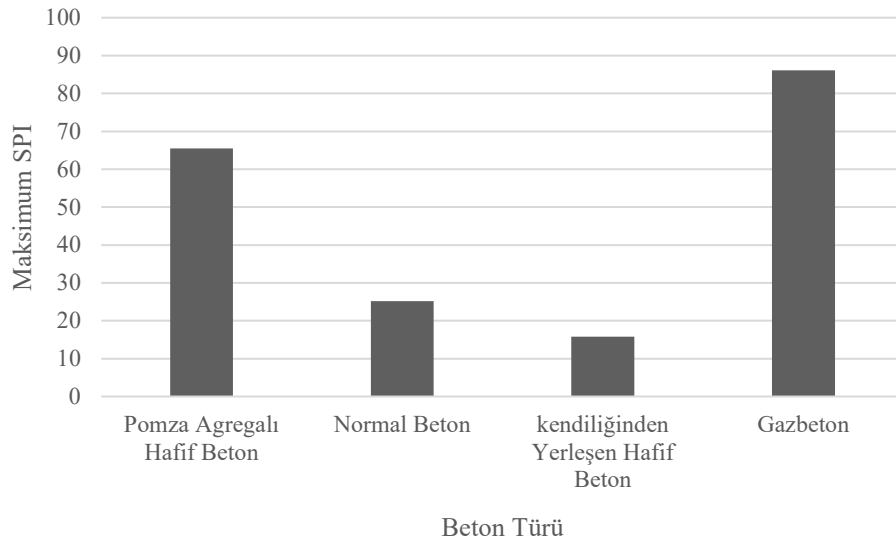


Şekil 2. Mermer tozu oranının basınç dayanımı değerlerine etkisi (Effect of marble powder ratio on compressive strength)

Referans Çalışma 2’de kendiliğinden yerleşen hafif betonlarda en yüksek SPI değeri %15 mermer tozu içeren numunede 15,799 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, mermer tozu oranının artması SPI değerini artırmış, ancak basınç dayanımını azaltmıştır. Bu nedenle, kendiliğinden yerleşen hafif betonlarda sürdürülebilirlik performansı artarken mekanik performansta azalma meydana geldiği görülmüştür [9]. Referans Çalışma 3’te gazbeton numunelerinde SPI değerleri A serisinde 54,511, F serisinde 56,194, I serisinde 86,087 ve K serisinde 60,096 olarak hesaplanmıştır. En yüksek SPI değeri I serisinde elde edilmiştir. Bu sonuç, düşük çimento oranı ve yüksek mermer tozu kullanımının sürdürülebilirlik performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

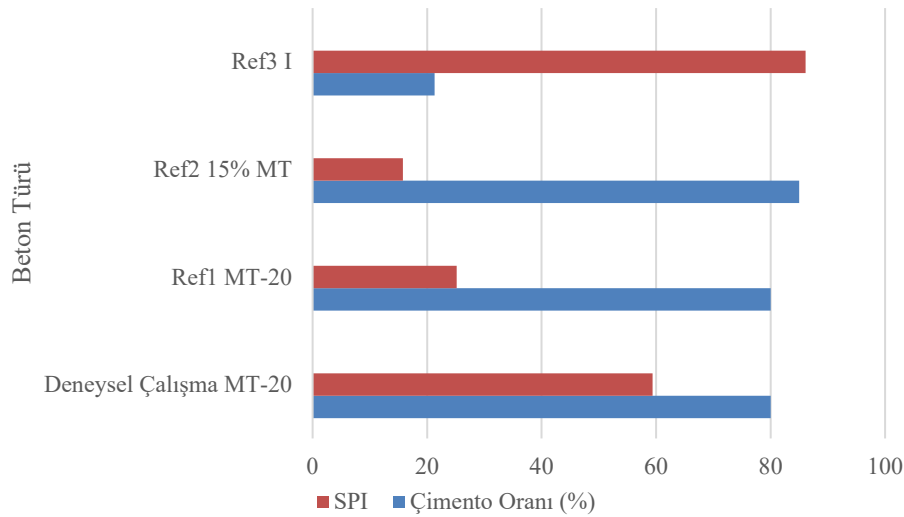
Farklı beton türlerinin maksimum SPI değerlerinin karşılaştırılması Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde en yüksek SPI değerinin Referans Çalışma 3’e ait gazbeton serilerinde elde edildiği görülmektedir. Bunu, deneysel çalışma kapsamında üretilen pomza agregalı hafif beton numuneleri takip etmiştir. Referans Çalışma 1’de yer alan mermer tozu katkılı normal beton numuneleri ile Referans Çalışma 2’de yer alan kendiliğinden yerleşen hafif beton numunelerinin ise daha düşük SPI değerleri verdiği belirlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde en yüksek SPI değerinin gazbeton serilerinde elde edildiği görülmektedir. Bunun temel nedeni, düşük çimento oranı ve yüksek mermer tozu kullanım

oranıdır. Deneysel çalışma kapsamında üretilen hafif beton numunelerinin ise normal beton ve kendiliğinden yerleşen hafif beton çalışmalarına göre daha yüksek sürdürülebilirlik performansı gösterdiği belirlenmiştir.



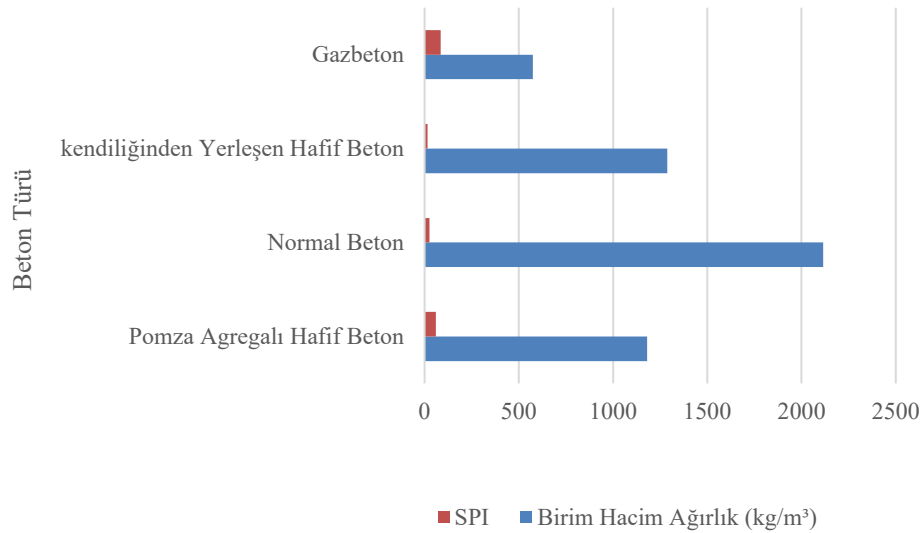
Şekil 3. Farklı beton türlerinin maksimum SPI değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of maximum SPI values for different concrete types)

Çimento oranı ile SPI arasındaki ilişki Şekil 4’te verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, çimento oranının azalmasıyla birlikte SPI değerlerinin arttığı görülmektedir. Özellikle düşük çimento oranına sahip gazbeton serilerinin yüksek sürdürülebilirlik performansı gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum çimento tüketiminin azaltılmasının sürdürülebilir yapı malzemeleri açısından önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Çimento oranı ile SPI arasındaki ilişki (Relationship between cement ratio and SPI)

Birim hacim kütle ile SPI arasındaki ilişki Şekil 5’te verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde düşük birim hacim kütlelerine sahip beton türlerinin daha yüksek SPI değerleri verdiği görülmektedir. Özellikle gazbeton ve pomza agregalı hafif beton sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından avantaj sağladığı belirlenmiştir. Bu durum, hafif beton teknolojilerinin sürdürülebilir yapı üretiminde önemli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Birim hacim kütlesi ile SPI arasındaki ilişki (Relationship between unit mass and SPI)

Gerek gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında gerekse literatürde incelenen çalışmalarda, beton karışımlarında mermer tozu kullanımının basınç dayanımı üzerinde belirli oranlara kadar olumlu etkiler sağladığı görülmüştür. Bu olumlu etkinin özellikle %15 ve %20 mermer tozu ikame oranlarında daha belirgin olduğu söylenebilir. Bu durum, mermer tozunun ince dolgu (filler) etkisi oluşturarak betonun boşluk yapısını iyileştirmesi ve daha yoğun bir mikro yapı meydana getirmesi ile açıklanabilir [10]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde mermer tozunun ince filler etkisi sayesinde beton içerisindeki boşluk yapısını iyileştirdiği belirtilmektedir [11]. Literatürle karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar, mermer tozunun beton üretiminde belirli oranlara kadar olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir [4]. Mermer tozu katkılı normal betonlarda ve kendiliğinden yerleşen hafif betonlarda da benzer şekilde sürdürülebilirlik performansının arttığı görülmüştür. Gazbeton çalışmasında ise mermer tozu katkı malzemesi olmanın ötesinde ana hammadde olarak değerlendirilmiş ve yüksek SPI değerleri elde edilmiştir.

Bu bulgular, mermer tozunun farklı beton türlerinde sürdürülebilir yapı malzemesi üretimi açısından önemli bir geri dönüşüm potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca SPI yöntemi, farklı beton türlerinde elde edilen mekanik ve fiziksel verilerin sürdürülebilirlik açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Kendiliğinden yerleşen hafif beton çalışmalarında mermer tozu oranının artmasıyla birlikte işlenebilirlik özelliklerinde azalma meydana geldiği görülmüştür [7]. Ancak düşük yoğunluk avantajı, sürdürülebilirlik açısından önemli katkı sağlamıştır. SPI değerleri değerlendirildiğinde, %15 mermer tozu içeren karışımın sürdürülebilirlik açısından uygun performans gösterdiği belirlenmiştir.

Gazbeton çalışmalarında mermer tozunun ana hammadde olarak kullanılabilmesi önemli bir geri dönüşüm potansiyeli ortaya koymuştur [5]. Gazbeton numunelerinde yüksek oranda mermer tozu kullanılmasına rağmen yeterli fiziksel performans elde edilmiştir. Bu durum, mermer atıklarının yalnızca katkı malzemesi olarak değil, aynı zamanda ana hammadde olarak da değerlendirilebileceğini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Mermer işleme endüstrisinden kaynaklanan mermer çamuru atıkları, önemli çevresel problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle, atık mermerin yapı malzemelerinde yeniden kullanımı sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi açısından önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. mermer çamuru kullanımının doğal kaynak tüketimini azaltabileceğini ve çevresel açıdan avantaj sağlayabileceğini literatürde belirtmiştir [12]. Bu durum SPI yöntemi ile yapılan sürdürülebilirlik değerlendirmelerini desteklemektedir.

Çalışmada elde edilen SPI sonuçları, belirli oranlarda mermer tozu kullanımının yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda sürdürülebilir malzeme kullanımına da katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Özellikle düşük çimento tüketimi ve atık malzeme kullanımının birlikte değerlendirilmesi, sürdürülebilir beton üretimi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle önerilen SPI yaklaşımının farklı beton türlerinin sürdürülebilirlik performanslarının karşılaştırmalı değerlendirilmesinde kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

Mermer tozu kullanımının belirli oranlara kadar beton performansını olumlu etkilediği literatürde de belirtilmektedir. Farklı oranlarda mermer tozu içeren betonlarda optimum mermer tozu kullanım oranının %5 olduğu belirtilmiştir. Yüksek oranlarda mermer tozu kullanımının ise mekanik performansı azalttığı görülmüştür. Ayrıca, atık mermer tozu kullanımının betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilediği, belirli oranlarda kullanımın beton performansını iyileştirebildiği ifade edilmiştir. Bu durum, deneysel çalışmada %25 mermer tozu içeren numunede basınç dayanımında meydana gelen düşüş ile uyumludur. Bununla birlikte mermer tozu kullanımının, sürdürülebilir beton üretimi açısından önemli çevresel avantajlar sağlayabileceği belirtilmiştir. Özellikle atık mermer tozunun beton üretiminde değerlendirilmesiyle, doğal kaynak tüketiminin ve atık depolama problemlerinin azaltılabileceği ifade edilmiştir. Bu durum, çalışma kapsamında önerilen SPI yönteminin sürdürülebilirlik yaklaşımıyla uyum göstermektedir [9,10].

Mermer tozunun çimento yerine kullanımında optimum ikame oranının genellikle %5–10 aralığında olduğu belirtilirken, daha yüksek oranlarda ise klinker seyrilmesi nedeniyle dayanım kayıplarının oluşabileceği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, ince agrega yerine kullanım durumunda optimum performans çoğunlukla %10–20 aralığında elde edildiği ortaya konmuştur. Bu olumlu etkinin filler etkisi ve mikro yapı yoğunlaşması ile ilişkili olduğunu belirtmiştir [13]. Bu durum, deneysel çalışmada %10–20 mermer tozu içeren karışımlarda elde edilen yüksek SPI değerleri ve mekanik performans sonuçları ile uyum göstermektedir.

Ayrıca çalışmada mermer tozunun sürdürülebilir yapı malzemesi üretiminde önemli bir geri dönüşüm potansiyeline sahip olduğu ve döngüsel ekonomi yaklaşımını desteklediği vurgulanmıştır [13]. Bu bağlamda, SPI yöntemi ile yapılan değerlendirmelerin sürdürülebilirlik analizlerinde kullanılabilir olduğu görülmektedir.

Çimento üretiminin yüksek karbon emisyonuna neden olması nedeniyle alternatif bağlayıcı malzemelerin kullanımı, sürdürülebilir beton teknolojileri açısından önem taşımaktadır. Çimento tüketiminin azaltılması ve alternatif malzeme kullanımının, beton üretiminde CO₂ emisyonlarının önemli ölçüde düşürülmesine katkı sağlayabileceğini belirtmiştir [14]. Bu durum, sürdürülebilir beton teknolojilerinin değerlendirilmesinde yalnızca mekanik performansın değil aynı zamanda çimento azaltımı ve atık malzeme kullanımının da birlikte dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Çalışmada önerilen Sürdürülebilirlik Performans İndeksi (SPI) yöntemi; basınç dayanımı, mermer tozu kullanım oranı, birim hacim ağırlık ve çimento oranını birlikte değerlendirerek sürdürülebilirlik performansının sayısal olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Elde edilen sonuçlarda düşük çimento oranına ve yüksek atık kullanımına sahip karışımların daha yüksek SPI değerleri verdiği belirlenmiştir. Bu nedenle SPI yaklaşımının, sürdürülebilir beton üretiminde çevresel performans ile mühendislik özelliklerini birlikte değerlendirebilen uygulanabilir bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Sürdürülebilir çimento sistemlerinin değerlendirilmesinde mekanik performans ile birlikte çevresel performansın da dikkate alınması gerektiğini literatürde desteklenmektedir [15]. SPI yöntemi de benzer şekilde yalnızca dayanım performansını değil; çimento azaltımı, atık malzeme kullanımı ve hafiflik özelliklerini birlikte değerlendirerek sürdürülebilirlik performansının sayısal olarak karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca, önerilen yöntemin farklı atık katkılı beton türlerine uygulanabilir olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, cam tozu, seramik atığı ve silis dumanı gibi farklı endüstriyel atıkların kullanıldığı beton sistemlerinde benzer sürdürülebilirlik analizleri gerçekleştirilebilir [16].

SPI yönteminin en önemli avantajlarından biri farklı beton türlerini ortak bir sürdürülebilirlik parametresi altında karşılaştırabilmesidir. Bu sayede; normal beton, hafif beton, kendiliğinden yerleşen beton, gazbeton gibi farklı betonlar aynı değerlendirme sistemi içerisinde analiz edilebilmektedir.

Bununla birlikte yöntemin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Denklem içerisinde ekonomik maliyet, karbon emisyonu, uzun süreli dayanıklılık ve yaşam döngüsü etkileri doğrudan yer almamaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda SPI yönteminin bu parametrelerle geliştirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak SPI yönteminin sürdürülebilir beton teknolojilerinde uygulanabilir, basit ve karşılaştırmalı değerlendirme yapılmasına olanak sağlayan yeni bir yaklaşım olduğu düşünülmektedir.

5. Kaynaklar (References)

- [1] Erdoğan TY. Beton. Ankara: METU Press; 2003.
- [2] Ashish DK. Concrete made with waste marble powder and supplementary cementitious material for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2019;211:716-729. Doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.245
- [3] Mohammadhosseini, H., & Abdul Awal, A. S. M. (2016). Green concrete production incorporating waste carpet fiber and palm oil fuel ash. Elsevier.
- [4] Ünal O, Kıbıçcı Y. Mermer tozu atıklarının beton üretiminde kullanılmasının araştırılması. Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı. Afyon; 2001. p.317-326.
- [5] Demir İ, Başpınar MS, Abadan S, Kahraman E, Ünal O. Mermer tozunun gazbeton üretiminde geri dönüşüm malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. ISEM2014 Proceedings. Adıyaman; 2014. p.1292-1301.
- [6] Türkiye Doğal Taş ve Mermer Sektörü Raporu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü; 2019.
- [7] Özdemir, C., Çağlar, H., Ahıskalı, A., Çimen, S., & Avan, Ç. (2022). Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonda Mermer Tozu Kullanımının Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(3), 1184-1200. <https://doi.org/10.47495/okufbed.981460>
- [8] Topçu İB. Hafif Beton Teknolojisi. Eskişehir: Nobel Yayınları; 2006.
- [9] Yazıcıoğlu, S., & Kara, C. (2017). Betonda Atık Mermer Tozu Kullanımının Karbonatlaşmaya Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 369-376. <https://izlik.org/JA38SZ42EX>
- [10] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G., & İpek, S. (2014). Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.046>
- [11] Alyamaç KE, İnce R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*. 2009;23(3):1201-1210.doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012
- [12] Benjeddou O., Abdelzاهر M.A. Experimental and Theoretical Study of Water Amount on the Rheological Features of Marble Sludge Grout. *Civil Engineering and Architecture*. 2024;12(3A):2403-2418. doi:10.13189/cea.2024.121
- [13] Luhar S., Luhar I. Sustainable Recycling and Reuse of Marble Waste in the Construction Industry: A Systematic Review Towards a Circular Economy. *Journal of Composites Science*. 2026;10:221. doi.org/10.3390/jcs10050221
- [14] Miller SA, Horvath A, Monteiro PJM. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental Research Letters*. 2016;11(7):074029. doi:10.1088/1748-9326/11/7/074029
- [15] Huang G., Liu Y., Benn T., Luo L., Xie T., Zhuge Y. A Comprehensive Framework for the Design and Optimisation of Limestone-Calcined Clay Cement: Integrating Mechanical, Environmental, and Financial Performance. *Journal of Composites Science*. 2024;8(12):524. doi.org/10.3390/jcs8120524
- [16] Siddique R, Cachim P. Waste and supplementary cementitious materials in concrete: Characterisation, properties and applications. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;136:85-96.



MONONOBE–OKABE YÖNTEMİNDE SİSMİK TOPRAK BASINCI KATSAYILARINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN DUYARLILIK ANALİZİ

*Burak SÜRÜCÜ¹ 

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 19.05.2026, Kabul/Accepted: 22.06.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ÖZ

Dayanma yapılarında deprem etkisi altında meydana gelen toprak basınçlarının doğru belirlenebilmesi, geoteknik tasarım güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu çerçevede Mononobe–Okabe yöntemi, sismik aktif ve pasif toprak basıncı katsayılarının belirlenmesinde sık olarak başvurulan yaklaşımlardan biridir. Bu çalışmada, Mononobe–Okabe yöntemi dahilinde sismik toprak basıncı katsayılarını etkileyen temel parametrelerin duyarlılığı araştırılmıştır. Analizlerde zemin içsel sürtünme açısı (ϕ'_d), duvar arka yüz açısı (ψ), dolgu yüzeyi eğimi (β), duvar-zemin sürtünme açısı (δ_d), kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ve dayanma yapısı azaltma katsayısı (r) dikkate alınmıştır. Hazırlanan 2160 farklı senaryo için toplam aktif katsayı (K_{at}), toplam pasif katsayı (K_{pt}), dinamik aktif artış katsayısı (K_{ad}) ve pasif dirençteki dinamik azalma katsayısı (K_{pd}) hesaplanmış; parametrelerin katsayılar üzerindeki etkileri kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Bulgular, aktif basıncı katsayıları üzerinde özellikle β ve S_{DS} parametrelerinin; pasif basıncı katsayıları üzerindeyse ϕ'_d ve β parametrelerinin daha belirgin etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, Mononobe–Okabe katsayılarının sadece deprem parametrelerine değil, aynı zamanda zemin ve geometriye ilişkin girdilere de yüksek duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Mononobe–Okabe yöntemi, Sismik toprak basıncı, Duyarlılık analizi, Dayanma yapıları.

SENSITIVITY ANALYSIS OF PARAMETERS AFFECTING SEISMIC EARTH PRESSURE COEFFICIENTS IN THE MONONOBE-OKABE METHOD

ABSTRACT

Accurate determination of soil pressures under seismic influence in retaining structures is critically important for geotechnical design safety. In this context, the Mononobe–Okabe method is one of the frequently used approaches for determining seismic active and passive soil pressure coefficients. In this study, the sensitivity of the fundamental parameters affecting seismic soil pressure coefficients within the Mononobe–Okabe method was investigated. In the analyses, the soil internal friction angle (ϕ'_d), wall back face angle (ψ), fill surface slope (β), wall-soil friction angle (δ_d), short-period design spectral acceleration coefficient (S_{DS}), and retaining structure reduction coefficient (r) were considered. For 2160 different scenarios, the total active coefficient (K_{at}), total passive coefficient (K_{pt}), dynamic active increase coefficient (K_{ad}), and dynamic reduction coefficient in passive resistance (K_{pd}) were calculated; and the effects of the parameters on the coefficients were compared and evaluated. The findings showed that the parameters β and S_{DS} had a more significant effect on active pressure coefficients, while the parameters ϕ'_d and β had a more significant effect on passive pressure coefficients. The results reveal that Mononobe–Okabe coefficients exhibit high sensitivity not only to earthquake parameters but also to soil and geometry-related inputs.

Keywords: Mononobe–Okabe method, Seismic earth pressure, Sensitivity analysis, Retaining structures.

1. Giriş (Introduction)

Dayanma yapıları; karayolu ve demiryolu dolguları, köprü yaklaşım dolguları, bodrum perdeleri, liman yapıları, derin kazılar ve eğimli sahalarda yapılan mühendislik platformları gibi birçok inşai faaliyette zeminin emniyetle tutulmasına imkân tanıyan geoteknik sistemlerdir. Bu yapıların projelendirilmesinde en önemli konulardan biri, yapı arkasındaki zeminin oluşturduğu toprak basınçlarının doğru belirlenmesidir. Statik şartlarda aktif ve pasif toprak basınçlarının hesabı klasik zemin mekaniğinin temel problemleri arasında bulunmakta olup bu konudaki Coulomb ve Rankine yaklaşımları uzun yıllardır kullanılmaktadır [1,2]. Fakat deprem etkisindeki zemin kütlelerinde gerçekleşen ivmeler, toprak basınçlarının hem büyüklüğünü hem de dağılımını değiştirebilmektedir. Bu sebeple sismik şartlardaki dayanma yapılarına etkiyen toprak basınçlarının doğru değerlendirilmesi, özellikle deprem tehlikesi yüksek alanlarda geoteknik tasarım güvenliği açısından önemli bir mühendislik problemidir [3,4].

Sismik yükleme şartları altında dayanma yapılarında meydana gelen yatay basınçlar, sadece statik basınca eklenen sabit bir ilave yük olarak değerlendirilmemelidir. Zemin içsel sürtünme açısı, duvar-zemin arayüz sürtünmesi, dolgu yüzeyi eğimi, duvar arka yüz geometrisi, yatay deprem katsayısı, düşey deprem katsayısı ve duvarın hareket kabiliyeti gibi çok sayıda parametre sismik aktif ve pasif basınç katsayıları üzerinde etkili olabilmektedir [5,6]. Bununla birlikte duvarın rijit ya da esnek olması, dönme veya ötelenme hareketine sahip olması, arka dolgu zeminin sıklık durumu ve zemin kamasının limit denge durumuna erişip erişmemesi de bileşke kuvvetin uygulama noktasını değiştirebilmektedir [7,8].

Sismik toprak basıncı analizlerindeki en genel yaklaşımlardan birisi Mononobe–Okabe'dir. Bu yöntem Coulomb toprak basıncı teorisinin deprem koşullarını içerecek biçimde genişletilmiş pseudo-statik bir formu olarak değerlendirilmektedir. Okabe tarafından hazırlanan genel toprak basıncı yaklaşımı ve Mononobe ile Matsuo tarafından deprem etkisi altındaki toprak basınçlarının tahkikine yönelik yapılan araştırmalar bu yöntemin temelini oluşturmuştur [3,4]. Mononobe–Okabe yönteminde deprem etkisi, zemin kamasına etkiyen yatay ve düşey eşdeğer statik ivme katsayıları ile temsil edilir. Bu şekilde zemin kamasına etkiyen ağırlık kuvveti, yatay ve düşey deprem bileşenleriyle değerlendirilerek aktif ve pasif sismik toprak basıncı katsayıları bulunur [5]. Yöntemin mühendislik uygulamalarında yaygın kullanılmasının temel sebebi karmaşık dinamik zemin-yapı etkileşimini daha sade ve kullanılabilir bir yaklaşıma indirgemesidir [6]. Bununla birlikte Mononobe–Okabe yöntemi belirli varsayımlara dayanmaktadır. Yöntem genel olarak kuru, kohezyonsuz ve homojen arka dolgu zeminler için hazırlanmış olup, zemin kamasının limit denge durumuna ulaştığını kabul eder [5]. Ayrıca aktif veya pasif limit durumun ortaya çıkabilmesi için dayanma yapısının yeterli düzeyde hareket edebildiği varsayılır [6]. Bu sebeple hareket kabiliyeti sınırlı olan rijit bodrum perdeleri ve derin gömülü yapılarda yöntemin sonuçları dikkatle incelenmelidir. Wood (1973), deprem etkisi altındaki rijit duvarlarda elastik zemin-yapı sisteminin Mononobe–Okabe kabulünden farklı basınç davranışları gösterebileceğini ifade etmiştir [7]. Steedman ve Zeng (1990), pseudo-statik yaklaşımlarda deprem ivmesinin faz etkisinin özellikle basınç dağılımı üzerinde önemli rol oynadığını; bu etkinin toplam basınç büyüklüğünden ziyade basıncın duvar boyunca dağılımını değiştirebildiğini belirlemiştir [8]. Sismik toprak basıncı davranışının anlaşılması konusunda erken çalışmalar, dayanma yapılarında deprem etkisinin tasarım bakımından önemini sunmuştur. Matsuo ve Ohara, rıhtım duvarlarında deprem sırasında oluşan yanal toprak basıncı ve stabilite problemini incelemiş ve sismik etkilerin dayanma yapıları için kritik olabileceğini ortaya koymuştur [9].

Seed ve Whitman (1970), dinamik yüklerle karşı karşıya kalan dayanma yapılarının tasarımında Mononobe–Okabe yaklaşımının kullanımını araştırmış ve yöntemin pratik tasarım kapsamında önemli bir temel sunduğunu belirtmiştir [5]. Kramer ve Stewart (2024) ise geoteknik deprem mühendisliğinde pseudo-statik analiz, eşdeğer deprem katsayıları ve dayanma yapılarında sismik toprak basıncı hesabına yönelik temel ilkeleri belirtmiştir [6]. Deneysel ve analitik çalışmalar, sismik toprak basıncı davranışının sadece katsayı büyüklüğü bakımından değil, aynı zamanda basınç dağılımı bakımından da incelenmesi gerektiğini açıklamaktadır. Sherif ve Fang (1984), üstten dönme hareketi yapan rijit bir duvar arkasında meydana gelen dinamik aktif basınç dağılımını incelemiş ve dinamik basınç dağılımının doğrusal olmayabileceğini ortaya koymuştur [10]. Fang, Chen ve Wu (1994), pasif toprak basıncının değişik duvar hareket şekillerine bağlı değiştiğini deneysel olarak belirlemiştir [11]. Dimarogona (1983), deprem etkisindeki dayanma duvarı üzerindeki yanal basınç dağılımını analitik olarak değerlendirmiş ve duvar hareket biçiminin sismik basınç dağılımında belirleyici rol oynadığını açıklamıştır [12]. Bu çalışmalar, dayanma yapılarında sismik basınç probleminin duvar hareketi, zemin davranışı ve deprem girdisiyle birlikte incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Mononobe–Okabe yöntemine ilişkin olarak devamında yapılan araştırmalar yöntemin geçerlilik koşullarını ve alternatif analiz yaklaşımlarını tartışmıştır. Richards, Huang ve Fishman (1999), dayanma yapılarındaki sismik toprak basıncının tahmini için kinematik esaslı bir yaklaşım hazırlamış ve klasik pseudo-statik yöntemlerle kıyaslamalı incelemeler yapmıştır [13]. Mylonakis, Kloukinas ve Papantonopoulos (2007), Mononobe–Okabe denklemlerine alternatif kapalı form bir çözüm önermiş ve zemin içsel sürtünme açısı, duvar eğimi, dolgu eğimi, duvar pürüzlülüğü, yüzey yükü, yatay ve düşey deprem ivmesi gibi parametrelerin sismik toprak basıncı üzerindeki etkilerini tartışmıştır [14]. Nakamura (2006), santrifüj model testleriyle ağırlık tipi dayanma duvarlarında Mononobe–Okabe teorisini tekrar değerlendirmiş ve yöntem kabullerinin deneysel davranışla bağıntısını değerlendirmiştir [15]. Bu araştırmalar, Mononobe–Okabe yönteminin basit ve kullanışlı olmasına rağmen, parametre tercihine duyarlı sonuçlar üretebildiğine işaret etmektedir.

Güncel deneysel ve sayısal çalışmalar da dayanma yapılarında sismik toprak basınçlarının zemin ve yapı davranışıyla birlikte yorumlanması gerektiğini göstermektedir. Mikola, Candia ve Sitar (2016), kohezyonsuz zeminlerde dayanma yapıları ve bodrum perdelerinde meydana gelen sismik toprak basınçlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiş, basınç değerlerinin deprem parametreleri, dolgu zeminin sıklığı ve yapı davranışı gibi değişkenlerle ilişkili olduğunu tanımlamıştır [16]. Çakır (2013), konsol dayanma duvarlarında deprem kayıtlarının frekans içeriği ve zemin-yapı etkileşiminin sismik davranış üzerindeki etkisini araştırmış, duvar davranışının bir tek zemin veya deprem parametresiyle açıklanmasının mümkün olmadığını göstermiştir [17].

Sadrekarami (2010), dayanma duvarları üzerinde pseudo-statik yanal toprak basınçlarını araştırmış, duvar arka yüz geometrisinin basınç davranışına etkili olabileceğini göstermiştir [18]. Bu çalışmalar, dayanma yapılarında değişken etkilerinin değerlendirilmesinin önemini pekiştirmektedir. Tasarım çalışmaları açısından Mononobe–Okabe yaklaşımı hâlen önemli bir konuma sahiptir. FHWA tarafından oluşturulan geoteknik deprem mühendisliği kılavuzlarında, ulaşım yapıları ve dayanma sistemlerinde deprem etkisinin değerlendirilmesinde pseudo-statik yaklaşımlar ve tasarım prensipleri ele alınmıştır [19]. Eurocode 8, temeller, dayanma yapıları ve geoteknik yapıların deprem etkisi altında tasarımına ilişkin genel hükümleri içermektedir [20]. Türkiye’de ise Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, deprem etkisi altında temel zeminleri ve dayanma yapılarına ilişkin tasarım kurallarını sunmaktadır [21].

İnşaat Mühendisleri Odası (2023) tarafından yayımlanan uygulama örneklerinde, dayanma yapılarının deprem etkisi altında analizlerinde Mononobe–Okabe yönteminin eşdeğer statik yaklaşım şeklinde kullanıldığı ifade edilmektedir [22]. Bu durum, yöntemin hem uluslararası hem de ulusal tasarım çalışmalarında geçerliliğini koruduğunu göstermektedir. Fakat tasarım yönetmelikleri ve klasik hesap yaklaşımları genellikle katsayıların nasıl hesaplanacağına odaklanmakta, bu katsayıların hangi girdi parametrelerine ne düzeyde duyarlı olduğunu her zaman açık olarak göstermemektedir. Oysa geoteknik tasarımcının karşılaştığı temel problemlerden biri sismik toprak basıncı katsayılarını hangi parametrelerin daha fazla etkilediğidir. Zemin içsel sürtünme açısının yükselmesi aktif basınç katsayısını azaltırken pasif direnç katsayısını artırabilmektedir [6]. Dolgu yüzeyi eğimi aktif basıncı artırabilir ve özellikle düşük içsel sürtünme açısında hesap sınırlarını zorlayabilir [14]. Duvar arka yüz açısı ve duvar-zemin sürtünme açısı da hem aktif hem de pasif katsayıların değişiminde etkili olabilir [13,14]. Bununla birlikte kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ve azaltma katsayısı gibi deprem girdileri, yatay deprem katsayısı üzerinden toplam sismik basınç katsayılarını doğrudan etkileyebilmektedir [19,21].

Bu çalışmada Mononobe–Okabe yöntemi dahilinde sismik toprak basıncı katsayılarını etkileyen temel parametrelerin duyarlılığı araştırılmıştır. Oluşturulan senaryo kümesiyle toplam aktif katsayı K_{at} , toplam pasif katsayı K_{pt} , dinamik aktif artış katsayısı K_{ad} ve pasif dirençteki dinamik azalma katsayısı K_{pd} hesaplanmıştır. Çalışma Mononobe–Okabe hesaplarında kullanılan temel girdilerin aktif ve pasif sismik toprak basıncı katsayıları üzerindeki etkilerini kıyaslamalı biçimde değerlendirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda parametre etkileri katsayı değişim aralıkları üzerinden değerlendirilmiş; bununla birlikte S_{DS-R} ve $\phi'_d-\beta$ parametre çiftleri için etkileşim alanları görselleştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Analizde kullanılan parametrelerin ve değer aralıklarının belirlenmesi (Determination of parameters and value ranges used in the analysis)

Mononobe–Okabe yönteminde sismik aktif ve pasif toprak basıncı katsayıları zeminin özellikleri, duvar geometrisi, dolgu yüzeyi eğimi, duvar-zemin arayüz sürtünmesi ve deprem katsayılarına bağlı şekilde farklılık göstermektedir. Bu çalışmada zemin içsel sürtünme açısı (ϕ'_d), duvar arka yüzünün yatayla yaptığı açı (ψ), dolgu yüzeyi eğimi (β), duvar-zemin sürtünme açısı (δ_d), kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}) ve dayanma yapısı azaltma katsayısı (r) temel girdi parametreleri olarak tercih edilmiştir. Kullanılan parametreler ve seçilen değer aralıkları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Analizde kullanılan parametreler ve değer aralıkları (Parameters and value ranges used in the analysis.)

Parametre	Açıklama	Değer aralığı
ϕ'_d	Zemin içsel sürtünme açısı ($^\circ$)	25°, 30°, 35°, 40°
ψ	Duvar arka yüzünün yatayla yaptığı açı ($^\circ$)	60°, 75°, 90°
β	Dolgu yüzeyi eğimi ($^\circ$)	0°, 5°, 10°, 15°
δ_d	Duvar-zemin sürtünme açısı	0, $\phi'_d/3$, $2\phi'_d/3$
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50
r	Dayanma yapısı azaltma katsayısı	1.0, 1.5, 2.0

Zemin içsel sürtünme açısı ϕ'_d olarak 25°–40° aralığı tercih edilmiştir. Bu aralık, gevşek-orta sıkı granüler dolgulardan daha sıkı kumlu-çakıllı dolgu zeminlere kadar uygulamada karşılaşılabilecek değerleri tanımlamaktadır. Güncel FHWA kaynaklarında mekanik olarak stabilize edilmiş zemin duvarlarında kullanılacak granüler dolgular için 34° mertebesinde içsel sürtünme açısının tipik bir tasarım girdisi olarak kullanıldığı aktarılmaktadır [23]. WSDOT köprü ve dayanma yapıları tasarım kılavuzunda da granüler zeminler için 34°–38° seviyesindeki değerler kullanılmaktadır [24]. Duvar arka yüz açısı ψ için 60°, 75° ve 90° değerleri kullanılmıştır. $\psi = 90^\circ$, düşey arka yüzü dayanma yapısını temsil eden durumdur. Diğer değerler olan 60° ve 75° ise arka yüz geometrisinin katsayılar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla tercih edilmiştir. Dolgu yüzeyi eğimi β için 0°, 5°, 10° ve 15° değerleri seçilmiştir. $\beta = 0^\circ$ yatay dolgu yüzeyini ifade etmektedir. Diğer değerlerse arka dolgu eğiminin aktif ve pasif toprak basıncı katsayılarına etkisini incelemek amacıyla seçilmiştir. Mononobe–Okabe aktif katsayı hesabında $\beta \leq \phi'_d - \theta$ koşulu formül seçimi konusunda önemlidir. Bu sebeple β değerlerinin seviyeli biçimde yükseltilmesi hem geometri etkisini hem de hesap şartlarının katsayılar üzerindeki etkisini incelemeye imkân sağlamaktadır.

Duvar-zemin sürtünme açısı δ_d için 0, $\phi'_d/3$ ve $2\phi'_d/3$ kabullerinden faydalanılmıştır. $\delta_d = 0$ sürtünmesiz arayüzü temsil ederken, $\phi'_d/3$ ve $2\phi'_d/3$ değerleri duvar-zemin arayüz sürtünmesinin kademeli biçimde yükseldiği senaryoları temsil etmektedir. Literatürde ve uygulama notlarında Coulomb tipi aktif basınç hesaplarında δ değerinin çoğunlukla ϕ' ’nin belirli bir oranı olarak alındığı, özellikle $2\phi/3$ kabulünün yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir [25]. Bu çalışmada aktif basınç tarafında δ_d değişken olarak değerlendirilmiş, pasif direnç tarafında ise güvenli tarafta kalmak amacıyla $\delta_d = 0$ kabul edilmiştir. Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} için 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 ve 1.50 değerleri seçilmiştir. TBDY 2018’de S_{DS} , kısa periyot bölgesi için tasarım spektral ivme katsayısı olarak tanımlanmakta ve deprem etkisinin belirlenmesinde temel bir büyüklük olarak kullanılmaktadır [21]. Bu çalışmada seçilen değerler, düşükten yükseğe doğru farklı sismik tehlike düzeylerini temsil edecek biçimde belirlenmiştir. Mononobe–Okabe hesaplarında S_{DS} , $k_h = 0.4S_{DS}/r$ bağıntısı üzerinden yatay deprem katsayısını doğrudan etkilediği için katsayı duyarlılığı açısından temel değişkenlerden biri olarak değerlendirilmiştir [21], [26], [27].

Dayanma yapısı azaltma katsayısı r için 1.0, 1.5 ve 2.0 değerleri kullanılmıştır. $r = 1.0$, deprem etkisinin azaltılmadığı daha konservatif durumu; $r = 1.5$ ve $r = 2.0$ ise dayanma yapısının türü ve izin verilen yer değiştirme kapasitesine yönelik deprem etkisinin azaltıldığı durumları göstermektedir. TBDY 2018 kapsamında dayanma yapılarında eşdeğer statik deprem katsayısının S_{DS} ve r ile ilişkilendirildiği görülmektedir [21]. Güncel uygulama çalışmalarında da konsol istinat duvarları için $r = 1.5$ kabulünün

kullanıldığı ve yatay deprem katsayısının $k_h = 0.4S_{DS}/r$ bağıntısıyla hesaplanabileceği ifade edilmektedir [27].

Hesaplamlarda referans durum $\varphi'_d = 30^\circ$, $\psi = 90^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $\delta_d = 2\varphi'_d/3$, $S_{DS} = 1.00$ ve $r = 1.50$ olarak belirlenmiştir. Bu referans durum; düşey arka yüzü dayanma yapısı, yatay dolgu yüzeyi ve orta düzeyde duvar-zemin sürtünmesi kabulünü yansıtmaktadır. Hesaplamalardaki tek parametre duyarlılık değerlendirmelerinde ilgili parametre değiştirilirken diğer parametreler referans değerlerinde sabit tutulmuştur.

2.2. Deprem katsayıları ve sismik açı (Seismic coefficients and seismic angle)

Deprem etkisi, yatay ve düşey eşdeğer statik deprem katsayıları ile temsil edilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 kapsamında dayanma yapıları için kullanılan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı S_{DS} ve dayanma yapısı azaltma katsayısı r göz önünde bulundurularak yatay deprem katsayısı k_h Denklem (1) ile hesaplanmıştır [21,22].

$$k_h = \frac{0.4S_{DS}}{r} \quad (1)$$

Burada k_h , yatay eşdeğer statik deprem katsayısını; S_{DS} , kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını; r ise dayanma yapısı azaltma katsayısını göstermektedir. Düşey deprem katsayısı k_v , yatay deprem katsayısına bağlı biçimde Denklem (2) ile tanımlanmıştır.

$$k_v = 0.5k_h \quad (2)$$

Mononobe–Okabe yaklaşımında deprem etkisi, zemin kaması üzerinde sismik açı θ ile tanımlanmaktadır. Düşey ivmenin yukarı ve aşağı yönlü etkilerini temsil edebilmek için iki farklı sismik açı kullanılmıştır. Bu açılar Denklem (3) ve Denklem (4) ile hesaplanmıştır.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1+k_v} \right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1-k_v} \right) \quad (4)$$

Burada θ_1 ve θ_2 , deprem ivmesinin farklı yönleri için hesaplanan sismik açıları göstermektedir. Hesaplamlarda trigonometrik fonksiyonlar radyan cinsinden kullanılmıştır.

2.3. Aktif toprak basıncı katsayılarının hesaplanması (Calculation of active earth pressure coefficients)

Mononobe–Okabe yöntemindeki aktif katsayı hesabında ilk olarak dinamik koşul kontrol edilmiştir. Bu kontrol Denklem (5) ile gerçekleştirilmiştir.

$$\beta \leq \varphi'_d - \theta \quad (5)$$

Denklem (5)'te verilen koşulun sağlanması durumunda toplam aktif toprak basıncı katsayısı K_{at} , Denklem (6) ile hesaplanmıştır.

$$K_{at} = \frac{\sin^2(\psi + \varphi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi'_d + \delta_d) \sin(\varphi'_d - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \theta - \delta_d) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2} \quad (6)$$

Denklem (5)'teki koşulun sağlanmaması başka bir deyişle $\beta > \varphi'_d - \theta$ olması halinde ise aktif katsayı hesabında kök terimini içermeyen ifade kullanılmıştır. Bu şartlar altında toplam aktif toprak basıncı katsayısı Denklem (7) ile hesaplanmıştır.

$$K_{at} = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \theta - \delta_d)} \quad (7)$$

Statik aktif toprak basıncı katsayısı K_{as} , deprem etkisinin bulunmadığı durum için $\theta = 0$ ile hesaplanmıştır. Bu sayede statik aktif katsayı Denklem (6) veya Denklem (7)'nin $\theta = 0$ koşulundaki karşılığı olarak elde edilmiştir. Sismik durumda ise θ_1 ve θ_2 için iki farklı toplam aktif katsayı değeri hesaplanmıştır. Bu değerler $K_{at,1}$ ve $K_{at,2}$ olarak tanımlanmıştır. Aktif basınç tarafında tasarım için daha elverişsiz olan büyük katsayı dikkate alınmış ve analizlerde kullanılacak toplam aktif katsayı Denklem (8) ile belirlenmiştir.

$$K_{at} = \max(K_{at,1}, K_{at,2}) \quad (8)$$

Dinamik aktif artış katsayısı K_{ad} , toplam aktif katsayı K_{at} ile statik aktif katsayı K_{as} arasındaki fark olarak Denklem (9) ile hesaplanmıştır. Bu tanım ile deprem etkisi sebebiyle aktif tarafta meydana gelen ek katsayı artışı ayrı bir değişken olarak değerlendirilmiştir.

$$K_{ad} = K_{at} - K_{as} \quad (9)$$

2.4. Pasif toprak basıncı katsayılarının hesaplanması (Calculation of passive earth pressure coefficients)

Pasif toprak basıncı hesabında, güvenli tarafta kalmak amacıyla duvar ile zemin arasında sürtünme olmadığı kabul edilmiştir. Pasif basınç katsayısı, zemin içsel sürtünme açısı ϕ'_d , duvar arka yüz açısı ψ , dolgu yüzeyi eğimi β ve sismik açı θ parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Toplam pasif toprak basıncı katsayısı K_{pt} , Denklem (10) ile hesaplanmıştır.

$$K_{pt} = \frac{\sin^2(\psi + \phi'_d - \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi'_d) \sin(\phi'_d + \beta - \theta)}{\sin(\psi + \theta) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2} \quad (10)$$

Denklem (10)'da $\delta_d = 0$ kabulü bulunduğu için, pasif katsayı hesabı sürtünmesiz duvar varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Statik pasif toprak basıncı katsayısı K_{ps} , Denklem (10)'da $\theta = 0$ tercih edilerek hesaplanmıştır. Sismik durumda pasif katsayı θ_1 ve θ_2 için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu değerler $K_{pt,1}$ ve $K_{pt,2}$ olarak tanımlanmıştır. Pasif direncin belirlenmesinde küçük katsayı göz önünde bulundurulmuş ve analizlerde kullanılacak toplam pasif katsayı Denklem (11) ile belirlenmiştir.

$$K_{pt} = \min(K_{pt,1}, K_{pt,2}) \quad (11)$$

Pasif dirençteki dinamik azalma katsayısı K_{pd} , statik pasif katsayı K_{ps} ile toplam pasif katsayı K_{pt} arasındaki fark şeklinde Denklem (12) ile elde edilmiştir. Bu ifade, deprem etkisi altında pasif direnç kapasitesinde meydana gelen azalmayı temsil etmektedir.

$$K_{pd} = K_{ps} - K_{pt} \quad (12)$$

2.5. Statik, artımsal dinamik ve toplam dinamik basınçların tanımlanması (Definition of static, incremental dynamic and total dynamic pressures)

Mononobe-Okabe yaklaşımında katsayılar ile belirlenen basınçlar, dayanma yapısı yüksekliği H ve zemin birim hacim ağırlığı γ ile ilişkilendirilmektedir. Statik aktif basınç bileşkesi P_s , statik aktif katsayı K_{as} kullanılarak Denklem (13) ile gösterilmektedir.

$$P_s = \frac{1}{2} K_{as} \gamma H^2 \quad (13)$$

Deprem etkisiyle meydana gelen artımsal dinamik basınç bileşkesi ΔP_d , dinamik aktif artış katsayısı K_{ad} kullanılarak Denklem (14) ile hesaplanmıştır.

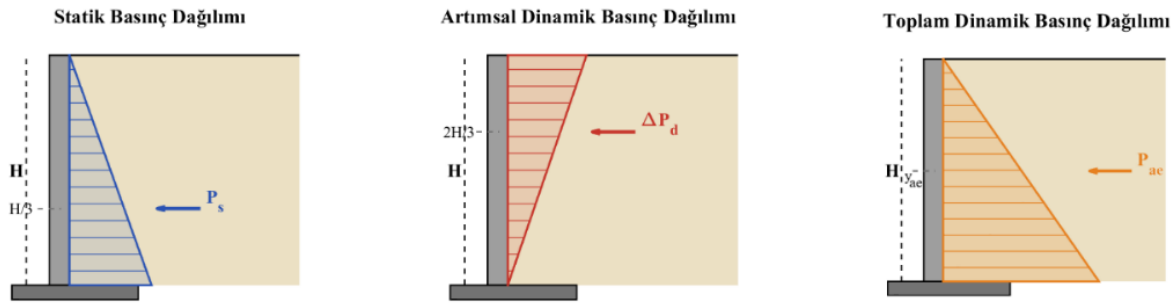
$$\Delta P_d = \frac{1}{2} K_{ad} \gamma H^2 \quad (14)$$

Toplam dinamik aktif basınç bileşkesi P_{ae} , statik basınç bileşkesi ile artımsal dinamik basınç bileşkesinin toplamı şeklinde Denklem (15) ile tanımlanmıştır.

$$P_{ae} = P_s + \Delta P_d \quad (15)$$

Statik aktif basınç bileşkesinin üçgensel dağılımı kabulünden ötürü tabandan $H/3$ yüksekliğinde etki ettiği varsayılmıştır. Dinamik artış bileşkesinin etkime yüksekliği için farklı kabuller bulunmakla birlikte, Seed ve Whitman (1970) tarafından dinamik artış bileşkesinin yaklaşık $0.6H$ seviyesinde etki ettiği önerilmiştir; Whitman (1991) tarafından ise sismik dayanma yapısı tasarımında bu yaklaşım tartışılmıştır [5], [28]. Bu çalışmada, artımsal dinamik basınç dağılımı esas alınarak ΔP_d bileşkesinin tabandan $2H/3$ yüksekliğinde etki ettiği kabul edilmiştir. Toplam dinamik aktif basınç bileşkesinin tabandan itibaren etkime yüksekliği \bar{y}_{ae} , moment dengesi kullanılarak Denklem (16) ile hesaplanmıştır. Çalışmada basınç dağılımları, katsayıların fiziksel anlamını göstermek amacıyla şematik olarak sunulmuştur. Çalışmanın ana değerlendirme konusu, basınç bileşkelerinin yapısal tasarımda kullanılması değil, katsayıların parametre değişimlerine verdiği tepkinin incelenmesidir.

$$\bar{y}_{ae} = \frac{P_s \left(\frac{H}{3}\right) + \Delta P_d \left(\frac{2H}{3}\right)}{P_{ae}} \quad (16)$$



Şekil 1. Basınç dağılımlarının şematik gösterimi (Schematic representation of pressure distributions)

2.6. Senaryo üretimi ve analiz süreci (Scenario generation and analysis procedure)

Parametre kombinasyonları tam faktöriyel yaklaşımla oluşturulmuştur. Buna göre dört farklı ϕ'_d , üç farklı ψ , dört farklı β , üç farklı δ_d , beş farklı S_{DS} ve üç farklı r değeri birlikte değerlendirilmiş toplam 2160 senaryo üzerinden incelemeler gerçekleştirilmiştir. Her senaryo için öncelikle k_h , k_v , θ_1 ve θ_2 değerleri hesaplanmıştır. Ardından statik aktif katsayı K_{as} , toplam aktif katsayı K_{at} , dinamik aktif artış katsayısı K_{ad} , statik pasif katsayı K_{ps} , toplam pasif katsayı K_{pt} ve pasif dirençteki dinamik azalma katsayısı K_{pd} belirlenmiştir. Hesaplama aşamalarının temel adımları özet olarak aşağıda sunulmuştur:

1. Girdi parametrelerinin seçilmesi: ϕ'_d , ψ , β , δ_d , S_{DS} ve r .
2. k_h ve k_v deprem katsayılarının hesaplanması.
3. θ_1 ve θ_2 sismik açı değerlerinin belirlenmesi.
4. $\beta \leq \phi'_d - \theta$ koşuluna göre aktif katsayı formülünün seçilmesi.
5. θ_1 ve θ_2 için aktif katsayıların hesaplanması ve maksimum değer K_{at} olarak seçilmesi.
6. Statik aktif katsayı K_{as} ile toplam aktif katsayı K_{at} arasındaki farktan K_{ad} değerinin hesaplanması.
7. θ_1 ve θ_2 için pasif katsayıların hesaplanması ve minimum değer K_{pt} olarak seçilmesi.
8. Statik pasif katsayı K_{ps} ile toplam pasif katsayı K_{pt} arasındaki farktan K_{pd} değerinin hesaplanması.
9. Katsayıların tablo halinde kaydedilmesi ve duyarlılık değerlendirmesinin yapılması.

2.7. Duyarlılık değerlendirme yaklaşımı (Sensitivity evaluation approach)

Duyarlılık analizi, bir model çıktısındaki değişimin hangi girdi parametrelerinden ve bu parametrelerdeki değişimlerden ne ölçüde etkilendiğini belirlemek için kullanılan bir değerlendirme yaklaşımıdır [29]. Bu yaklaşım, özellikle çok sayıda girdi parametresi bulunan modellerde, davranışı kontrol eden baskın değişkenlerin belirlenmesine ve daha yorumlanabilir sonuçlar elde edilmesine katkı sunmaktadır [30]. Bu çalışmada duyarlılık analizi, Mononobe–Okabe yöntemiyle hesaplanan sismik toprak basıncı katsayılarının seçilen zemin, geometri ve deprem parametrelerine verdiği değişim tepkisini karşılaştırmak için kullanılmıştır. Parametre duyarlılığı, her bir girdi parametresinin ilgili katsayı üzerinde oluşturduğu değişim aralığı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda her parametre için diğer değişkenler referans değerlerinde sabit tutulmuş ve ilgili katsayının en büyük ve en küçük değerleri arasındaki fark hesaplanmıştır. Katsayı değişim aralığı Denklem (17) ile tanımlanmıştır.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (17)$$

Burada ΔK , ilgili katsayı için değişim aralığını; K_{\max} , tercih edilen parametre değişiminde belirlenen en büyük katsayı değerini; K_{\min} ise en küçük katsayı değerini göstermektedir. ΔK değerinin büyük olması, ilgili parametrenin seçilen katsayı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım K_{at} , K_{pt} , K_{ad} ve K_{pd} katsayıları için ayrı ayrı uygulanmıştır. Hesaplanan sonuçlar üç düzeyde değerlendirilmiştir. İlk olarak, her parametre için katsayı değişim aralıkları belirlenmiş ve parametrelerin göreceli etkileri kıyaslanmıştır. İkinci olarak, S_{DS-r} ve $\phi'_d-\beta$ parametre çiftleri için etkileşim alanları oluşturularak katsayıların iki değişkenli değişim davranışı incelenmiştir. Üçüncü olarak, tüm senaryolarda elde edilen katsayıların dağılımı değerlendirilmiştir.

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Yapılan hesaplamalar sonunda seçilen parametre aralıkları için incelenen sismik toprak basıncı katsayılarının değişim davranışları değerlendirilmiştir. Parametre kaynaklı katsayı değişim aralıkları Tablo 2’de sunulmuştur. Bu kapsamda toplam aktif katsayı K_{at} üzerinde en yüksek değişim dolgu yüzeyi eğimi β parametresinde elde edilmiştir. β için $\Delta K_{at} = 0.6641$ olarak hesaplanmış, bu değeri S_{DS} için $\Delta K_{at} = 0.6224$ ve r için $\Delta K_{at} = 0.5462$ değerleri izlemiştir. Bu sonuç, aktif basınç katsayısının özellikle dolgu geometrisi ve deprem etkisini ifade eden parametrelerin etkisi altında kaldığını göstermektedir. Duvar arka yüz açısı ψ de K_{at} üzerinde belirgin bir değişim meydana getirmiş, buna karşılık duvar-zemin sürtünme açısı δ_d aktif katsayı üzerinde sınırlı düzeyde etki ortaya koymuştur.

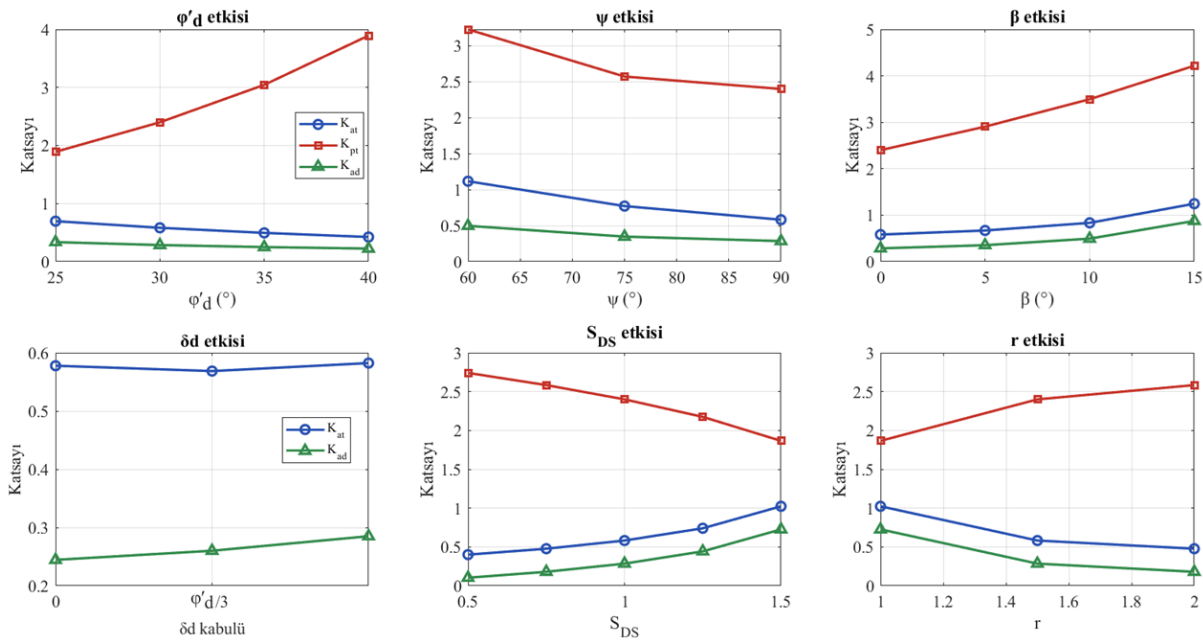
Tablo 2. Parametre bazlı katsayı değişim aralıkları (Parameter-based coefficient variation ranges)

Parametre	ΔK_{at}	ΔK_{pt}	ΔK_{ad}	ΔK_{pd}
ϕ'_d	0.2728	2.0018	0.1118	0.1332
ψ	0.5347	0.8277	0.2123	4.7911
β	0.6641	1.8173	0.5908	0.0164
δ_d	0.0138	0	0.0406	0
S_{DS}	0.6224	0.8748	0.6224	0.8748
r	0.5462	0.7181	0.5462	0.7181

Toplam pasif katsayı K_{pt} bakımından en büyük değişim zemin içsel sürtünme açısı ϕ'_d parametresinde belirlenmiş olup ϕ'_d için $\Delta K_{pt} = 2.0018$ olarak hesaplanmış, ikinci en yüksek değişim ise β parametresinde $\Delta K_{pt} = 1.8173$ olarak belirlenmiştir. Bu bulgu, pasif direnç bölgesinde zemin dayanımının ve dolgu eğiminin belirleyici olduğunu göstermektedir. S_{DS} ve r parametreleri de K_{pt} üzerinde orta seviyede değişim meydana getirmiştir. Pasif hesaplarda $\delta_d = 0$ kabul edildiğinden, δ_d parametresi K_{pt} ve K_{pd} üzerinde değişim oluşturmamıştır.

Dinamik aktif artış katsayısı K_{ad} için en büyük değişim S_{DS} parametresinde belirlenmiştir. S_{DS} için $\Delta K_{ad} = 0.6224$ olup, bunu β ve r parametreleri takip etmiştir. Bu durum, dinamik aktif artışın doğrudan deprem etkisine ve dolgu geometrisine duyarlı olduğunu göstermektedir. Pasif dirençteki dinamik azalma katsayısı K_{pd} için en belirgin değişim ψ parametresinde ortaya çıkmış olup ψ için $\Delta K_{pd} = 4.7911$ hesaplanmış ve bu değer diğer parametrelerin etkisinden çok daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, pasif taraftaki dinamik azalma davranışında duvar arka yüz geometrisinin baskın bir rol oynayabileceğini ifade etmektedir.

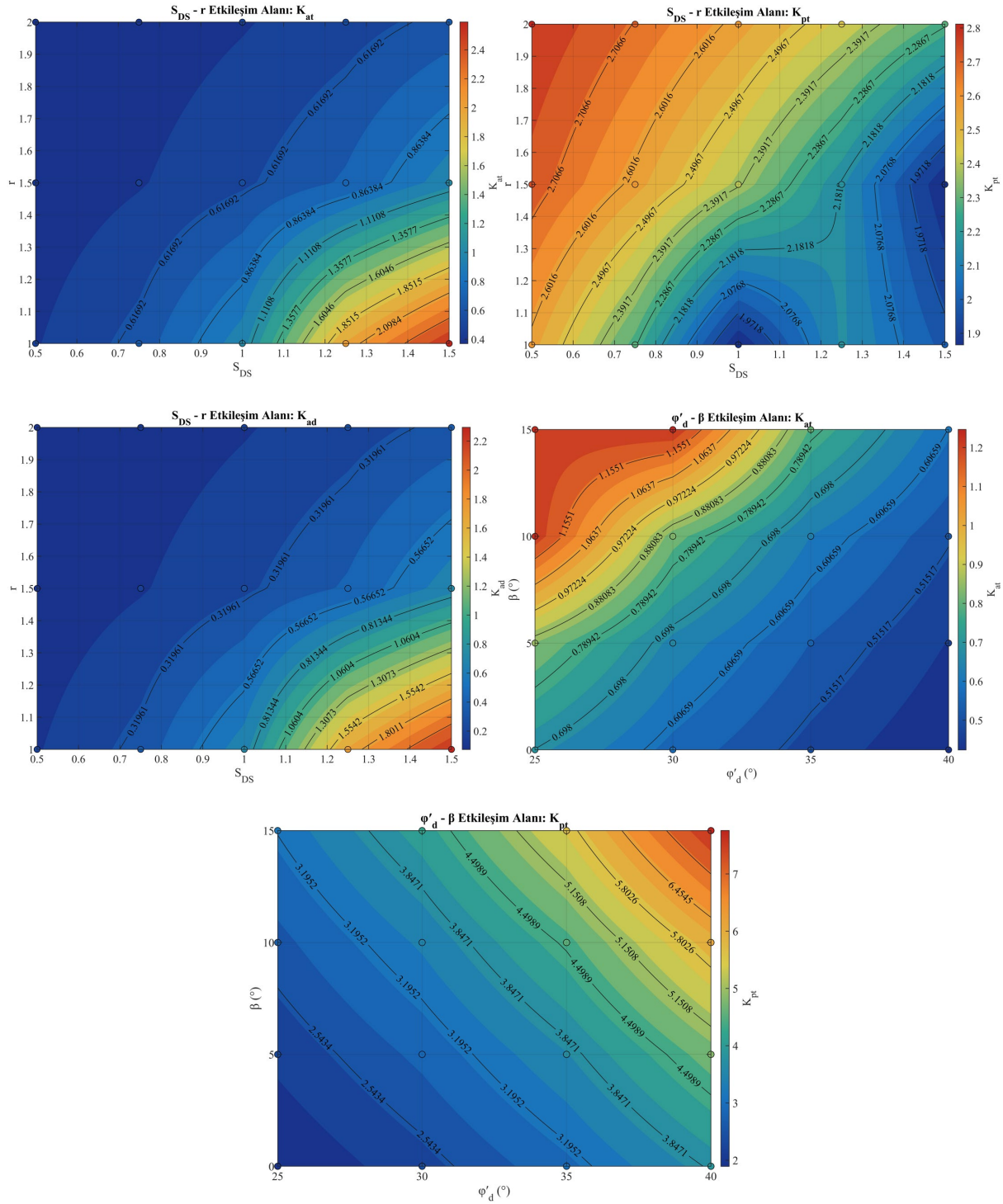
Şekil 2’de sunulan tek-parametre duyarlılık eğrileri, katsayıların parametre değişimlerine verdiği tepkileri göstermektedir. Grafiklerde ϕ'_d arttıkça K_{at} ve K_{ad} değerleri azalmış, K_{pt} değeri ise belirgin şekilde yükselmiştir. Bu eğilim, zemin içsel sürtünme açısının aktif basıncı azaltıcı, pasif direnci ise artırıcı etkisiyle örtüşmektedir. Duvarın arka yüzünün yatayla yaptığı açı olan ψ değerinin artmasıyla genel olarak katsayı değerlerinde azalma tespit edilmiş olup bu durum duvar arka yüz geometrisinin hem aktif hem de pasif katsayılarında etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Tek-parametre duyarlılık eğrileri (Single-parameter sensitivity curves)

Dolgu yüzeyi eğimi β arttıkça K_{at} , K_{pt} ve K_{ad} değerlerinde artış gerçekleşmiştir. Bu artış özellikle aktif katsayı değişimi ve pasif katsayı değişimi açısından önemli seviyededir. δ_d değişiminin etkisiyle sınırlı kalmıştır. S_{DS} artışı K_{at} ve K_{ad} değerlerini artırırken, K_{pt} değerini azaltmıştır. Buna karşın r artışı K_{at} ve K_{ad} değerlerinde azalmaya, K_{pt} değerinde ise artışa sebep olmuştur. Bu eğilim, deprem etkisinin büyümesiyle aktif tarafta talebin yükseldiğini, pasif tarafta ise direnç katsayısının azalma eğilimine girdiğini ifade etmektedir.

Şekil 3’te iki parametrelilik etkileşim alanları birlikte sunulmuştur. S_{DS} - r etkileşim alanlarında K_{at} değerlerinin yüksek S_{DS} ve düşük r kombinasyonlarında yükseldiği görülmektedir. Aynı parametre çifti için K_{pt} ters yönde davranmış; S_{DS} arttıkça K_{pt} azalmış, r arttıkça K_{pt} yükselmiştir. K_{ad} için belirlenen etkileşim alanı ise K_{at} ile benzer bir eğilim göstermiştir. Bu bulgular, S_{DS} ve r parametrelerinin özellikle aktif taraftaki dinamik artış üzerinde birlikte etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca görselde ϕ'_d - β etkileşiminin K_{at} ve K_{pt} üzerindeki etkileri gösterilmiştir. K_{at} için en yüksek değerler düşük ϕ'_d ve yüksek β kombinasyonlarında meydana gelmiştir. Bu durum, içsel sürtünme açısının düşük olduğu zeminlerde eğimli dolgunun aktif basınç katsayısını önemli düzeyde artırdığını göstermektedir. Buna karşılık ϕ'_d arttıkça K_{at} değerleri azalmış ve özellikle düşük β koşullarında aktif katsayı daha sınırlı seviyelerde bulunmaktadır. K_{pt} için ise hem ϕ'_d hem de β artışıyla katsayı değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu eğilim, pasif direnç tarafında zemin dayanımının temel belirleyici olduğunu, fakat dolgu geometrisinin de katsayı büyüklüğünü artırıcı doğrultuda katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla ϕ'_d - β etkileşimi, aktif ve pasif katsayılar üzerinde farklı yönlerde fakat belirgin düzeyde etkili olmaktadır.

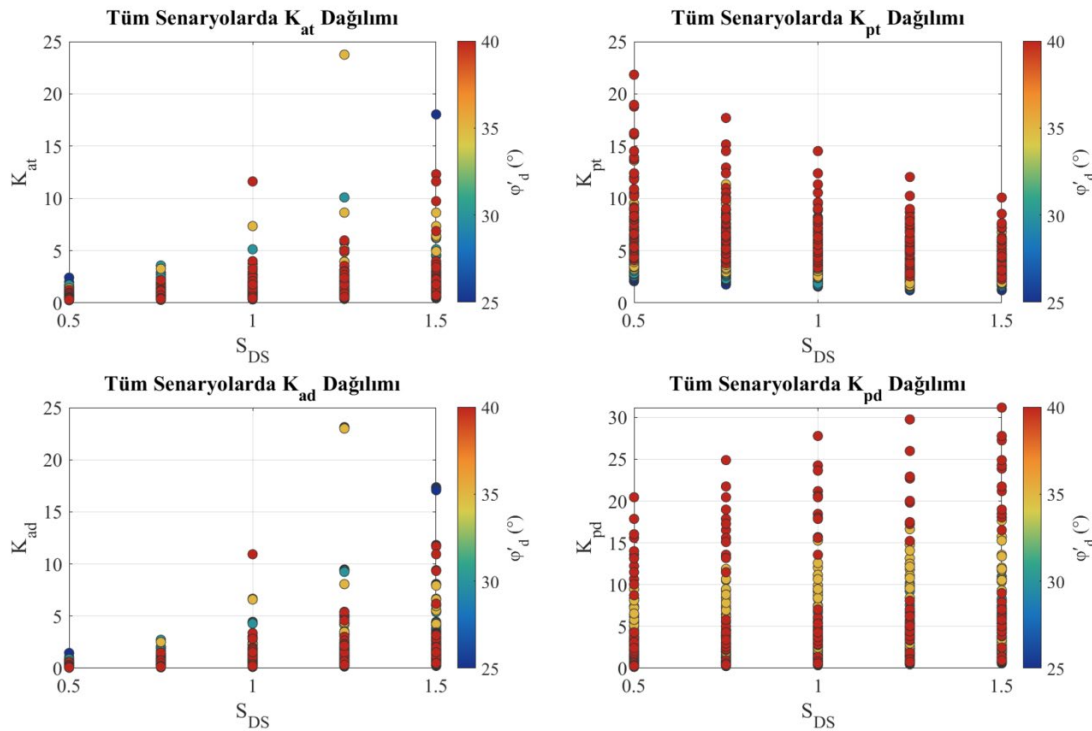


Şekil 3. İki parametrelili etkileşim alanları: S_{DS} - r ve ϕ'_d - β değışimlerinin sismik toprak basıncı katsayılarına etkisi (Two-parameter interaction fields: effects of S_{DS} - r and ϕ'_d - β variations on seismic earth pressure coefficients)

Şekil 4'te tüm parametre kombinasyonlarında belirlenen katsayı dağılımları verilmiştir. K_{at} ve K_{ad} değerlerinde S_{DS} arttıkça üst sınır değerlerinin yükseldiği saptanmıştır. Bu durum, sismik etkilerin artışıyla aktif taraftaki toplam basınç katsayısı ve dinamik artış katsayısının arttığını göstermektedir. Bununla birlikte aynı S_{DS} değeri altında katsayıların geniş bir aralıkta bulunması, sonuçların sadece deprem parametresiyle açıklanamayacağını göstermektedir. Zemin içsel sürtünme açısı, dolgu yüzeyi eğimi, duvar geometrisi ve azaltma katsayısı gibi diğer girdiler de katsayıların büyüklüğü üzerinde belirgin etkiye sahiptir. K_{pt} değerlerinde S_{DS} artışıyla daha düşük pasif katsayıların oluşması, deprem etkisinin pasif direnç kapasitesini azaltıcı yönde etkilediğini açıklamaktadır. K_{pd} dağılımındaki geniş dağılım ise pasif dirençteki dinamik azalmanın zemin ve duvar şekli parametrelerinin birlikte etkisine duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

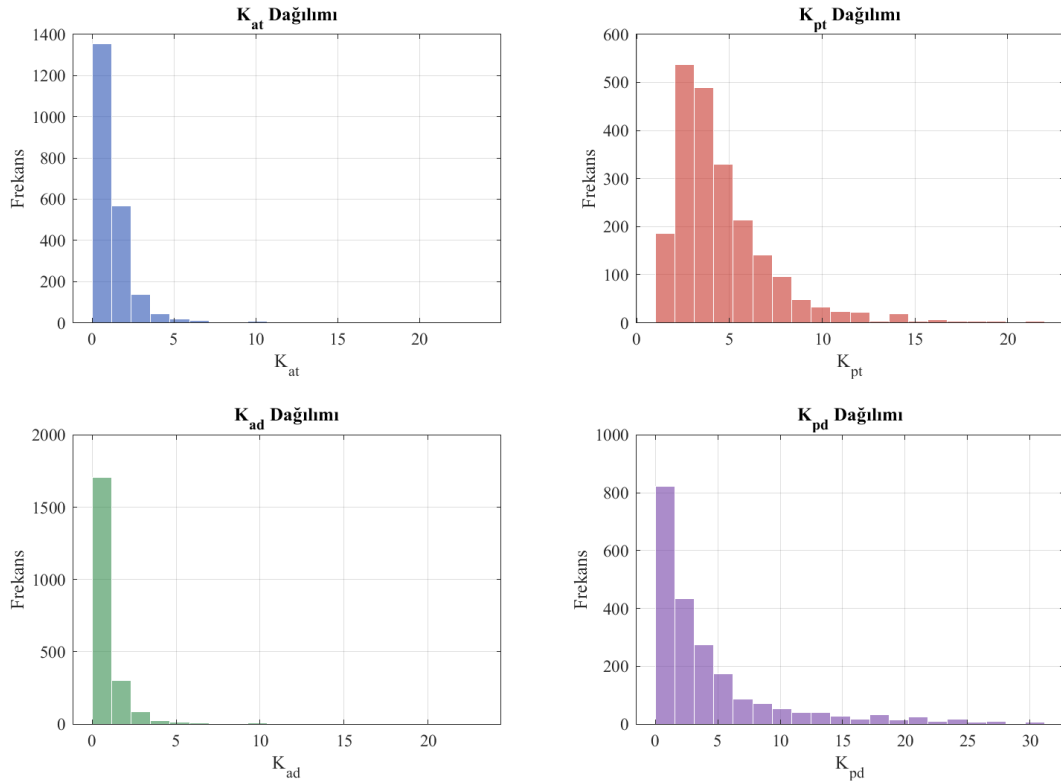
K_{at} ve K_{ad} dağılımlarında bazı S_{DS} seviyelerinde belirgin katsayı artışları meydana gelmektedir. Mononobe–Okabe aktif katsayı bağıntıları trigonometrik ve kök içeren bağıntılara bağlı olduğundan, belirli zemin, geometri ve deprem kombinasyonlarında payda terimleri küçülerek katsayıların ani olarak büyümesine neden olabilmektedir. Özellikle düşük duvar arka yüz açısı, yüksek duvar-zemin sürtünme açısı, düşük azaltma katsayısı, düşük içsel sürtünme açısı ve yüksek dolgu eğimi gibi koşullar aktif katsayı hesabını sınır koşullara yaklaştırabilmektedir. Literatürde de Mononobe–Okabe yaklaşımının sismik dayanma yapısı analizlerinde yaygın kullanılmasına karşın, özellikle yüksek yatay deprem katsayısı, zemin-yapı etkileşimi, duvar hareketi, dolgu geometrisi ve sınır denge varsayımları nedeniyle sonuçların dikkatli yorumlanması gerektiği belirtilmektedir [31], [32]. Bu doğrultuda, Mononobe–Okabe yaklaşımı çerçevesinde elde edilen yüksek aktif katsayı değerleri, belirli kritik parametre kombinasyonlarında yöntemin zemin, geometri ve deprem girdilerine karşı yüksek duyarlılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır. İncelemeler sonucunda $S_{DS} = 1.25$ seviyesinde görülen yüksek K_{at} ve buna bağlı yüksek K_{ad} değerleri, genel eğilimden ziyade belirli kritik parametre kombinasyonlarının etkisini gösteren yerel uç değerler olarak değerlendirilmiştir.

K_{pt} dağılımında, S_{DS} artışıyla pasif katsayıların genel biçimde daha düşük değerlere yöneldiği saptanmıştır. Buna karşılık yüksek ϕ'_d değerleri için var olan senaryolarda K_{pt} değerleri daha yüksek seviyelere erişmiştir. K_{pd} değerlerinde ise daha geniş bir dağılım meydana gelmiştir. Bu durum, pasif dirençteki dinamik azalma katsayısının sadece deprem parametrelerine değil, aynı zamanda geometri ve zemin parametrelerinin birlikte etkisine de duyarlı olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 4. Tüm parametre kombinasyonlarının katsayı dağılımları (Coefficient distributions of all parameter combinations)

Şekil 5'te sunulan frekans dağılımları, ilgili katsayıların tüm senaryolar içinde hangi aralıklarda yoğunlaştığını göstermektedir. K_{at} ve K_{ad} değerleri genellikle düşük katsayı aralıklarında yoğunlaşmış, fakat bazı parametre kombinasyonlarında yüksek değerler oluşmuştur. Bu sebeple aktif tarafa yönelik histogramlarda sağa çarpık bir dağılım ortaya çıkmıştır. Bu durum, özellikle düşük ϕ'_d , yüksek β , yüksek S_{DS} ve düşük r kombinasyonlarının aktif basınç katsayılarını belirgin biçimde artırabildiğini ifade etmektedir. K_{pt} histogramına göre pasif katsayıların aktif katsayılara göre daha geniş bir aralıkta dağıldığı görülmektedir. Bu geniş dağılımda ϕ'_d ve β parametrelerinin etkisi ön plana çıkmaktadır. K_{pd} histogramında da sağa çarpık bir yayılım gözlenmiş, senaryoların önemli bir bölümü düşük ve orta düzey değerlerde yoğunlaşırken bazı kombinasyonlarda yüksek K_{pd} değerleri meydana gelmiştir. Bu bulgu, pasif dirençteki dinamik azalmanın belirli zemin ve dayanma yapısının şekline bağlı kombinasyonlarında önemli düzeylere ulaşabileceğini göstermektedir.



Şekil 5. Tüm senaryolarda katsayı ve frekans dağılımları (Coefficient and frequency distributions in all scenarios)

Bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, aktif tarafta β , S_{DS} ve r parametrelerinin; pasif tarafta ise ϕ'_d , β ve ψ parametrelerinin daha belirgin etkiler oluşturduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, Mononobe–Okabe yöntemiyle hesaplanan sismik toprak basıncı katsayılarının sadece deprem girdilerine bağlı olmadığını; zemin ve geometri parametrelerinin de hesap sonuçları açısından belirleyici olabildiğini göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Bu çalışmada, Mononobe–Okabe yöntemine yönelik sismik toprak basıncı katsayılarını etkileyen temel zemin, geometri ve deprem parametrelerinin duyarlılığı araştırılmıştır. Oluşturulan 2160 senaryo için K_{at} , K_{pt} , K_{ad} ve K_{pd} katsayıları değerlendirilmiş; parametrelerin bu katsayılar üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Mononobe–Okabe katsayılarının sadece deprem girdilerine değil, aynı zamanda zemin mukavemet parametreleri ve duvar-dolgu geometrisine ilişkin parametrelere de belirgin seviyede duyarlı olduğunu göstermiştir.

Sonuçlara göre aktif tarafta özellikle β , S_{DS} ve r parametreleri ön plana çıkmıştır. β ve S_{DS} artışı K_{at} ve K_{ad} değerlerini artırırken, r parametresinin yükselmesi eşdeğer yatay deprem katsayısını azalttığından aktif tarafta katsayıların düşmesine sebep olmuştur. Pasif tarafta ise ϕ'_d , β ve ψ parametreleri daha belirgin etkiler meydana getirmiştir. Özellikle ϕ'_d artışı K_{pt} değerini belirgin şekilde yükseltmiş, S_{DS} artışı ise pasif direnç katsayısını azaltıcı yönde etki sağlamıştır. Bu bulgular, aktif ve pasif basınç katsayılarının aynı parametrelere aynı yönde ve aynı düzeyde tepki vermediğini göstermektedir.

Tespit edilen eğilimler genel olarak Mononobe–Okabe yaklaşımından beklenen mühendislik davranışlarıyla uyumludur. ϕ'_d artışı aktif katsayıları azaltırken pasif katsayıyı artırmış; S_{DS} artışı aktif tarafta katsayıları yükseltmiş, pasif tarafta ise azaltmıştır. r parametresinin artması, K_{at} ve K_{ad} değerlerinde azalma, K_{pt} değerinde ise artış oluşturmuştur. δ_d etkisi seçilen referans senaryo kapsamında sınırlı kalmış; β ve ψ parametreleri ise kullanılan geometri ve işaret kabulleri çerçevesinde katsayılar üzerinde belirgin değişimler oluşturmuştur. Bazı senaryolarda gözlenen yerel uç değerler ise Mononobe–Okabe bağıntılarının belirli zemin-geometri-deprem kombinasyonlarında sınır koşullara yaklaşabildiğini göstermektedir.

Çalışmanın temel katkısı, mevcut hesap yaklaşımını geniş bir parametre uzayı içinde uygulaması ve hangi girdilerin aktif ile pasif sismik toprak basıncı katsayıları üzerinde daha etkili olduğunu kıyaslamalı şekilde göstermesi olup Mononobe–Okabe teorisine yeni bir formülasyon önermemektedir. Bu yönüyle çalışma, geoteknik tasarımı yapan mühendise sadece katsayı değerlerini değil, katsayıların hangi zemin, geometri ve deprem girdilerine daha duyarlı olduğunu gösteren bir değerlendirme sunmaktadır.

Çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Analizler pseudo-statik Mononobe–Okabe yaklaşımı ile sınırlandırılmıştır. Bu sebeple zemin-yapı etkileşimi, gerçek deprem kayıtlarına bağlı zaman tanım alanı davranışı, kalıcı yer değiştirmeler, zemin tabakalaşması, yeraltı suyu etkisi, drenaj koşulları ve ayrıntılı stabilite tahkikleri kapsam dışında bırakılmıştır. Ayrıca çalışma belirli bir dayanma yapısının nihai boyutlandırılması veya yapısal tasarımı amacıyla değil, katsayıların parametre değişimlerine verdiği tepkiyi araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda farklı zemin türleri, kohezyon etkisi, yeraltı su seviyesi, yüzey yükleri, farklı duvar tipleri ve farklı deplasman kabulleri analize dahil edilebilir. Bununla birlikte bu çalışmada belirlenen sonuçlar sonlu elemanlar veya sonlu farklar temelli sayısal analizlerle kıyaslanarak Mononobe–Okabe yönteminin hangi parametre aralıklarında daha hassas sonuçlar verdiği incelenebilecektir. Gerçek deprem kayıtlarına dayalı zaman tanım alanı analizleri de bu ve benzeri yaklaşımların sınırlarının daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

5. Kaynaklar (References)

- [1] J.D. Bray, Retaining structures, in: W.F. Chen, J.Y.R. Liew (Eds.), The Civil Engineering Handbook, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2003.
- [2] W.J.M. Rankine, On the stability of loose earth, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 147 (1857) 9–27.
- [3] S. Okabe, General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall, Journal of the Japan Society of Civil Engineers 10 (6) (1924) 1277–1323.
- [4] N. Mononobe, H. Matsuo, On determination of earth pressure during earthquake, in: Proceedings of the World Engineering Congress, Vol. 9, Tokyo, Japan, 1929, pp. 177–185.
- [5] H.B. Seed, R.V. Whitman, Design of earth retaining structures for dynamic loads, in: Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, Cornell University, Ithaca, NY, 1970, pp. 103–147.
- [6] S.L. Kramer, J.P. Stewart, Geotechnical Earthquake Engineering, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2024.
- [7] J.H. Wood, Earthquake-Induced Soil Pressures on Structures, Ph.D. Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1973.
- [8] R.S. Steedman, X. Zeng, The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall, Géotechnique 40 (1) (1990) 103–112. doi:10.1680/geot.1990.40.1.103.
- [9] H. Matsuo, S. Ohara, Lateral earth pressure and stability of quay walls during earthquakes, in: Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1, Tokyo and Kyoto, Japan, 1960, pp. 165–183.
- [10] M.A. Sherif, Y.S. Fang, Dynamic earth pressures on walls rotating about the top, Soils and Foundations 24 (4) (1984) 109–117. doi:10.3208/sandf1972.24.4_109.
- [11] Y.S. Fang, T.J. Chen, B.F. Wu, Passive earth pressures with various wall movements, Journal of Geotechnical Engineering 120 (8) (1994) 1307–1323. doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:8(1307).
- [12] P.D. Dimarogona, Distribution of lateral earthquake pressure on a retaining wall, Soils and Foundations 23 (4) (1983) 1–10. doi:10.3208/sandf1972.23.4_1.
- [13] R. Richards Jr., C. Huang, K.L. Fishman, Seismic earth pressure on retaining structures, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125 (9) (1999) 771–778. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:9(771).

- [14] G. Mylonakis, P. Kloukinas, C. Papantonopoulos, An alternative to the Mononobe–Okabe equations for seismic earth pressures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27 (10) (2007) 957–969. doi:10.1016/j.soildyn.2007.01.004.
- [15] S. Nakamura, Reexamination of Mononobe–Okabe theory of gravity retaining walls using centrifuge model tests, *Soils and Foundations* 46 (2) (2006) 135–146. doi:10.3208/sandf.46.135.
- [16] R.G. Mikola, G. Candia, N. Sitar, Seismic earth pressures on retaining structures and basement walls in cohesionless soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 142 (10) (2016) 04016047. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001507.
- [17] T. Çakır, Evaluation of the effect of earthquake frequency content on seismic behavior of cantilever retaining wall including soil–structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 45 (2013) 96–111. doi:10.1016/j.soildyn.2012.11.008.
- [18] A. Sadrekarimi, Pseudo-static lateral earth pressures on broken-back retaining walls, *Canadian Geotechnical Journal* 47 (11) (2010) 1247–1258. doi:10.1139/T10-025.
- [19] E. Kavazanjian Jr., N. Matasovic, T. Hadj-Hamou, P.J. Sabatini, *Geotechnical Engineering Circular No. 3: Design Guidance—Geotechnical Earthquake Engineering for Highways*, FHWA-SA-97-076, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1997.
- [20] CEN, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects, EN 1998-5, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [21] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara, Türkiye, 2018.
- [22] İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, TBDY-2018 Kısım 16: Deprem Etkisi Altında Temel Zemini ve Temellerin Tasarımı İçin Özel Kurallar, Örnek Hesaplar, Ankara, Türkiye, 2023.
- [23] Federal Highway Administration, Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall Fills, FHWA-HIN-21-002, U.S. Department of Transportation, Washington, DC, 2021.
- [24] Washington State Department of Transportation, Bridge Design Manual: Chapter 8, Walls and Buried Structures, Washington State Department of Transportation, Olympia, WA, 2025.
- [25] CED Engineering, Retaining Walls for Non-Geotechnical Engineers, CED Engineering, 2021.
- [26] Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, Türkiye, 2007.
- [27] Ö.L. Ertuğrul, B.B. Zahin, A parametric study on the dynamic lateral earth forces on retaining walls according to European and Turkish Building Earthquake Codes, *Turkish Journal of Engineering* 7 (3) (2023) 196–207. doi:10.31127/tuje.1100015.
- [28] R.V. Whitman, Seismic design and behavior of gravity retaining walls, in: *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Geotechnical Special Publication No. 25, ASCE, New York, NY, 1990, pp. 817–842.
- [29] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, John Wiley & Sons, Chichester, 2008. doi:10.1002/9780470725184.
- [30] F. Pianosi, K. Beven, J. Freer, J.W. Hall, J. Rougier, D.B. Stephenson, T. Wagener, Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow, *Environmental Modelling & Software* 79 (2016) 214–232. doi:10.1016/j.envsoft.2016.02.008.
- [31] L. Al Atik, N. Sitar, Seismic earth pressures on cantilever retaining structures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136 (10) (2010) 1324–1333. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000351
- [32] D.G. Anderson, G.R. Martin, I.P. Lam, J.N. Wang, *Seismic Analysis and Design of Retaining Walls, Buried Structures, Slopes, and Embankments*, NCHRP Report 611, Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.



ADVANCED TECHNOLOGIES IN WEARABLE FOR SLEEP APNEA DIAGNOSIS: A REVIEW

*Elif Nur SELÇUK¹, Gökçenur ÇAKMAK¹, Mustafa Reşit USAL²

¹Suleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Turkey

²Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Turkey

(Geliş/Received: 06.03.2026, Kabul/Accepted: 22.04.2026, Yayınlanma/Published: 30.06.2026)

ABSTRACT

This article provides a comprehensive assessment of the literature regarding the application of wearable devices that incorporate essential metrics of traditional polysomnography (PSG) for the diagnosis of obstructive sleep apnea (OSA). While PSG serves as a standard, it entails several disadvantages, including exorbitant expenses, lengthy processes, limited accessibility, and patient discomfort. Recent innovations in wearable and portable devices enable continuous monitoring of biophysiological parameters such as heart rate, blood oxygen saturation (SpO₂), respiratory rate, body movements, and sleep position, offering accessible, user-friendly, and economical alternatives. Commercial devices like the WatchPAT, Belun Ring, and NightOwl demonstrate moderate to strong correlations with polysomnography in key metrics, including the apnea-hypopnea index (AHI) and oxygen desaturation index (ODI). The existing limitations include the inability to precisely measure airflow, a limited number of EEG/EMG channels, low accuracy in sleep stage classification, inconsistent algorithmic performance, and insufficient clinical validation. As a result, these devices are primarily utilized as pre-diagnostic screening tools. The integration of artificial intelligence, particularly deep learning analysis, presents significant opportunities for enhancing diagnostic precision and clinical reliability. AI-driven models that evaluate sleep stages, detect improper sensor installation, and analyze multimodal biomarkers are improving data quality and patient compliance. Moreover, contactless measurement technologies, mobile health applications, and multimodal data fusion are enhancing the integration of polysomnography (PSG) and home sleep apnea testing (HSAT). In the future, hybrid models incorporating smaller sensors, automated AI-driven analytics, and interactive user interfaces are expected to play a more prominent role in clinical practice, providing scalable and efficient alternatives to traditional PSG.

Keywords: Obstructive Sleep Apnea, Polysomnography, Wearable Technology, Artificial Intelligence.

UYKU APNESİ TEŞHİSİNDE GİYİLEBİLİR TEKNOLOJİLERDEKİ GELİŞMELER: DERLEME

ÖZ

Bu makale, obstrüktif uyku apnesinin (OSA) tanısında klasik polisomnografiye (PSG) ait temel ölçütleri entegre eden giyilebilir cihazların kullanımına ilişkin literatürün kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. PSG altın standart olmakla birlikte; yüksek maliyet, uzun süren işlemler, sınırlı erişilebilirlik ve hasta konforsuzluğu gibi pek çok dezavantaja sahiptir. Giyilebilir ve taşınabilir cihazlardaki son gelişmeler; kalp atım hızı, kan oksijen saturasyonu (SpO₂), solunum hızı, vücut hareketleri ve uyku pozisyonu gibi biyofizyolojik parametrelerin sürekli izlenmesini mümkün kılarak daha erişilebilir, kullanıcı dostu ve maliyet etkin alternatifler sunmaktadır. WatchPAT, Belun Ring ve NightOwl gibi ticari cihazlar; apne-hipopne indeksi (AHI) ve oksijen desatürasyon

indeksi (ODI) gibi kritik ölçümlerde polisomnografi ile orta ila yüksek düzeyde uyum göstermektedir. Mevcut sınırlılıklar arasında hava akımının doğru şekilde ölçülememesi, sınırlı sayıda EEG/EMG kanalı, uyku evrelerinin sınıflandırılmasında düşük doğruluk, değişken algoritma performansı ve yetersiz klinik doğrulama yer almaktadır. Bu nedenle söz konusu cihazlar çoğunlukla ön tanı amaçlı tarama araçları olarak kullanılmaktadır. Özellikle derin öğrenme analizleri olmak üzere yapay zekânın entegrasyonu, tanısallık doğruluğunun ve klinik güvenilirliğin artırılması açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Uyku evrelerini değerlendiren, sensörlerin hatalı yerleştirilmesini tespit eden ve çok modlu biyobelirteçleri analiz eden yapay zekâ destekli modeller; veri kalitesini ve hasta uyumunu artırmaktadır. Ayrıca temassız ölçüm teknolojileri, mobil sağlık uygulamaları ve çok modlu veri füzyonu; PSG ile ev tipi uyku apne testi (HSAT) sistemlerinin entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Gelecekte, daha küçük sensörler, otomatik yapay zekâ destekli analizler ve etkileşimli kullanıcı arayüzleri içeren hibrit modellerin klinik uygulamada daha önemli bir rol üstlenmesi ve geleneksel PSG'ye ölçeklenebilir ve verimli alternatifler sunması beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Obstrüktif uyku apnesi, Polisomnografi, Giyilebilir teknoloji, Yapay zeka.

1. Introduction

Sleep is a physiological process that affects all bodily organs and improves the brain's capacity and performance. Sleep disorders include sleep-related breathing disorders, insomnia, hypersomnia, parasomnia, circadian rhythm disorders, and sleep apnea. There are three primary forms of sleep apnea: obstructive sleep apnea (OSA), central sleep apnea, and complex (mixed) sleep apnea. OSA is the predominant variant of this condition [2–4]. OSA typically results from partial or complete obstruction of the upper airway due to muscle relaxation during sleep. This results in airway collapse, leading to intermittent episodes of apnea and hypopnea. This diminishes the oxygen levels in the bloodstream. This condition can lead to complications in the cardiovascular, pulmonary, and neurocognitive systems over time. Consequently, it may contribute to chronic conditions such as stroke, hypertension, heart failure, obesity, arrhythmias, conduction disorders, and type 2 diabetes [5–7].

Polysomnography (PSG) is the most effective method for diagnosing obstructive sleep apnea (OSA). It simultaneously records numerous neurophysiological and respiratory parameters, including electroencephalography (EEG), electrooculography (EOG), electromyography (EMG), electrocardiography (ECG), nasal and oral airflow, thoracic and abdominal respiratory effort, peripheral oxygen saturation (SpO₂), body position, and snoring. Nonetheless, PSG encounters several challenges due to its high cost, significant time investment, and extensive labor requirements [8–11]. These factors render PSG less accessible and practical in routine clinical practice, resulting in extended wait times in sleep laboratories and prolonged diagnostic periods. Despite the prevalence of OSA, numerous individuals remain undiagnosed or untreated. This is primarily due to the insufficient availability of tests and the general lack of awareness regarding the issue. The American Academy of Sleep Medicine recommends conducting a preliminary assessment to evaluate the severity of patients' OSA risk prior to referring them for PSG. Therefore, PSG should be restricted to patients with a substantial probability of an OSA diagnosis. In this context, it is crucial to develop screening models that yield results closely aligned with PSG [12, 13].

In recent years, wearable technologies have gained significant prevalence in healthcare. These devices can now continuously and in real-time monitor individuals' physiological data [14, 15]. These devices are available in various forms, including smartwatches, fitness bands, rings, earrings, body-integrated sensor systems, and bed-embedded sensors. They can monitor various physiological parameters, including heart rate, peripheral oxygen saturation (SpO₂), movement, respiratory rate, and sleep stages [16, 17]. Wearable technologies have proven beneficial not only for diagnosing sleep apnea but also for determining an individual's sleep stage and identifying instances of oxygen desaturation. With the proliferation of wearable devices, selecting a reliable and effective sleep monitoring device has become increasingly challenging for researchers and medical professionals. The complexity is intensified by ongoing debates regarding the accuracy, lack of standardization, and clinical validity of the data produced by these devices. Among the most advantageous features of wearable systems are their ability to monitor individuals during sleep, collect data with minimal disruption to daily activities, and facilitate repeated measurements. However, certain personal and contextual factors may influence the device's efficacy and should be considered. Physiological variations among individuals can influence sensor efficiency. Individuals with darker skin tones or denser skin often experience suboptimal performance

of Photoplethysmography (PPG) sensors. The accuracy of these devices may be influenced by the frequency and severity of an individual's sleep disturbances. Therefore, a thorough analysis of data obtained from wearable devices is essential, taking into account individual differences [18].

Numerous studies in literature have investigated the measurement of various parameters used in PSG, such as EEG, ECG, and EMG, through wearable systems. This review meticulously analyzes all essential parameters associated with PSG and highlights wearable technologies that could replace conventional PSG in diagnosing sleep apnea. A thorough literature review evaluates the precision, advantages, and disadvantages of these technologies, while also examining their potential roles in future diagnostic protocols and their incorporation into healthcare systems.

2. Methodology of Literature Review

This review aims to provide a systematic perspective on the current state, diagnostic performance, and artificial intelligence integration of wearable, portable, and contactless technologies used in the diagnosis of obstructive sleep apnea (OSA). A systematic literature search was performed in PubMed, Scopus, and Web of Science databases for articles published between January 2001 and June 2025. The search strategy combined keywords related to sleep apnea ("obstructive sleep apnea", "OSA", "sleep-disordered breathing") and wearable technology ("wearable", "portable device", "home sleep test", "ring sensor", "WatchPAT", "Belun Ring", "NightOwl", "contactless radar"). Only peer-reviewed articles written in English that reported sensitivity, specificity, or correlation with in-lab PSG for AHI detection were included. Conference abstracts, editorials, and studies without a reference standard were excluded.

3. OSA

3.1. Epidemiology and diagnostic evaluation

OSA is a prevalent sleep disorder characterized by recurrent episodes of partial or complete upper airway obstruction during sleep. Epidemiological studies consistently demonstrate a higher prevalence of OSA in males compared to females. Global estimates indicate that approximately 1 billion individuals aged 30–65 years are affected by OSA, with 425 million experiencing moderate to severe disease [19, 20]. Regional studies reveal significant variations in OSA prevalence. In North America, the condition affects 10% of men and 3% of women aged 30–49 years, rising to 17% and 9%, respectively, in the 50–70 age group [21, 22]. Pediatric OSA is also increasingly recognized, with reported prevalence rates ranging from 5.3% to 34.5% in preschool-aged children [23, 24]. OSA manifests through a constellation of nocturnal and daytime symptoms. Common nocturnal symptoms include loud snoring, witnessed apneas, choking episodes, and restless sleep. Daytime symptoms often involve excessive sleepiness, fatigue, morning headaches, and impaired cognitive function. Notably, OSA is associated with an elevated risk of motor vehicle accidents due to sleep-related attentional deficits [25, 26]. The diagnosis of OSA combines clinical evaluation with objective testing, requiring either the presence of nocturnal respiratory disturbances (such as snoring or witnessed apneas) or unexplained daytime sleepiness, along with polysomnographic confirmation demonstrating an apnea-hypopnea index (AHI) of ≥ 5 events/hour measured by in-laboratory PSG or home sleep apnea testing (HSAT), with disease severity classified as mild (AHI 5–14), moderate (AHI 15–30), or severe (AHI >30). While AHI remains the cornerstone of OSA diagnosis, it has limitations. The index does not fully capture disease burden, as it neglects factors such as hypoxemia duration, sleep-stage-specific respiratory disturbances, and symptom severity [27]. Thus, comprehensive evaluation should incorporate additional metrics, including oxygen desaturation indices and sleep fragmentation measures. OSA is a globally prevalent disorder with significant health implications. Accurate diagnosis requires a combination of clinical suspicion and objective testing, though future refinements in diagnostic criteria may enhance phenotypic characterization.

3.2. Classification of diagnostic techniques for OSA

In the diagnosis of OSA, four types of classification-based techniques are commonly used. Type 1 refers to full PSG conducted in a sleep laboratory under expert supervision, which typically includes at least seven parameters such as EEG, EOG, chin EMG, heart rate or ECG, respiratory effort, airflow, and oxygen saturation. Type 2 similarly consists of at least seven parameters but is performed unattended in a home setting. Type 3 includes diagnostic tests that utilize a minimum of four parameters, typically

respiratory effort, airflow, heart rate or ECG, and peripheral oxygen saturation. Type 4 describes limited-channel systems that usually monitor only one or two parameters (most commonly oxygen saturation along with airflow or heart rate) [28]. While Type 1 systems represent traditional in-lab polysomnography, Type 2 systems enable data collection in the patient's home using PSG devices set up by healthcare professionals. Numerous studies comparing Type 1 and Type 2 systems have reported that sleep efficiency measured at home is higher than that recorded in a laboratory setting. Additionally, home-based recordings demonstrate shorter sleep onset latency and longer REM sleep duration [29-32]. Currently, Type 3 and Type 4 devices are commonly referred to as portable cardiorespiratory monitors or HSAT. These systems are used either as screening tools for OSA or as diagnostic aids in patients suspected of having moderate-to-severe OSA. Although Type 3 devices demonstrate better performance and accuracy compared to Type 4 systems, the clinical status of patients with suspected OSA should be carefully evaluated before selecting the appropriate device [33, 34].

4. Wearable Technologies

4.1. Advances in sleep and respiratory monitoring

Despite rapid technological advancements, disease outbreaks remain a significant global challenge. Smart health monitoring systems offer an effective solution for disease prevention and control under demanding lifestyle conditions [35]. Wearable sensor technologies enable real-time monitoring of physiological data in healthcare settings and have gained particular importance in the post-COVID-19 era due to the need to minimize physical contact. Advances in miniaturization and smart textile technologies have facilitated the integration of these systems into daily life and accelerated the adoption of personalized applications [36, 37]. Devices such as smartwatches, virtual reality (VR) headsets, skin patches, and smart garments play a crucial role in health monitoring, sports performance analysis, and chronic disease management. These devices continuously collect data, provide alerts, and enhance human-machine interaction. The wearable technology market, valued at \$55.5 billion in 2022, is projected to reach \$142.4 billion by 2030, with optimistic estimates suggesting \$466 billion by 2032. This rapid growth is driven by technological advancements in materials science, electronics, data science, and telecommunications, as well as increasing digitalization and the growing healthcare demands of an aging population [38].

4.2. Limitations of traditional methods and the role of wearables

PSG remains the gold standard for diagnosing sleep disorders but has limitations, including high cost, time-consuming procedures, and the requirement for a laboratory setting. Alternatives such as HSAT and actigraphy offer more cost-effective and practical solutions. However, HSAT has drawbacks, including insufficient assessment of certain sleep disorders and potential underestimation of results. These limitations can be overcome with AI-enhanced wearable technologies [39, 40]. According to the American Academy of Sleep Medicine (AASM) guidelines, a home-based PSG system should include the following components: three EEG electrodes, two EOG electrodes, three EMG electrodes, a single-channel ECG, a nasal pressure sensor, a pulse oximeter, and two respiratory inductance plethysmography belts [41].

4.3. Wearable and portable devices for OSA detection

Figure 1 displays devices produced from 2001 to the present. The SleepStrip™ device, introduced in 2001, was designed to be low-cost, user-friendly, and suitable for widespread application. The device consists of a central processing unit, oral/nasal thermistors, and a battery but does not include biophysiological parameters such as EEG or ECG. In a study involving 402 patients, the device demonstrated a sensitivity ranging from 80% to 86%. Researchers concluded that while SleepStrip™ cannot replace PSG, it may provide useful preliminary screening data in both clinical and experimental settings [42].

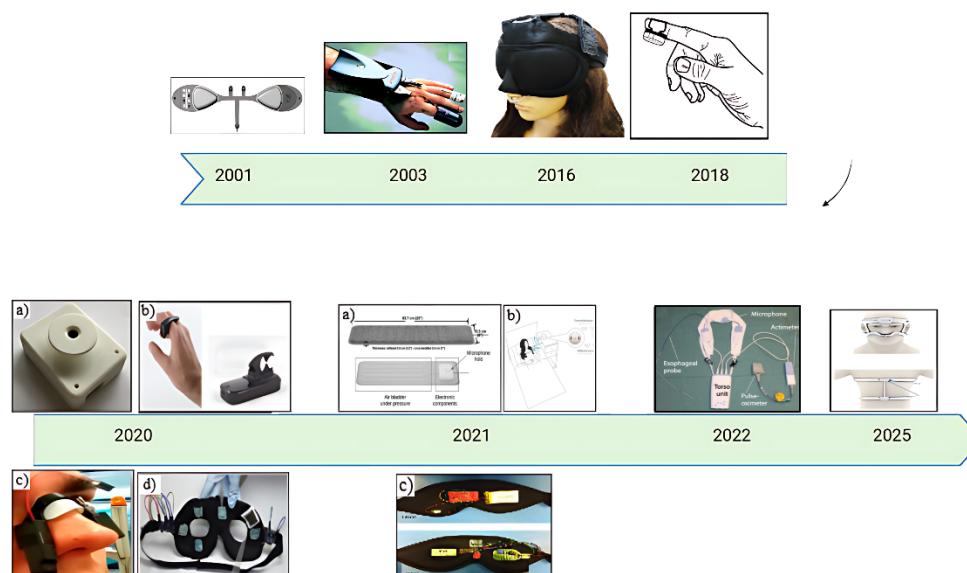


Figure 1. Chronological overview of studies conducted between 2001 and 2025 for the detection of OSA [42-55]

One of the devices developed for the diagnosis of OSA is the WatchPAT, which was developed in 2003 and is available in two models, the 100 and the 200. The WatchPAT employs an automatic algorithm that integrates data such as peripheral arterial tone (PAT) signal attenuation, oxygen desaturations detected by pulse oximetry, and heart rate variability to calculate the hourly frequency of respiratory events during total sleep time measured by actigraphy. In a study conducted by Ayas et al. (2003) with the participation of 30 adults, the device demonstrated a sensitivity ranging from 82.6% to 93.3% compared to PSG. Numerous studies on the WatchPAT have generally reported a sensitivity exceeding 80% [43-48]. However, the device's accuracy may decrease in individuals with periodic limb movements during sleep or restless legs syndrome. Moreover, since it does not directly measure airflow, it cannot directly detect apneas and hypopneas. Another notable limitation is that most studies have evaluated the device exclusively under laboratory conditions [49].

The other sleep apnea diagnostic device developed in 2016 is the ARAM device. The measurements were categorized into two main groups: respiratory activity (airflow and nasal air pressure) and sleep behavior (movement and ambient noise). The respiratory sensors directly detect abnormalities and interruptions in airflow through a simple nasal cannula. An integrated microphone records the patient's snoring and ambient noise, while accelerometer measurements provide information about movement and body orientation, which can be used to estimate sleep stages. By analyzing these sensors together, it is intended to provide a more detailed picture of the patient's sleep, for example, distinguishing awakenings caused by loud external noises instead of an apneic event. A custom-designed PCB collects the sensor data, uses an onboard timer to timestamp each measurement, and stores the data on an internal SD card. Pressure data are collected using a pressure sensor and a thermistor, combined with an accelerometer for actigraphy, while ambient noise is captured by an integrated microphone. The cannula directs the airflow from the patient's nose and mouth to the thermistor and pressure sensor. All data are stored on an internal SD card in a custom timestamp format that can easily be converted to the standard PSG data format (EDF+). The storage capacity (4 GB) and battery capacity (300 mAh) are designed to operate for two nights without requiring recharging or data clearing. In conclusion, devices such as ARAM are considered to offer a much more cost-effective and accessible option for large-scale screening of OSA due to their simplicity [50]. The NightOwl-RE I, developed in 2018, consists of a fingertip sensor and cloud-based analysis software. The sensor collects accelerometer and photoplethysmographic data, and the software generates actigraphy, blood oxygen saturation, and PAT parameters from these data. In a laboratory study conducted with 101 patients, the device's AHI assessment showed an agreement of 81.2% with PSG [51].

The Overnight Digital Monitoring (ODM) device (Figure 1: 2020a) consists of a high-resolution wireless oximeter and an integrated accelerometer that connect to a smartphone. The device measures the Oxygen Desaturation Index. In a laboratory study involving 304 patients with a mean age of 55 years

and a mean body mass index of 30 kg/m², the device's results were found to be comparable to those of PSG. ODM has been evaluated as a simple and reliable method for the diagnosis of OSA [52]. The Belun Ring (Figure 1: 2020b) is a system developed for home detection of sleep apnea. It includes a pulse oximeter sensor and a cloud-based neural network algorithm. Using oxygen saturation, photoplethysmography, and accelerometer signals, the device estimates total sleep time and the respiratory event index. These parameters are derived from heart rate variability and fluctuations in oxygen saturation. In a laboratory study involving 50 adult participants without significant cardiopulmonary or neuromuscular comorbidities and not using medications that affect heart rate, the device demonstrated the ability to estimate AHI and total sleep time with reasonable accuracy [53].

The MORFEA device (Figure 1: 2020c), which can be comfortably positioned on the nasal septum, employs an integrated PPG system with red and infrared light sources to analyze changes in arterial blood volume, along with a three-axis accelerometer based on MicroElectroMechanical Systems (MEMS) technology integrated on silicon to analyze movements. MORFEA records data in streaming mode via Bluetooth Low Energy (BLE) and transmits it to an external processor. The data can be monitored in real time during acquisition. Placement of MORFEA on the nasal septum offers a significant advantage, providing maximum PPG sensitivity to airflow modulation and excellent accelerometer sensitivity to thoracoabdominal movements. Algorithms have been developed for apnea detection (using the PPG signal), classification (through the fusion of PPG and inertial signals), and body position identification (using the inertial signal). In evaluations involving more than 500 apnea episodes, MORFEA demonstrated approximately 90% sensitivity and precision in apnea detection. Even in the absence of the accelerometer during patient testing, the apnea classification method—based on the simultaneous detection of airflow reduction (via PPG) and repetitive thoracoabdominal efforts (via the accelerometer) during PPG-identified apnea periods—was validated on control subjects. Neither MORFEA nor Type III HSAT devices are capable of sleep staging or detecting the REM phase. However, MORFEA has the potential to detect apnea episodes, monitor thoracoabdominal movements associated with OSA, grade the severity of sleep-related breathing disorders (SRBDs), and identify the patient's body and head position during sleep [54]. In another study (Figure 1: 2020d), a wearable bioelectrode was developed with the aim of combining the comfort and reusability of textile materials with the high signal-to-noise ratio (SNR) and low motion artifacts characteristic of wet electrodes. To this end, textile electrodes and garment design strategies were synergistically employed to create Chesma, a discreet platform that enables longitudinal acquisition of physiological signals from the user's facial region. Chesma incorporates two novel fabric-based electrodes: the first is a hydrogel electrode (tAgTrode) that retains its ionic properties after multiple uses and washes, does not cause skin irritation, and can operate continuously for more than eight hours without compromising signal integrity. The second component is an ion-conductive textile pressure sensor (Press-ION) capable of capturing pulse waveforms. When integrated into a lightweight eye mask, these electrodes can simultaneously acquire complementary electrooculographic and cardiac data, thereby facilitating sleep quality and psychophysiological studies and enhancing the accuracy and usability of virtual reality headsets [55]. Additionally, in a 2020 study, the Dreem Headband (DH), a cost-effective, comfortable, and patient-friendly reduced EEG montage equipped with five dry EEG electrodes (O1, O2, FpZ, F7, and F8), a tri-axial accelerometer, and an integrated pulse oximeter, was used. Utilizing deep learning algorithms, the device aims to achieve high accuracy in both physiological signal acquisition and automatic sleep stage analysis. To this end, simultaneous recordings were obtained from 31 participants over a single night using both the DH and clinical standard PSG. The following parameters were evaluated: (1) the capability of DH to monitor brain sleep frequencies throughout the night; (2) the accuracy of heart rate, respiratory rate, and respiratory rate variability (RRV) measurements during sleep; and (3) the performance of DH's automatic sleep stage classification algorithm compared to manual scoring by five sleep experts based on PSG. In conclusion, DH demonstrated the capability to monitor sleep-related physiological signals and accurately translate them into sleep stages. These features highlight its potential to facilitate large-scale, longitudinal sleep studies [56]. Withings Sleep Analyzer (Figure 1: 2021a) is a system measuring 63.7 cm in length and 9.5 cm in width, comprising a microphone, electronic components, and an air cushion. In a sleep laboratory study involving 118 patients, the device was shown to accurately detect moderate OSA when compared to PSG. Given its simple operating principle and the high prevalence of sleep apnea syndrome, it has been emphasized to possess significant clinical potential [57]. OrbSense (Figure 1: 2021b) is a contactless respiratory monitoring device based on ultra-wideband (UWB) radar technology. The radar module is positioned approximately 10 cm from the patient's bed and utilizes pulse-Doppler and respiratory signal processing methods to collect data. Operating at a center frequency of 7.29 GHz with a bandwidth of 1.5 GHz, the device emits an average

power of only 0.1 mW, which is about 1000 times lower than that of a standard Wi-Fi router, with a power density around -41.3 dBm/MHz. A sleep laboratory study involving 359 participants demonstrated that OrbSense reliably detected respiratory events with high agreement to PSG. However, further research is required to evaluate its potential use in community and home settings [58]. In another study (Figure 1: 2021c), a smart mask was developed with a microcontroller equipped with a Bluetooth module placed on the front side, along with a 1000 mAh rechargeable battery capable of supporting continuous recording for over 10 hours. Various sensors were integrated on the rear side of the sleep mask. Centrally, a high-sensitivity microphone was used as an acoustic sensor to monitor respiratory sounds along the nasal airway. Positioned toward the top, a three-axis accelerometer was included to detect head movements and position during sleep. Additionally, an eye movement sensor was embedded in a recessed cavity on the left side to detect any ocular activity during sleep. It is anticipated that the mask could serve as a simple platform to provide various physiological signals and reveal neurological activities during different sleep stages, thereby generating clinically meaningful insights [59]. Developed in 2022, the ApneaGraph Spiro system consists of a microphone, pulse oximeter, actimeter, and esophageal probe. In a sleep laboratory study, when compared to PSG, this device was reported to have a tendency to overestimate mild OSA cases and underestimate severe cases [60].

Dormotech Vlab (in 2025) is a comprehensive system that monitors oxygen saturation, heart rate, EEG, EOG, EMG, total airflow, snoring intensity, respiratory effort, and body and head positions. Data collected from sensors attached to the head and trunk units are transmitted to a central data acquisition unit via a local Wi-Fi network. Data analysis is performed by external service providers. In a sleep laboratory study involving 47 adult participants, the Dormotech Vlab device demonstrated 97% agreement with PSG and was found to be comparable to PSG in terms of usability, effectiveness, and validity [61]. Table 1 provides a comparative summary of the diagnostic performance of sleep apnea detection devices based on different sensor Technologies.

Table 1. Summary of Studies Including Patient Numbers, Age Ranges, and Device Types

Device Type	Number of Patients	Age (Mean \pm SD)	Primary Metric	Limitations vs. PSG	Sensitivity (%)	Specificity (%)	PSG Correlation (r /ICC)
SleepStrip TM [42]	402	NR	AHI	No EEG/EOG/EMG, No SpO ₂	80-86	57-86	NR
WatchPat 100 [43]	16	NR	AHI	No airflow, No EEG	82	89	$r=0,92$
WatchPat 100 [44]	27	40,9 \pm 11,2	AHI	No airflow, No EEG	NR	NR	NR
WatchPat 200 [45]	51	45,3 \pm 10	AHI	No EEG	93.1	66.1	NR
PAT [46]	30	NR	AHI	No airflow, No EEG	60	96.2	$r=0,85$
WatchPat 100 [47]	36	63 \pm 7	AHI	No airflow, No EEG	95.8	55	NR
WatchPat 100 [48]	262	NR	AHI	No airflow, No EEG	85.8	76.6	$r=0,86$
ODM [52]	304	55 \pm 14	ODI	No airflow, No sleep staging	95	50	NR
Belun Ring [53]	50	NR	AHI	No EEG/EOG	92	64	$r=0,94$
Dreem Headband [56]	31	35,32 \pm 7,51	Sleep staging	Limited EEG channels (5 dry electrodes)	NR	NR	NR
Withings Sleep Analyzer [57]	118	NR	AHI	No EEG, indirect measurement	88	88.6	NR
OrbSense [58]	359	NR	AHI	No EEG, No direct airflow	96	56	$r=0,92$
Dormotech Vlab [61]	47	52	AHI	Requires head/body sensors	NR	NR	97% agreement

Nox-T3 REI [62]	74	NR	AHI	Type III device (no EEG)	NR	NR	NR
NOX-T3 [63]	80	47,6±14	AHI	EEG optional only	95	63	NR
WatchPat 200 [64]	75	45±11	AHI	No EEG	90	69	NR
Somnofy® [65]	71	Mean 28.9	AHI	No EEG, no direct airflow	97	72	NR
ApneaStrip [66]	56	48,9±14,6	AHI	No SpO ₂ , no EEG	80	54.5	NR
Somnocheck Micro [67]	155	52±12	AHI	Type III device	NR	NR	NR
Wearable watch [68]	41	NR	AHI	No EEG, no airflow	82	89	NR
LifeShirt [69]	10	NR	AHI	Bulky, no EEG	NR	NR	NR
LifeShirt [70]	50	NR	AHI	No EEG	87	82	NR
PPG [71]	49	43,5±16,9	AHI	No airflow, no EEG	95.3	50	r=0,93
Morpheus Ox [72]	73	52,1±14,2	AHI	Single sensor only	70	91	NR
Smart phone [73]	50	NR	AHI	Sound only, no SpO ₂	70	94	NR
IR-UWB Radar [74]	94	NR	AHI	No direct airflow	93	84	NR
UWB Radar [75]	67	43±11	AHI	Contactless, indirect	100	70	NR
UWB Radar [76]	176	NR	AHI	Contactless, indirect	97	96	NR

NR: Not reported in the original study

Wearable, portable, and contactless devices based on various sensor technologies have emerged as promising alternatives to traditional PSG in the detection of OSA. The reviewed devices utilize a wide range of sensors, including thermistors, PPG, PAT, EEG, EMG, and IR-UWB radar, and are applied to different body regions such as the nose, finger, wrist, chest, head, or used in a fully contactless manner. Reported sensitivity values range from 60% to 100%, while specificity ranges from 50% to 96%. The highest sensitivity was observed in contactless systems using IR-UWB and UWB radar (97–100%), and the highest specificity was reported in PAT-based devices (96.2%) and smartphone-based acoustic systems (94%). PAT-based devices like the WatchPat showed considerable variation in diagnostic performance depending on the study population, with sensitivities ranging from 60% to 95.8%. Devices relying solely on SpO₂ measurements generally demonstrated lower diagnostic accuracy, while systems integrating multiple physiological signals—such as heart rate, respiratory effort, body movement, and EEG—showed superior performance. Sample sizes across studies ranged from 10 to 402, with better diagnostic performance typically observed in adult populations aged between 40 and 60 years. Overall, multi-sensor and contactless systems not only enhance user comfort but also achieve high diagnostic accuracy, although validation in the target patient population remains essential before routine clinical use.

3.4. Commercial devices used for OSA detection

The evaluation of commercially available sleep apnea diagnostic devices today reveals distinct advantages and disadvantages of different systems in terms of their technological features, clinical applicability, and practical usability (Figure 2). The Embla N7000 (Figure 2a) recording system is the result of nearly twenty years of experience in the field of sleep medicine. The system offers a high degree

of flexibility and excellent signal quality to meet the demanding requirements of clinical practice and research. It consists of the N7000 Bedside Unit, which acquires and transmits physiological signals; the MDrive, which powers the Bedside Unit and facilitates communication between the N7000 and the acquisition computer via a Local Area Network (LAN); and the Patient Unit, which acquires and transmits respiratory data. The total weight is 1580 grams, with dimensions of 190 mm x 130 mm x 27 mm. The system has been reported to be ideal for routine sleep studies and research applications [77]. The SOMNOtouch™ RESP device (Figure 2b) is notable for its standard screening signals (airflow and snoring, respiratory effort, SpO₂, pulse rate, plethysmogram, body position, CPAP/BIPAP pressure) combined with the integrated actigraphy sensor of the SOMNOtouch™ system. Based on body position and actigraphy data, it enables a detailed sleep-wake assessment that distinguishes between sleep, wakefulness, and respiratory events. Time in bed is determined interactively by the patient using a patient marker. Thanks to its color touchscreen and Smart Connectivity technology, the SOMNOtouch™ RESP is user-friendly and intuitive. Integrated sensors and a built-in Li-Ion battery keep operational costs low per measurement. The recorded data can be transferred to a tablet, computer, or smartphone, allowing instant signal monitoring; the data can be displayed bedside or on a mobile device screen. Transfer durations and intervals are customizable for each user. Weighing only 64 grams and measuring 84 mm x 55 mm, it is one of the lightest, most modular, and powerful polygraphy devices available on the market today [78]. The Philips Alice NightOne device (Figure 2c) presents a cost-effective solution for home-based sleep apnea testing, offering significantly lower costs compared to traditional overnight polysomnography, with test results reviewed by board-certified sleep specialists. The system is minimally invasive, requiring only a nasal cannula, fingertip pulse oximeter, and chest effort belt, with sensor indicators that alert users to improper placement and a “Good Study” indicator confirming sufficient data collection. Devices are typically shipped within two to three business days, and results are returned approximately two to four days after device return, enabling rapid diagnosis. However, the device rental is limited to a four-day period, and while intended for one-time diagnostic use, it cannot be retained for future testing without incurring additional fees. As a Type III sleep monitoring device, Alice NightOne provides less comprehensive physiological data than Type I or II studies, resulting in lower sensitivity compared to in-laboratory evaluations and an increased risk of false negatives. Furthermore, depending on the results, clinicians may prescribe automatic positive airway pressure (APAP) devices that adjust airway pressure based on detected events and usually do not require in-laboratory titration; nevertheless, patients with more complex sleep apnea may still require further evaluation in a sleep laboratory before PAP therapy initiation [79]. The Nox T3s™ HST system (Figure 2d) includes thoracic and abdominal RIP bands, nasal pressure/mask pressure sensors, snoring signal and sound channels, 13 unipolar and 4 bipolar channels, as well as sensors for body position, activity, SpO₂, pulse, and plethysmography. The device features two RIP channels for thoracic and abdominal respiratory inductance plethysmography with a sampling rate of 200 Hz, one flow/pressure channel with an input pressure range of -5 cmH₂O to +50 cmH₂O (DC-80 Hz) and noise levels below 1 mmH₂O. The unit measures 82 mm (W) x 62 mm (H) x 26 mm (D) and weighs 120 grams including the battery [80]. Graef PSG (Figure 2e) measures 240 mm x 144 mm x 50 mm and weighs 700 grams. It features 13 referential channels, 6 differential channels, 2 respiratory inductive plethysmography channels, a pressure sensor, a tri-axial accelerometer-based position sensor, an electret microphone, an integrated light sensor, and a pulse oximeter. The referential and differential channels operate within a ±300 mV range with a resolution of less than 50 nV and offer a user-adjustable frequency response from DC to 580 Hz. The input impedance is >100 MΩ for referential channels and >20 MΩ for differential channels, with a CMRR greater than 100 dB for both. Typical noise is 2 μV_{pp} within the 0.1–70 Hz range. The respiratory inductive plethysmography channels use an inductive band sensor with a frequency response from DC to 64 Hz. Pressure measurements are obtained via differential input with two male luer connections, covering a range of ±100 cmH₂O with an accuracy of ±1 cmH₂O at 25°C. The position sensor, a tri-axial accelerometer, can detect supine, prone, left, right, and upright positions. The microphone is electret-based with a user-adjustable frequency response of 5–580 Hz. The integrated light sensor and pulse oximeter measure SpO₂ values between 25% and 100% and heart rate between 18 and 300 beats per minute. The SpO₂ accuracy is ±2.5 digits within 1 standard deviation for the 70–100% range, and heart rate accuracy is ±1% ±1 digit. SpO₂, heart rate, and status data are sampled once per second and up-sampled to match other channels, while the plethysmograph channel is sampled at 256 samples per second and also up-sampled accordingly [81].

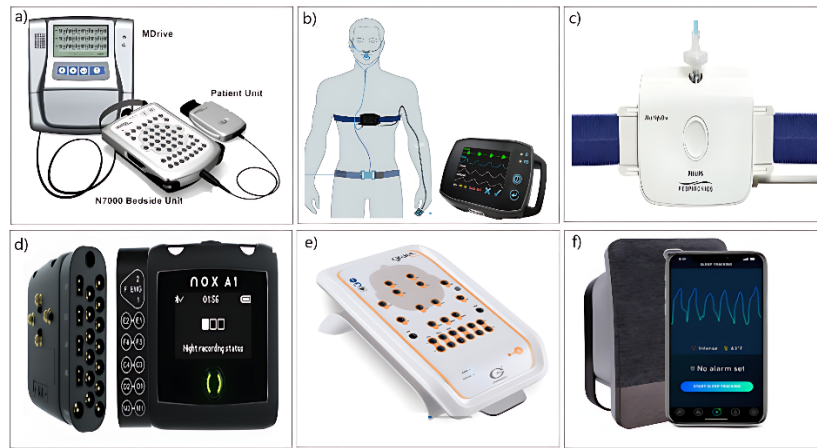


Figure 2. Commercial devices used for OSA detection a) Embla N7000 [77], b) SOMNOtouch™ RESP [78] c) Philips Alice NightOne [79], d) Nox T3s™ HST [80], e) Graehl PSG [81], SleepScore Max [82]

SleepScore Max (Figure 2f) primarily operates using bio-motion sensor technology. This system functions by emitting ultra-low-power radio waves—similar to echolocation—from a device placed at the bedside, enabling the detection of respiration and subtle body movements, particularly in the upper torso. The integrated sensors within the device allow for continuous monitoring of both physiological and environmental parameters throughout sleep. Respiratory sensors track the rate and pattern of breathing, thereby identifying indirect indicators of sleep-related breathing disorders such as sleep apnea. Motion sensors detect both micro- and macro-level body movements, enabling the differentiation of sleep stages (light, deep, and REM) as well as periods of wakefulness. In addition to physiological monitoring, the device includes various environmental sensors: a light sensor measures ambient light levels in the bedroom, a temperature sensor detects room temperature, and a sound sensor (microphone) records noise levels and potential sleep-disrupting sounds such as snoring. Through this multi-sensor system, the device is capable of providing a comprehensive analysis of both individual and environmental sleep dynamics. The data collected from these sensors is processed by SleepScore’s advanced algorithms to generate detailed sleep reports and personalized recommendations for the user [82].

3.5. Artificial intelligence (AI) in OSA

Although PSG is considered the gold standard for the diagnosis of OSA, it requires patients to be monitored overnight in a sleep laboratory while connected to various sensors. This approach presents several limitations, including high cost, time demands, limited geographical accessibility, and incompatibility with individuals’ busy schedules. In addition, PSG may overlook mild cases of OSA and does not always provide an accurate estimation of disease severity. In response to these challenges, machine learning (ML) and deep learning (DL)–based systems have emerged as promising alternatives that can accelerate the diagnostic process and address the shortcomings of traditional methods [83, 84].

In recent years, ML and DL techniques have been effectively utilized in the analysis of PSG data. Traditionally manual tasks such as sleep stage scoring and apneic event detection have been automated through AI, resulting in substantial savings in time and labor, while also improving consistency by minimizing human error. AI algorithms are capable of accurately analyzing patterns in multiple parameters including airflow, oxygen desaturation, and sleep stages, and can reliably detect OSA-related events. Wearable and portable devices integrated with AI technologies offer a more accessible diagnostic alternative to laboratory-based PSG. Devices such as smartwatches, rings, and sleep masks are used to continuously monitor various physiological parameters, enabling real-time analysis of OSA events. The design and development of such wearable electronics often utilize mobile-controlled interfaces to enhance user interaction and provide adjustable feedback [85]. Furthermore, Brain-Computer Interface (BCI) systems integrated with Arduino-based microcontrollers demonstrate the potential for real-time control and monitoring through low-cost, portable hardware solutions [86]. Additionally, mobile health (mHealth) applications utilize smartphone-acquired data such as snoring and breathing sounds to provide cost-effective, user-friendly solutions for early screening of OSA [87].

The primary advantage of ML and DL-based models lies in their ability to detect complex patterns within large and heterogeneous datasets—patterns that may not be easily discernible by human observation. For example, one of the most commonly used algorithms, Support Vector Machines (SVM), enhances classification reliability by creating linear decision boundaries with wide margins, and its low computational requirements make it suitable for real-time applications in portable devices. Logistic Regression (LR) is a statistical model that calculates the probability of an observation belonging to a particular class, and is frequently employed in predicting disease risk. The k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm, while flexible for both binary and multi-class classification tasks, is more effective on smaller datasets due to its computational burden and complexity in decision boundaries [88]. However, the success of these systems is highly dependent on the availability of large, high-quality, and diverse datasets. Current data collection processes are challenged by concerns related to patient privacy, ethical considerations, lack of standardization, and data heterogeneity. Inconsistent or low-quality data from different sources can reduce the generalizability and clinical reliability of AI models. To date, numerous AI-based algorithms have been developed for sleep medicine, with some having received approval from the U.S. Food and Drug Administration (FDA). Furthermore, the predictive power of AI models is demonstrably effective in other cardiovascular areas, such as identifying biomarkers for new-onset atrial fibrillation following coronary artery bypass grafting [89]. However, FDA approval is primarily based on safety profiles and does not guarantee clinical validity or efficacy. Therefore, comprehensive certification and regulatory mechanisms are needed to ensure that AI systems meet certain performance standards, are tested on independent datasets, and are transparently reported prior to clinical deployment. Moreover, the integration of AI-based systems into clinical practice introduces several technical and structural challenges. Recent research highlights that comparing various ML models is crucial for optimizing disease prediction and successfully integrating these tools into clinical decision support systems [90]. Deep learning models require high-performance computing infrastructure to operate effectively, and this infrastructure must be seamlessly compatible with existing healthcare systems. AI tools must be capable of integration with various clinical workflows, data sources, and software platforms. Otherwise, their practical adoption by clinicians may be hindered, negatively impacting overall clinical efficiency. Data security is another crucial consideration. Unless patient data confidentiality and integrity are fully safeguarded, the safe use of AI systems in clinical environments cannot be assured. Finally, the development of user-friendly interfaces that facilitate easy access to and meaningful interpretation of AI-generated outputs is of paramount importance. Such interfaces would enable even clinicians without extensive technical expertise to make accurate and informed clinical decisions using AI-supported systems [91].

5. Conclusions

Among commercially available diagnostic devices, SOMNOtouch™ RESP and Nox T3s™ provide a good balance between portability, signal comprehensiveness, and user-friendly design, making them suitable for both clinical and home settings. However, they remain relatively expensive and operate without direct physician supervision. Embla N7000 is still considered the gold standard for full PSG due to its extensive signal acquisition capabilities; yet, its large size and high cost render it impractical for home use. Philips Alice NightOne offers a cost-effective and practical solution for home-based screening but may fail to detect mild OSA cases. Contactless solutions such as SleepScore Max offer a comfortable alternative for users who prefer not to wear sensors, though their reliance on indirect measurements limits diagnostic accuracy.

According to the literature, wearable and portable technologies developed for the diagnosis and screening of OSA have emerged as more accessible, user-friendly, and cost-effective alternatives to traditional PSG. Devices such as WatchPAT, SleepStrip™, Belun Ring, and NightOwl demonstrate moderate to high correlation with PSG in key parameters such as AHI, ODI, and TST. These systems are particularly promising for community-based screening and ambulatory monitoring of undiagnosed individuals. However, many of these devices cannot accurately differentiate sleep stages, do not directly measure airflow, and have limited reliability in detecting non-apnea-related sleep disorders. In addition, most validation studies are limited in scope and rarely conducted under real-world home-use conditions. The integration of advanced algorithms and deep learning-based analysis holds strong potential to enhance diagnostic accuracy and clinical reliability. Models capable of estimating sleep stages using respiration, actigraphy, and HR, along with interactive feedback systems to guide users on correct sensor placement, could significantly improve both adherence and data quality. Overall, multi-sensor and contactless systems show great promise as alternatives to PSG in detecting OSA. Especially devices

using IR-UWB radar and integrated physiological metrics offer high diagnostic accuracy and greater user comfort. Nonetheless, robust clinical validation across diverse populations remains essential for widespread implementation.

Furthermore, recent studies have demonstrated that some AI-based systems can detect OSA using non-contact methods by analyzing audio recordings, thermal imaging, or video data alone. These solutions allow for high-accuracy screening without the need for wearable sensors, increasing comfort and accessibility for at-home monitoring. Additionally, AI models capable of processing multimodal data by integrating various biomarkers can further enhance diagnostic performance.

Looking ahead, the development of AI-assisted automated analysis, miniaturized sensors, and multimodal monitoring technologies may play a pivotal role in bridging the diagnostic gap between PSG and HSAT. Accordingly, device selection should be guided by the clinical diagnostic objective, the intended usage setting, patient compliance, and overall cost-effectiveness. While these systems may not fully replace PSG, they can serve as effective complementary tools or preliminary screening solutions.

6. Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

7. Funding

This study is supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of Süleyman Demirel University under project number FDK-2022-8789.

8. References

- [1] C. Freire, L.U. Sennes, V.Y. Polotsky, Opioids and obstructive sleep apnea, *Journal of Clinical Sleep Medicine* 18 (2) (2022) 647–652.
- [2] J.L. Chang, A.N. Goldberg, J.A. Alt, A. Mohammed, L. Ashbrook, D. Auckley, et al., International consensus statement on obstructive sleep apnea, *International Forum of Allergy & Rhinology* 13 (7) (2023) 1061–1482.
- [3] A.L. Platon, C.G. Stelea, O. Boișteanu, E. Patrascanu, I.N. Zetu, S.N. Roșu, et al., An update on obstructive sleep apnea syndrome—A literature review, *Medicina* 59 (8) (2023) 1459.
- [4] X. Yang, Y. Xiao, B. Han, K. Lin, X. Niu, X. Chen, Implication of mixed sleep apnea events in adult patients with obstructive sleep apnea-hypopnea syndrome, *Sleep and Breathing* 23 (2023) 559–565.
- [5] A. Abbasi, S.S. Gupta, N. Sabharwal, V. Meghrajani, S. Sharma, S. Kamholz, et al., A comprehensive review of obstructive sleep apnea, *Sleep Science* 14 (2) (2021) 142–154.
- [6] B. Błaszczyk, H. Martynowicz, M. Więckiewicz, M. Straburzyński, M. Antolak, S. Budrewicz, et al., Prevalence of headaches and their relationship with obstructive sleep apnea (OSA)-Systematic review and meta-analysis, *Sleep Medicine Reviews* 73 (2024) 101889.
- [7] A.K. Mitra, A.R. Bhuiyan, E.A. Jones, Association and risk factors for obstructive sleep apnea and cardiovascular diseases: A systematic review, *Diseases* 9 (4) (2021) 88.
- [8] R.B. Berry, R. Brooks, C.E. Gamaldo, S.M. Harding, C.L. Marcus, B.V. Vaughn, *The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: Rules, terminology and technical specifications (Version 2.5)*, American Academy of Sleep Medicine (2018).
- [9] H. ElMoaqet, M. Eid, M. Glos, M. Ryalat, T. Penzel, Deep recurrent neural networks for automatic detection of sleep apnea from single channel respiration signals, *Sensors* 20 (18) (2020) 5037.
- [10] Y.H. Khor, S.W. Khung, W.R. Ruehland, Y. Jiao, J. Lew, M. Munsif, et al., Portable evaluation of obstructive sleep apnea in adults: A systematic review, *Sleep Medicine Reviews* 68 (2023) 101743.

- [11] J. Kim, H. ElMoaqet, D.M. Tilbury, S.K. Ramachandran, T. Penzel, Time domain characterization for sleep apnea in oronasal airflow signal: A dynamic threshold classification approach, *Physiological Measurement* 40 (5) (2019) 054007.
- [12] P. Moridian, A. Shoeibi, M. Khodatars, M. Jafari, R.B. Pachori, A. Khadem, et al., Automatic diagnosis of sleep apnea from biomedical signals using artificial intelligence techniques: Methods, challenges, and future works, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 12 (6) (2022) e1478.
- [13] H. Qin, G. Liu, A dual-model deep learning method for sleep apnea detection based on representation learning and temporal dependence, *Neurocomputing* 473 (2022) 24–36.
- [14] E.P. Adeghe, C.A. Okolo, O.T. Ojeyinka, A review of wearable technology in healthcare: Monitoring patient health and enhancing outcomes, *OARJ of Multidisciplinary Studies* 7 (1) (2024) 142–148.
- [15] G.M. Migliaccio, J. Padulo, L. Russo, The impact of wearable technologies on marginal gains in sports performance: An integrative overview on advances in sports, exercise, and health, *Applied Sciences* 14 (15) (2024) 6649.
- [16] Y. Xiao, Z. Huang, Y. Gao, From wrist to finger: Hand pose tracking using ring-watch wearables, in: *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2025*, pp. 1–7.
- [17] Q. Xue, D. Nissanka, J.T. Yan, R. Wang, S. Patel, V. Iyer, PPG earring: Wireless smart earring for heart health monitoring, in: *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2025*, pp. 1–16.
- [18] M. De Zambotti, C. Goldstein, J. Cook, L. Menghini, M. Altini, P. Cheng, et al., State of the science and recommendations for using wearable technology in sleep and circadian research, *Sleep* 47 (4) (2024) zsad325.
- [19] A.V. Benjafield, N.T. Ayas, P.R. Eastwood, R. Heinzer, M.S. Ip, M.J. Morrell, et al., Estimation of the global prevalence and burden of obstructive sleep apnoea: A literature-based analysis, *The Lancet Respiratory Medicine* 7 (8) (2019) 687–698.
- [20] A. Malhotra, I. Ayappa, N. Ayas, N. Collop, D. Kirsch, N. Mcardle, et al., Metrics of sleep apnea severity: Beyond the apnea-hypopnea index, *Sleep* 44 (7) (2021) zsab030.
- [21] P.E. Peppard, T. Young, J.H. Barnet, M. Palta, E.W. Hagen, K.M. Hla, Increased prevalence of sleep-disordered breathing in adults, *American Journal of Epidemiology* 177 (9) (2013) 1006–1014.
- [22] Y. Qian, S.C. Dharmage, G.S. Hamilton, C.J. Lodge, A.J. Lowe, J. Zhang, et al., Longitudinal risk factors for obstructive sleep apnea: A systematic review, *Sleep Medicine Reviews* 71 (2023) 101838.
- [23] M. Kang, F. Mo, M. Witmans, V. Santiago, M.A. Tablizo, Trends in diagnosing obstructive sleep apnea in pediatrics, *Children* 9 (3) (2022) 306.
- [24] S. Magnusdottir, E.A. Hill, Prevalence of obstructive sleep apnea (OSA) among preschool aged children in the general population: A systematic review, *Sleep Medicine Reviews* 73 (2024) 101871.
- [25] S. Ahbab, H.E. Ataoğlu, M. Tuna, L. Karasulu, F. Çetin, L.Ü. Temiz, et al., Neck circumference, metabolic syndrome and obstructive sleep apnea syndrome; evaluation of possible linkage, *Medical Science Monitor* 19 (2013) 111.
- [26] S.M. Caples, W.M. Anderson, K. Calero, M. Howell, S.D. Hashmi, Use of polysomnography and home sleep apnea tests for the longitudinal management of obstructive sleep apnea in adults: An American Academy of Sleep Medicine clinical guidance statement, *Journal of Clinical Sleep Medicine* 17 (6) (2021) 1287–1293.
- [27] Y. Yeghiazarians, H. Jneid, J.R. Tietjens, S. Redline, D.L. Brown, N. El-Sherif, et al., Obstructive sleep apnea and cardiovascular disease: A scientific statement from the American Heart Association, *Circulation* 144 (3) (2021) e56–e67.

- [28] C. Iber, S. Redline, A.M.K. Gilpin, S.F. Quan, L. Zhang, D.J. Gottlieb, et al., Polysomnography performed in the unattended home versus the attended laboratory setting: Sleep Heart Health Study methodology, *Sleep* 27 (3) (2004) 536–540.
- [29] M. Bruyneel, C. Sanida, G. Art, W. Libert, L. Cuvelier, M. Paesmans, et al., Sleep efficiency during sleep studies: Results of a prospective study comparing home-based and in-hospital polysomnography, *Journal of Sleep Research* 20 (1pt2) (2011) 201–206.
- [30] A.J. Campbell, A.M. Neill, Home set-up polysomnography in the assessment of suspected obstructive sleep apnea, *Journal of Sleep Research* 20 (1pt2) (2011) 207–213.
- [31] W. Banhiran, W. Chotinaiwattarakul, C. Chongkolwatana, C. Methetrairut, Home-based diagnosis of obstructive sleep apnea by polysomnography type 2: Accuracy, reliability, and feasibility, *Sleep and Breathing* 18 (2014) 817–823.
- [32] D. Cunnington, H. Garg, H. Teichtahl, Accuracy of an ambulatory device for the diagnosis of sleep disordered breathing, *The Indian Journal of Sleep Medicine* 4 (4) (2009) 143–148.
- [33] R. De Fazio, V. Mattei, B. Al-Naami, M. De Vittorio, P. Visconti, Methodologies and wearable devices to monitor biophysical parameters related to sleep dysfunctions: An overview, *Micromachines* 13 (8) (2022) 1335.
- [34] K. Ito, T. Ikeda, Accuracy of type III portable monitors for diagnosing obstructive sleep apnea, *Biomedicine Hub* 3 (2) (2019) 1–10.
- [35] H.S. Saad, J.F. Zaki, M.M. Abdelsalam, Employing of machine learning and wearable devices in healthcare system: Tasks and challenges, *Neural Computing and Applications* 36 (29) (2024) 17829–17849.
- [36] B.A. Vicente, R. Sebastião, V. Sencadas, Wearable devices for respiratory monitoring, *Advanced Functional Materials* 34 (45) (2024) 2404348.
- [37] A. Erdem, E. Eksin, H. Senturk, E. Yildiz, M. Maral, Recent developments in wearable biosensors for healthcare and biomedical applications, *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 171 (2024) 117510.
- [38] X. Chen, D.H. Kim, N. Lu, Introduction: Wearable devices, *Chemical Reviews* 124 (10) (2024) 6145–6147.
- [39] S. Aziz, A.A. AM Ali, H. Aslam, A.A. Abd-alrazaq, R. AlSaad, M. Alajlani, et al., Wearable artificial intelligence for sleep disorders: Scoping review, *Journal of Medical Internet Research* 27 (2025) e65272.
- [40] D. Vitazkova, H. Kosnacova, D. Turonova, E. Foltan, M. Jagelka, M. Berki, et al., Transforming sleep monitoring: Review of wearable and remote devices advancing home polysomnography and their role in predicting neurological disorders, *Biosensors* 15 (2) (2025) 117.
- [41] T. Penzel, C. Schöbel, I. Fietze, New technology to assess sleep apnea: Wearables, smartphones, and accessories, *Research* 7 (2018) 413.
- [42] T. Shochat, N. Hadas, M. Kerkhofs, A. Herchuelz, T. Penzel, J.H. Peter, et al., The SleepStrip™: An apnoea screener for the early detection of sleep apnoea syndrome, *European Respiratory Journal* 19 (1) (2001) 121–126.
- [43] A. Bar, G. Pillar, I. Dvir, J. Sheffy, R.P. Schnall, P. Lavie, Evaluation of a portable device based on peripheral arterial tone for unattended home sleep studies, *Chest* 123 (3) (2003) 695–703.
- [44] J.H. Choi, E.J. Kim, Y.S. Kim, J. Choi, T.H. Kim, S.Y. Kwon, et al., Validation study of portable device for the diagnosis of obstructive sleep apnea according to the new AASM scoring criteria: Watch-PAT 100, *Acta Oto-Laryngologica* 130 (7) (2010) 838–843.
- [45] T. Ceylan, H. Fırat, G. Kuran, S. Ardiç, E. Bilgin, F. Çelenk, Quick diagnosis in obstructive sleep apnea syndrome: WatchPAT-200, *Iranian Red Crescent Medical Journal* 14 (8) (2012) 475.
- [46] J.A. Pinto, L.B.M.D. Godoy, R.C. Ribeiro, E.I. Mizoguchi, L.A.M. Hirsch, L.M. Gomes, Accuracy of peripheral arterial tonometry in the diagnosis of obstructive sleep apnea, *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology* 81 (5) (2015) 473–478.

- [47] R. Jen, J.E. Orr, Y. Li, P. DeYoung, E. Smales, A. Malhotra, et al., Accuracy of WatchPAT for the diagnosis of obstructive sleep apnea in patients with chronic obstructive pulmonary disease, COPD: Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease 17 (1) (2020) 34–39.
- [48] Z. Zhang, M. Sowho, T. Otvos, L.S. Sperandio, J. East, F. Sgambati, et al., A comparison of automated and manual sleep staging and respiratory event recognition in a portable sleep diagnostic device with in-lab sleep study, Journal of Clinical Sleep Medicine 16 (4) (2020) 563–573.
- [49] N.T. Ayas, S. Pittman, M. MacDonald, D.P. White, Assessment of a wrist-worn device in the detection of obstructive sleep apnea, Sleep Medicine 4 (5) (2003) 435–442.
- [50] R.S. Puri, A.G. Athanassiadis, N. Gill, S.S. Sathya, G. Rathod, A. Wahi, et al., Design and preliminary evaluation of a wearable device for mass-screening of sleep apnea, in: 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, 2016, pp. 1870–1873.
- [51] F. Massie, D. Mendes de Almeida, P. Dreesen, I. Thijs, J. Vranken, S. Klerkx, An evaluation of the NightOwl home sleep apnea testing system, Journal of Clinical Sleep Medicine 14 (10) (2018) 1791–1796.
- [52] G.D.L. Pinheiro, A.F. Cruz, D.M. Domingues, P.R. Genta, L.F. Drager, P.J. Strollo, et al., Validation of an overnight wireless high-resolution oximeter plus cloud-based algorithm for the diagnosis of obstructive sleep apnea, Clinics 75 (2020) e2414.
- [53] W. Gu, L. Leung, K.C. Kwok, I.C. Wu, R.J. Folz, A. Chiang, A Belun ring platform: A novel home sleep apnea testing system for assessment of obstructive sleep apnea, Journal of Clinical Sleep Medicine 16 (9) (2020) 1611–1617.
- [54] A. Manoni, F. Loreti, V. Radicioni, D. Pellegrino, L. Della Torre, A. Gumiero, et al., A new wearable system for home sleep apnea testing, screening, and classification, Sensors 20 (24) (2020) 7014.
- [55] S.Z. Homayounfar, S. Rostaminia, A. Kiaghadi, X. Chen, E.T. Alexander, D. Ganesan, et al., Multimodal smart eyewear for longitudinal eye movement tracking, Matter 3 (4) (2020) 1275–1293.
- [56] P.J. Arnal, V. Thorey, E. Debellemanni, M.E. Ballard, A. Bou Hernandez, A. Guillot, et al., The Dreem headband compared to polysomnography for electroencephalographic signal acquisition and sleep staging, Sleep 43 (11) (2020) zsa097.
- [57] P. Edouard, D. Campo, P. Bartet, et al., Validation of the Withings sleep analyzer, an under-the-mattress device for the detection of moderate-severe sleep apnea syndrome, Journal of Clinical Sleep Medicine 17 (6) (2021) 1217–1227.
- [58] R. Zhao, J.B. Xue, X.S. Dong, et al., Screening for obstructive sleep apnea using a contact-free system compared with polysomnography, Journal of Clinical Sleep Medicine 17 (5) (2021) 1075–1082.
- [59] B. Dang, J. Dicarolo, S. Lukashov, N. Hinds, J. Reinen, B. Wen, et al., Development of a smart sleep mask with multiple sensors, in: 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), IEEE, 2021, pp. 7058–7062.
- [60] T.A. Olafsson, E.A. Steinsvik, G. Bachmann-Harildstad, H. Hrubos-Strøm, A validation study of an esophageal probe-based polygraph against polysomnography in obstructive sleep apnea, Sleep and Breathing (2022) 1–10.
- [61] B.D. Fox, M. Shihab, A. Nassir, et al., Validation of a novel mask-based device for monitoring of comprehensive sleep parameters and sleep disordered breathing, Sleep and Breathing 29 (2025) 83.
- [62] K.W. To, T.O. Chan, W.C. Chan, K.L. Choo, D.S. Hui, Using a portable monitoring device for diagnosing obstructive sleep apnea in patients with multiple coexisting medical illnesses, The Clinical Respiratory Journal 15 (10) (2021) 1104–1112.
- [63] L. Xu, F. Han, B.T. Keenan, E. Kneeland-Szanto, H. Yan, X. Dong, et al., Validation of the Nox-T3 portable monitor for diagnosis of obstructive sleep apnea in Chinese adults, Journal of Clinical Sleep Medicine 13 (5) (2017) 675–683.
- [64] N. Garg, A.J. Rolle, T.A. Lee, B. Prasad, Home-based diagnosis of obstructive sleep apnea in an urban population, Journal of Clinical Sleep Medicine 10 (8) (2014) 879–885.

- [65] S. Toften, S. Pallesen, M. Hrozanova, F. Moen, J. Grønli, Validation of sleep stage classification using non-contact radar technology and machine learning (Somnofy®), *Sleep Medicine* 75 (2020) 54–61.
- [66] S.Z. Assefa, M. Diaz-Abad, A. Korotinsky, S.E. Tom, S.M. Scharf, Comparison of a simple obstructive sleep apnea screening device with standard in-laboratory polysomnography, *Sleep and Breathing* 20 (2016) 537–541.
- [67] C. Bilgin, U. Erkorkmaz, M.K. Ucar, N. Akin, A. Nalbant, A.N. Annakkaya, Use of a portable monitoring device (Somnocheck Micro) for the investigation and diagnosis of obstructive sleep apnoea in comparison with polysomnography, *Pakistan Journal of Medical Sciences* 32 (2) (2016) 471.
- [68] J. Hayano, H. Yamamoto, I. Nonaka, M. Komazawa, K. Itao, N. Ueda, et al., Quantitative detection of sleep apnea with wearable watch device, *PLoS One* 15 (11) (2020) e0237279.
- [69] G.S. Carter, M.A. Coyle, W.B. Mendelson, Validity of a portable cardio-respiratory system to collect data in the home environment in patients with obstructive sleep apnea, *Sleep and Hypnosis* 6 (2004) 85–92.
- [70] S. Goodrich, W.C. Orr, An investigation of the validity of the Lifeshirt in comparison to standard polysomnography in the detection of obstructive sleep apnea, *Sleep Medicine* 10 (1) (2009) 118–122.
- [71] Y. Li, H. Gao, Y. Ma, Evaluation of pulse oximeter derived photoplethysmographic signals for obstructive sleep apnea diagnosis, *Medicine* 96 (18) (2017) e6755.
- [72] A. Romem, A. Romem, D. Koldobskiy, S.M. Scharf, Diagnosis of obstructive sleep apnea using pulse oximeter derived photoplethysmographic signals, *Journal of Clinical Sleep Medicine* 10 (3) (2014) 285–290.
- [73] H. Nakano, K. Hirayama, Y. Sadamitsu, A. Toshimitsu, H. Fujita, S. Shin, et al., Monitoring sound to quantify snoring and sleep apnea severity using a smartphone: Proof of concept, *Journal of Clinical Sleep Medicine* 10 (1) (2014) 73–78.
- [74] S. Kang, D.K. Kim, Y. Lee, et al., Non-contact diagnosis of obstructive sleep apnea using impulse-radio ultra-wideband radar, *Scientific Reports* 10 (2020) 5261.
- [75] Z. Wei, J. Xu, W. Li, et al., Evaluation of a non-contact ultra-wideband bio-radar sleep monitoring device for screening of sleep breathing disease, *Sleep and Breathing* 26 (2022) 689–696.
- [76] Y. Zhou, D. Shu, H. Xu, Y. Qiu, P. Zhou, W. Ruan, et al., Validation of novel automatic ultra-wideband radar for sleep apnea detection, *Journal of Thoracic Disease* 12 (4) (2020) 1286–1295.
- [77] Embla N7000 PSG System, MFI Medical. https://mfimedical.com/products/embla-n7000-psg-system?srsIid=AfmBOoo0BPmPFWFKI7l-ItROtCkURzw9iDZyT0wLFTqvqcNSDI7_5keb (accessed 08.06.2025).
- [78] SOMNOtouch RESP, Somnomedics. https://somnomedics.de/en/solutions/sleep_diagnostics/polygraphy-devices/somnotouch-resp/ (accessed 08.06.2025).
- [79] Philips Alice NightOne At-Home Test Review, Sleep Foundation. <https://www.sleepfoundation.org/sleep-studies/philips-alice-nightone-at-home-test-review> (accessed 08.06.2025).
- [80] Nox T3s, Nox Medical. <https://noxmedical.com/noxt3s/> (accessed 08.06.2025).
- [81] GraeL PSG, Compumedics. <https://www.compumedics.com.au/en/products/grael-psg/> (accessed 08.06.2025).
- [82] SleepScore Max, SleepScore. <https://shop.sleepscore.com/products/sleepscore-product> (accessed 08.06.2025).
- [83] K. Singh, A. Mehta, A. Chaudhary, AI-driven sleep apnea detection and prediction, in: 2024 International Conference on Computational Intelligence and Computing Applications (ICCICA), Vol. 1, IEEE, 2024, pp. 237–241.
- [84] V. Rathi, Y. Kedia, R. Nath, P. Ish, The transformative role of artificial intelligence in obstructive sleep apnea management, *Sleep and Vigilance* 7 (2) (2023) 235–237.

- [85] Çakır, M., & Çakır, E. (2017). Mobil Cihaz Üzerinden Görsel Efektini Kontrol Edilebilen Elektronik Takıların Tasarımı. *Mesleki Bilimler Dergisi*, 6(3), 508-516.
- [86] Şansal U. Et al, "Beyin-Bilgisayar Arabirimi ve Arduino Mikrodenetleyici Tabanlı Kontrol," 2. *ULUSLARARASI TÜRK DÜNYASI MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ KONGRESİ*, vol.2, Antalya, Turkey, pp.348-358, 2019.
- [87] S.P. Bhatt, A. Khurana, Artificial intelligence in obstructive sleep apnea: Transforming diagnosis and management, *Respiratory Medicine* 243 (2025) 108100.
- [88] L. Giorgi, D. Nardelli, A. Moffa, F. Iafrati, S. Di Giovanni, E. Olszewska, et al., Advancements in obstructive sleep apnea diagnosis and screening through artificial intelligence: A systematic review, *Healthcare* 13 (2) (2025) 181.
- [89] Akbulut, B., Çakır, M., Sarıkaya, M. G., Oral, O., Yılmaz, M., & Aykal, G. (2025). Artificial intelligence to predict biomarkers for new-onset atrial fibrillation after coronary artery bypass grafting. *Türk Gogus Kalp Damar Cerrahisi Dergisi*, 33(2), 144-153.
- [90] Çakır, M. (2025). Comparison of machine learning models in heart failure prediction and their integration into clinical decision support systems. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 9(2), 272-282.
- [91] A.N. Bhatt, S. Sengupta, A. Abolhassani, D. Brower, C. Forehand, K. Keats, et al., Awakening sleep medicine: The transformative role of artificial intelligence in sleep health, *Current Sleep Medicine Reports* 11 (1) (2025) 13.