

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE YENİLENEBİLİR TEKNOLOJİLER: KURAMDAN UYGULAMAYA

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL



İKSAD
Publishing House

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE YENİLENEBİLİR TEKNOLOJİLER: KURAMDAN UYGULAMAYA

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

YAZARLAR

Prof. Dr. Ahmet FERTELLİ

Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL

Doç. Dr. Nesli AYDIN

Dr. Öğr. Üyesi Bekir DOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi Ünsal AYBEK

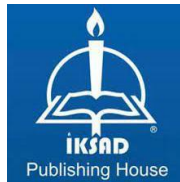
Öğr. Gör. Dr. Sezin ARPAĞ

Arş. Gör. Dr. Emine Su TURAN

Öğr. Gör. İbrahim BOZ

Yük. Müh. Güven NERGİZ

Tuğçe TAĞRAF



Copyright © 2025 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or
transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social

Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2025©

ISBN: 978-625-378-464-5

Cover Design: İbrahim KAYA

December / 2025

Ankara / Türkiye

Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMDA DOĞA TABANLI ÇÖZÜMLER: TÜRKİYE’DEKİ UYGULAMA POTANSİYELİ VE ZORLUKLAR

Arş. Gör. Dr. Emine Su TURAN.....3

BÖLÜM 2

MARDİN’DE ATIKSU ARITMA TESİSLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÇEVRESEL ROLÜ VE ETKİLERİ

Öğr. Gör. İbrahim BOZ

Öğr. Gör. Dr. Sezin ARPAĞ.....33

CHAPTER 3

ASSESSING THE EFFECTS OF PLASTIC BAGS IN SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT

Assoc. Prof. Dr. Nesli AYDIN.....47

BÖLÜM 4

ENERJİ DEPOLAMADA FAZ DEĞİŞTİRME MALZEMELERİ: ZORLUKLAR, ÇÖZÜM STRATEJİLERİ VE ARAŞTIRMA EĞİLİMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ünsal AYBEK

Dr. Öğr. Üyesi Bekir DOĞAN.....65

BÖLÜM 5

ANTALYA VE YOZGAT İLLERİ İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Tuğçe TAĞRAF

Prof. Dr. Ahmet FERTELLİ.....93

BÖLÜM 6

YÜZER TEMELLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ TİPLERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Yük. Müh. Güven NERGİZ

Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL.....105

Önsöz

Enerji, günümüz dünyasında yalnızca teknolojik gelişmelerin değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğin ve toplumsal refahın da merkezinde yer almaktadır. “Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Teknolojiler: Kuramdan Uygulamaya” başlığı altında bir araya gelen bu kitap, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji teknolojileri, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik ekseninde farklı perspektifleri buluşturan kapsamlı bir çalışmadır.

Kitabın bölümleri, hem küresel hem de yerel ölçekte enerjiye dair kritik sorunları ve çözüm önerilerini ele almaktadır. İklim değişikliğine uyumda doğa tabanlı çözümler başlıklı bölüm, Türkiye’deki uygulama potansiyelini ve karşılaşılan zorlukları tartışarak ekosistem temelli yaklaşımların önemini vurgulamaktadır. Mardin’de atıksu arıtma tesislerinin enerji verimliliği üzerine yapılan çalışma, çevresel rol ve etkileriyle birlikte bölgesel bir örnek sunmaktadır. Plastik poşetlerin sürdürülebilir atık yönetimi üzerindeki etkilerini değerlendiren bölüm, döngüsel ekonomi ve çevre politikaları açısından önemli çıkarımlar sağlamaktadır.

Enerji depolama teknolojilerinde faz değiştirme malzemeleri üzerine odaklanan bölüm, bu alandaki zorluklar, çözüm stratejileri ve araştırma eğilimlerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Güneş enerjisi santrallerinin Antalya ve Yozgat illerindeki karşılaştırmalı analizi, yerel potansiyellerin enerji politikalarına nasıl yön verebileceğini göstermektedir. Son olarak, yüzer temelli rüzgâr türbini tiplerinin performans analizleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinde inovatif yaklaşımların önemini ortaya koymaktadır.

Bu kitap, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji teknolojileri ve sürdürülebilirlik alanlarında çalışan araştırmacılar, çevre ve enerji politikaları üzerine çalışan lisansüstü öğrenciler, mühendislik ve uygulamalı bilimler uzmanları ile enerji politikalarının tasarımında görev alan karar vericilere hitap etmektedir. Bölümler, kuramsal temelleri berrak biçimde ortaya koyarken; uygulama örnekleri, yöntem karşılaştırmaları ve saha odaklı çıkarımlarla okura “nasıl” ve “neden” sorularının birlikte yanıtlandığı bir okuma deneyimi sunuyor. Editoryal yaklaşımımız, disiplinler arası etkileşimi güçlendirmeyi, teknik uzmanlığı insan odaklı hedeflerle bütünleştirmeyi ve sürdürülebilir teknolojiler için vizyoner bir çerçeve oluşturmayı amaçlıyor.

Bu kitabın içeriği, katkı sunan yazarlar tarafından hazırlanmış olup her türlü bilgi, kaynak ve sorumluluk yazarların kendilerine aittir. Yazarlar,

çalışmalarını ve araştırmalarını özgün ve güvenilir bir içerik olarak sunmaya özen göstermiştir. Kitabın her bir bölümü, ilgili uzmanlık alanında deneyimli isimler tarafından bilimsel kaynaklara dayalı olarak hazırlanmıştır. Bu nedenle, sunulan bilgilerin doğruluğu ve güvenilirliği yazarlar tarafından sağlanmaktadır.

Ayrıca, kitapta ifade edilen fikirler ve görüşler, yazarların araştırmalarına dayalı kişisel değerlendirmeleridir; editör veya yayınevinin resmi görüşlerini yansıtmaz. Editör ve yayınevi, içerik oluşturma ve düzenleme sürecinde rehberlik etmiş olabilir; ancak kitapta yer alan her fikir ve yorum yazarlara aittir.

Bu kitap projesi, farklı disiplinlerden uzmanların bilgi ve deneyimlerini bir araya getiren, yoğun emek ve titiz bir editoryal sürecin ürünü olarak ortaya çıkmıştır. Yazarlar, uzmanlık alanlarındaki bilgi ve deneyimlerini paylaşarak teknik bilgiye katkı sağlamışlardır. Ayrıca, İKSAD Yayınevi'nin desteği bu çalışmanın yayımlanmasını mümkün kılmıştır. Profesyonellikleri ve sağladıkları katkılar için İKSAD Yayınevi'ne en içten teşekkürlerimizi sunarız.

Katkı sunan tüm yazar ve hakemlere, bilimsel titizlikleri ve üretken paylaşımları için teşekkür ederiz. Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Teknolojiler: Kuramdan Uygulamaya, ortak aklın ve sorumluluk bilincinin eseri olarak hem bugünün sorunlarına çözüm üretmeyi hem de yarının olanaklarını etik ve kapsayıcı bir çerçevede keşfetmeyi amaçlıyor. Dilerim bu kitap, yeni projelere, disiplinler arası işbirliklerine ve nitelikli tartışmalara kapı aralar.

Dr. Öğr. Üyesi Serkan Güldal
Editör

BÖLÜM 1

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE UYUMDA DOĞA TABANLI

ÇÖZÜMLER:

TÜRKİYE’DEKİ UYGULAMA POTANSİYELİ VE

ZORLUKLAR

Arş. Gör. Dr. Emine Su TURAN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17923078>

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye. su.turan@gmail.com, orcid id: 0000-0002-4361-6628

1. GİRİŞ

Küresel ısınmanın çok boyutlu etkileri, Türkiye dâhil olmak üzere Akdeniz havzasını “iklim değişikliği sıcak noktası” olarak öne çıkarmaktadır. Akdeniz havzasında yüzey sıcaklıkları, IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu’nda (AR6) raporlanan sanayi öncesine göre $\sim 1,5$ °C’lik artışla uyumlu biçimde 2024 yılı sonunda yeniden rekor düzeyleri görmüş; World Meteorological Organization (WMO) 2024’ün küresel ölçekte en sıcak yıl olduğunu ve 1850–1900 dönemine göre $\sim 1,5$ °C anomaliye ulaşıldığını doğrulamıştır (WMO, 2025). Avrupa ve Akdeniz alt havzası dünyanın en hızlı ısınan kıtası olmayı sürdürmüştür; Copernicus Climate Change Service (C3S)’nin European State of the Climate 2024 değerlendirmesi Avrupa’da 2024’ün kayıtlardaki en sıcak yıl olduğunu, deniz yüzeyi sıcaklıklarının da 2024’te rekor seviyeye ulaştığını göstermiştir (C3S/ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [ECMWF], 2025). Buna paralel olarak, sıcak hava dalgalarının sıklığı/şiddeti artmış ve özellikle 2024 yazında Güneydoğu Avrupa–Doğu Akdeniz’de belirgin sıcak ve kurak koşullar gözlenmiştir (C3S, 2024; C3S/ECMWF, 2025). Kuraklık, su stresi ve kıyı taşkını/erozyonu riskleri ise European Environment Agency (EEA)’nın Avrupa İklim Risk Değerlendirmesi’nde öncelikli riskler arasında tanımlanmış; çok sayıda riskin “kritik” düzeylere yaklaştığı vurgulanmıştır (EEA, 2024). Küresel deniz seviyesi artış hızı 2014–2024 döneminde $\sim 4,2$ mm/yıl’a yükselmiş ve 2024’te uydu kayıtlarındaki en yüksek seviye kaydedilmiştir; bu ivmelenen eğilim Akdeniz için de ısınan sular ve daha sık/şiddetli kıyı tehlikeleri anlamına gelmektedir (WMO, 2025; C3S, 2025).

Türkiye özelinde, yüksek çözünürlüklü Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6 (CMIP6) model çıktıları, yüzyıl sonuna doğru ülke genelinde aşırı sıcak göstergelerinde belirgin artış, çok şiddetli yağışların katkısında yükseliş ve toplam yağışta bazı bölgelerde önemli azalışlarla daha “kuru ama aynı zamanda darbe-şiddeti artmış” bir rejime doğru evrimi işaret etmektedir (Gümüş vd., 2023). Türkiye’de Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün (MGM) dinamik ölçek küçültme (RegCM4.3.4) çalışmaları, 2016–2099 dönemi için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarında yıllık ortalama sıcaklıklarda belirgin artışlar ve yağışlarda genel azalma öngörmektedir. Özellikle RCP8.5 altında yüzyılın ikinci yarısında yıllık ortalama sıcaklık artış aralığı $\sim 1,4$ – $6,6$ °C’ye çıkmakta; yağış anomalisi ise Türkiye genelinde $\%+1$ ile $\%-18$ aralığına inmektedir

(MGM, 2025). Bununla tutarlı biçimde, United Nations Development Programme (UNDP) destekli ve Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İklim Değişikliği Başkanlığı yararlanıcılı “Türkiye’de Yerel İklim Eylemi için AB Ortaklığı” projesinin 2024 yönetici özetinde, CMIP6 tabanlı yüksek çözünürlüklü (4 km) WRF/PGW simülasyonları ve ulusal literatür sentezi; 2071–2099 için yıllık ortalama sıcaklık artışlarını $\sim 1,5\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$, yaz aylarında ise $\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye varan artışları işaret etmektedir. Aynı çalışma, Akdeniz Bölgesi için yüzyıl sonunda yağışlarda $-\%10,8$ ile $-\%37,2$ aralığında düşüşler de dâhil olmak üzere bölgesel yağış azalmalarının da altını çizmektedir (UNDP–EHB, 2024). 2024 iklim değerlendirmeleri ise rekor sıcaklıkların etkisini ve kuraklık/ani taşkın döngülerinin yönetim zorluklarını güncel veriyle pekiştirmektedir (MGM, 2024). Bu risk görünümü, iklim değişikliğine uyumu yalnızca “fiziksel altyapı güçlendirmesi” olarak değil, ekosistem süreçlerini merkeze alan, birlikte fayda üreten ve yerel bağlama duyarlı çözümler bütünü olarak ele almayı gerektirmektedir. NbS tam da bu noktada; iklim risklerini azaltırken biyoçeşitliliği ve ekosistem hizmetlerini güçlendiren, maliyet etkin ve çok-faydalı müdahaleler olarak öne çıkmaktadır (IPCC, 2022; Seddon vd., 2020). Türkiye’nin 2024–2030 İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı da su, tarım, kentler, sağlık ve biyoçeşitlilik gibi sektörlerde risk temelli yaklaşımı benimseyerek uyum eylemlerini sistematik bir çerçeveye bağlamaktadır (T.C. ÇŞİDB-İDB, 2024).

IPCC AR6 ve bölgesel değerlendirmeler, Türkiye’nin ısınan ve yağış rejimi değişen bir iklimde; sıcak hava dalgaları, hidro-meteorolojik aşırıları (ani taşkınlar, seller), meteorolojik ve ziraî kuraklık, orman yangını riski, deniz seviyesi kaynaklı kıyı tehlikeleri ve su-enerji-gıda güvenliği bağlantılı etkilerle karşı karşıya olduğunu göstermektedir (IPCC, 2022; Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change [MedECC], 2020). CMIP6 temelli Türkiye çalışmaları, yüzyıl sonunda ülke ortalamasında maksimum sıcaklık göstergelerinde $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’ye varan artışlar; çok şiddetli yağış günlerinin toplam yağışa katkısında artış; buna karşılık bazı bölgelerde toplam yağış ve yağışlı gün sayısında azalış beklentileri ortaya koymaktadır (Gümüş vd., 2023). MGM projeksiyonları da benzer biçimde, özellikle yaz aylarında sıcaklık artışlarının ve yağış azalımının belirginleşeceğini, mevsimsel kaymaların su yönetimi ve tarım için kritik olduğunu vurgulamaktadır (Demircan vd., 2017).

1. Doğa Tabanlı Çözümler: Kuramsal Yaklaşımlar ve Uluslararası Çerçeve

IUCN, NbS’yi “toplumsal sorunları etkili ve uyarlanabilir biçimde ele alırken insan esenliği ve biyoçeşitlilik için eşzamanlı faydalar sağlayan; doğal ya da insan etkisiyle değiştirilmiş ekosistemlerin korunması, sürdürülebilir yönetimi ve restorasyonuna dönük eylemler” olarak tanımlar (Cohen-Shacham vd., 2016; IUCN, 2020). IUCN’nin 2020 “Küresel NbS Standardı”, etkilerin kanıtlanabilirliği, yerel paydaş katılımı, eşitlik/adalet, iklim/ekosistem bütünlüğü ve uzun dönemli sürdürülebilirlik gibi sekiz ölçüt ve göstergeyle uygulayıcılara tasarım-doğrulama çerçevesi sunmaktadır (IUCN, 2020; Cohen-Shacham vd., 2019).

NbS, ekosistem temelli uyum (EbA), ekolojik restorasyon, orman peyzaj restorasyonu ve yeşil-mavi altyapı gibi yaklaşımları kapsar; havza ölçeğinde sulak alan restorasyonu ve taşkın ovalarının yeniden bağlanması, kentlerde geçirgen yüzeyler, yağmur bahçeleri, kentsel ormanlar, tarımda agroekolojik uygulamalar, kıyıda kumul/dengeleyici sulak alan çözümleri gibi uygulama sınıfları içerir (IPCC, 2022; IUCN, 2020). Kanıt tabanı, bu çözümlerin sele, ısı dalgalarına bağlı sağlık risklerine, erozyon ve su kıtlığına karşı dayanıklılığı artırırken eşzamanlı karbon, hava kalitesi ve rekreasyon faydaları üretebildiğini göstermektedir (Chausson vd., 2020; Seddon vd., 2020).

1.1. Uyum Politikaları Bağlamında NbS’nin Rolü

AR6, uyum portföylerinde ekosistem temelli seçeneklerin etkin ve uygulanabilir çözümler arasında olduğunu vurgulamakta; ancak “tek başına mucize” yerine, sosyal adalet, yönetim kalitesi ve uzun dönem bakımı güvencesine alan bütüncül politika tasarımlarına ihtiyaç olduğunu da belirtmektedir (IPCC, 2022; IPCC, 2023). Avrupa Birliği’nin 2021 “İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi” de doğa tabanlı çözümleri merkezî bir kaldıraç olarak konumlandırmakta; üye ülkelerde uyumun “daha akıllı-hızlı-sistemik” olabilmesi için NbS’nin planlama ve finansmanın yaygınlaştırılmasını hedeflemektedir (European Commission, 2021).

Türkiye’nin İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (İD-USEP, 2024–2030), su kaynakları, tarım ve gıda güvencesi, kentler, biyoçeşitlilik/ekosistem hizmetleri, sağlık, turizm-kültürel miras gibi sektörlerde risk ve kırılganlık analizlerine dayalı stratejik hedefler ve eylemler

ortaya koymakta; izleme-değerlendirme ve yerel kapasite geliştirme mekanizmalarıyla uygulamayı kurumsallaştırmaktadır (Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – İklim Değişikliği Başkanlığı [T.C. ÇŞİDB-İDB], 2024). Bu çerçevede, havza-ölçekli yeşil-mavi altyapı planlaması, kentsel ısı adalarının azaltımı için kentsel yeşil alan ağları, su verimliliği ve toprak-nem tutma kapasitesini artıran doğa-dostu tarımsal uygulamalar, kıyı taşkınına karşı ekosistem temelli çözümler gibi NbS sınıfları; mühendislik çözümleriyle hibrit biçimde, maliyet etkin ve birlikte fayda üreten seçenekler olarak öne çıkmaktadır (IUCN, 2020; European Commission, 2021; IPCC, 2022). Öte yandan literatür, NbS'nin sınırlarını ve olası takaslarını açık biçimde ortaya koyar: yanlış tür/yanlış yer ağaçlandırma ekolojik bütünlüğü ve havza su bütçesini bozabilir; hızlanan iklim değişimi karşısında bazı NbS uygulamalarının dayanıklılığı sınırlı kalabilir; faydaların adil paylaşımı ile etkin yerel katılım güvence altına alınmadığında mal-uyum (maladaptation) riski yükselir (Seddon vd., 2020; Cohen-Shacham vd., 2019). Bu nedenle, Türkiye bağlamında NbS'nin etkili yaygınlaştırılması; iklim senaryolarıyla tutarlı tasarım, IUCN NbS Standardı'na göre doğrulama, yerel bilgiyle eş-üretim, uzun dönemli işletme-bakım için sürdürülebilir finansman ve sistematik izleme-değerlendirme bileşenlerini birlikte içermelidir (IUCN, 2020; T.C. ÇŞİDB-İDB, 2024).

1.2. Kurumsal Perspektifler: IPCC, IUCN ve Avrupa Birliği (AB)

IPCC: AR6, EbA'nın farklı iklim risklerini azalttığını, çoklu ortak yararlar sağladığını; fakat 1,5°C'nin üzerindeki ısınmada kimi ekosistemlerde etkinliğin düşebildiğini belirtmektedir. Kent ormanları/yeşil altyapı yerel serinlemeyi artırmakta; doğal akarsu-sulak alan sistemleri taşkın riskini çoğu durumda azaltır; kıyı sulak alanları ise fırtına dalgaları ve deniz seviyesi yükselmesine karşı koruma sağlamaktadır (IPCC, 2022).

IUCN: IUCN, kavramsal çerçevenin yanında uygulama kalitesini güvenceye almak üzere Küresel NbS Standardını geliştirmiştir. Standart; net toplumsal sorun tanımı, biyoçeşitlilik bütünlüğü, iklim ve afet risklerine dayanıklılık, paydaş katılımı ve eşitlik, ekonomik uygulanabilirlik ve uyarlanabilir yönetim döngüsü gibi ilkeleri doğrulama ve ölçekleme için kullanılmaktadır (IUCN, 2020).

AB: AB'nin 2021 İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi, uyumu “daha akıllı, daha sistemik ve daha hızlı” kılmayı hedeflemekte ve NbS'nin üye ülkelerde yaygınlaştırılmasını değerlendirmeler, rehberlik ve AB fonları ile teşvik etmektedir (Avrupa Komisyonu, 2021). 2024'te kabul edilen Doğa Restorasyon Tüzüğü (Reg. (EU) 2024/1991), karbon tutma/depolama potansiyeli ve afet etkilerini önleme/küçültme kapasitesi yüksek ekosistemler için bağlayıcı restorasyon hedefleri belirleyerek, NbS'nin zorunlu politika araçlarıyla ölçeklenmesi açısından dönüm noktasıdır (AB, 2024).

1.3. Küresel Ölçekte İyi Uygulama Örnekleri

Hollanda - Nehre Alan Açma Programı: Nehir taşkınlarını yalnızca set yükselterek değil, taşkına “yer açarak” yönetmeyi amaçlayan program; taşkın güvenliğini artırırken manzara kalitesi ve rekreasyon gibi ortak yararlar üretmiştir (Rijke vd., 2012).

Çin - Sünger Şehirler: Wuhan'da NbS temelli yağış-yüzey akışını azaltma uygulamaları (geçirgen yüzeyler, yağmur bahçeleri, yeşil çatı vb.) sayısal modellemeye göre tepe debisini ve toplam akışı %39–42 düşürmüş, su baskınlarının yoğunluğunu azaltmıştır (Stewart vd., 2021).

Kuzeydoğu ABD - Kıyı Sulak Alanları: 2012 Sandy Kasırgası sırasında kıyı sulak alanları, 625 milyon ABD\$ düzeyinde taşkın hasarını önlemiş; tuzcul bataklıklar bazı yerlerde yıllık taşkın kayıplarını ortalama %16 azaltmıştır (Narayan vd., 2017).

Vietnam - Topluluk Temelli Mangrov Ağaçlandırma Projeleri: Deniz seti hasarlarını ve özel mülk kayıplarını belirgin biçimde düşürmüş, maliyet-yarar oranlarının >3 (ekolojik yararlar dahil edildiğinde >28) olduğunu göstermiştir (IFRC, 2011).

Bu örnekler, NbS'nin mühendislik çözümleriyle birlikte (hibrit “gri-yeşil” yaklaşımlar) kurgulandığında risk azaltımı, ekosistem hizmetleri ve sosyo-ekonomik faydaları aynı anda üretebildiğini göstermektedir (Chausson vd., 2020; Seddon vd., 2020).

1.4. NbS'nin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile İlişki

NbS; SKA-6 (Temiz Su ve Sanitasyon) kapsamında su kalitesi/taşkın yönetimi, SKA-11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar) kapsamında kentsel

ısı adası etkisini azaltma ve afet dayanıklılığı, SKA-13 (İklim Eylemi) kapsamında uyum ve risk azaltımı ve SKA-15 (Karasal Yaşam) kapsamında ekosistem/restorasyon hedeflerine doğrudan katkı sağlar. Araştırma sentezleri, iyi tasarlanmış NbS'nin bu hedefler arasında çoğunlukla sinerjiler yarattığını; fakat bağlama uygun planlama, yerel paydaş katılımı ve koruma güvenceleri olmadan beklenen faydaların elde edilemeyebileceğini vurgulamaktadır (Chausson vd., 2020; Seddon vd., 2020; UNEA, 2022).

2. Türkiye’de İklim Değişikliğinin Uyum Boyutları

2.1. Sektörel İklim Riskleri: Su, Tarım, Orman, Kıyı ve Kentler

Su kaynakları: Akdeniz havzası, yağışların azalması, buharlaşmanın artması ve kuraklığın şiddetlenmesi nedeniyle küresel ölçekte iklim değişikliğine en hassas bölgelerden biridir. AR6, su döngüsündeki bozulmaların akış ve yeraltı suyu beslenmesini azaltarak su kıtlığını artıracığını, bunun da kullanıcılar arası çatışma potansiyelini büyüteceğini vurgulamaktadır. Türkiye açısından bu eğilimler, kuraklığın sıklık ve şiddetindeki artışlarla birlikte su yönetimi üzerinde kalıcı baskılar doğurmaktadır (IPCC, 2022). Ek olarak, Meteoroloji Genel Müdürlüğü’nün Standartlaştırılmış Yağış–Buharlaşma–Terleme İndeksi /Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI) tabanlı kuraklık izleme–tahmin sistemi, 1969’dan bu yana veriyle desteklenen operasyonel bir erken uyarı çerçevesi sunmakta; mevsimlik tahminlerle 3–24 aylık ölçeklerde kuraklık izlenebilmektedir (MGM, 2022). Meteoroloji Genel Müdürlüğü bölgesel ölçekte yapılan çalışmalar, örneğin Güneydoğu Anadolu’da 1981–2022 döneminde sıcaklık artışı ve kuraklık göstergelerindeki eğilimlerin su kaynakları ve tarım üzerinde baskıyı artırdığını göstermektedir (Kartal vd., 2024).

Tarım: AR6’nın gıda ve tarımsal sistemlere ilişkin değerlendirmesi, ısınmanın ve aşırı olayların verim ve kalite üzerinde olumsuz etkilerinin arttığını, etkili uyum seçeneklerinin (çeşit/boyu–erken başaklanma ıslahı, agroekolojik uygulamalar, sulama verimliliği vb.) dikkate alınması gerektiğini belirtmektedir (IPCC, 2022). Türkiye’de buğday gibi serin iklim tahıllarında ısı–kuraklık eşzamanlı streslerinin verim düşüşlerini tetiklediği; fenolojinin uyarlanması, sulama ve toprak yönetimi gibi önlemlerin uyum kapasitesini

artırabileceği gösterilmiştir (Kaya, 2021). Akdeniz çapında yapılan bölgesel sentezler de, sıcak hava dalgaları ve kuraklıkların gıda güvenliği ve tarımsal üretim istikrarını tehdit ettiğini teyit etmektedir (MedECC, 2020).

Ormanlar ve yangın riski: Akdeniz havzasında yangın havası endekslerinin artacağına ve yüzyıl sonunda, ısınma düzeyine bağlı olarak yanan alanların genişleyeceğine ilişkin güçlü kanıtlar bulunmaktadır (IPCC, 2022; MedECC, 2020). Türkiye özelinde uzun dönem yangın riski modelleri, iklim değişikliği altında yangın mevsiminin uzayacağını ve yeni bölgelerin risk altına girebileceğini göstermektedir (Satır vd., 2016).

Kıyı bölgeleri: Deniz seviyesi yükselmesi ve kıyı aşırı olayları (fırtına kabarması, denizel sıcak hava dalgaları) kıyı yerleşimleri, ekosistemler ve altyapı için artan riskler doğurmaktadır (IPCC, 2022). Türkiye kıyılarında kırılganlık değerlendirmeleri, özellikle alçak kıyı ovaları ve deltaların (ör. Çukurova, Göksu) taşkın ve tuzlanma baskısına hassas olduğunu ortaya koymuştur (Alpar, 2009; Özyurt & Ergin, 2010).

Kentler: AR6'nın "Kentler, Yerleşimler ve Kilit Altyapı" bölümü, kentsel ısı adası etkisinin ısınmayla birleşerek ısıya bağlı sağlık risklerini artırdığını; buna karşı yeşil-mavi altyapı, geçirgen yüzeyler ve ısı eylem planlarının etkili uyum seçenekleri olduğunu belirtmektedir (Dodman vd., 2022).

2.2. Ulusal Uyum Politikası ile Bağ: 2024–2030 İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı

Türkiye, İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024–2030) ile uyumu kurumsallaştırmış; su yönetimi, tarım-gıda sistemleri, ekosistem-orman, kıyı alanları, kentler-altyapı ve afet risk yönetimi gibi alanlarda risk temelli, kanıta dayalı eylemler öngörmüştür. Plan; izleme-erken uyarı (ör. kuraklık), iklim risk değerlendirmesi, doğa tabanlı çözümler, iklim dirençli altyapı ve yerel uyum kapasitesi başlıklarını yatay öncelikler olarak vurgulamaktadır (İklim Değişikliği Başkanlığı, 2024).

Politika-uygulama eşleştirmesi, sektörler arası tutarlı bir uyum çerçevesi ortaya koymaktadır. Su alanında, havza temelli bütünleşik su yönetimi anlayışı su verimliliği ve yeniden kullanım politikalarıyla tamamlanmalı; kuraklık için erken uyarı, hazırlık ve müdahaleyi içeren risk planları ile talep yönetimi birlikte işletilmelidir (IPCC, 2022; MGM, 2022). Tarımda, iklime uyumlu çeşit

ve fenoloji seçimi, toprak nemi yönetimi, sulama verimliliğinin artırılması ve agroekolojik uygulamaların yaygınlaştırılması esastır; bu paket, üreticiye zamanında bilgi sağlayan erken uyarı ve danışmanlık hizmetleriyle desteklenmelidir (IPCC, 2022; Kaya, 2021; Uyum EP). Orman sektöründe, yangın riskinin bütüncül yönetimi—yakıt yükü azaltımı, dirençli amenajman yaklaşımları ve peyzaj ölçekli doğa-tabanlı çözümlerle—iklim risklerine karşı dayanıklılığı artırır (IPCC/MedECC). Kıyı alanlarında, planlı kıyı geriletme/çekilme stratejileri; set, sazlık ve sulakalan gibi doğal tamponların restorasyonu; hassas bölgelerde sıkı mekânsal planlama ve kullanımı sınırlandıran hükümlerle birlikte yürütülmelidir (IPCC–CCP4). Kentlerde ise, yeşil-mavi altyapının güçlendirilmesi, ısı eylem planlarının uygulanması, geçirgen yüzeylerin ve yağmur suyu hasadının yaygınlaştırılması ile kentsel planlama mevzuatına iklim kriterlerinin ana akımlaştırılması, İstanbul ve Ankara gibi büyükşehirlerin bulgularıyla da uyumlu biçimde öncelikli müdahale alanları olarak öne çıkmaktadır (AR6).

3. Ekosistem Tabanlı Yaklaşımlar ve Türkiye’deki Potansiyel Uygulamalar

3.1. Orman Ekosistemlerinin Korunması ve Rehabilitasyonu

Akdeniz havzasında iklim değişikliğiyle artan kuraklık ve yangın rejimindeki değişimler, orman ekosistemlerinde yangına dayanıklı arazi kullanımı, yakıt yönetimi ve orman-peyzaj restorasyonu (Forest and Landscape Restoration, FLR) gibi doğa tabanlı yaklaşımları ön plana çıkarmaktadır. FLR; ekolojik bütünlüğü güçlendirirken aynı zamanda yerel paydaşların geçim kaynaklarını korumayı amaçlayan bir çerçevedir (FAO, 2020). Bu bağlamda “fire-smart” planlama (seyrelterek bakım, mozaik yakıt düzenleri, kontrollü yakma, yakıt kırma zonları) yangın davranışını ılımlılaştırarak yüksek şiddetli yangın riskini azaltabilir. Türkiye’de uzun dönemli erozyon kontrolü ve ağaçlandırma programları ile bozulmuş sahalarda yerli, kuraklığa dayanıklı türlerle rehabilitasyon, hem toprak koruma hem de karbon birikimi açısından öncelikli bir NbS yaklaşımıdır. Örneğin *Juniperus* türleri ile yapılan ekim ve restorasyon çalışmalarının, bozulmuş sahalarda ekolojik kazanımlar sağladığı gösterilmiştir (Yücedağ & Bilir, 2021). Akdeniz İçin Avrupa Ormancılık Enstitüsü (EFI) de iklim değişikliği bağlamında orman yönetiminde önleyici politikaların önemini vurgulamaktadır (EFI, 2021).

3.2. Sulak Alanların Restorasyonu ve Taşkın Kontrolünde Kullanımı

Nehir-taşkın yatağı bağlantısının yeniden kurulması (ör. set-back çözümleri, taşkın ovası yeniden ıslatmaları), taşkın riskini azaltırken biyolojik üretkenlik, su kalitesi ve karbon tutumu gibi eş-faydalar da sağlamaktadır (Opperman vd., 2009). Hollanda'daki "Room for the River" programı, taşkın güvenliğini artırırken peyzaj kalitesi ve rekreasyonel kazanımlar yaratmıştır (Rijke vd., 2012).

Türkiye'de sulak alan kayıpları, delta ve lagün ekosistemlerinde (ör. Kızılırmak Deltası, Akyatan Lagünü) uyum politikalarının öncelikli alanları haline gelmiştir. Bu bölgelerde yürütülen restorasyon girişimleri, taşkın tamponlama ve su kalitesi iyileştirmeleri açısından öncül örnekler oluşturmaktadır.

3.3. Kıyı Ekosistemlerinde Mavi Karbon ve Kıyı Erozyonu Önleme Uygulamaları

Mavi karbon ekosistemleri (deniz çayırları, tuzcul bataklıklar) yüksek karbon yoğunluklarıyla iklim değişikliğinin hem uyum hem de hafifletim boyutlarında kritik rol oynamaktadır. Örneğin Akdeniz'de yaygın olan *Posidonia oceanica* çayırlarının, karbon gömme kapasitesi ve kıyı istikrarı için kilit ekosistemler olduğu belgelenmiştir (Pergent-Martini vd., 2021). Ayrıca kıyı erozyonuna karşı doğa tabanlı çözümler, dalga enerjisini sönümleyerek kıyı savunmasına katkıda bulunur. Tuzcul bataklıkların ve kumul sistemlerinin restorasyonu, dalga yüksekliğini azaltarak kıyı korumasında etkili olmaktadır (Temmerman vd., 2013; Narayan vd., 2016). Türkiye'de Ege ve Akdeniz kıyılarındaki *Posidonia* çayırlarının korunması ve kumul restorasyonu, ekosistem hizmetleri ve karbon faydaları açısından stratejik önem taşımaktadır (TUDAV, 2013).

3.4. Kent Ekosistemlerinde Yeşil Altyapı ve Doğa Temelli Şehircilik

Yeşil ve mavi altyapı çözümleri, şehirlerde hem ısı adası etkisini hem de yağmur suyu taşkınlarını azaltmaktadır. Kent ağaçlandırmasının özellikle gündüz saatlerinde yüzey sıcaklıklarını düşürdüğü, geçirgen yüzeyler ve

yağmur bahçelerinin ise pik akışları azalttığı gösterilmiştir (Demuzere vd., 2014; Kumar vd., 2024). Türkiye’den İstanbul örneği, kentsel dönüşüm alanlarında yeşil altyapının serinletici etkilerini ortaya koyarken, mekânsal eşitsizliklerin “yeşil bölünme” sorununa yol açtığını göstermektedir. Bu bulgu, uyum politikalarında ısı-hassas mahallelerde hedefli yeşil altyapı uygulamalarının gerekliliğini işaret etmektedir (Yazar vd., 2023).

4. Doğa Tabanlı Çözümlerin Sosyo-Ekonomik Katkıları

4.1. Kırsal Kalkınma ve Yerel Topluluklara Etkileri

NbS, kırsal bölgelerde geçim kaynaklarını çeşitlendirerek gelir istikrarını artırır; topluluk temelli doğal kaynak yönetimi (CBNRM), agroforestry ve sulak alan/orman restorasyonu gibi yaklaşımlar, hem ekosistem hizmetlerini güçlendirmekte hem de yerel refaha doğrudan katkı sağlamaktadır (Miller vd., 2019; Castle, 2022). Örneğin, Namibya’daki CBNRM uygulamaları, 1998–2013 döneminde 77 muhafaza alanında turizm ve sürdürülebilir avcılığın tamamlayıcı gelir akışları yarattığını göstermiş; doğa temelli kullanımın tarımsal geçimle birlikte yürütülebileceğini nicel olarak ortaya koymuştur (Naidoo vd., 2016). Sistematik kanıt haritaları ise (özellikle düşük-orta gelirli ülkelerde) agroforestry müdahalelerinin üretkenlik ve bazı refah göstergelerinde küçük ama pozitif etkiler yarattığını; gelir çeşitlenmesinin yoksulluğa karşı tampon görevi görebildiğini ortaya koymaktadır (Miller vd., 2019; Castle vd., 2021; Castle, 2022). Türkiye bağlamında da orman köylülerinin ekoturizm faaliyetlerini özellikle “ek gelir” beklentisiyle olumlu algıladıkları; katılımcı planlama ile kırsal kalkınma hedefleriyle daha iyi hizalanabileceği gösterilmiştir (Gültekin, 2022). Bu bulgular, kırsalda NbS’nin yerel sahiplenme, kapasite gelişimi ve kapsayıcı yönetimle birlikte tasarlanması gerektiğine işaret etmektedir (ILO, 2022).

4.2. Ekoturizm, İstihdam ve Gelir Yaratma Potansiyeli

Korunan alanlara yapılan doğa temelli ziyaretlerin küresel çapta yılda yaklaşık 8 milyar olduğu ve yerinde doğrudan harcamalarda kabaca 600 milyar ABD doları yarattığı tahmin edilmektedir (Balmford vd., 2015). Bu ölçek, iyi yönetimle birleştirildiğinde, yerel istihdam ve tedarik zincirleri için güçlü bir kaldıraç sunar. Topluluk temelli koruma alanlarında turizm gelirleri ile diğer doğa temelli faaliyetlerin birlikte topluluklara nakdi ve aynı faydalar sağladığı;

gelir akışlarının zamanla büyüdüğü gösterilmiştir (Naidoo vd., 2016). Bununla birlikte, ekoturizmin sosyo-kültürel etkileri ve mevsimsellik gibi riskleri bulunduğundan, yerel katılım, fayda paylaşımı ve taşıma kapasitesi yönetimi esastır (Riehl vd., 2015). Türkiye’de de orman ekoturizminin yerel memnuniyeti artırmasının temel belirleyicileri arasında gelir fırsatları, hizmet kalitesi ve paydaşlar arası güven öne çıkmaktadır (Gültekin, 2022).

4.3. Halk Sağlığı ve Yaşam Kalitesi Açısından Katkılar

Kent içi yeşil-mavi alanlar; fiziksel aktivite, psikolojik iyilik hâli, ısı-hava kirliliği ve gürültü maruziyetlerinde azalma gibi çoklu mekanizmalar üzerinden geniş bir sağlık yelpazesinde faydalar sağlar (WHO, 2016; WHO, 2017). 143 çalışmayı içeren kapsamlı bir derleme-meta analiz, yeşil alan maruziyetinin tüm nedenlere bağlı mortalite, kardiyovasküler mortalite ve tip 2 diyabet riskinde anlamlı azalmalarla ilişkili olduğunu; stres biyobelirteçlerinde iyileşmeler görüldüğünü bildirmiştir (Twohig-Bennett & Jones, 2018). 1 milyon kişiyi izleyen bir kohort çalışması, çocukluk çağında yeşil alan varlığının yetişkinlikte birçok psikiyatrik rahatsızlık riskini düşürdüğünü göstermiştir (Engemann vd., 2019). Isı dalgalarına karşı, kentsel ağaçlandırma ve yeşil altyapı çözümleri kentsel ısı adası etkisini azaltarak ısıya bağlı morbidite ve mortaliteyi düşürebilmektedir. Çalışmalar, cadde ağaçlarının ve kent ormanlarının serinletici etkilerini nicel olarak ortaya koymaktadır (Ettinger vd., 2024; McDonald vd., 2024; Nazish vd., 2024). Sağlık yararlarının toplumdaki eşitsizlikleri azaltacak biçimde adil erişimle desteklenmesi gerektiğine ilişkin bulgular da kuvvetlidir (EEA, 2022).

4.4. İstihdam ve “Adil Geçiş” Bağlamı

NbS yatırımları; restorasyon, kent yeşil altyapısı, sulak alan/orman yönetimi, izleme-değerlendirme ve doğa temelli turizm gibi alanlarda “yeşil işler” yaratır. ILO-IUCN-UNEP ortak raporları, NbS’nin istihdam/makul gelir potansiyelini ortaya koyarken bu işlerin “insana yakışır iş” standartlarıyla (iş sağlığı-güvenliği, sosyal koruma, örgütlenme) güvence altına alınmasının altını çizer (ILO, 2022). Pandemi sonrası toparlanmada NbS’nin “istihdam dostu” rolünü vurgulayan çalışmalar da bulunmaktadır (ILO & WWF, 2020). Politika düzeyinde; beceri geliştirme, yerel tedarik zincirleri, kooperatif modelleri ve

uzun vadeli bakım-işletme finansmanı, istihdam kalıcılığı için kritik görülmektedir (ILO, 2022).

5. Uygulama Önündeki Zorluklar ve Engeller

NbS, iklim değişikliğine uyum için güçlü bir araç seti sunsa da uygulamada ilerleme; yönetim kapasitesi, finansman, bilgi-veri ekosistemi ve mekânsal planlama alanlarındaki yapısal engeller nedeniyle yavaşlamaktadır (IPCC, 2022). Türkiye bağlamında öne çıkan başlıca zorluklar özetlenmiştir.

5.1. Yasal ve Kurumsal Çerçevenin Yetersizlikleri

Türkiye’de çevre yönetimi merkeziyetçi olmakla birlikte görev ve yetkiler birden fazla bakanlık arasında parçalı durumdadır; ayrıca stratejik çevresel değerlendirme (SÇD) süreçleri yerel ölçekli mekânsal planları kapsam dışı bıraktığından arazi kullanım kararlarında önemli bir değerlendirme boşluğu oluşmaktadır (OECD, 2019). Bu durum, uyumun sektörel politikalara yatay entegrasyonunu ve çok düzeyli yönetişimi zorlaştırmakta; uyum faaliyetlerinin su sektörü dışına taşınmasında gecikmelere yol açmaktadır (OECD, 2019). IPCC de etkili uyumun “etkin kurumlar, kapsayıcı yönetim, bilgi ve kapasite, teknoloji ve yeterli finansman” gibi etkinleştirici koşullara bağlı olduğunu vurgular; bu koşullar zayıf kaldığında mal-uyum (maladaptation) riskleri artar (IPCC, 2022). IUCN’in Küresel NbS Standardı da NbS’nin kapsayıcı, şeffaf ve güçlendirici yönetim süreçlerine dayanması gerektiğini belirtir; yerel paydaş katılımı ve hak sahiplerinin sürece anlamlı katılımı sağlanmadığında projelerin dayanıklılığı azalır (IUCN, 2020).

5.2. Finansman ve Yatırım Eksiklikleri

Küresel ölçekte uyum finansmanı ile ihtiyaç arasındaki fark büyüktür. UNEP’in Adaptation Gap Report 2023 bulgularına göre yıllık uyum ihtiyacı yüz milyarlarca ABD doları ölçeğindedir ve mevcut akışlar bu ihtiyacın yalnızca küçük bir kısmını karşılar (UNEP, 2023). NbS özelinde, 2022’de doğaya yönelik yıllık finansman yaklaşık 200 milyar ABD\$ olup 2030 hedeflerine erişmek için yaklaşık 542 milyar ABD\$’a çıkarılması gerekir (UNEP, 2023). Ayrıca kalkınma bankaları ve resmi kalkınma yardımlarından yararlanma, proje hazırlama ve risk paylaşımı mekanizmaları gibi konular yerelde teknik kapasite ve proje boru hattı eksiklikleri nedeniyle zorlaşmaktadır.

(OECD, 2021; Swann vd., 2021). Bu bulgular, Türkiye’de NbS yatırımlarının ölçeklenmesi için (i) fizibilite-ölçme-değerleme araçlarının standartlaşması, (ii) hazırlık ve proje geliştirme için hibe/kolay finans, (iii) belediyeler ve su-orman idareleri için krediye erişim ve teminat mekanizmalarının geliştirilmesi gereğine işaret eder.

5.3. Bilgi, Farkındalık ve Kapasite Geliştirme Sorunları

IPCC, uyumun hızlanması için bilgi ve kapasitenin temel etkinleştirici olduğunu vurgular (IPCC, 2022). Türkiye’de ise sektörel kırılganlık ve sosyo-ekonomik etkilerde bilgi boşlukları bulunduğu; izleme-değerlendirme sistemlerinin ve açık veri paylaşımının geliştirilmesi gerektiği belirtilmektedir (OECD, 2019). Uluslararası değerlendirmeler, NbS’nin faydalarının (taşkın azaltımı, ısı adası etkisinin düşürülmesi, su kalitesi vb.) nicel olarak değerlendirilmesi ve yatırım kararlarına entegre edilmesi konularının hâlen birçok ülkede kapasite eksikliği yarattığını, bunun da finansmana erişimi zorlaştırdığını göstermektedir (Swann vd., 2021; OECD, 2021).

5.4. Arazi Kullanımı Baskıları ve Planlama Uyumsuzlukları

Mekânsal planlamada yeşil-mavi altyapının sistematik yer bulmaması ve projelerin parsel/ada ölçeğinde yürütülmesi, ekosistem bütünlüğü ile iklim risk yönetimi arasında kopukluk yaratmaktadır. İstanbul’daki kentsel dönüşüm alanlarında yapılan bir çalışma; yeşil altyapı artışının çoğu zaman yalnızca proje sahası içinde kaldığını, çevre mahallelere taşmadığını ve bu nedenle ısı maruziyeti ve çevresel adalet sorunlarının derinleşebildiğini göstermiştir (Yazar vd., 2023). OECD de SED kapsamının yerel planları dışarıda bırakmasının arazi kullanımında değerlendirme boşluğu doğurduğunu, bu nedenle çevresel etkilerin erken aşamada bütünlük biçimde ele alınamadığını belirtir (OECD, 2019). Akdeniz havzası için IPCC, havza ölçeğinde hidroloji-arazi kullanım planlaması ile yerel koruma-restorasyon uygulamalarının birlikte kurgulanmasını, böylece taşkın-kuraklık riskleri ile ekosistem hizmetlerinin birlikte yönetilmesini önermektedir (IPCC, 2022, CCP4).

6. Politika, Yönetişim ve Strateji Önerileri

6.1. Ulusal ve Yerel Düzeyde Yapılması Gereken Düzenlemeler

NbS; ekosistemlerin korunması, sürdürülebilir yönetimi ve restorasyonu yoluyla iklimsel riskleri azaltan, çok işlevli ve maliyet-etkin müdahalelerdir (IUCN, 2020; Kabisch vd., 2022). Türkiye’de planlama, yatırım ve izleme döngüsünün IUCN Küresel Standart göstergelerine referans vererek mevzuata bağlanması, kalite güvencesi ve ölçülebilirlik sağlar (IUCN, 2020; Kabisch vd., 2022).

Ulusal çerçeveye eşgüdüm: 7552 sayılı İklim Kanunu ile kurulacak Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve iklim yönetişimi mimarisi, uyum yatırımlarında NbS’yi “öncelikli çözüm sınıfı” olarak tanımalı; ikincil mevzuatta (yönetmelikler/tebliğler) belediye ve sektör planlarına NbS entegrasyonunu zorunlu kılmalıdır (ör. mavi-yeşil altyapı standartları, şehir ısı adası ve taşkın riski için minimum NbS kota/indikatörleri) (Resmî Gazete, 2025).

Ulusal stratejilerle uyum: İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024-2030): su, tarım, kentleşme ve afet riskinde ekosistem-temelli uyum önceliklerini açıklar. Bu belge, havza-temelli planlamada taşkın ovası geri kazanımı, kent içi geçirgenlik, kıyı-ıslakçayır ve sulak alan restorasyonu gibi NbS müdahaleleri için sektörel yol haritalarına (DSİ, AFAD, Tarım/Orman, Ulaşım) bağlayıcı hedefler üretmek üzere referans alınmalıdır (ÇŞİDB, 2024).

Yerel ölçekte ana akımlaştırma: Büyükşehir/ilçe imar planlarında “mavi-yeşil ağ”, yağmur bahçeleri, geçirgen yüzey, yeşil çatı/duvar ve gölgeleme koridorlarını zorunlu standartlara bağlayan plan notları oluşturulmalı; SÇD ve ÇED süreçlerinde NbS’nin “eşdeğer veya daha iyi” performans göstermesi halinde gri altyapıya kıyasla öncelik verilmelidir (Frantzeskaki, 2019; IPCC, 2022).

Kanıt-temelli ölçüm ve izleme: Belediyelerin Kent Düzeyi NbS Gösterge Seti (ısı-maruziyeti, tepe debisi, su tutma, biyolojik çeşitlilik göstergeleri, eşitsizlik/erişim) kullanması; IPCC’nin uyum etkililiği vurgusuyla uyumlu oluşturması önerilir (IPCC, 2022; Kabisch vd., 2022).

6.2. Yeşil Finansman ve Karbon Piyasaları ile Entegrasyon

Taksonomi uyumu: AB Sürdürülebilir Faaliyetler Taksonomisi (2020/852) çevresel hedeflere “önemli katkı” ve “önemli zarar vermeme” ölçütlerini tanımlar. Türkiye’de banka-sermaye piyasası düzenlemeleri, NbS projelerinin (ör. sel riskini azaltan doğala dönüş, kentsel ormanlaştırma) taksonomi uyumlu sınıflandırılmasına imkân vermelidir (AB, 2020/852).

Yeşil tahvil standardı: Belediyeler/ilbank/kalkınma bankaları için Avrupa Yeşil Tahvil Standardı (2023/2631) ile uyumlu ihraç çerçeveleri geliştirilmeli; gelirlerin NbS’ye (havza restorasyonu, taşkın ovası kazanımı, sünger şehir uygulamaları) ayrılması izleme-raporlama güvenilirliğini artırır (AB, 2023/2631; EIB, 2023).

ETS gelirleri ve kamu-özel harmanı: ETS açık artırma gelirlerinin belirli yüzdesi Uyum ve Doğal Sermaye Fonu’na yönlendirilmeli; European Bank for Reconstruction and Development/ Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası (EBRD), European Investment Bank/ Avrupa Yatırım Bankası (EIB); EBRD-EIB kredileriyle harmanlanarak karma finans (blended finance) ve performansa dayalı sözleşmeler (ör. “pay-for-performance” taşkın azaltımı) tasarlanmalıdır (OECD, 2021; EIB, 2023).

Karbon piyasaları ve NbS: Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM), Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM); SKDM/CBAM (2023/956) 2023-2025 geçiş döneminde raporlamayı, 2026’dan itibaren mali yükümlülükleri getirir. Bu düzen, tedarik zincirlerinde karbon yoğunluğu azaltımını hızlandırırken; Türkiye’de sanayi bölgelerinde doğa-tabanlı ısı-serinlik ve su yönetimi çözümlerinin (gölgeleme koridorları, geçirimsizlik, mikro-yeşil alanlar) “kurumsal iklim planları”na girmesini teşvik eder. Uyum odaklı NbS’nin gönüllü karbon piyasalarında kredilendirilmesi gündeme gelebilir; ancak bütünlük, ek ilaveyet ve uzun vadeli izleme şartları titizlikle sağlanmalı; uyum faydası ≠ telafi yaklaşımı korunmalıdır (AB, 2023/956; EC, 2023; ICAP, 2023).

Finansman açığı ve ölçek: UNEP/OECD/DB girişimleri NbS finansmanının hâlen yetersiz olduğunu; kent-ölçekli NbS’nin “planlama-sermaye-işletme” döngüsünün tamamı için kaynak tasarımına ihtiyaç duyduğunu gösteriyor. Türkiye’de belediyelerin yeşil tahvil + ETS geliri + hibe üçlüsüyle çok yıllık NbS ana programları oluşturması tavsiye edilir (UNEP, 2023; OECD, 2025).

6.3. AB Yeşil Mutabakatı ve Türkiye’nin Uyum Süreciyle Bağlantılar

AB uyum stratejileri: AB İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi (2021) NbS’yi “her yerde, sistemik ve daha akıllı” uyum vizyonunun merkezine yerleştirir. Türkiye’de Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021) ve İklim Stratejileri, bu yaklaşım ile eşgüdümленerek belediyelerin Sürdürülebilir Enerji ve İklim Eylem Planı / Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP) benzeri planlarına NbS hedefleri yazılmalıdır (EC, 2021; T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021).

Doğa Restorasyon Yasası ile uyum: AB’nin Doğa Restorasyon Yasası bozunmuş ekosistemleri onarmaya yönelik bağlayıcı hedefler getirir; sınır-ötesi ekolojik ağların güçlendirilmesi ve biyoçeşitlilik kazanımları, kırsal-kentsel NbS’nin finansman gerekçesini güçlendirir. Türkiye’nin AB ile ticari ve teknik uyumu kapsamında, restorasyon hedefleriyle uyumlu ulusal restorasyon programları ve veri izleme altyapısı (MRV) geliştirilmelidir (EC, 2024).

SKDM (CBAM) ve rekabetçilik: 2023-2025 geçiş, 2026 itibarıyla tam uygulamayla CBAM; sanayide karbon gömülülüğü azaltımını zorunlu kılacaktır. Sanayi bölgelerinde ısı-serinlik yönetimi, yağış-taşkın kontrolü ve toz/partikül azaltımı için NbS’yi içeren yeşil saha planları, tedarik zinciri risklerini ve uyum maliyetlerini düşürür (AB, 2023/956; EC, 2023).

2025–2030 dönemi için yol haritası, düzenleyici çerçevenin netleşmesi, finansman akışlarının kilitlenmesi ve sahadaki uygulamaların ölçeklenmesi olarak üç ardışık fazda ilerlemelidir. İlk fazda (2025–2026), İklim Kanunu’na bağlı ikincil mevzuat ile NbS tanımı ve standartları netleştirilmeli; belediyeler için asgari NbS göstergeleri—geçirgenlik oranı, gölgeleme etkisi ve sel riski azaltımı—Resmî Gazete’de yayımlanarak ulusal bir taban seviye oluşturulmalıdır. Aynı dönemde ETS gelirlerinden belirli bir payın Uyum ve Doğal Sermaye Fonu’na tahsisi, yerel projelerin sürekliliği için kalıcı bir finansman hattı sağlar (Resmî Gazete, 2025). İkinci fazda (2026), CBAM’ın tam uygulamaya geçtiği eşikte organize sanayi bölgeleri için yeşil saha NbS kılavuzu yürürlüğe girmeli; EuGB uyumlu yeşil tahvil pilot ihraçlarıyla “sünger-şehir” uygulamaları başta olmak üzere kentsel uyum projeleri finanse edilmelidir. Üçüncü fazda (2027–2030), havza ölçekli restorasyon ile kent içi mavi-yeşil ağ projeleri, EIB/EBRD kaynakları, ETS gelirleri ve hibe karmasıyla ülke geneline yaygınlaştırılmalı; her yıl bağımsız etki

değerlendirmeleri yapılarak debi azalımı, ısı maruziyeti, sağlık çıktıları ve eşitsizlik üzerindeki etkiler düzenli biçimde raporlanmalıdır (EIB, 2023; OECD, 2021; IPCC, 2022). Bu sıralı yaklaşım, normatif netliği, finansal ölçeklenebilirliği ve ölçülebilir etkiyi aynı hat üzerinde buluşturmuş olacaktır.

7. Sonuç ve Gelecek Perspektifleri

Türkiye'nin hızlanan iklim riskleri; sıcak hava dalgaları, kuraklık, su baskınları ve kıyı erozyonu karşısında NbS, hem risk azaltımı hem de eş-faydaları birlikte üreten stratejik bir uyum eksenini olarak öne çıkmaktadır. IPCC'nin AR6 değerlendirmesi, ekosistem temelli uyumun kentsel ısı ve taşkın risklerini düşürürken sağlık, biyoçeşitlilik ve refah faydalarını aynı anda sağlayabildiğini vurgulamaktadır (IPCC, 2022). Türkiye'nin 2024–2030 İklim Değişikliği Uyum Stratejisi ve Eylem Planı da ekosistem temelli yaklaşımları politika metnine taşımış durumdadır (T.C. ÇŞİB, 2024). Küresel ölçekte Kunming-Montreal Küresel Biyoçeşitlilik Çerçevesi'nin 2030'a dek bozulmuş ekosistemlerin en az %30'unun onarımını hedeflemesi ve AB'nin 2024 tarihli Doğa Restorasyon Tüzüğü (NRL) ile kurulan bağ, Türkiye'nin NbS gündemini hem bilimsel hem de finansal olarak güçlendireceği düşünülmektedir (CBD, 2022; European Union, 2024). Bu çerçevede NbS, çoklu tehlike ortamında çoklu fayda üretmekte: taşkın kontrolü, kentsel serinletme, su tutma, kıyı koruma ve karbon tutumu gibi düzenleyici hizmetler eşzamanlı olarak devreye girmektedir (IUCN, 2020; European Commission, 2021; EEA/Climate-ADAPT, 2025). Özellikle kentsel yeşil altyapı; ağaçlandırma, yeşil çatılar ve geçirgen yüzeyler ısı adası etkisini ve yüzey akışını azaltmaktadır (Kabisch vd., 2022; Cortinovis vd., 2022). Çalışmalar kentlerde NbS'nin sıcak dalgaları ve taşkınlara karşı etkinliğini sistematik biçimde göstermektedir (Ferrario vd., 2024). Politika düzleminde, AB Uyum Stratejisi “daha akıllı, daha hızlı ve daha sistemik” uyum için NbS'yi ana akımlaştırırken; NRL, kent-doğa sürekliliğini de kapsayan bağlayıcı restorasyon hedefleri getirmektedir. Türkiye'nin AB Yeşil Mutabakatı ile teknik mevzuat uyumu ve Gümrük Birliği ilişkileri gözetildiğinde, NbS'nin ölçeklendirilmesi stratejik bir yakınsama zemini sunmaktadır (European Commission, 2021; European Union, 2024).

Uygulama ölçeğini büyütmek için öncelikle risk-temelli mekânsal önceliklendirmenin benimsenmesi; havza ve kent ölçeğinde ısı, su baskını ve kuraklık gibi çoklu tehlikeleri birlikte haritalayan analizlerle eş-fayda

optimizasyonu yapılarak NbS portföylerinin sıralanması gerektiği düşünülmektedir (OECD, 2021; OECD, 2020). Yeşil-gri entegrasyon esastır: kıyı setleri ve yağmur suyu altyapısı gibi gri çözümler; taşkın ovaları, sulakalan restorasyonu ve şehir ormanları gibi NbS ile birlikte tasarlanmalıdır. Dünya Bankası kılavuzları fizibilite, tasarım ve işletme aşamalarında metodolojik bir çerçeve sağlamaktadır (World Bank, 2017; World Bank, 2023). Standartlar ve izleme bakımından, proje döngüsünde IUCN Küresel NbS Standardı’nın sekiz ilke ve yirmi sekiz göstergesinin referans alınması; NRL’nin izleme-raporlama formatlarıyla uyumlu ulusal bir MRV şemasının kurulması kalite güvencesi ve ölçülebilirlik sağlamaktadır (IUCN, 2020; European Union, 2024). Finansman tarafında belediyelerin sermaye yatırım programlarına NbS kalemlerinin entegrasyonu; yeşil/sosyal tahviller, havza-temelli su hizmeti ödemeleri, karbon-biyoçeşitlilik kredileri ve sigorta temelli araçların devreye alınması gereklidir. UNEP, ekosistem restorasyonu finansmanının 2030’a kadar yaklaşık dört kat artması gerektiğini belirtirken, kent NbS yatırımları için veri ve araç boşluklarının kapatılmasını önermektedir (UNEP, 2024a; UNEP, 2024b). Kapasite ve bakım yönünde, büyükşehir belediyelerinde “yeşil altyapı yönetimi” birimleri ile uzun dönem işletme-bakım bütçeleri kurulmalı; EBRD’nin GCAP süreçleri (İzmir 2020, Gaziantep 2023) yönetim ve yatırım boru hattı tasarımı için örnek teşkil etmektedir (EBRD, 2020; EBRD, 2023). Kır-kent bağlantılarında, yukarı havzadaki orman-mera restorasyonu, riparyan tampon bölgeler ve yapay/suni sulakalanlar, aşağı havzalarda taşkın ve su kalitesi risklerini anlamlı ölçüde düşürür (OECD, 2025; OECD, 2020). Etki değerlemede ise fayda-maliyet, dağılımsal etkiler ve sağlık-ekonomi ortak göstergeleriyle değerlendirme yapılmalı; güncel çalışmalar ve meta-analizler, politika hedeflerine gerçekçi katkı büyüklükleri atamayı mümkün kılmaktadır (Cortinovis vd., 2022; Ferrario vd., 2024; World Bank, 2023).

Bilim-politika-toplum işbirliğine dayalı uzun vadeli bir yol haritasının, kısa, orta ve uzun vade olarak kademelendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Kısa vadede (0–2 yıl) bakanlıklar, belediyeler, üniversiteler, STK’lar ve özel sektörü bir araya getiren bir Ulusal NbS Görev Gücü kurularak IUCN Standardı temelinde ulusal NbS envanteri çıkarılmalı ve hızlı uygulanabilir müdahaleler listesi oluşturulmalıdır (IUCN, 2020). Aynı dönemde, on kent ve beş öncelikli havzada yeşil-gri entegre pilotlar başlatılarak AB Uyum Stratejisi’nin “daha akıllı-daha hızlı” ilkeleri doğrultusunda izleme-öğrenme döngüleri tesis

edilmelidir (European Commission, 2021); UNEP’in önerileri ışığında belediye bütçelerinde NbS sınıflandırması ve yatırım stratejisi geliştirilmelidir (UNEP, 2024b). Orta vadede (3–5 yıl) 2024–2030 Uyum Eylem Planı’nın uygulanmasında NbS hedefleri; il çevre düzeni ve imar planları ile kentsel dönüşüm, ulaşım ve su-atık su yatırımlarına yatay biçimde işlenmeli (T.C. ÇŞİB, 2024); NRL’nin iki yıllık ulusal restorasyon planı takvimiyle uyumlu, su tutma, serinletme, karbon ve biyoçeşitlilik göstergelerini içeren şeffaf bir MRV ile açık veri platformu hayata geçirilmelidir (European Union, 2024). EBRD GCAP ve AB Mission-Cities gibi programlar aracılığıyla projelendirme-ihale-işletme adımlarına yönelik teknik dokümantasyon havuzu ve eğitim programları oluşturulmalıdır (EBRD, 2020; Climate-ADAPT, 2025). Uzun vadede (2025–2035) ise CBD’nin 2030 Hedef 2’siyle uyumlu, kırsal-kentsel ölçekleri kapsayan ulusal NbS hedefleri ve fon mekanizmaları kurumsallaştırılmalı (CBD, 2022; UNEP, 2024a); kentler arası bilgi paylaşımı, standartlaştırılmış metrikler ve bağımsız etki doğrulamasıyla özel sektörün NbS yatırımlarına katılımı artırılmalıdır (OECD, 2021).

Sonuç olarak, kanıta dayalı tasarım, sağlam standartlar, AB mevzuatına uyum ve izlenebilir finansman mimarisi birlikte ele alındığında, NbS Türkiye’nin iklim uyumunda yüksek etki ve uyarlanabilirlik potansiyeli sunmaktadır. Bu çerçevenin ölçekli, kapsayıcı ve finansal olarak sürdürülebilir şekilde işletilmesinin, 2030 ve 2050 hedeflerine giden yolu belirginleştireceği; aynı zamanda sağlık, eşitlik ve doğa-pozitif kalkınma sonuçlarını görünür kılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Alpar, B. (2009). Vulnerability of Turkish coasts to accelerated sea-level rise. *Geomorphology*, 107(1–2), 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.05.021>
- Avrupa Birliği. (2024). Regulation (EU) 2024/1991 on nature restoration. Avrupa Birliği Resmî Gazetesi.
- Avrupa Komisyonu. (2021). EU Strategy on Adaptation to Climate Change (COM(2021) 82 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0082> EUR-Lex
- Balmford, A., Green, J. M. H., Anderson, M., Beresford, J., Huang, C., Naidoo, R., Walpole, M., & Manica, A. (2015). Walk on the wild side: Estimating the global magnitude of visits to protected areas. *PLOS Biology*, 13(2), e1002074. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002074>
- C3S (Copernicus Climate Change Service). Seasonal lookback: Summer 2024.
- C3S (Copernicus Climate Change Service). Climate indicators: Sea level. ECMWF.
- C3S/ECMWF. European State of the Climate 2024 (ESOTC 2024): Overview & European ocean sections.
- Castle, S. E. (2022). Evidence for the impacts of agroforestry on ecosystem services and human well-being in low- and middle-income countries. *Environmental Evidence*, 11, 26. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00260-4>
- Castle, S. E., Harvey, C. A., & Miller, D. C. (2021). The impacts of agroforestry interventions on agricultural productivity, ecosystem services, and human well-being: A meta-analysis. *Environmental Evidence*, 10, 30. <https://doi.org/10.1002/cl2.1167>
- Chausson, A., Turner, B., Seddon, D., Chabaneix, N., Girardin, C. A. J., Kapos, V., & Seddon, N. (2020). Mapping the effectiveness of nature-based solutions for climate change adaptation. *Global Change Biology*, 26(11), 6134–6155. <https://doi.org/10.1111/gcb.15310>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>

- Cohen-Shacham, E., Andrade, A., Dalton, J., Dudley, N., Jones, M., Kumar, C., ... Walters, G. (2019). Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. *Environmental Science & Policy*, 98, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.014>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Climate-ADAPT. (2025). Implementing nature-based solutions – İzmir hikâyesi. <https://climate-adapt.eea.europa.eu>
- Convention on Biological Diversity (CBD). (2022). *Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (Decision 15/4)*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int>
- Cortinovis, C., Olsson, P., Boke-Olén, N., & Hedlund, K. (2022). Scaling up nature-based solutions for climate-change adaptation: Potential and benefits in three European cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127450. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127450>
- Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., & Coşkun, M. (2017). Climate change projections for Turkey: Three models and two scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1(1), 22–43. <https://doi.org/10.31807/tjwsm.297183>
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., ... Faehnle, M. (2014). Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Dodman, D., et al. (2022). *Chapter 6: Cities, Settlements and Key Infrastructure*. In *IPCC AR6 WGII*.
- European Forest Institute (EFI). (2021). *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2020*.
- European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). (2020). *Izmir Green City Action Plan*. London: European Bank for Reconstruction and Development.
- European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). (2023). *Gaziantep Green City Action Plan*. London: European Bank for Reconstruction and Development.

- European Investment Bank (EIB). (2023). Investing in nature-based solutions. European Investment Bank. <https://www.eib.org>
- Engemann, K., Pedersen, C. B., Arge, L., Tsirogiannis, C., Mortensen, P. B., & Svenning, J.-C. (2019). Residential green space in childhood is associated with lower risk of psychiatric disorders from adolescence into adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11), 5188–5193. <https://doi.org/10.1073/pnas.1807504116>
- European Environment Agency (EEA) (2022). *Who benefits from nature in cities?* Copenhagen: EEA.
- European Environment Agency (EEA) (2024). *European Climate Risk Assessment (EUCRA)*. EEA Report 1/2024.
- EEA/Climate-ADAPT. (2025). *Implementing Nature-based Solutions to Achieve Climate Resilience in İzmir, Türkiye (Mission Story)*. Avrupa Çevre Ajansı/AB Komisyonu.
- Ettinger, A. K., Brown, K. A., et al. (2024). Street trees provide an opportunity to mitigate urban heat. *Scientific Reports*, 14, 12345. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51921-y>
- European Commission. (2021). *EU Strategy on Adaptation to Climate Change* (policy page; NbS vurgusu). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-and-resilience-climate-change/eu-adaptation-strategy_en
- European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1991 on nature restoration*. *Official Journal of the European Union*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *The Forest and Landscape Restoration Mechanism*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Frantzeskaki, N. (2019). Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science & Policy*, 93, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.033>
- Ferrario, F., Mourato, J. M., Rodrigues, M. S., & Dias, L. F. (2024). Evaluating nature-based solutions as urban resilience and climate adaptation tools: A meta-analysis of their benefits on heatwaves and floods. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175179>.
- Gültekin, Y.S. (2022). Ecotourism through the perception of forest villagers: Understanding via mediator effects using structural equation modeling.

- Environmental Science and Pollution Research*, 29:70899–70908.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20882-y>
- Gümüş, B., Oruc, S., Yücel, İ., & Yılmaz, M. T. (2023). Impacts of climate change on extreme climate indices in Türkiye driven by high-resolution downscaled CMIP6 climate models. *Sustainability*, 15(9), 7202. <https://doi.org/10.3390/su15097202>
- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). (2011). Mangrove plantation in Viet Nam: Measuring impact and cost-benefit.
- International Carbon Action Partnership (ICAP). (2023). EU CBAM transitional phase. <https://icapcarbonaction.com>
- International Labour Organization (ILO); International Union for Conservation of Nature (IUCN); UN Environment Programme (UNEP). (2022). *Decent work in nature-based solutions*. Geneva: ILO.
- International Labour Organization (ILO) & World Wide Fund for Nature (WWF). (2020). *Nature hires: How nature-based solutions can power a green jobs recovery*. Geneva: ILO/WWF.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report* (özellikle SPM ve Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> ; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_CCP4.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *AR6 Synthesis Report—Summary for Policymakers*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2020). *Global Standard for Nature-based Solutions: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS* (1st ed.)
- İklim Değişikliği Başkanlığı (İDB). (2024). *İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024–2030)*.

- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., & Hansen, R. (2022). Principles for urban nature-based solutions. *Ambio*, 51(6), 1388–1401. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01685-w>
- Kumar, P., Abhijith, K. V., Morawska, L., & Pham, T. (2024). Urban heat mitigation by green and blue infrastructure. *Discover Environment*, 2(1), 100026. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588>
- Kaya, Y. (2021). Winter wheat adaptation to climate change in Turkey. *Agronomy*, 11(4), 689. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040689>
- Kartal, V., Yavuz, V. S., & Arıman, S. (2024). Climate change trends in the Southeastern Anatolia region of Türkiye: Precipitation and drought. *Journal of Water and Climate Change*, 15(12). <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.503>
- McDonald, R. I., et al. (2024). Current inequality and future potential of U.S. urban tree distribution to reduce heat-related mortality. *npj Urban Sustainability*, 4(1), 33. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00150-3>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) (2022). *SPEI yöntemi ile Türkiye kuraklık tahmini: İzleme ve tahmin sistemi*.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) (2024). *Türkiye 2024 İklim Raporu*. <https://mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2024-iklim-raporu.pdf>
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) (2025). Türkiye İçin İklim Projeksiyonları (RCP4.5/RCP8.5; RegCM4.3.4; 20 km; 2016–2099).
- MedECC. (2020). *Summary for Policymakers of the First Mediterranean Assessment Report (MAR1)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5513887> zenodo.org
- Miller, D. C., Ordoñez, P. J., Brown, S. E., Forrest, S., Nava, N. J., Hughes, K., & Baylis, K. (2019). The impacts of agroforestry on agricultural productivity, ecosystem services, and human well-being in low- and middle-income countries: An evidence and gap map. *Campbell Systematic Reviews*, 16(1), e1066. <https://doi.org/10.1002/CL2.173>
- Naidoo, R., Weaver, L. C., Diggle, R. W., Matongo, G., Stuart-Hill, G., & Thouless, C. (2016). Complementary benefits of tourism and hunting to communal conservancies in Namibia. *Conservation Biology*, 30(3), 628–638. <https://doi.org/10.1111/cobi.12643>
- Narayan, S., Beck, M. W., Wilson, P., Thomas, C. J., Guerrero, A., Shepard, C. C., Reguero, B. G., Franco, G., Ingram, J. C., & Trespalacios, D. (2017).

- The value of coastal wetlands for flood damage reduction in the northeastern USA. *Scientific Reports*, 7, 9463. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09269-z>
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J. N., Ingram, J. C., Lange, G.-M., & Burks-Copes, K. A. (2016). The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PLOS ONE*, 11(5), e0154735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154735>
- Nazish, A., Abbas, K., & Sattar, E. (2024). *Health impact of urban green spaces: A systematic review of heat-related morbidity and mortality*. *BMJ Open*, 14(9), e081632. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-081632>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2019). *OECD Environmental Performance Reviews: Turkey 2019 — Highlights*. Paris: OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). *Nature-based solutions for adapting to water-related climate risks* (Environment Policy Papers, No. 21). Paris: OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). *Scaling up nature-based solutions to tackle water-related climate risks*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/OECD>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). *Scaling finance and investment for climate adaptation*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/OECD>
- Özyurt, G., & Ergin, A. (2010). Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: A new indicator-based methodology for decision makers. *Journal of Coastal Research*, 26(2), 265–273. <https://doi.org/10.2112/08-1055.1>
- Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V., Ardizzone, G., Colantoni, P., Balestri, E., ... Romero, J. (2021). Contribution of *Posidonia oceanica* meadows in the Mediterranean Sea for carbon sequestration. *Marine Environmental Research*, 166, 105249. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105236>
- Rijke, J., van Herk, S., Zevenbergen, C., & Ashley, R. (2012). *Room for the River: Delivering integrated river basin management in the Netherlands*.

- International Journal of River Basin Management*, 10(4), 369–382.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2012.739173>
- Riehl, B., Zerriffi, H., & Naidoo, R. (2015). Effects of community-based natural resource management on household welfare in Namibia. *PLOS ONE*, 10(5), e0125531. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125531>
- Satır, O., Berberoğlu, S., & Çilek, A. (2016). Modelling long-term forest fire risk using fire weather index under climate change in Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4), 537–551.
http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1404_537551
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794), 20190120.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Stewart, E., Lin, Y., Cole, S. J., Moore, R. J., Xu, J., Yuan, Z., & Pan, D. (2021). Sponge cities and sustainable drainage systems: Sharing best practice in China and the UK. In FLOODrisk 2020 – 4th European Conference on Flood Risk Management (Budapest, Hungary, 22–24 June 2021). Budapest University of Technology and Economics (BME).
<https://doi.org/10.3311/FLOODRisk2020.13.10>
- Swann, S., Blandford, L., Cheng, S., Cook, J., & Miller, A. (2021). *Public International Funding of Nature-based Solutions for Adaptation: A Landscape Assessment*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature* 504, 79–83 (2013).
<https://doi.org/10.1038/nature12859>
- Twohig-Bennett, C., & Jones, A. (2018). The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. *Environmental Research*, 166, 628–637.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.030>
- Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) (2013). *Posidonia oceanica on the coasts of Turkey and Northern Cyprus*.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı—İklim Değişikliği Başkanlığı. (2024). *İklim Değişikliğine Uyum Stratejisi ve Eylem Planı (2024–2030)*.

- https://iklim.gov.tr/db/turkce/icerikler/files/%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fine%20Uyum%20Stratejisi%20ve%20Eylem%20Plan_%202024-2030.pdf
- T.C. Resmî Gazete. (2025, 9 Temmuz). 7552 sayılı İklim Kanunu. <https://www.resmigazete.gov.tr>
- United Nations Development Programme (UNDP) Türkiye & Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – İklim Değişikliği Başkanlığı. (2024). Türkiye’de Yerel İklim Eylemi için AB Ortaklığı – Yönetici Özeti.
- United Nations Environment Assembly (UNEA). (2022). Resolution 5/5: Nature-based solutions for supporting sustainable development. Birleşmiş Milletler Çevre Asamblesi. UNEP - UN Environment Programme
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2023). *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2024a). *State of Finance for Nature — Restoration Finance Report*. Nairobi: UN Environment Programme.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2024b). *From Grey to Green: State of Finance for Nature in Cities 2024*. Nairobi: UN Environment Programme.
- World Meteorological Organization (WMO) 2025. State of the Global Climate 2024.
- World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe. (2016). *Urban green spaces and health: A review of evidence*. Copenhagen: WHO Europe.
- World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe. (2017). *Urban green space interventions and health: A review of impacts and effectiveness*. Copenhagen: WHO Europe.
- World Bank. (2017). *Nature-based Solutions for Disaster Risk Management (Booklet)*.
- World Bank. (2023). *Assessing the Benefits and Costs of Nature-Based Solutions for Climate Resilience: A Guideline for Project Developers*.
- Yazar, M., Daloğlu Çetinkaya, İ., İban, M. C., & Bilgilioğlu, S. S. (2023). The green divide and heat exposure: Urban transformation projects in

Istanbul. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1265332.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1265332>

Yücedağ, C., & Bilir, N. (2021). *Juniperus* L. for restoration of degraded forest lands in Turkey under climate change. *South-east European Forestry*, 12(1), 15–28. <https://doi.org/10.15177/see4or.21-05>

BÖLÜM 2

MARDİN'DE ATIKSU ARITMA TESİSLERİNİN ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÇEVRESEL ROLÜ VE ETKİLERİ

Öğr.Gör. İbrahim BOZ¹

Öğr. Gör. Dr. Sezin ARPAĞ²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17923354>

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu , Elektrik ve Enerji Bölümü, Mardin İli, Türkiye. ibrahimboz@artuklu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-2719-4197

² Mardin Artuklu Üniversitesi, Savur Meslek Yüksekokulu , Harita ve Kadastro Bölümü, Mardin İli, Türkiye. sezinarpag@artuklu.edu.tr, orcid id:0000-0002-7555-840X

1. GİRİŞ

Kentleşme, sanayileşme ve nüfus artışı, atıksu üretimini artırmakta, bu da yerel su kaynakları ve çevresel kalite üzerinde baskı yaratmaktadır. Atıksu arıtma tesisleri (WWTP – Wastewater Treatment Plants), bu baskıları hafifletmek amacıyla çevresel yükleri kontrol altına almakla beraber kendileri de çevresel ve enerji açısından çeşitli etkilere sahiptir. Yapılan bilimsel çalışmalar, tesislerin yalnızca “kirliliği azaltma” işleviyle değil, aynı zamanda kaynak geri kazanımı (su, enerji, besin) süreçlerine dönüştürücü rol oynaması gerektiğini vurgular (Mo et al., 2013).

Atıksu arıtma tesisleri, sürdürülebilir kalkınma ve çevresel yönetimin temel bileşenleri arasında yer alır. Bu tesislerde enerji verimliliği yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel bir gerekliliktir. Havalandırma, pompalama ve çamur yönetimi işlemleri toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturur. Bu nedenle, enerji geri kazanımı, biyogaz üretimi ve kojenerasyon sistemlerinin etkin kullanımı kritik öneme sahiptir.

Ancak tesislerin faydaları kadar, olası çevresel riskleri de dikkatle ele alınmalıdır. Bu riskler arasında çamurun içerdiği ağır metaller ve mikro kirleticilerin toprağa ve sudaki ekosistemlere geçişi; deşarj edilen suyun besin yükü (azot, fosfor) nedeniyle ötrofikasyon oluşturma potansiyeli; sera gazı emisyonları; koku, gürültü ve halk sağlığı baskıları; ve tesislerin yüksek enerji tüketimi sayılabilir (Samsami et al., 2025).Mardin özelinde, özellikle Kızıltepe ve Yeşilli ilçelerinde kurulan ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri, bölgenin su stresi yaşayan coğrafi koşulları göz önüne alındığında özel bir anlam taşır. Haber kaynaklarına göre, bu tesisler 2018’den bu yana yaklaşık 170 milyon m³’lük atık suyu arıtarak tarımsal kullanım için kazandırmış, aynı zamanda çamur bertarafı ve biyogaz üretimiyle entegre bir tesistir.. Özellikle Kızıltepe tesisinde, atık su arıtıldıktan sonra UV dezenfeksiyon işleminden geçirilmekte ve Zergan Deresi’ne deşarj edilmektedir (Kızıltepe Atık Su Arıtma Tesisi tanıtımı, MARSU). Bu uygulama, tesisin su kaynaklarına yönelik koruyucu fonksiyonunun somut göstergesidir.

2. Enerji Geri Kazanımı: Biyogaz, Kojenerasyon ve Entegre Sistemler

Geleneksel atıksu arıtma tesisleri, genellikle enerji tüketen yapılar olarak bilinir. Özellikle havalandırma, pompalama ve çamur işleme gibi

süreçler toplam enerji yükünün büyük kısmını oluşturur (Cengiz et al., 2024). Bu yük, enerjiyi sadece maliyet unsuru değil, aynı zamanda çevresel etkilerin belirleyicisi hâline getirir. Bu nedenle modern tesislerde, enerji-çevre optimizasyonu giderek daha fazla önem kazanır.

Enerji geri kazanımının en yaygın yolunu anaerobik sindirim ile biyogaz üretimi ve bunu kullanarak kojenerasyon sistemleri oluşturma yaklaşımı oluşturur. Bu sistemlerde, atıksu arıtım sürecinden elde edilen organik madde parçalanarak metan ve karbondioksit içeren biyogaz oluşturulur; bu gaz, elektrik ve ısı üretiminde kullanılarak tesiste kullanılan enerji ihtiyacının bir kısmı karşılanır (Cengiz et al., 2024). Bazı çalışmalarda, enerji geri kazanım verimliliğinin %90'ı aşabileceği öne sürülmüştür (Energy Recovery in Wastewater Treatment Plants). Diğer ileri yöntemler arasında kodigestiyon, anaerobik membran reaktörleri (AnMBR) ve atıksu-teknoloji hibrit sistemleri yer almakta olup, bu uygulamalar biyogaz üretimini ve sistem verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir (Cengiz et al., 2024).

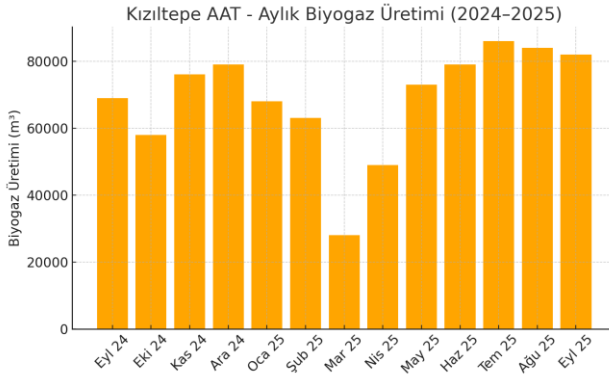
Atıksu tesislerinde enerji özerkliği fikri literatürde giderek daha fazla tartışılmaktadır. Hidroelektrik uygulamalarının (küçük düşey akış türbinleri gibi) atıksu altyapısına entegre edilmesinin olası faydalarını irdelemiş, böylece enerji geri kazanım kapasitesinin artırılabilirliğini öne sürmüştür (Llácer-Iglesias ve ark. 2021). Bu tür hibrit sistemler, enerji-besin-suyu birlikte optimize eden altyapılar için umut vadeder.

2.1. Mardin Atıksu Arıtma Tesisleri Verileri

MARSU tarafından işletilen Kızıltepe ve Yeşilli Atıksu Arıtma Tesisleri, bölgenin iklim koşulları ve su kıtlığı göz önüne alındığında stratejik tesislerdir. Kızıltepe tesisi ileri biyolojik arıtma ve biyogaz üretim sistemine sahipken, Yeşilli tesisi daha küçük ölçekli olup biyogaz üretim altyapısına sahip değildir. Bu farklılıklar enerji performansında önemli farklara yol açmaktadır.

2.1.1. Biyogaz Üretimi

Kızıltepe tesisinde elde edilen biyogaz miktarları Şekil 1'de sunulmuştur. Aylık üretim değerleri 28.000–86.000 m³ arasında değişmekte olup, bu biyogazın kojenerasyon sisteminde kullanılması enerji maliyetlerinde ciddi tasarruf sağlamaktadır.



Şekil 1. Kızıltepe AAT - Aylık Biyogaz Üretimi (2024–2025)

2.1.1.2. Enerji Tüketimi Analizi

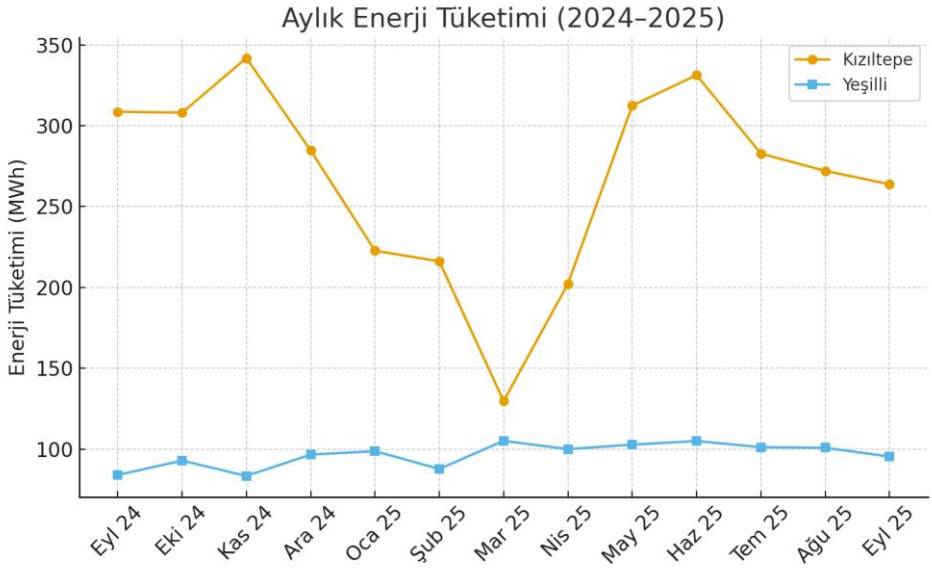
Şekil 1’de, Kızıltepe ve Yeşilli tesislerinin 2024–2025 dönemine ait aylık enerji tüketim değerleri verilmiştir. Kızıltepe tesisinin enerji tüketimi dönem boyunca 220–340 MWh arasında değişmektedir. Yeşilli tesisinde ise enerji tüketimi daha düşük olmakla birlikte, arıtılan su miktarına oranla özgül enerji tüketimi daha yüksektir. Tablo 1 ve tablo 2 de veriler açıkça görülmektedir.

Tablo 1. Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Enerji Verileri (2024–2025)

Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri	Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri	Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri	Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri	Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri	Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri	Kızıltepe Atıksu Arıtma Tesisi Verileri
Aylar (2024-2025)	Şebekeden Alınan Elektrik (MW-saat/ay)	Toplam Türbin Elektrik Üretimi/ gaz jeneratörü	Toplam Elektrik Tüketimi (MW-saat/ay)	Enerji Geri Kazanımı (%)	Toplam Arıtılan Atık su Miktarı (m3/ay)	1 m³ Atık su için Elektrik Tüketimi (kW-saat/m3)
Eylül 24	241,29	67,42	308,710	21,84	1.620.000	0,15
Ekim 24	250,939	57,18	308,119	18,55	1.638.000	0,15
Kasım 24	272,519	69,38	341,899	20,29	1.716.000	0,16
Aralık 24	212,613	72,11	284,723	25,33	1.590.000	0,13
Ocak 25	173,097	49,6	222,697	22,27	1.548.000	0,11
Şubat 25	162,35	53,8	216,150	24,89	1.490.000	0,11
Mart 25	91,349	38,3	129,650	29,50	695.000	0,13
Nisan 25	160,46	41,8	202,260	20,67	1.365.000	0,12
Mayıs 25	284,618	27,9	312,518	8,93	1.853.000	0,15
Haziran 25	262,721	68,6	331,321	20,70	1.746.000	0,15
Temmuz 25	263,504	19,32	282,824	6,83	1.861.000	0,14
Ağustos 25	262,493	9,61	272,103	3,53	1.746.000	0,15

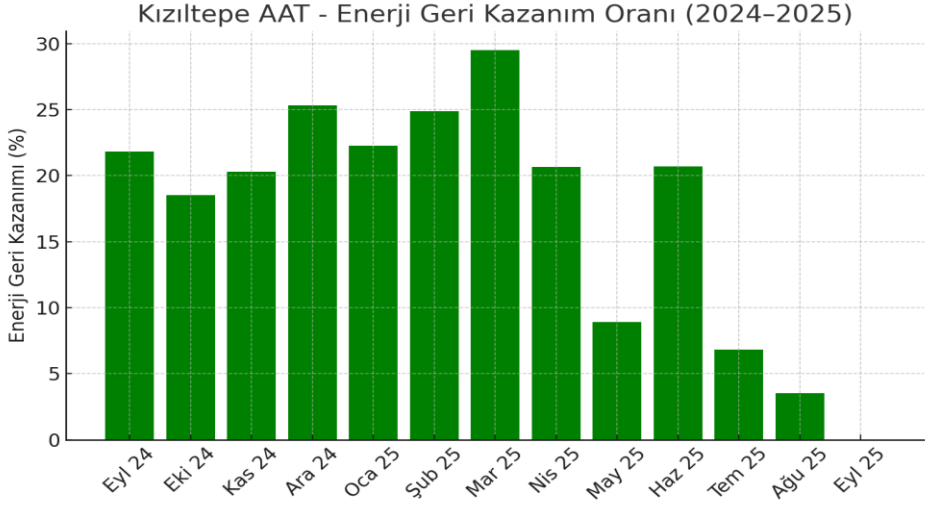
Tablo 2. Yeşilli Atıksu Arıtma Tesisi Enerji Verileri (2024–2025)

Aylar (2024-2025)	Toplam Arıtılan Atıksu Miktarı (m3/ay)	Toplam Tesis Elektrik Tüketimi (MW-saat /ay)	Ortalama aylık polielektroli t tüketimi (kg/gün)	Çamur (Kuru Ürün) Miktarı (kg/ay)	Toplam Üretilen Biyogaz Miktarı (m3/ay)
Eylül 24	1.620.000	308,71	90	900.000	69.000
Ekim 24	1.638.000	308,119	90	900.000	58.000
Kasım 24	1.716.000	341,899	90	1.000.000	76.000
Aralık 24	1.590.000	284,723	90	900.000	79.000
Ocak 25	1.548.000	222,697	90	900.000	68.000
Şubat 25	1.490.000	216,15	90	900.000	63.000
Mart 25	695.000	129,65	30	250.000	28.000
Nisan 25	1.365.000	202,26	60	650.000	49.000
Mayıs 25	1.853.000	312,518	100	1.000.000	73.000
Haziran 25	1.746.000	331,321	100	900.000	79.000
Temmuz 25	1.861.000	282,824	90	1.000.000	86.000
Ağustos 25	1.746.000	272,103	100	1.000.000	84.000
Eylül 25	1.751.000	263,842	100	1.000.000	82.000

**Şekil 2.** Aylık Enerji Tüketimi (2024–2025)

2.1.1.3. Enerji Geri Kazanımı

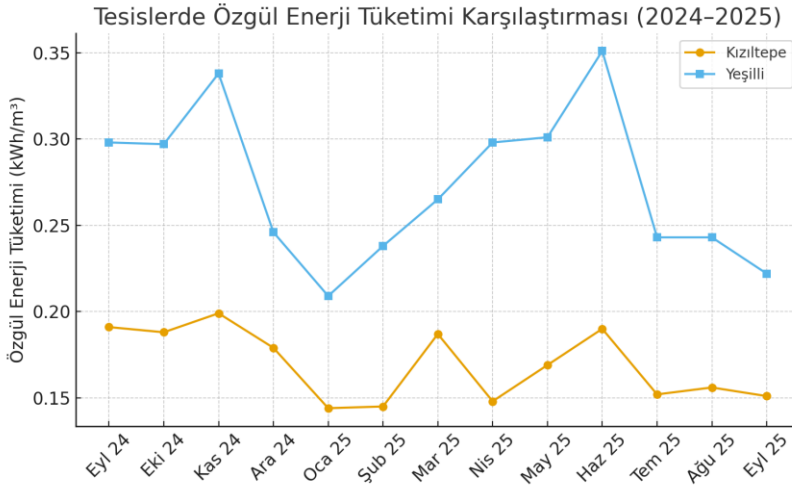
Kızıltepe tesisinde biyogazdan enerji üretimiyle geri kazanım oranı ortalama %17 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3’de görüldüğü üzere, yıl boyunca geri kazanım oranı özellikle ilkbahar aylarında artış göstermektedir.



Şekil 3. Kızıltepe AAT - Enerji Geri Kazanım Oranı (2024–2025)

2.1.1.4. Özgül Enerji Tüketimi

Tesislerin özgül enerji tüketimleri Şekil 4’te karşılaştırılmıştır. Kızıltepe tesisinde 0,11–0,16 kWh/m³ aralığında değerler gözlenirken, Yeşilli tesisinde bu değer 0,21–0,35 kWh/m³ arasında değişmektedir. Bu durum, biyogaz üretimi ve enerji geri kazanım altyapısının etkinliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Özgül Enerji Tüketimi Karşılaştırması (2024–2025)

3.Su, Besin ve Enerji Döngüsünde Tesislerin Konumu

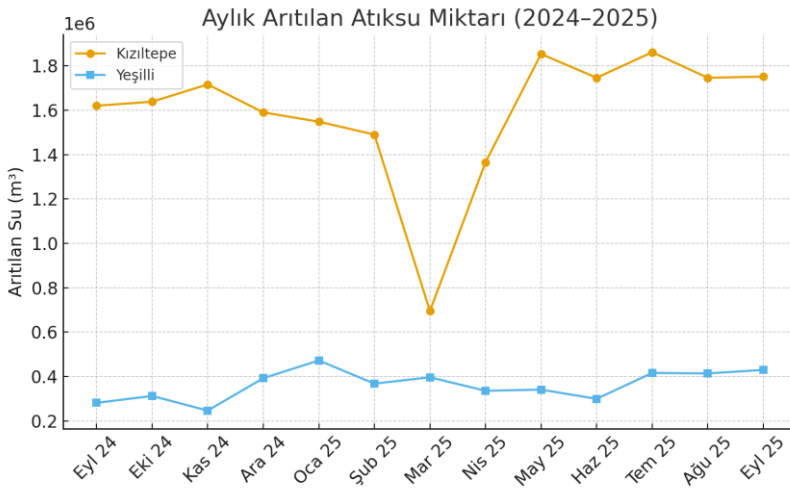
Atıksu tesisleri üçlü kaynak döngüsünde (su-besin-enerji) kavşak noktalarıdır. Yani, bu tesisler yalnızca atıksu arıtmaz; aynı zamanda suyu tekrar kullanıma sokar, besin elementlerini (azot, fosfor) geri kazanabilir ve enerji üretir. Bu entegre yaklaşımın uzun vadeli sürdürülebilir su yönetimi için kritik olduğunu vurgular. Türkiye özelinde yapılan “Atıksu Geri Kullanımı” çalışmasında, 1.015 belediyesel atıksu tesisinden yalnızca 15’inde geri kullanım uygulaması olduğu ve geri kazanılmış su oranının 2017’de toplam atıksu miktarının sadece %0,78’i seviyesinde kaldığı belirtilmiştir (Mo ve ark 2013). Bu veriler, Türkiye’de su geri kullanımı potansiyelinin henüz optimum düzeyde değerlendirilemediğini göstermektedir.

Mardin bağlamında da, arıtılmış suyun tarımsal sulamada kullanımına dair haberler dikkat çekicidir. Örneğin, AA kaynaklı haberde Kızıltepe tesisinde bugüne dek 109,8 milyon m³ atık suyun arıtılarak tarıma kazandırıldığı, ayrıca günlük 20 ton kadar çamurun elde edildiği ve biyogaz ile günlük yaklaşık 4.000 kW elektrik üretildiği belirtilmektedir. Bu uygulama, atıksu tesisinin yalnızca kirliliği azaltma değil aynı zamanda su kıtlığı ve enerji baskılarıyla yüzleşme işlevini de gösterir. Ancak su geri kullanım süreçleri, nutrient dengesi kontrolü, patojen giderimi, mikro kirlenici ve ağır metal kontrolü gibi teknik ve yönetsel zorluklara sahiptir. Bu nedenle

tesislerin tasarımında ileri arıtma, membran teknolojileri, iyon değişimi, adsorpsiyon ve ileri oksidasyon süreçleri gibi tamamlayıcı ünitelere yer verilmesi literatürde sıkça önerilmektedir.

3.1. Arıtılan Atıksu Miktarları

Şekil 5'te tesislerin aylık arıtılan su miktarları karşılaştırılmaktadır. Kızıltepe tesisi ortalama 1,65 milyon m³/ay, Yeşilli tesisi ise yaklaşık 360.000 m³/ay arıtım kapasitesine sahiptir. Bu fark, tesis ölçeği ve nüfus yoğunluğu ile ilişkilidir.



Şekil 5. Aylık Arıtılan Atıksu Miktarı (2024–2025)

4. Çevresel Riskler, Koku ve Halk Sağlığı

Her tesisin faydalarına karşılık bazı çevresel riskleri de barındırdığı unutulmamalıdır. Atıksu tesisleri işletme sürecinde doğrudan sera gazı emisyonu (metan sızıntıları, karbon dioksit, N₂O gibi gazlar), enerji kullanımı ve kimyasal tüketiminden kaynaklı ekolojik ayak izi üretir. Samsami ve arkadaşlarının çalışması, WWTP'lerin farklı aşamalarda “sera gazı üretimi, asitlenme, ötrofikasyon potansiyeli, insan sağlığı etkileri” gibi etkilere neden olabileceğini vurgular (Samsami et al., 2025). LCA (Yaşam Döngüsü Analizi) araçları bu tür etkilerin kantitatif değerlendirilmesinde kullanılır.

Ayrıca deşarj edilen suyun içinde çözünmüş kimyasallar, mikro kirleticiler (farmasötikler, hormon bozucular, pestisit kalıntıları) ve iz

elementler bulunabilir. Örneğin Türkiye sahillerindeki atıksu arıtma çıkışlarında yapılan bir çalışmada, Al, Ni gibi iz metal konsantrasyonlarının ölçüler arasında değiştiği; bazı istasyonlarda uluslararası standartları aştığı ve sağlık riskleri oluşturabileceği tespit edilmiştir (Akdemir et al., 2024). Bu örnek, atıksu tesislerindeki arıtmanın yalnızca klasik parametrelerle (BOD, KOİ, azot, fosfor) sınırlandırılmayacağını; geniş spektrumlu kirletici analizlerinin rutin hale getirilmesi gerektiğini gösterir.

Koku, gürültü ve estetik olumsuzluklar da sosyal kabul açısından önemlidir. Bazı köylerin yakınındaki arıtma tesislerinde, kanalizasyon ve biyolojik ünitelere ait kokuların mahalleleri etkilediği, yerleşik halkın yaşam konforunu azalttığı yönünde şikayetler bulunmaktadır. Örneğin Diyarbakır'daki bir atıksu tesisine yönelik yerel haber(<https://ilkha.com/news/haber-33944>). Bu tip sosyal-itibari baskılar, tesisin işletme başarısını ve sürdürülebilirliğini sekteye uğratabilir.

5. Mardin Örneği Üzerinden Uygulama Değerlendirmesi

Kızıltepe ve Yeşilli tesisleri, yukarıda özetlenen teorik ilkeleri coğrafi ve iklimsel kısıtları dikkate alan somut uygulamalara dönüştürme potansiyeli taşımaktadır. Kızıltepe tesisi, MARSU'nun resmi tanıtımında; açıkta akan atık suların toplanması, sucul ortamların kirletilmesinin önlenmesi ve Zergan Deresi gibi alıcı ortamlarda su kalitesinin iyileştirilmesi hedeflerinin bir bileşkesi olarak sunulmaktadır. Bu doğrultuda, arıtılmış su hem derelere deşarj edilmekte hem de sanayi tarımı sulamasında kullanılmaktadır; böylece hem havza su dengesi korunmakta hem de tarımsal üretime destek verilmektedir.

Yerel haber kaynaklarına göre, 2024 yılı itibarıyla Kızıltepe'de 109,8 milyon m³ atık su arıtılmış ve tarıma kazandırılmış; bu süreçte yaklaşık 30.000 ton %90 katı madde içeren çamur gübre olarak değerlendirilmiş, ayrıca biyogazla enerji üretimi yapılmış, tesisin elektrik ihtiyacının yaklaşık %60'ı karşılanmıştır. Bu tür entegre işletme, yukarıda teoride önerilen kaynak geri kazanım paradigmasını fiili hayata taşımaktadır.

Bununla birlikte bu başarılar, yalnızca işletme büyüklüğü veya potansiyel ile sınırlı kalmamalıdır. Tesisin verimliliği, bakım rejimleri, gaz arıtım sistemleri, çamur stabilizasyonu ve analiz protokolleri, sosyal kabul süreçleri gibi tüm boyutlarla birlikte ele alınmalıdır. Literatürde önerilen

optimizasyon teknikleri arasında çok ajanlı kontrol sistemleri, makine öğrenmesi, sürece dayalı optimizasyon modelleri gibi ileri yöntemler yer almakta, bu teknikler tesis sınırlarında çevresel etkileri minimize etme fırsatı sunmaktadır (Chen et al., 2020).

Ayrıca literatürde, mevcut arıtma tesislerinin enerji-özerk nüanslar kazanması yönünde model kontrol stratejileri önerilmektedir. Örneğin, Neto ve arkadaşları (2025), mevcut WWTP'lerin model-tahmine dayalı kontrol (MPC) ile işletilerek hem su kalite hedefleri sağlanırken hem de yeterli biyogaz üretimiyle enerji maliyetlerinin dengelenebileceğini göstermiştir. Bu tür stratejiler, özellikle enerji maliyet baskısının yüksek olduğu bölgelerde tesislerin sürdürülebilirliğini artırabilir.

6.Öneriler ve Sonuç

Mardin ili özelinde yapılan analiz, atıksu arıtma tesislerinin yalnızca çevresel koruma değil, aynı zamanda enerji üretimi ve kaynak geri kazanımı açısından da stratejik bir konuma sahip olduğunu göstermektedir. Kızıltepe tesisi biyogaz üretimiyle enerji geri kazanımında önemli bir örnek oluştururken, Yeşilli tesisinde bu altyapının geliştirilmesi potansiyel kazanç sağlayacaktır. Uzun vadede, bu tesislerde yapay zekâ destekli izleme ve otomasyon sistemlerinin entegrasyonu enerji verimliliğini artıracak ve sürdürülebilir işletme modellerine katkı sunacaktır.

Bu değerlendirme metni ışığında, atıksu arıtma tesislerinin çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak geri kazanımı ekseninde başarıya ulaşabilmesi için aşağıdaki stratejik öneriler öne çıkar:

1. **Enerji entegrasyonu ve optimizasyon:** Biyogaz üretimi ve kojenerasyon sistemlerinin verimliliği artırılmalı; ko-digestiyon, AnMBR, hatta hidroelektrik türbin entegrasyonu gibi hibrit sistemler değerlendirilmelidir (Cengiz et al., 2024; Llácer-Iglesias, 2021).
2. **Gelişmiş izleme ve analiz:** Atıksu ve çamur çıkışlarında geniş spektrumlu kirletici analizleri (iz elementler, mikro kirleticiler, patojen) rutin hale getirilmeli; böylece arıtma performansı ve sağlık riskleri sürekli izlenmelidir (Akdemir et al., 2024)
3. **İleri arıtma ve geri kazanım teknolojileri:** Membran filtrasyon, ileri oksidasyon, iyon değişimi gibi teknolojilerle arıtılmış su

kalitesi artırılarak sulamada güvenle kullanılabilir hâle getirilmelidir. Türkiye’de mevcut arıtma tesislerinin çok azında geri kullanım uygulamaları görülmektedir (Nas et al., 2020).

4. **Model tabanlı kontrol ve optimizasyon:** Özellikle kontrol algoritmaları, çok kriterli optimizasyon yaklaşımları ve yapay zeka destekli sistemlerle tesis işletimi iyileştirilebilir (Chen et al., 2020; Neto et al., 2025).
5. **Toplumsal katılım ve çevresel iletişim:** Tesis yerleşim alanlarında koku, gürültü ve estetik etkiler halkı rahatsız edebileceğinden, şeffaf iletişim, katılımcı süreçler ve halk eğitimi stratejileri öncelikli olmalıdır.
6. **Yaşam döngüsü analizleri (LCA):** Tesislerin inşa, işletme ve bakım süreçleriyle birlikte çevresel etkileri (sera gazı, asitifikasyon, kaynak tüketimi) değerlendirilerek iyileştirme yolları belirlenmelidir (Samsami et al., 2025).

Sonuç olarak, Mardin özelinde Kızıltepe ve Yeşilli tesisleri, coğrafi su stresi, iklim koşulları ve tarımsal potansiyel göz önüne alındığında sürdürülebilir bir su-enerji-besin altyapısının çekirdek bileşenleri olabilir. Ancak bu potansiyelin tam olarak ortaya çıkması, sistematik planlama, ileri teknoloji entegrasyonu, izleme ve halkla etkileşim süreçlerinin birlikte yürütülmesiyle mümkündür. Böylece atıksu arıtma tesisleri sadece “çevre yükünü azaltan tesisler” olmaktan çıkıp, bölgenin su yönetimi, enerji üretimi ve tarımsal sürdürülebilirliği için merkezî altyapı elemanlarına dönüşebilir.



Fotoğraf 1. “Kızıltepe Atık Su Arıtma Tesis” tanıtım fotoğrafı, 2025



Fotoğraf 2. “Yeşilli Atıksu Arıtma Tesisi” tanıtım fotoğrafı, 2025

KAYNAKÇA

- Akdemir, A., Taş, B., & Şahin, S. (2024). *Heavy metals and pollution indices at the outlet of wastewater treatment plants discharging into the Turkish coast*. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1521449. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1521449>
- Cengiz, E., Çiçek, F., & Çelik, A. (2024). *Energy recovery and optimization in wastewater treatment plants: Recent advances and perspectives*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 23(2), 547–564. <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09691-6>
- Chen, H., Wang, S., & Zhang, Y. (2020). *Reinforcement learning-based control strategies for wastewater treatment plants*. arXiv preprint, arXiv:2008.10417. <https://arxiv.org/abs/2008.10417>
- Llácer-Iglesias, P., García, J., & Melián-Martel, N. (2021). *Integration of micro-hydropower in wastewater systems to increase energy recovery potential*. *Sustainability*, 13(10), 5537. <https://doi.org/10.3390/su13105537>
- Mo, W., Zhang, Q., & Mihelcic, J. R. (2013). *Sustainability influence of integrated water resources management on wastewater treatment and reuse*. *Journal of Environmental Management*, 128, 703–710. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.062>
- Nas, B., Yazıcı, H., & Berktaş, A. (2020). *Wastewater reuse in Turkey: From present status to future potential*. *Water Policy*, 22(5), 808–823.
- Neto, J., Pires, C., & Carvalho, P. (2025). *Model predictive control of anaerobic digestion in WWTPs: Improving energy self-sufficiency*. arXiv preprint, arXiv:2506.10490. <https://arxiv.org/abs/2506.10490>
- ResearchGate. (2022). *Energy recovery in wastewater treatment plants: Utilization of hydro and biogas energy*. <https://www.researchgate.net/publication/358845739>
- Samsami, S., Tabrizi, F., & Ebrahimi, A. (2025). *Life cycle assessment of wastewater treatment plants: Environmental impacts and opportunities*. *Scientific Reports*, 15, 81380. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81380-4>
- <https://ilkha.com/news/haber-33944>

CHAPTER 3

ASSESSING THE EFFECTS OF PLASTIC BAGS IN SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT

Assoc. Prof. Dr. Nesli AYDIN¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17923414>

¹ Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, Tekirdağ, Turkey. naydin@nku.edu.tr, orcid id: <https://orcid.org/0000-0002-7561-4280>

1. INTRODUCTION

Products made of plastic have increased considerably in recent years due to their superior properties, lightweight nature, durability, and low cost. These properties make plastic the preferred material for many uses, particularly single-use packaging. The growth in plastic use, along with the end-of-life disposal problems and environmental pollution of these products, has led to the emergence of plastic bags. Plastic bags are a significant component of waste that contributes to environmental plastic pollution (Figure 1). Standard waste bags, like most other plastic materials, are made from polyethylene monomers derived from natural gas and oil. It could be recycled through chemical processes; however, it does not degrade well on its own. It means that these types of bags, once they end up in landfills, will not decompose for several centuries. The recycling processes for these single-use bags can deteriorate the plastic, and therefore, recycled bags could only be reused a limited number of times. Although plastics are often recycled or reused as fillers in building materials, they are dumped in landfills at the end of their life, where they take more than 1,000 years to decompose.



Figure 1: Plastic pollution (Sea turtle, ingests plastics, mistaking them for food)
(Bradt, 2015)

It is known that 4% of the world's oil is used in plastic production (British Plastic Federation, 2025). Studies have shown that a person who does not use plastic bags for their entire life span reduces their CO₂ emissions by 18.9 kg (Environment Agency, 2006). One of the environmentally friendly behaviours necessary to reduce CO₂ emissions is supporting “plastic bag

bans” and interventions implemented by administrators or marketers to reduce “plastic bag use”.

In recent years, high-density polyethylene waste bags produced using non-renewable resources have been encouraged to be replaced by bags made from biodegradable polymers (e.g., by breaking down under the influence of sunlight or dissolving in water). While degradable polymers, like any material, have environmental impacts, it is crucial to realise these impacts and the difference between them and non-renewable-based polymers in advance of accepting them as a solution (Haq et al., 2025).

2. LEGISLATIVE BACKGROUND OF PLASTIC BAGS

The negative impact of plastic waste on the environment is becoming increasingly apparent. Despite this, large quantities of plastic remain to be produced. Plastic materials are used in many products because they are lightweight and inexpensive, yet strong and durable. Plastic bag production is known to have been first supported by the US oil and gas industry in the 1970s. The predominant material for these disposable thin-film bags is high-density polyethylene, produced primarily from fossil fuel by-products.

To date, approximately 90 countries have implemented policies to diminish the use of plastic shopping bags. These policies specifically target bags made of HDPE (high-density polyethylene) or LDPE (low-density polyethylene), as well as lightweight, single-use plastic bags. These practices generally involve (1) banning the sale and distribution of all plastic bags that are non-biodegradable or have a thickness greater than the minimum thickness threshold, or (2) imposing a tax per bag (Macintosh et al., 2020).

Various initiatives are being implemented in different countries for this purpose. For example, Ohtomo and Ohnuma (2014) conducted a study in Japan to evaluate the use of free plastic bags. They observed that when consumers are given free plastic bags, they use them more than necessary. However, when plastic bags are charged, they found that consumers reuse existing bags instead of purchasing them. A similar system was implemented with Chinese consumers, and consumer habits were examined in a model called "bring your own bags" (Chan et al., 2008). A study conducted by Jayaraman et al. (2011) includes an experimental survey on the use of plastic bags in food products. It was found in this study that consumers are generally

unresponsive to campaigns against plastic bags unless awareness of the health risks of using plastic bags for hot meals is high in Malaysia.

It is known that around 500 billion plastic bags are used globally per year (Gürbüz and Yılmaz, 2018). Furthermore, 380 billion of these bags are used in the US alone. In some countries, governments are implementing various bans and taxes to reduce plastic bag use. For example, the plastic bags ban in San Francisco, which first began in certain stores, was later implemented in other stores (Hürriyet, 2016). Similarly, in the UK, the first province to ban plastic bags in 2007 was Modbury, a city where 13 billion plastic bags are discarded annually (Gürbüz and Yılmaz, 2018). If consumers forget to bring their own cloth bags when shopping, they can purchase bags made from inexpensive paper or recycled cotton at the supermarkets located in Modbury.

Mexico and India have also imposed restrictions on plastic bag use. India is a leader in banning plastic bags. Large cities such as Delhi, Mumbai, and Vasco da Gama have all banned plastic bags (Gürbüz and Yılmaz, 2018). Environmental pollution caused by plastic waste has led to restrictions on plastic bags worldwide. While anti-plastic bag policies are becoming widespread worldwide, there are some differences in the implementation of bans across countries. These differences in the implementation of these bans are most notable among East African countries. Rwanda's 2008 ban on plastic bags was met with praise (Behuria, 2021). Rwanda, which has been banned for years, holds a significant place not only on its continent but also globally. With its plastic bag ban, Rwanda is among the cleanest countries in the world. Although Kenya implemented the plastic bags ban before Rwanda, its application was repeatedly delayed. Finally, Kenya began implementing a ban on plastic bags in secondary packaging in August 2017, after a 14-year effort (Omondi and Asari, 2021).

Despite the plastic bag ban being declared at different times in Uganda, it is known that there are some delays in its implementation. Bangladesh also banned the use of plastic bags in 2002 (Gürbüz and Yılmaz, 2018). Currently, 12 Australian cities also charge a fee for plastic bags. With 6.7 billion plastic bags used annually in the country, it is estimated that plastic bag use will decrease further.

Producing 100 billion plastic bags necessitates 12 million barrels of oil per year (Clapp and Swanston, 2009). Plastic bag waste, along with other waste, poses a threat to wildlife and provides a breeding ground for malaria-carrying mosquitoes, while also negatively impacting public health by clogging sewer drains. Since the 1990s, public recognition of the harm caused by plastic bags has led to legal regulations regarding the use of plastic bags. This has been followed by a rapid expansion of anti-plastic bag policies through taxes and bans (Nielsen et al., 2019). It is known that countries in the Global South have taken stricter measures against plastic bags than other industrialised countries. Of the 51 countries that have adopted plastic bag bans, 36 are in the Global South, whereas 11 of the 39 countries that impose taxes on plastic bags are in the Global South as well (Knoblauch et al., 2018).

Although there are no restrictions on the use of plastic bags in various regions yet, some efforts are being made to reduce their use through taxes. For example, it has been reported that the use of plastic bags in countries such as Italy, Belgium, and Ireland has decreased by 94% since 2008 due to taxation (Gürbüz and Yılmaz, 2018). Plastic bags are charged in stores in Switzerland, Sweden, Norway, Germany, and the Netherlands. China, the world's most populous country, is banning the use of plastic bags. The Chinese government has banned the production and sale of plastic bags thinner than 0.025 millimetres in supermarkets. China saves 37 million barrels of oil every year simply by charging for the bags (Gürbüz and Yılmaz, 2018). Plastic bags have been banned or are being banned in Israel, Canada, Botswana, South Africa, Uganda, Taiwan, Singapore, and Tanzania.

3. TURKISH PRACTICES ON USING PLASTIC BAGS

For a sustainable future, consumers must choose recyclable products. Cloth bags, paper bags, and net bags, which were once used, are gaining importance again in terms of reducing human health and environmental pollution. Associations, organisations, and municipalities have recently begun raising awareness on this issue. These campaigns, launched to emphasise the importance of human health and environmental pollution, have significantly influenced consumer bag choices. The harmful effects of plastic bags have been recognised in many cities around the world, and the production and use of plastic bags have been largely regulated. Turkey has only recently begun to

implement the necessary measures. In Turkey, the regulation on plastic shopping was published in the Official Gazette (Turkish Ministry of Environment, Urbanisation and Climate Change, 2021). Accordingly, since January 1, 2019, these bags have no longer been provided free of charge to users or consumers at points of sale, including those sold through distance contracts in Turkey, and they have not been included in any promotions or campaigns that would allow them to be provided free of charge. Only very lightweight plastic bags have been exempt from this practice.

4. WHAT DOES “DEGRADABILITY” MEAN?

Degradability is the capability of materials to decompose under the influence of bacteria, thermal (oxidative), or ultraviolet (photodegradable) conditions. For degradable polymers to be transformed into waste bags, they must be able to be shaped into films, possess sufficient tensile strength and elongation values, and have suitable puncture and tear resistance in terms of their physical and rheological properties (Thakore et al., 2001).

While degradable plastics used for waste bags must degrade quickly at the end of their lifespan, it is also significant that their mechanical properties stay unchanged during use. It is preferable for plastic bags to decompose within a reasonable timeframe (e.g., three or six months) and leave no toxic residue behind.

The term “biodegradable” refers to plastics that break down faster than commonly used plastics. However, the degradation process still takes time, depending on how and where the biodegradable plastic is disposed of. Biodegradable plastic breaks down naturally. This process does not pose as much pollution into the soil or water as non-biodegradable plastics (Figure 2).

Recyclable materials are used to produce biodegradable plastics. These materials differ from degradable plastics made from crude oil. Bioplastics are biopolymers that degrade faster than bio-based plastics. Biodegradable waste bags are considered environmentally friendly as they break down more quickly than plastic. They are made from materials that break down into water, carbon dioxide, and biomass.

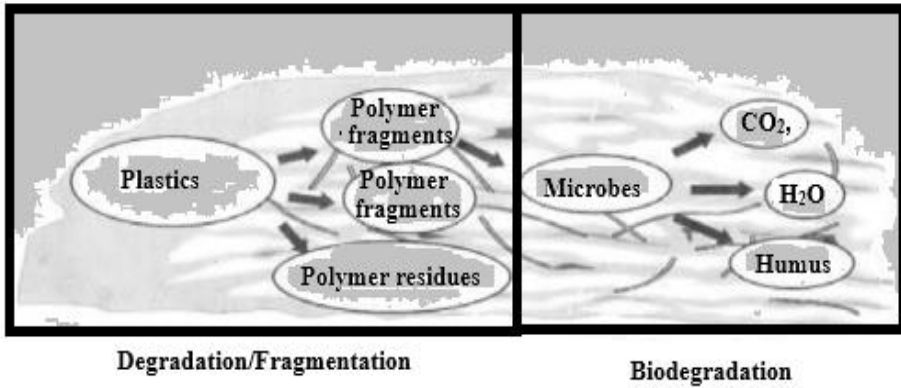


Figure 2: Degradation versus biodegradation (Mohee et al., 2008; Taylor, 2024)

The challenge with biodegradable materials is the temperature levels required for their breakdown. Biodegradable materials require very high temperatures to break down, and these temperatures are not always this high while in a landfill. This can cause biodegradable waste bags to last longer than advertised unless they are destined for an industrial facility.

Furthermore, biodegradable plastics offer many benefits. In this sense, switching to biodegradable plastics contributes to reducing the environmental footprint. Firstly, the production process for biodegradable plastics emits fewer carbon gases than raw plastics. The primary component of them is plants, and hence, when biodegraded, fewer carbon emissions are produced.

Secondly, biodegradable plastics have more natural ingredients because they do not contain colourants, fillers, or other additives that hinder recycling. This makes biodegradable plastics' recycling potential superior.

Many abiotic oxidation products, which have generally low molecular weight compounds, are utilised by microbes during the microbial degradation stage. A key aspect of this biodegradation stage is the constant progression of microorganisms. It is stated that the typical molecular weight of the oxidised polyolefin must be below 5000 Da to reach important biodegradation within a reasonable time (Liu et al., 2014). During the microbial degradation stage, the number of carbonyl groups decreases, and this reduction of carbonyl groups from the original oxidation products indicates the development of microorganisms. Ultimately, the microorganisms break down smaller fragments of the polyolefin, producing end products such as H₂O and CO₂ (Ammala et al., 2011).

Depending on the diverse methods adapted to process waste, various types of bags are required to help reduce waste. It is crucial to realise the changes between compostable, degradable, and biodegradable bags. For instance, compostable bags are intended to break down in the same way during approximately the same amount of time as the organic waste they contain. To be categorised as degradable or compostable, these bags must be verified for compliance with local standards such as the American Society for Testing Materials (ASTM), European Norm (EN), and others. Biodegradable waste bags differ from compostable waste bags (Figure 3). If something is biodegradable, it does not mean it can be thrown in a compost bin. Compostable waste bags are a different type of waste bag and are ideal for waste collection systems where you collect food waste or certain compostable materials separately (Figure 4).

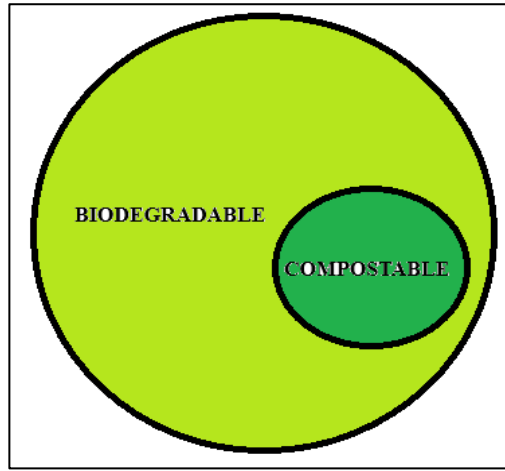


Figure 3: Biodegradable versus compostable (Elevate, 2023)

Because of the processes involved, an ideal waste bag could be the one that decomposes anaerobically and does not require ultraviolet light to activate degradation. Various decomposable waste bag technologies have recently approached this level, but have not yet produced a bag that could decompose in all landfills.

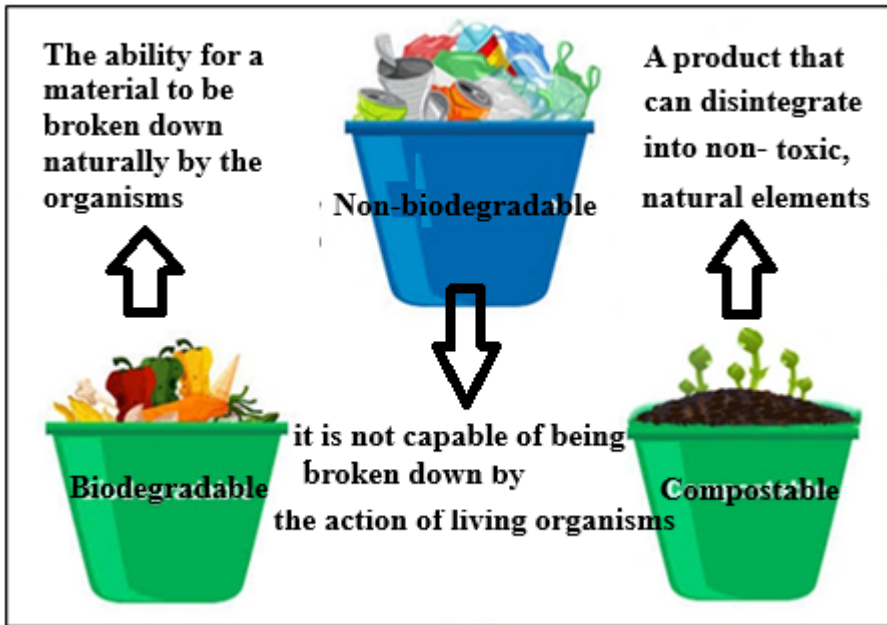


Figure 4: The difference between biodegradable, non-biodegradable, and compostable bags (Jarsking, 2025)

5. DEGRADABLE PLASTIC BAGS

Waste bags could be classified based on the materials they are made of, whether they are made of natural starch or synthetic polymers, or whether they are composed of a mixture of traditional polymers containing an additive to facilitate degradation (Abioye et al., 2019; Arvanitoyannis and Kasaveti, 2008; Dallaev et al., 2025; Yadav et al., 2021). Depending on their decomposition method, waste bags can be decomposed biologically, that is, by the action of microorganisms, or by heat, mechanical stress, ultraviolet light, or the need for water.

Five main types of degradable polymers are explained briefly below (James and Grant, 2005);

Biodegradable polymers

The main degradation mechanism is the enzymatic action of microorganisms. Degradation occurs over a period of time and could be measured with standard tests. Consequently, these polymers could decompose in CO₂, inorganic compounds, methane, H₂O, or biomass.

Compostable polymers

These polymers (Figure 5) could be degraded under composting conditions. To achieve this, the polymers must be degraded by microorganisms (bacteria, fungi, algae) and converted to water, inorganic compounds, CO₂, CH₄, or biomass under aerobic conditions, achieving a high level of mineralisation. This process must be compatible with the composting process.



Figure 5: Compostable plastic bags and dog waste bags (Government of the Australian Capital Territory, 2025)

Compostable waste bags, which are another type of ecological waste bag, are produced from natural plant starch. Therefore, these bags contain no toxic substances. They are easily broken down in the composting system by microbial activity.

The composition of compostable waste bags could be in various forms. However, the main categories include (1) thermoplastic starch-based polymers, which are derived from renewable resources such as cassava, corn, potatoes, or wheat and contain at least 90% starch; (2) polyesters produced from hydrocarbons (oil or gas); and (3) polyester blends, which blend thermoplastic starch with polyesters made from hydrocarbons.

Oxo-degradable polymers

These polymers (Figure 6) experience controlled degradation through the addition of "pro-degradant" additives, which could start and speed up the

degradation process. These polymers undergo faster oxidative degradation, started by natural sunlight, mechanical stress, or heat, and become brittle and erode under the effect of weathering (Figure 7).



Figure 6: Oxo-degradable bags (Sustainable, 2020)

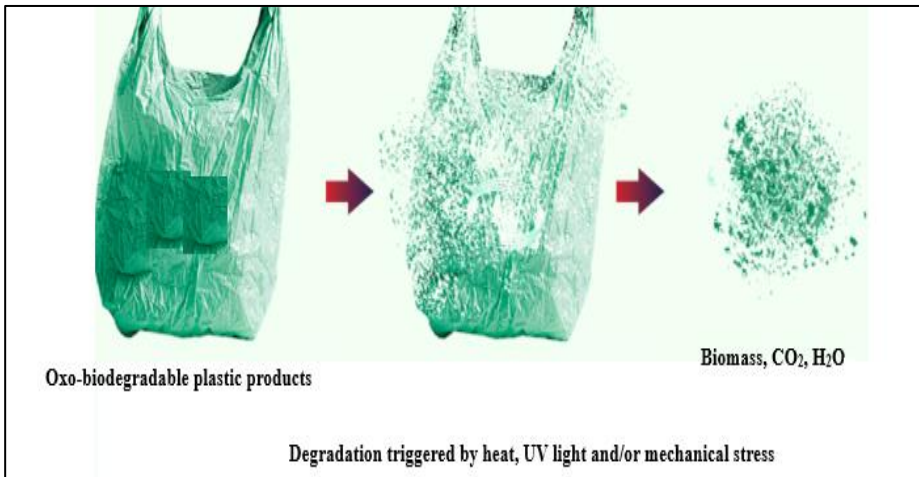


Figure 7: The degradation process of oxo-degradable polymer

The oxo-biodegradation is a term that includes the two-phase process of polyolefin degradation (Ammala et al., 2011). The first phase includes the reaction of the polymer with O_2 from the air. The carbon backbone of the polymer is oxidised, and this results in the development of minor molecular remains. The first oxo-degradation phase is an abiotic process. The involvement of O_2 into the carbon chain polymer backbone leads to the development of functional groups such as carboxylic or hydrocarboxylic

acids, esters, aldehydes, and alcohols. In this stage, hydrocarbon polymers alter their behaviour from hydrophobic to hydrophilic, so that the degraded polymer absorbs H_2O (Ammala et al., 2011). The second phase starts with the biodegradation of oxidation products by microorganisms, such as algae, bacteria, and fungi. These microorganisms ingest the oxidised carbon backbone fragments and produce H_2O , CO_2 , and biomass. In the first phase of oxo-biodegradation, oxidative degradation of the polymer could be enhanced by ultraviolet light, which means photo-degradation or, over time, by thermal degradation with heat. Early abiotic oxidation is an important step, as it specifies the rate of the whole process (Ammala et al., 2011).

Photo-degradable polymers

These polymers are degraded by ultraviolet light (Figure 8). This degradation occurs by breaking down the chemical bonds in the polymer or the chemical structure of the plastic. This process could be enhanced by adding ultraviolet-sensitive additives to the polymers.

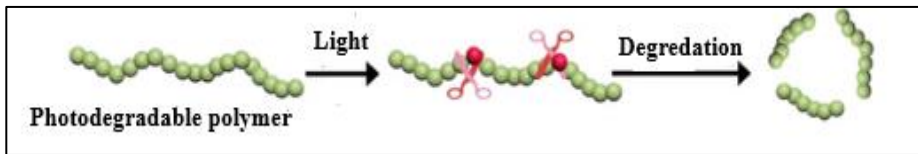


Figure 8: The degradation process of photo-degradable polymers

Water-soluble polymers

These polymers dissolve in water at a specific temperature and biodegrade upon interaction with microorganisms.

6. CONCLUSIONS

The long-standing "plastic bag ban" is gaining acceptance among more and more people. In particular, imposing a fee or tax on plastic bags in supermarkets has succeeded in diminishing the use of plastic bags. However, implementation of this ban still has a long way to go. For the plastic bag ban to have a lasting and profound impact in supporting the development of a circular economy, more effective and widespread implementation is needed.

The use of biodegradable bags could reduce the amount of landfill waste. Waste in biodegradable bags also decomposes faster than in traditional polyethylene bags. It is important for consumers to eliminate single-use

plastics from their kitchens to make their daily lifestyles more environmentally friendly. Therefore, it is important to be mindful of labels labelled "eco-friendly," "organic," or "green" on the packaging of products they purchase. The best way to determine whether a product's natural content and sustainability, in other words, whether it is worth adding to your daily routine, is to look for an accredited third-party certification label on the product packaging. These labels exist to help consumers choose environmentally friendly product options based on the amount of recycled material used in production. However, these labels should not be confused with the actual degradability standards of the material. Figure 9 shows common packaging symbols.



Figure 9: Green packaging symbols (Jarsking, 2025)

Hot food products (bread, soup, etc.) placed hot in a plastic bag could react with the heat, leading to dangerous consequences. Therefore, cloth bags, mesh bags, and paper bags are recommended as alternatives to plastic bags. While waste paper, the most essential raw material in the Turkish paper industry, can be reused in paper production, some fibre loss occurs with each use. Cloth bags, depending on the raw materials used in production, are made from either 100% cotton, which is completely biodegradable, or antibacterial and recyclable materials. Although a cotton bag could have a high CO₂ footprint in the production stage, which requires it to be used 50 to 150 times to have less impact on the environment in comparison with single-use plastic bags, a cloth bag can last for months or even years.

REFERENCES

- Abioye, A., Rotimi, D., Abioye, O., Fasanmi, O.O., 2019, Review of the Development of Biodegradable Plastic from Synthetic Polymers and Selected Synthesized Nanoparticle Starches, *Journal of Physics Conference Series*, 1378, 4 :042064,10.1088/1742-6596/1378/4/042064
- Ammala, A., Bateman, S., Dean, K., 2011, An Overview of Degradable and Biodegradable Polyolefins, *Progress in Polymer Science*, 36, 8, 1015-1049
- Arvanitoyannis, I.S., Kasaveti, A., 2008, 7 - Consumer Attitude to Food Packaging and The Market for Environmentally Compatible Products, Editor(s): Emo Chiellini, In *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Environmentally Compatible Food Packaging*, Woodhead Publishing, 161-181, <https://doi.org/10.1533/9781845694784.2.161>
- Behuria, P., 2021, Ban the (Plastic) Bag? Explaining Variation in the Implementation of Plastic Bag Bans in Rwanda, Kenya and Uganda. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 39, 8, 1791-1808. <https://doi.org/10.1177/2399654421994836>
- Bradt, G., 2015, The Trashy Side of Plastics: Volunteers Sift Sand in Search of Plastic Fragments Primary Tabs, <https://naturegroupie.org/story/trashy-side-plastics-volunteers-sift-sand-search-plastic-fragments-primary-tabs>
- British Plastic Federation, 2025, Oil Consumption, https://www.bpf.co.uk/press/Oil_Consumption.aspx
- Chan, R.Y., Wong, Y.H., Leung, T.K., 2008, Applying Ethical Concepts to the Study of ‘Green’ Consumer Behavior: An Analysis of Chinese Consumers’ Intentions to Bring Their Own Shop Bags, *Journal of Business Ethics*, 79, 469-481
- Clapp J, Swanston, L., 2009, Doing Away with Plastic Shopping Bags: International Patterns of Norm Emergence and Policy Implementation, *Environmental Politics*, 18, 3, 315-332
- Dallaev, R., Papež, N., Allaham, M. M., Holcman, V., 2025, Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. *Polymers*, 17, 14, 1981. <https://doi.org/10.3390/polym17141981>

- Elevate, 2023, Biodegradable or Compostable: What's the Difference?, <https://elevatepackaging.com/blog/biodegradable-vs-compostable>
- Environment Agency, 2006, Life Cycle Assessment Of Supermarket Carrier Bags: A Review Of The Bags Available in 2006, Report: SC030148, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291023/scho0711buan-e-e.pdf
- Government of the Australian Capital Territory, 2025, Oxo-Degradable Plastics, <https://yoursayconversations.act.gov.au/single-use-plastics/oxo-degradable-plastics>
- Gürbüz, H., Yılmaz, V., 2018, Investigation of Attitudes and Behaviours of University Students on the Use of Plastic Bags by Structural Equation Modelling, *Socioeconomics*, 26, 38, 135 - 149
- Haq, F., Kiran, M., Khan, I.A., Mehmood, S., Aziz, T., Haroon, M., 2025, Exploring the Pathways to Sustainability: A Comprehensive Review of Biodegradable Plastics in the Circular Economy, *Materials Today Sustainability*, 29, 101067, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.101067>.
- Hürriyet, 2016, Plastik poşetin zararları, <https://www.hurriyet.com.tr/kelebek/saglik/plastik-posetin-zararlari-40103352>
- James, K., Grant, T., 2005, LCA of Degradable Plastic Bags, In *Proceedings of the 4th Australian LCA Conference*, Australian Life Cycle Assessment Society, 23-25, Sydney
- Jarsking, 2025, Biodegradable Materials in Packaging Revolution, <https://www.jarsking.com/biodegradable-materials-in-packaging-revolution/>
- Jayaraman, K., Hasnah, H., Sung, G.B., Lin, S.K., 2011, Consumer Reflections on the Usage of Plastic Bags to Parcel Hot Edible Items: An Empirical Study in Malaysia", *Journal of Cleaner Production*, 19, 1527-1535
- Knoblauch, D., Mederake, L., Stein, U., 2018, Developing countries in the lead – What drives the diffusion of plastic bag policies?, *Sustainability*, 10, 6, 1994–1924

- Liu, X., Gao, C., Sangwan, P., Yu, L., Tong, Z., 2014, Accelerating the Degradation of Polyolefins Through Additives and Blending, *Journal of Applied Polymer Science*, 131, 18
- Macintosh, A., Simpson, A., Neeman, T., Dickson, K., 2020, Plastic Bag Bans: Lessons from the Australian Capital Territory, *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104638,
- Mohee, A., Unmar, G.D., Mudhoo, R., Khadoo, P., 2008, Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials, under aerobic and anaerobic conditions, *Waste Management*, 28, 1624–1629
- Nielsen, T.D., Holmberg, K., Strippel, J., 2019, Need a bag? A review of public policies on plastic carrier bags, Where, how and to what effect?, *Waste Management*, 87, 428–440
- Ohtomo, S., Ohnuma, S., 2014, Psychological Interventional Approach for Reduce Resource Consumption: Reducing Plastic Bag Usage at Supermarkets, *Resources, Conservation and Recycling*, 84, 57-65.
- Omondi, I., Asari, M., 2021, A study on Consumer Consciousness and Behavior to the Plastic Bag Ban in Kenya, *J Mater Cycles Waste Manag* 23, 425–435, <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01142-y>
- Sustainable, 2020, UK Organisations Call for Ban on Oxo-Degradable Plastics, <https://www.sustainableplastics.com/news/uk-organisations-call-ban-oxo-degradable-plastics>
- Taylor, M., 2024, What Are Biodegradable Garbage Bags?, <https://www.webmd.com/a-to-z-guides/what-are-biodegradable-garbage-bags>
- Thakore, S., Desai, S., Sarawade, B.D., Devi, S., 2001, Studies on Biodegradability, Morphology and Thermo-Mechanical Properties of LDPE/Modified Starch Blends, *European Polymer Journal* 37, 1, 151-160, 10.1016/S0014-3057(00)00086-0
- Turkish Ministry of Environment, Urbanisation and Climate Change, 2021, Control Regulation on Packaging Waste, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/06/20210626-18.htm>
- Yadav, A.N., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Dikilitaş, M., Abdel-Azeem, A.M., Ahluwalia, A.S., Saxena, A.K., 2021, Biodiversity, and biotechnological contribution of beneficial soil microbiomes for nutrient cycling, plant growth improvement and nutrient uptake,

Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 33, 102009,
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102009>

BÖLÜM 4

ENERJİ DEPOLAMADA FAZ DEĞİŞTİRME MALZEMELERİ: ZORLUKLAR, ÇÖZÜM STRATEJİLERİ VE ARAŞTIRMA EĞİLİMLERİ

Dr. Öğr. Üyesi Ünsal AYBEK¹

Dr. Öğr. Üyesi Bekir DOĞAN²

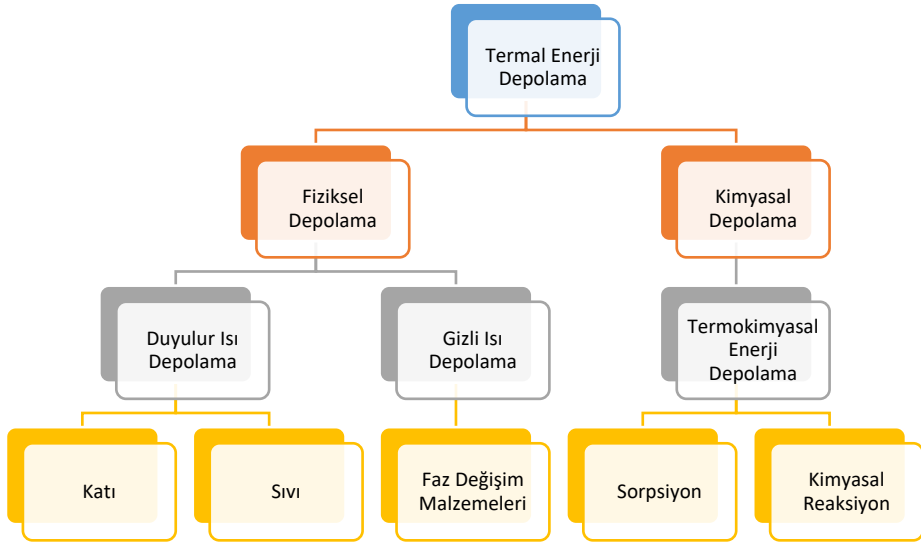
DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17923472>

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu , Elektrik ve Enerji Bölümü, Tokat, Türkiye. unsal.aybek@gop.edu.tr, orcid id: 0000-0003-3573-9385

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu , Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Tokat, Türkiye. bekir.dogan@gop.edu.tr, orcid id: 0000-0002-8986-7174

1. GİRİŞ

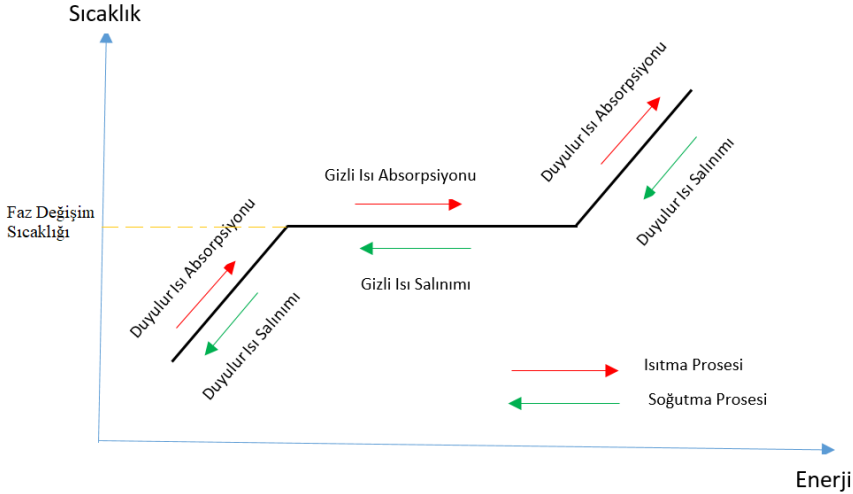
Termal enerji, birçok enerji dönüşüm ve kullanım sürecinde temel bir rol oynamaktadır ve termal enerji depolama (TES) teknolojileri, ısıyı depolayarak ve sonrasında kullanarak enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. TES, enerji üretimi ve talebindeki dalgalanmalar sırasında termal enerjinin etkin yönetimini sağlayarak özellikle binalar, endüstriyel süreçler ve yenilenebilir enerji sistemlerinde kritik bir rol oynar (Castillo Bonillo vd., 2025). TES yöntemleri; duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve kimyasal depolama olarak sınıflandırılır ve her yöntem, farklı termodinamik özellikler ve uygulama alanları sunar (Zhou vd., 2026). Bu yöntemlerin genel sınıflandırması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Termal enerji depolama yöntemlerinin genel sınıflandırması

Özellikle gizli ısı depolayan faz değişim malzemeleri (FDM’ler), katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçiş sırasında enerji emer veya serbest bırakır. FDM’ler, başlangıçta geleneksel depolama malzemeleri gibi sıcaklık değiştirir; ancak fark olarak, Şekil 2’de görüldüğü gibi faz geçişi sırasında neredeyse sabit sıcaklıklarda büyük miktarda gizli ısı depolayabilir ve serbest bırakabilir (Leong vd, 2019; Tyagi vd. 2022; Zhou vd., 2026). Bu özellikleri sayesinde, su, taş veya tuğla gibi duyulur depolama malzemelerine kıyasla birim hacim başına 5–14 kat daha fazla enerji depolayabilirler. Ayrıca, farklı FDM’ler,

ihtiyaç duyulan sıcaklık aralığında uygun erime gizli ısıasına sahip olacak şekilde tasarlanabilir (Sharma vd., 2009).



Şekil 2. Katı-sıvı FDM'nin ısı depolama ve açığa çıkarma sürecindeki sıcaklık değişimi

Katı-sıvı FDM'ler, enerji depolama ve açığa çıkarma süreçlerinde yüksek gizli ısı kapasitesi ve kontrollü hacim değişimi sağladıkları için mühendislik uygulamalarında en sık tercih edilen türdür. Bu malzemeler, ısı pompaları, pil ısı yönetimi, binaların termal kontrolü ve taşımacılık gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhou vd., 2026).

Katı-sıvı FDM'ler, kimyasal yapılarına göre organik, inorganik ve ötektik tipler olarak sınıflandırılır (Liu vd., 2023). İnorganik FDM'lerden hidratlı tuzlar, düşük maliyetleri, yüksek gizli ısı kapasiteleri ve uygun faz değişim noktaları ile öne çıkarken, faz ayrışması ve aşırı süpersoğuma gibi sorunlar uzun vadeli performansı sınırlayabilir (Zhi vd., 2023). Organik FDM'ler ise kimyasal olarak stabil, korozyona dayanıklı ve belirli faz değişim noktalarında etkin enerji depolama sağlar; ancak yanıcılıkları nedeniyle yüksek yangın güvenliği gerektiren alanlarda sınırlı kullanım sunar. Ötektik FDM'ler, birden fazla bileşenin belirli oranlarda birleşimiyle ayarlanabilir faz değişim noktaları ve yüksek gizli ısı kapasiteleri sunar; böylece hem organik hem de inorganik malzemelerin avantajlarını bir araya getirerek enerji depolama verimliliğini artırır.

Bu çalışma, ötektik FDM’lerdeki termodinamik sınırları ve güncel araştırma yaklaşımlarını inceleyerek, bu malzemelerin enerji depolama potansiyelini optimize etmeye yönelik stratejileri değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2. FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ: TES İÇİN GEREKLİ ÖZELLİKLER

FDM’ler enerji depolama ve açığa çıkarma süreçlerinde termal performansı belirleyen kritik unsurlardır. TES sistemlerinde kullanılacak FDM’lerin performansı, termofiziksel, kinetik ve kimyasal özellikler bakımından kapsamlı biçimde değerlendirilmelidir. Özellikle FDM’nin faz geçiş sıcaklığı, sistemin çalışma sıcaklığı ile uyumlu olmalı ve yüksek gizli ısı kapasitesine sahip olmalıdır; böylece belirli bir enerji depolama kapasitesi için gerekli depolama hacmi minimize edilir. Yüksek ısıl iletkenlik, şarj ve deşarj süreçlerinin hızını artırarak enerji depolama verimliliğini yükseltir.

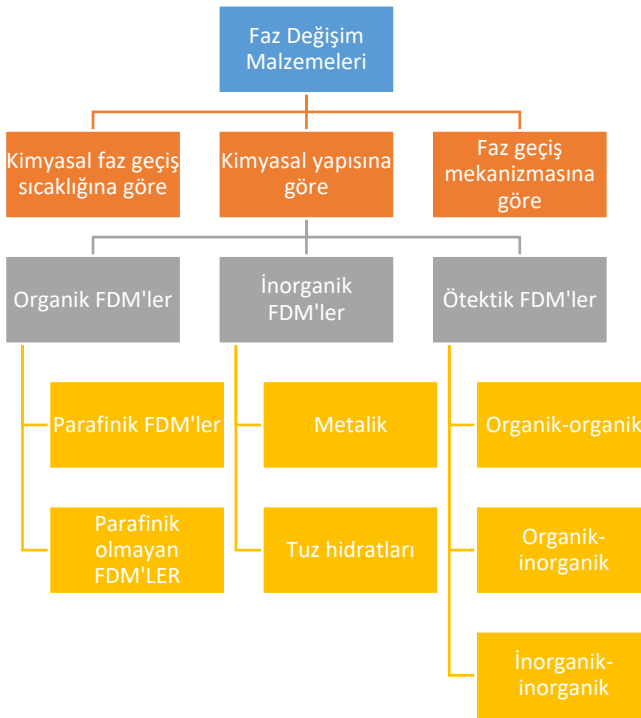
Donma ve erime sırasında faz dengesinin korunması, sistemin uzun vadeli kararlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Malzemenin yüksek yoğunluğa sahip olması depolama biriminin boyutunu küçültürken, faz değişimi sırasında meydana gelen hacim değişikliklerinin sınırlı olması ve düşük buhar basıncı göstermesi, malzemenin muhafazası ve sistem tasarımında karşılaşılabilecek sorunları azaltır. Kinetik özellikler açısından, süpersoğuma oluşmaması ve yeterli kristalleşme hızına sahip olunması, depolanan ısının etkin şekilde geri kazanılmasını sağlar; bu durum özellikle tuz hidratları için önemlidir. Kimyasal açıdan FDM’lerin uzun dönem stabil olması, yapı malzemeleri ile uyumlu kalması ve toksik, yanıcı veya patlayıcı risk içermemesi gerekir. Ekonomik açıdan ise malzemenin bol bulunabilir, kolay temin edilebilir ve maliyet açısından uygun olması, büyük ölçekli TES uygulamalarında belirleyici bir faktördür (Sharma vd., 2009).

3. FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Faz değişim malzemeleri, enerji depolama ve açığa çıkarma süreçlerinde faz geçiş mekanizması ve faz değişim sıcaklığı açısından değerlendirilir. Başlıca geçişler, katı–sıvı, sıvı–gaz ve katı–katı olarak sınıflandırılır; katı–sıvı

geçişler, yüksek gizli ısı kapasitesi ve kontrollü hacim değişimi nedeniyle TES uygulamalarında en sık tercih edilir.

Bu termodinamik özellikler, uygulama sıcaklığı aralıkları ve enerji depolama gereksinimleri ile uyumlu olmalıdır. FDM'lerin farklı uygulamalara uygun malzeme seçimini kolaylaştırmak amacıyla, kimyasal yapılarına göre organik, inorganik ve ötektik malzemeler olarak sınıflandırılması yaygındır (Şekil-3). Böylece her sınıfın sunduğu avantajlar ve sınırlılıklar dikkate alınarak, uygulamaya en uygun FDM belirlenebilir (Liu vd., 2023; Zhi vd., 2023).



Şekil 3. Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması

3.1. Kimyasal Yapılarına Göre Faz Değişim Malzemeleri

Organik FDM'ler

Organik faz değişim malzemeleri genellikle parafin mum veya alkol, ester veya asit fonksiyonel grupları içeren non-parafin bileşiklerinden oluşur. Parafinik FDM'ler yalnızca lineer karbon zincirleri şeklinde hidrokarbonlardan oluşurken, non-parafinik FDM'ler yapısına elektronegatif elementler dahil

eder. Saf parafin, ağırlıklı olarak hidrojen ve yaklaşık 14 ila 40 karbon atomu içeren lineer karbon zincirlerinden oluşur; parafin mumları ise 8 ila 15 karbonlu hidrokarbon zincirlerinden meydana gelir.

Hayvansal yağlar ve bitkisel yağlar gibi doğal hammaddeler, non-parafinik FDM'lere dönüştürülebilir. Bu doğal kaynaklı malzemeler, biyolojik olarak parçalanabilir, toksik olmayan ve bazı sentetik bileşiklere kıyasla nispeten düşük yanıcılık gibi çevresel avantajlar sunar. Ayrıca, faz ayrımı olmadan tekrarlanabilir bir erime süreci gösterirler, uygun nükleer özelliklere sahiptir, minimal süpersoğuma ve ihmal edilebilir hacim değişimleri sergilerler. Bunlara ek olarak, birçok yapı malzemesi ile uyumludur, maliyet açısından etkilidir ve geri dönüştürülebilir (Wong vd., 2023).

Organik FDM'ler muadillerine kıyasla kimyasal olarak daha reaktiftir ve daha pahalıdır. Yine de, organik FDM'ler toksik olmamaları, dayanıklılıkları, stabiliteleri ve süpersoğuma göstermemeleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Çok sayıda organik FDM, gizli ısı depolama uygulamaları için değerlendirilmiş olup; bunlar arasında parafin, lipidler, polietilen glikoller (PEG'ler) ve ikili veya üçlü karışımlar bulunmaktadır. Ancak, organik FDM'lerin kullanımını nispeten düşük ısıl iletkenlik ve yoğunluk sınırlamaktadır (Sharma vd. ,2009; Wong vd., 2023). Tablo 1'de bazı yaygın organik FDM'lerin faz geçiş sıcaklıkları ve gizli ısı kapasiteleri karşılaştırmalı olarak verilmiş olup, malzemelerin performans değerlendirmesinde önemli bir referans sağlar.

Tablo 1. Bazı organik FDM'lerin termal özellikleri (Soibam, 2017).

20 °C'deki bir malzeme	Faz geçiş sıcaklığı (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)
Heksadekan	18,1	236
Heptadekan	21,9	214
Oktadekan	28,1	244
Nonadekan	32,0	222
Eikosan	36,6	248
Heneikosan	40,2	213
Dokosan	44,0	252
Trikosan	47,5	234

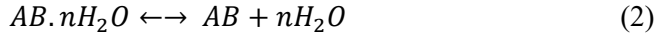
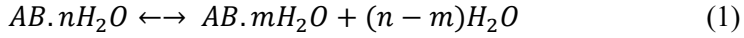
n-alkanlar	Tetrakosan	50,6	255
	Pentakosan	53,5	238
	Heksakosan	56,3	250
	Oktakosan	61,2	254
	Triakontan	65,4	252
Yağ asitleri	Kaprilik asit	16,1	144,2
	Kaprik asit	31,5	155,5
	Laurik asit	43,6	184,4
	Miristik asit	57,7	189,7
	Palmitik asit	61,3	197,9
	Stearik asit	66,8	259,0
Polialkoller	Pentaeritritol (PE)	187–188	269-289
	Pentagliserin (PG)	81–89	193-269
	Neopentilglükol (NPG)	40–48	110-131
	Aminoglikol (AMPL)	78	233.6
	Tris-amino-metan (T-AM)	134.5	285

İnorganik FDM'ler

İnorganik faz değişim malzemeleri (FDM) esas olarak metal alaşımları, inorganik bileşikler ve tuz hidratları içerir. Çoğu metal alaşımı, yüksek erime noktaları nedeniyle düşük sıcaklık enerji depolama alanında sınırlı bir kullanıma sahiptir. İnorganik bileşikler genellikle karbon içermeyen bileşikler ve bazı karbon oksitlerini ifade eder. Çoğu inorganik bileşiğin düşük gizli ısıya sahip olması ve insan sağlığına zararlı olması nedeniyle soğuk depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılması zordur. En ucuz ve en yaygın inorganik bileşik ise buzdur; yüksek gizli ısı, sabit faz değişim sıcaklığı, yüksek özgül ısı ve çevre dostu olma gibi avantajlara sahiptir.

Tuz hidratları düşük sıcaklık alanında belirli bir uygulama potansiyeline sahiptir. Genel kimyasal formülü $AB \cdot n(H_2O)$ olup, burada n su molekülü sayısını, AB ise metal karbonat, sülfür, fosfat, asetat veya klorürleri temsil eder. Tuz hidratının faz dönüşüm süreci esas olarak dehidratasyon ve hidratasyon ile gerçekleşir ve bu süreçler denklem (1) ve (2) ile açıklanabilir. Tuz hidratının dehidratasyonu veya erimesi sırasında kristal suyun bir kısmı

veya tamamı kaybolur. Tuz hidratı, yüksek gizli ısı ve ısı iletkenlik, küçük hacim değişimi, yüksek bulunabilirlik ve düşük maliyet gibi özellikleri ile ideal bir inorganik düşük sıcaklıklı faz değişim malzemesidir. Ancak düşük özgül ısı, kolay korozyon, düşük süper soğuma, erimede tutarsızlık ve faz ayrışması gibi dezavantajları da vardır (Li vd., 2021).



Tablo 2’de bazı yaygın inorganik FDM’lerin faz geçiş sıcaklıkları ve gizli ısı kapasiteleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2. Bazı inorganik FDM’lerin termal özellikleri (Soibam, 2017).

	20 °C’deki bir malzeme	Faz geçiş sıcaklığı (°C)	Gizli (kJ/kg)	Isı
Tuz Hidratları	CaCl ₂ ·12H ₂ O	2.8	174	
	LiNO ₃ ·2H ₂ O	30	296	
	LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	189	
	KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	33	173	
	LiBr·2H ₂ O	34	124	
	FeCl ₃ ·H ₂ O	37	223	
	CoSO ₄ ·7H ₂ O	40,7	170	
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47	153	
	Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	47	155	
	Ca(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	51	104	
	FeCl ₃ ·2H ₂ O	56	90	
	CH ₃ COONa·3H ₂ O	58	265	
	MgCl ₂ ·4H ₂ O	58	178	
	NaAl(SO ₄) ₂ ·10H ₂ O	61	181	
	NaOH·H ₂ O	64,3	273	
	Al(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	72	155	
	MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	167	
Metalik bileşikler	Galyum	30	80,3	
	Cerrolow ötektik alaşımı	58	90,9	
	Bi–Cd–In	61	25	
	Cerrobend ötektik alaşımı	70	32,6	
	Bi–Pb–In	70	29	
	Bi–In	72	25	

Ötektik FDM’ler

Ötektik faz değişim malzemeleri, en az iki farklı faz değişim malzemesinin kombinasyonunu ifade eder ve genellikle organik-organik, inorganik-inorganik veya inorganik-organik malzemelerden oluşur. Bileşenlerin ayrılması zor olduğundan, ötektik faz değişim malzemeleri donma sürecinde karışık kristal oluşturabilir. Ötektik faz değişim malzemelerinin bir

diğer önemli özelliği ise, erime sürecinde tüm bileşenlerin eşzamanlı olarak sıvıya dönüşmesidir (Li vd., 2020).

Genel olarak, ötektik su-tuz çözeltileri, 0 °C'nin altındaki sıcaklıklarda enerji depolamak için kullanılır. Organik-metalik katı FDM'ler ise bir tür organometalik tabakalı perovskitler sınıfına girer. Bu malzemeler genellikle organik ve inorganik katmanların ardışık olarak sıralandığı kristal bir yapıya sahiptir. Ötektik karışımların en önemli avantajı, erime noktalarının ayarlanabilmesi sayesinde, yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'lerin kullanılmasını mümkün kılmasıdır; bu da onları güneş enerjisi uygulamaları için uygun hale getirir. Ötektik bileşiklerin erime sıcaklıkları ve gizli erime enerjileri, kullanılan iki temel FDM ile karşılaştırılabilir düzeydedir (Wong vd., 2023).

Ötektik FDM'ler, farklı organik ve inorganik bileşenlerin bir araya gelmesi sayesinde, tek başına kullanıldığında sınırlı performans gösteren malzemelerin termal özelliklerini optimize etme imkânı sağlar ve tasarımcılar için uygulamaya özgü çözümler geliştirmede esneklik sağlar. Tablo 3, çeşitli yaygın ötektik FDM'lerin termal özelliklerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tablo 3. Bazı ötektik FDM'lerin termal özellikleri (Soibam, 2017).

20 °C'deki bir malzeme	Faz geçiş sıcaklığı (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
Trietilol etan + su + üre	13,4	160
CaCl ₂ +MgCl ₂ 6H ₂ O	25	95
CH ₃ CONHH ₂ +NH ₂ CONH ₂	27	163
Trietilol etan + üre	29,8	218
CH ₃ COONa 3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂	30	200,5
NH ₂ CONH ₂ +NH ₂ NO ₃	46	95
Mg(NO ₃) ₃ 6H ₂ O + NH ₄ O ₃	52	125,5
Mg(NO ₃) ₃ 6H ₂ O + MgCl ₂ 6H ₂ O	59	132,2
Mg(NO ₃) ₃ 6H ₂ O + MgBr ₂ 6H ₂ O	66	168
NH ₂ CONH ₂ + NH ₄ Br	76	151

4. FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN UYGULAMALARI: SICAKLIK ARALIKLARI AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Faz değişim malzemeleri (FDM'ler), hem ısı depolama hem de ısı koruma amacıyla farklı mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu iki kullanım arasındaki temel fark, uygulamanın gerektirdiği ısı iletkenlik değeridir. Isı koruma uygulamalarında düşük ısı iletkenlik avantaj sağlayabilirken, depolama sistemlerinde düşük iletkenlik, depolanan enerjinin yeterince hızlı bırakılmasını engelleyebildiği için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle FDM uygulamaları genel olarak düşük sıcaklıklı (LT) ve yüksek sıcaklıklı (HT) süreçler olarak sınıflandırılır.

Düşük sıcaklık aralığında çalışan ısı enerjisi depolama sistemleri, genellikle 20 °C'nin altındaki uygulamaları kapsar. Bu sıcaklık bölgesinde kullanılan FDM'ler; gıda, farmasötik ürünler, biyolojik örnekler ve tıbbi malzemelerin taşınması ve korunması gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca hava koşullandırma, soğutma ve endüstriyel soğuk depolama sistemlerinde de önemli rol oynarlar. Düşük maliyeti, kimyasal açıdan güvenli yapısı ve faz değişim sıcaklığının uygulamalarla uyumlu olması nedeniyle su, bu uygulamalar için en çok kullanılan FDM'dir. Bununla birlikte, suyun faz değişim sıcaklığının uygun olmadığı durumlarda farklı organik ve inorganik bileşikler kullanılmakta olup, bu malzemelerde temel seçim kriteri faz değişim sıcaklığının gereksinimle uyumudur.

LT uygulamalarda FDM kullanımının geliştirilmesini zorlaştıran birtakım teknik sorunlar bulunmaktadır. Bunlar arasında tekrar eden erime-donma döngülerinde malzemenin bileşenlerinin ayrılmasıyla ortaya çıkan faz ayrışması; donma sıcaklığına ulaşmasına rağmen kristalleşmenin başlamaması sonucu oluşan aşırı soğuma; uzun süreli döngülerde kimyasal kararlılığın bozulması ve metal yüzeylerde korozyon gibi problemler sayılabilir. Ayrıca FDM'lerin toksik olmaması ve yangınlık riskinin düşük olması, özellikle gıda ve sağlık gibi hassas sektörlerde kritik öneme sahiptir. Bu nedenle malzeme güvenliği, depolama kapasitesi kadar önemli bir değerlendirme ölçütüdür.

Düşük sıcaklık uygulamaları için uygun FDM'ler literatürde organik, inorganik ve ötektik sistemler olmak üzere üç sınıfta toplanmaktadır. Organik FDM'ler; parafin türevleri, çeşitli alkoller, alkanonlar, yağ asitleri ve bu bileşiklerin karışımlarını içermektedir. İnorganik sistemlerde ise su ve çeşitli

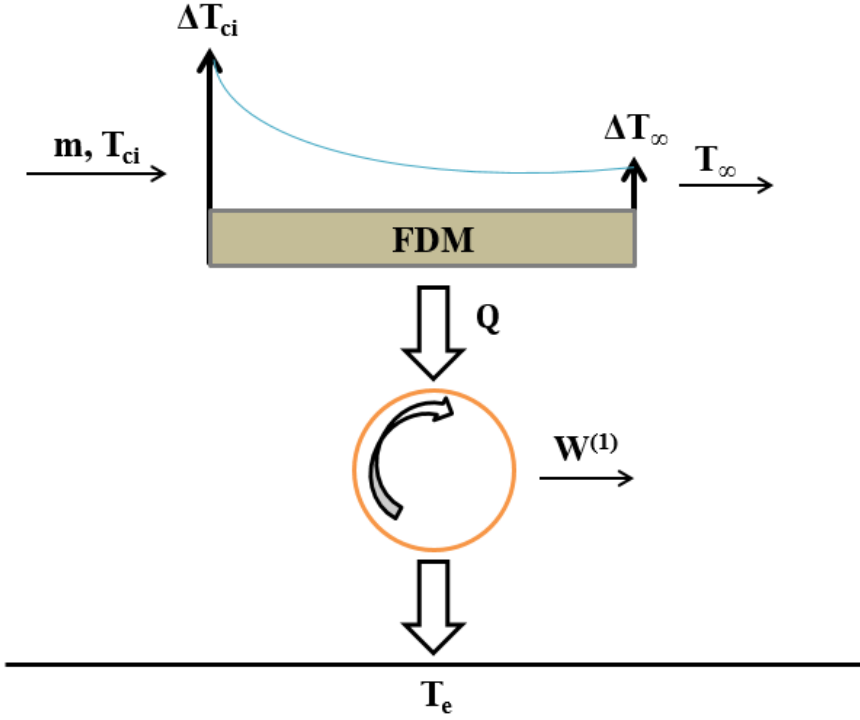
tuzların oluşturduğu ötektik çözeltiler öne çıkmaktadır. Ötektik FDM'ler genellikle belirli oranlarda karıştırılan organik bileşiklerden oluşur; tetradekan-oktadekan veya pentadekan-heneikosan karışımları bu gruba örnek olarak verilebilir.

Yüksek sıcaklık aralığı ise 80–600 °C olarak tanımlanır. 20–80 °C aralığındaki faz değişim uygulamaları günümüzde geniş ölçüde ticari hâle gelmiş olmasına karşın, 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda uygulamalar daha sınırlıdır ve çeşitli teknik zorluklar barındırır. Bununla birlikte, 900–1000 °C'ye kadar erime sıcaklığına sahip FDM'lerin yoğunlaştırılmış güneş enerjisi gibi yüksek sıcaklıklı enerji depolama teknolojileri için önemli bir potansiyel sunduğu bilinmektedir. Ancak bu yüksek sıcaklık malzemelerine dair fiziksel özelliklerin eksik raporlanması, uygulamaya dönük tasarım çalışmalarını kısıtlamaktadır (Sevault vd., 2017).

Sonuç olarak, FDM'ler hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda enerji depolama süreçlerinde önemli avantajlar sağlayabilen malzemelerdir. Ancak bu potansiyelden tam olarak yararlanılabilmesi için malzemelerin termal performansı, kimyasal kararlılığı, güvenlik profili ve uzun dönem davranışlarının dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Avantajlarına rağmen farklı FDM türlerinin belirli uygulama alanlarında sınırlılıkları da bulunduğundan, uygun malzemenin seçimi uygulamanın gereksinimlerine göre titizlikle yapılmalıdır.

5. FAZ DEĞİŞTİRME MALZEMELERİNİN TERMODİNAMİKSEL MODELİ

Gizli ısı depolama sisteminin fiziksel modeli, bir FDM ve bir ısı transfer akışkanından oluşur (Şekil 4). Akışkan, enerjiyi depolamak veya geri kazanmak için FDM içerisinden akar. Enerji yükleme (şarj) sürecinde sıcak akışkan FDM'den geçer ve akışkanın taşıdığı ısı enerji FDM'de depolanır. Enerji boşaltma (deşarj) sürecinde ise soğuk akışkan FDM'den geçerek depolanan ısı enerjiyi FDM'den çeker ve ilgili alıcıya iletir.



Şekil 4. Tek FDM'li bir sistemin fiziksel modeli

Analizi kolaylaştırmak için, FDM için yığılmış model ve ısı transfer akışkanı için dağılımlı model kullanılır. Yığılmış model, FDM'nin sıcaklığının erime noktası değerinde sabit kalan bir rezervuar olduğunu varsayar. Dağılımlı model ise ısı transfer akışkanının sıcaklığının yalnızca akış yönü boyunca değiştiğini ve ısıнын akışkana girip çıkmasıyla belirlendiğini kabul eder.

Bu tür gerçek bir sistem; FDM'nin ısı-fiziksel özellikleri, depolama modülünün geometrisi ve boyutu, ısı transfer akışkanının ısı-fiziksel özellikleri ve akışkan giriş sıcaklıkları ile akışkan debisi gibi işletme koşullarıyla tanımlanır. FDM için yığılmış model varsayımı altında duyulur ısı etkileri ihmal edilir ve bunun sonucu olarak ısı transfer akışkanının çıkış sıcaklıkları zamandan bağımsız olur (Gong & Mujumdar, 1997).

Isı transfer akışkanı için dağılımlı modele dayanan basit bir FDM sistemde enerji yükleme sürecinin termodinamik analizi aşağıdaki denklemlerle açıklanır:

FDM'de depolanan enerji oranı iki şekilde ifade edilebilir :

$$Q = h_c A \frac{T_{ci} - T_{\infty}}{\ln\left(\frac{T_{ci} - T_m}{T_{\infty} - T_m}\right)} \quad (3)$$

$$Q = m_c c_F (T_{ci} - T_{\infty}) \quad (4)$$

Denklem (5) ve (6) ile ısı transfer akışkanının çıkış sıcaklığı elde edilebilir:

$$T_{\infty} = T_m + (T_{ci} - T_m)e^{-N_c} \quad (5)$$

Bu durumda,

$$N_c = \frac{h_c A}{m_c c_F} \quad (6)$$

Burada N_c , ısı transfer birimlerinin sayısıdır. FDM’de depolanan ekserji oranı ise denklem (7) ile ifade edilir;

$$W_c^1 = m_c c_F (1 - e^{-N_c}) (T_{ci} - T_m) \left(1 - \frac{T_e}{T_m}\right) \quad (7)$$

Isı transfer akışkanının FDM ile temas etmeden önce sahip olduğu toplam ekserji oranı denklem (8) ile açıklanabilir;

$$W_T = m_c c_F \left[T_{ci} - T_e - T_e \ln\left(\frac{T_{ci}}{T_e}\right) \right] \quad (8)$$

FDM’de depolanan ekserji oranının, ısı transfer akışkanının FDM ile temas etmeden önce sahip olduğu toplam ekserji oranına oranı olarak tanımlanan şarj işleminin ekserji verimliliği ise şöyledir;

$$\Phi_c^1 = \frac{W_c^1}{W_T} = \frac{(1 - e^{-N_c}) (T_{ci} - T_m) \left(1 - \frac{T_e}{T_m}\right)}{T_{ci} - T_e - T_e \ln\left(\frac{T_{ci}}{T_e}\right)} \quad (9)$$

Bağımsız parametrelerin sayısını azaltmak için analizlerde kullanılmak üzere aşağıdaki boyutsuz parametreler tanımlanmıştır;

$$\omega = \frac{W}{m_c c_F T_e} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{T}{T_e} \quad (11)$$

Bu boyutsuz parametreler kullanıldığında, denklem (9) şu hale gelir;

$$\Phi_c^1 = \frac{\omega_c^1}{\omega_T} = \frac{(1 - e^{-N_c})(\theta_{ci} - \theta_m) \left(1 - \frac{1}{\theta_m}\right)}{\theta_{ci} - 1 - \ln(\theta_{ci})} \quad (12)$$

$\partial \Phi_c^1 / \partial \theta_m = 0$ 'ın çalıştırılması, şu sonucu verir:

$$\theta_m = (\theta_{ci})^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Bu optimal erime sıcaklığına denklem (13) karşılık gelen optimal ekserji verimliliği ise denklem (14) ile bulunabilir:

$$\Phi_{c,max}^1 = \frac{(1 - e^{-N_c}) \left[(\theta_{ci})^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^2}{\theta_{ci} - 1 - \ln(\theta_{ci})} \quad (14)$$

Tek FDM'li sistem boşaltma işleminde ısı transfer akışkanının boyutsuz çıkış sıcaklığı denklem (15) ile ifade edilir;

$$\theta_{do}^1 = \theta_m + (\theta_m - \theta_{di})e^{-N_d} \quad (15)$$

Boşaltma işlemi sırasında ısı transfer akışkanının kazandığı boyutsuz ekserji oranı ise şöyledir;

$$\omega_d^1 = \left[\theta_{do}^1 - \theta_{di} - \ln \left(\frac{\theta_{do}^1}{\theta_{di}} \right) \right] \quad (16)$$

FDM tarafından salınan boyutsuz ekserji oranı denklem (17) ile hesaplanır;

$$\omega_{Td}^1 = (1 - e^{-N_d})(\theta_m - \theta_{di}) \left(1 - \frac{1}{\theta_m} \right) \quad (17)$$

Boşaltma işleminin ekserji verimliliği, ısı transfer akışkanının kazandığı ekserji oranının FDM tarafından boşaltma işlemi sırasında salınan ekserji oranına oranı olarak tanımlandığından, denklem (18) ile bulunabilir;

$$\theta_d^1 = \frac{\omega_d^1}{\omega_{Td}^1} = \frac{\theta_{do}^1 - \theta_{di} - \ln \left(\frac{\theta_{do}^1}{\theta_{di}} \right)}{(1 - e^{-N_d})(\theta_m - \theta_{di}) \left(1 - \frac{1}{\theta_m} \right)} \quad (18)$$

Bu verimin bir optimum noktası yoktur. Bunun yerine, N_d ve θ_m arttıkça monotonik olarak artar. Φ_d^1 ; N_d ve θ_{di} değerlerinden bağımsız olarak, $\theta_m \rightarrow \infty$ (yani $T_{ci} \rightarrow \infty$) olduğunda 1 limitine ulaşır (Gong & Mujumdar, 1997).

6. KISITLAR VE YENİLİKÇİ ÇÖZÜMLER

Faz değişim malzemeleri, enerji depolama, ısı yönetimi ve termal kararlılık uygulamalarında önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak literatürde bu malzemelerin performansını sınırlayan bir dizi termodinamik, yapısal ve kinetik kısıt tanımlanmıştır. Bu sorunlar özellikle düşük ısıl iletkenlik, faz değişimi sırasında yaşanan sızıntı, uzun döngülerde kararlılık kaybı, katkı eklenmesiyle gizli ısı kapasitesinin azalması ve bazı inorganik sistemlerde süper soğuma olarak öne çıkar. Son yıllardaki çalışmalar, bu sınırlamaların malzemenin yapısal doğasından kaynaklandığını ve çözümlerin ancak kompozit mimarilerin, nano-yapısal düzenlemelerin ve hibrit malzeme tasarımlarının entegrasyonu ile etkili olabildiğini göstermektedir (Radouane,

2022; Said vd., 2024; Hyun vd., 2025). Bu bölümde literatür, kısıtların bilimsel temelleri ve çözüm stratejileri çerçevesinde değerlendirilmiştir.

6.1. Faz Değiştiren Malzemelerde Termodinamiksel ve Yapısal Kısıtlar

FDM'lerin performansını sınırlandıran temel etkenlerden biri, özellikle organik FDM'lerde belirgin şekilde düşük olan ısı iletkenliğidir. Parafin ve benzeri organik yapıların ısı iletkenliği tipik olarak $0.2\text{--}0.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ aralığındadır; bu değer faz geçişi sırasında beklenen ısı akısını karşılamak için yetersizdir (El-Idi vd., 2021). Düşük iletkenlik, yalnızca enerji depolama verimini sınırlamaz, aynı zamanda sıcaklık gradyentlerinin oluşmasına neden olarak sistemde termal dengesizlik yaratır. Son yıllarda yapılan nano-dolgu ve hibrit tasarım çalışmaları, düşük iletkenliğin sınırlayıcı etkilerini azaltmak için etkili stratejiler önermektedir (Zachairas vd., 2025; Moein-Jahromi vd., 2022).

Bir diğer yapısal sınırlama, faz değişimi sırasında ortaya çıkan hacimsel kararsızlık ve sızıntıdır. FDM'in sıvı faza geçtiğinde yapısal bütünlüğünü koruyamaması, özellikle matris içermeyen saf sistemlerde uygulama güvenliğini azaltır. Sızıntıyı önlemek için yaygın olarak tercih edilen yöntem, FDM'leri erime noktasının üzerinde bile destekleyici bir matriste tutan köpük stabilizasyonudur (Trigui vd., 2014). Form Kararlı bir FDM'de, FDM destekleyici matris içinde erime ve donma sırasında yüklenir. Bu, sızıntıyı önler ve tüm sistem katı fazda tutulur (Paul vd., 2022). Yeni çalışmalar, 3B karbon iskelet ve polimer destekli kompozitlerde sızıntıyı önleyerek yapısal stabiliteyi artırdığını bildirmiştir (Das & Stachewicz, 2024; Liu vd., 2023).

Katkı maddeleri ile ısı iletkenlik artırılmaya çalışıldığında gizli ısı kapasitesindeki azalma literatürde “performans dengesi” sorunu olarak değerlendirilir. Karbon nanotüpleri, grafen nanoplateletleri ve genişletilmiş grafit gibi katkılar ısı iletkenliği büyük ölçüde artırsa da FDM hacmini azaltarak faz değişimi entalpisini düşürebilir (Shang vd., 2022). Yeni nanokompozit tasarımları, düşük katkı oranlarıyla iletkenliği artırırken gizli ısı kaybını minimuma indirerek bu dengeyi optimize etmektedir (Amberkar & Mahanvar, 2022).

İnorganik FDM'lerde, özellikle tuz hidratlarında süper soğuma ve faz ayrışması önemli bir kısıttır. Aglomerasyon, uzun döngülerde kimyasal kararsızlık ve hidratlaşma davranışındaki bozulmalar, uygulama sıcaklık

aralığını kontrol etmeyi güçleştirir. Güncel hibrit stratejiler, metalik ve inorganik nanoparçacık katkıları ile süper soğumayı azaltarak çevrimsel kararlılığı artırmaktadır (Man vd., 2023).

6.2. Literatürde Geliştirilen Yenilikçi Çözümler ve Bilimsel Yaklaşımlar

Enerji depolama uygulamalarında FDM'lerin performansını sınırlayan kısıtlar, araştırmacıları yalnızca katkı ekleme yöntemlerinden uzaklaştırmış ve FDM'lerin çok ölçekli bir kompozit sistem olarak yeniden tasarlanması gerektiği yönünde ortak bir anlayış oluşturmuştur. Literatürdeki yenilikçi çözüm stratejileri hem nano-yapısal hem de makro-yapısal tasarım yaklaşımlarını içermektedir. Bu bölümde, literatürde öne çıkan bazı yenilikçi çözümler aşağıda sunulmuştur:

Karbon Temelli Isı İletim Ağları ve Nanomalzemelerle FDM Performansının Artırılması

Faz değişim malzemelerinin termal enerji depolama uygulamalarındaki yaygın kullanımı, düşük ısı iletkenliği ve şekil stabilitesi sorunları ile sınırlanmaktadır. Bu sorunları çözmek için, 3B gözenekli karbon iskeletleri ve karbon nanomalzemeleri, FDM'lerde hem yüksek ısı iletimi hem de sızıntının önlenmesini sağlayan etkili stratejiler olarak kullanılmaktadır. Karbon tabanlı makro ve nano yapılar, sürekli ısı iletim ağları oluşturarak termal ve mekanik performansı artırmakta, aynı zamanda FDM moleküllerinin stabilize edilmesine yardımcı olmaktadır.

Li vd. (2018) çalışmasında, hiyerarşik üç boyutlu (3B) indirgenmiş grafen gözenekli karbon (rGO) destekli FDM'ler kullanılarak hem faz değişim entalpisi hem de ısı iletkenliği eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Kompozitler, grafen oksit@metal-organik çerçeve (GO@MOF) şablonunun karbonlaştırılması yoluyla sentezlenmiş; MOF'ler hiyerarşik gözenekli karbonlara, GO ise yüksek ısıl performanslı rGO'ya dönüşmüştür. Bu yapı, kapiler kuvvet ve yüzey gerilimi sayesinde FDM'leri stabilize etmiş ve rGO ile FDM arasındaki etkileşim arayüz ısıl direncini azaltarak yüksek ısı iletkenliği sağlamıştır. rGO@MOF-5-C destekli kompozitler, 0,60 W/m·K ısı iletkenliği ve 168,7 J/g faz değişim entalpisi ile sırasıyla %27,7 ve %18,5 artış göstermiştir.

Tao vd. (2023), makroporöz rGO aerogellerini emülsiyon şablonlama ve hidrotermal indirgeme ile 3B gözenekli iskeletler hâline getirmiştir. Bu aerogeller, vakum altında eriyik parafin (PW) ile birleştirilerek şekil-stabil FDM'ler elde edilmiştir. Kompozitler, %95,61 yükleme oranı ile 179,94 J/g faz değişim entalpisi ve 0,412 W/m·K ısı iletkenliği sergileyerek saf PW'ye göre %54,89 daha yüksek ısı iletkenliği göstermiştir. Ayrıca uzun süreli ısıl döngü kararlılığı sağlanmıştır.

Yang vd. (2023), üç boyutlu gözenekli grafit (PG) köpüğü kullanarak FDM'lerin ısı iletkenliği ve şekil stabilitesini artırmıştır. PG köpüğü, grafit tozu ve amonyum bikarbonat karışımının preslenip kurutulmasıyla elde edilmiş ve vakum altında sıvı parafin emdirilmiştir. %35,55 hacim oranında grafit içeren PG/parafin kompozit FDM'ler, 19,27 W/m·K gibi ultra yüksek bir ısı iletkenliği göstermiş; saf parafine göre yaklaşık 76 kat daha yüksek değer elde edilmiştir. Kompozit FDM'ler ayrıca yüksek şekil stabilitesi ve sızıntı önleme özellikleri sergilemiştir.

Nanomalzemeler, FDM'lerde ısı iletimi ve termal kararlılığı artırmada önemli rol oynamaktadır.

Vigneshwaran vd. (2023) çalışmasında, grafen nanoplaketleri (GNP) takviyeli FDM'ler eritme karışımı tekniği ile hazırlanmış ve 25–50 °C sıcaklık aralığında yapılan ölçümlerde GNP konsantrasyonu arttıkça ısı iletkenliği ve spesifik ısının belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir. DSC analizleri erime ve donma sıcaklıklarında küçük artış ve gizli ısı değerlerinde hafif düşüş göstermiştir. Tüm kompozitlerdealt soğutma sıcaklığı 10 °C'nin altında bulunmuş, FTIR analizleri fiziksel etkileşimleri doğrulamış, TGA analizleri ise 165–270 °C aralığında iyi termal kararlılık göstermiştir.

Hekimoğlu (2024) ise metil stearat (MtS) FDM ile hindistan cevizi kabuğundan elde edilen aktif karbon (CAC) ve termal olarak güçlendirilmiş CAC@Grafen nanoplaketleri (GnP) hibrit matrislerini birleştirerek çok işlevli FDM'ler geliştirmiştir. CAC90@GnP10/MtS kombinasyonu, %70 yükleme oranı ve 160,87 J/g gizli ısı ile saf CAC destekli FDM'e göre %27,52 daha yüksek enerji depolama kapasitesi ve %195,83 artmış ısı iletkenliği göstermiştir.

Tüm bu çalışmalar, 3B gözenekli karbon iskeletler ve karbon nanomalzemelerinin, FDM'lerin hem yüksek enerji depolama kapasitesine hem

de hızlı ve sürekli ısı iletimine ulaşmasını sağlayarak, termal enerji depolama uygulamalarında etkili çözümler sunduğunu göstermektedir.

Metal–karbon hibrit matrislerle mekanik ve termal sinerji

Faz değişim malzemelerinin kullanımını sınırlayan düşük ısı iletkenliği ve sızıntı sorunları, metal–karbon hibrit matrisler ile aşılabilmektedir. Bu strateji, bakır, alüminyum gibi yüksek ısıl iletkenli metallerin grafen veya karbon nanotüp yapılarla birleştirilmesiyle hem mekanik dayanımı hem de ısıl iletkenliği artırarak termal enerji depolama uygulamalarında etkili bir çözüm sunmaktadır.

Al-Yasiri vd. (2024) çalışmalarında, FDM birimlerine %0,1 ağırlık oranında galvanizli çelik metal lifler eklenmiş ve farklı kalınlıklarda metal lif takviyeli FDM'ler ile çatı sistemleri tasarlanmıştır. MFFDM1 referans çatıya göre maksimum iç yüzey sıcaklığı düşüşü, zayıflama katsayısı ve zaman gecikmesinde sırasıyla %17, %77,8 ve %170 iyileşme sağlarken, MFFDM2 sırasıyla %16,5, %75,6 ve %150 değerlerine ulaşmıştır.

Wei vd. (2025) ise PEG FDM'i, karboksillenmiş çok duvarlı karbon nanotüpler, FeCl₃ ve Kevlar nanofiberleri ile birleştirerek tek sentezde CFK ağı ile şekil-stabil kompozitler geliştirmiştir. %89,9 PEG içeren kompozit yalnızca %0,76 sızıntı göstermiş, ısı iletkenliği saf PEG'e göre %170,5 artarken erime ve kristalleşme gizli ısıları sırasıyla 147,9 J/g ve 143,7 J/g ölçülmüştür. Kompozit yüksek ışık emme kapasitesi ve %83,4 fototermal dönüşüm verimliliği ile hızlı ısıl tepki ve mükemmel döngüsel kararlılık sağlamıştır. Bu çalışmalar, metal–karbon hibrit matrislerin FDM'lerde mekanik güçlendirme ve hızlı termal yanıt için güvenilir ve yüksek performanslı bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

İnorganik katkılar ile hibrit nano-yapılar

Inorganik nanoparçacık katkıları ile hibrit FDM'ler, hem ısı iletkenliğini artırmak hem de döngüsel kararlılığı iyileştirmek için etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Singh vd. (2022), Al₂O₃, MgO ve SiO₂ nanoparçacıkları ile hazırlanan nanoyapılı FDM'lerin termal performansını deneysel ve nümerik analizlerle incelemiş, Al₂O₃ ve MgO katkısının şarj hızını %33,8, SiO₂ katkısının %41 artırdığını, deşarj hızındaki iyileşmelerin ise %19,6–30 arasında değiştiğini rapor etmiştir.

Kibria vd. (2024), parafin bazlı FDM'leri %0,5–%2 yükleme oranlarında hibrit Al_2O_3 ve ZnO nanoparçacıkları ile geliştirmiş; ısı iletkenliğinde %24,68–%41,56 artış sağlanmış, elektriksel verimlilik %28,70'den %31,46'ya yükselmiş ve maksimum termal verimlilik %51,28'e ulaşmıştır.

Karaağaç (2024) ise Al_2O_3 , MgO ve CuO katkılı FDM'lerde erime sıcaklığında küçük değişimler gözlemlerken, ısı iletkenliğinde %13–48 arasında iyileşme ve CuO katkılı FDM'de deşarj süresinde %11,8 azalma kaydetmiştir.

Bu çalışmalar, inorganik nanoparçacık katkılı hibrit FDM'lerin enerji depolama kapasitesini ve ısı transfer performansını artırmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Nano-kapsülleme ve gelişmiş form stabilizasyonu

Nano-kapsülleme yöntemi, FDM'lerin hem şekil stabilitesini hem de termal performansını artıran etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Ju vd. (2024), sol-jel yöntemiyle nanoskalada SiO_2 ile kapsüllenmiş n-oktadekan (ODE) nanokapsüller geliştirmiş ve bunları çimento bazlı malzemelere entegre etmiştir. Nanokapsüller, 200 faz değişim döngüsünden sonra erime entalpisi 181,5 J/g olarak korunmuş ve çimento örneğinde zirve sıcaklıkları 3,9 °C düşürmüştür; basınç dayanımı ise yalnızca hafif azalmıştır.

Kazaz vd. (2024), düşük sıcaklıklı güneş enerji sistemlerinde nanoenkapsüle biyolojik FDM süspansiyonlar ile güneş ışığını ısıya dönüştürme ve termal enerji depolama performansını incelemiştir. Hindistancevizi yağı temelli Ag, Au, Al ve Cu katkılı süspansiyonlar, saf suya kıyasla 2,7–3,14 kat daha yüksek faydalı ısı kazanım kapasitesi ve 7,41–9,29 kat artmış termal enerji depolama kapasitesi sergilemiştir. FDM kütle konsantrasyonunun %5'ten %20'ye artırılması ve Au nanoparçacık ilavesi depolama kapasitesini %74,4 yükseltmiştir. Çekirdek/kabuk boyutunun artırılması aglomerasyona yol açmış, Al nanoparçacıkları ise düşük optik ve ısı iletkenlik nedeniyle en düşük performansı göstermiştir.

Li vd. (2022), hidrasyonlu tuz FDM'leri düşük sıcaklık TES uygulamalarında kullanabilmek için $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$ 'yu PMMA nanokapsüllerine kapsüllemiş ve yüksek termal güvenilirlik elde etmiştir. Nanokapsüller, 500 termal döngü sonrasında %97,7 korunmuş ve kompozit FDM'in gizli ısısı yaklaşık 72,7 kJ/kg, ısı iletkenliği 1,25 W/(m·K) olarak

ölçülmüş, ısı depolama süresi saf nanokapsüllere kıyasla %82,8 azalmıştır. Nanokapsüller metale neredeyse aşındırıcı etki yapmamıştır.

Jiménez-Vázquez vd. (2022), n-oktadekan (C18) FDM içeren melamin-formaldehit (MF) polimer kapsüllerle süspansiyonlar geliştirmiştir. Tek adımlı reaksiyonla üretilen bu süspansiyonlar, yüksek akışkanlık ve monodisperse parçacık boyutu dağılımı göstermiştir. Optimal C18/MF oranı 2,33 olan süspansiyon %98,7 kapsülleme verimi, 63,7 nm parçacık boyutu ve 23 J/g gizli ısıya sahip olup, aktif termal enerji depolama sistemlerinde güvenle kullanılabilecek bir nano-süspansiyon olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmalar, nano-kapsülleme ile FDM'lerin hem yüksek termal enerji depolama kapasitesine hem de uzun süreli termal güvenilirliğe ulaşabildiğini, ayrıca metal ve yapı malzemeleriyle uyumlu kompozitler hâline getirilebildiğini göstermektedir.

7. SONUÇ

Literatür, FDM teknolojisinin yalnızca katkı maddeleriyle sınırlı basit iyileştirmelerle geliştirilemeyeceğini göstermektedir. Başarılı modern tasarımlar çok ölçekli kompozit mimarilere dayanır. Makro ölçekli karbon iskeletler sürekli ısı yolu oluştururken, nano-katkılar lokal iletkenliği artırır; metal-karbon hibritler mekanik dayanımı güçlendirir; nano-kapsülleme ise çevrimsel kararlılığı sağlar. Güncel hibrit ve nano-yapısal tasarımlar, özellikle yüksek hızlı termal yönetim ve uzun döngü kararlılığı gerektiren uygulamalarda önemli iyileşmeler sunmaktadır. Dolayısıyla modern FDM çözümleri, tek bileşenli malzemeler yerine çok bileşenli fonksiyonel sistemlere odaklanmaktadır.

FDM'lerin enerji depolama uygulamalarındaki potansiyeli malzemenin doğrudan özellikleriyle sınırlı değildir; tasarım ve kompozit mühendisliği yaklaşımı ile belirgin şekilde artırılabilir. Literatür, performansı sınırlayan temel sorunların düşük ısı iletkenlik, sızıntı, gizli ısı kayıpları ve çevrimsel kararsızlık olduğunu göstermektedir. Yenilikçi çözümler ise gözenekli karbon iskeletler, karbon nanomalzemeleri, hibrit yapılar ve nano-kapsülleme teknikleri gibi çok ölçekli tasarımları içermektedir.

Gelecek çalışmalarda yüksek kararlılığa sahip, çok ölçekli hibrit FDM tasarımlarının enerji depolama teknolojilerinde belirleyici rol oynaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Al-Yasiri, Q., Alktranee, M., & Szabó, M. (2024). Metal fibers-enhanced PCM thermal energy storage unit: An experimental approach on a composite roof application. *International Journal of Thermofluids*, 23, 100812. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100812>
- Amberkar, T., & Mahanwar, P. (2022). Phase Change Material Nanocomposites for Thermal Energy Storage Applications. *Materials Proceedings*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.3390/materproc2022009008>
- Castillo Bonillo, A., Lum, Y., Muiruri, J. K., Tomczak, N., Wu, W. Y., Wang, S., Thitsartarn, W., Wang, P., Yeo, J. C. C., Xu, J., Li, Z., Loh, X. J., & Zhu, Q. (2025). State-of-the-art biodegradable polymers and bio-composites for phase change materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 46, e01728. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01728>
- Das, M., & Stachewicz, U. (2024). 3D carbon based phase change composites: A review on progress in fabrication strategies, thermal energy storage-conversion efficacy, prototypes, numerical models and applications. *Journal of Energy Storage*, 98, 113029. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113029>
- El Idi, M. M., Karkri, M., & Kraiem, M. (2021). Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/Metal Foam composite. *Journal of Energy Storage*, 33, 102077. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102077>
- Gong, Z. X., & Mujumdar, A. S. (1997). Thermodynamic optimization of the thermal process in energy storage using multiple phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 17(11), 1067-1083.
- Hyun, S. W., Kim, J. H., & Shin, D. H. (2025). Hybrid PCM–Liquid Cooling System with Optimized Channel Design for Enhanced Thermal Management of Lithium–Ion Batteries. *Energies*, 18(18), 4996. <https://doi.org/10.3390/en18184996>
- Hekimoğlu, G. (2024). Utilizing biomass-derived activated carbon hybrids for enhanced thermal conductivity and latent heat storage in form-stabilized composite PCMs. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 11395-11412. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2390112>

- Jiménez-Vázquez, M., Ramos, F. J., Garrido, I., López-Pedrajas, D., Rodríguez, J. F., & Carmona, M. (2022). Production of thermoregulating slurries constituted by nanocapsules from melamine-formaldehyde containing n-octadecane. *Journal of Energy Storage*, 51, 104465. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104465>
- Ju, S., Miao, Y., Wang, L., Shi, J., Wang, F., Liu, Z., & Jiang, J. (2024). Development of octadecane/silica phase change nanocapsules for enhancing the thermal storage capacity of cement-based materials. *Journal of Energy Storage*, 89, 111636. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111636>
- Karaağaç, M. O. (2024). Performance evaluation of nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage: An experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105412. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105412>
- Kazaz, O., Karimi, N., & Paul, M. C. (2024). Optically functional bio-based phase change material nanocapsules for highly efficient conversion of sunlight to heat and thermal storage. *Energy*, 305, 132290. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132290>
- Kibria, Md. G., Paul, U. K., Mohtasim, Md. S., Das, B. K., & Mustafi, N. N. (2024). Characterization, optimization, and performance evaluation of PCM with Al₂O₃ and ZnO hybrid nanoparticles for photovoltaic thermal energy storage. *Energy and Built Environment*, S2666123324000667. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.06.001>
- Leong, K. Y., Rahman, M. R. A., & Gurunathan, B. A. (2019). Nano-enhanced phase change materials: A review of thermo-physical properties, applications and challenges. *Journal of Energy Storage*, 21, 18-31.
- Li, A., Dong, C., Dong, W., Atinafu, D. G., Gao, H., Chen, X., & Wang, G. (2018). Hierarchical 3D Reduced Graphene Porous-Carbon-Based PCMs for Superior Thermal Energy Storage Performance. *ACS applied materials & interfaces*, 10(38), 32093–32101. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b09541>
- Li, D., Wu, Y., Wang, B., Liu, C., & Arıcı, M. (2020). Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review. *Construction and Building Materials*, 233, 117327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117327>

- Li, J., Chen, H., Jia, L., Zhu, X., Qin, G., & Chen, Y. (2022). Preparation and characterization of $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ @polymethyl methacrylate nanocapsule for efficient thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 53, 105133. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105133>
- Li, Y., Yang, D., Xie, J., & Wang, J. (2021). Review on research and application of phase change materials in cold storage refrigerator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 766(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/766/1/012094>
- Liu, C., Xiao, T., Zhao, J., Liu, Q., Sun, W., Guo, C., Ali, H. M., Chen, X., Rao, Z., & Gu, Y. (2023). Polymer engineering in phase change thermal storage materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113814. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113814>
- Man, X., Lu, H., Xu, Q., Wang, C., & Ling, Z. (2023). Review on the thermal property enhancement of inorganic salt hydrate phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 72, 108699. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108699>
- Moein-Jahromi, M., Rahmanian-Koushkaki, H., Rahmanian, S., & Pilban Jahromi, S. (2022). Evaluation of nanostructured GNP and CuO compositions in PCM-based heat sinks for photovoltaic systems. *Journal of Energy Storage*, 53, 105240. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105240>
- Paul, J., Pandey, A. K., Mishra, Y. N., Said, Z., Mishra, Y. K., Ma, Z., Jacob, J., Kadirgama, K., Samykano, M., & Tyagi, V. V. (2022). Nano-enhanced organic form stable PCMs for medium temperature solar thermal energy harvesting: Recent progresses, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112321. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112321>
- Radouane, N. (2022). A Comprehensive Review of Composite Phase Change Materials (cPCMs) for Thermal Management Applications, Including Manufacturing Processes, Performance, and Applications. *Energies*, 15(21), 8271. <https://doi.org/10.3390/en15218271>
- Said, Z., Pandey, A. K., Tiwari, A. K., Kalidasan, B., Jamil, F., Thakur, A. K., Tyagi, V. V., Sari, A., & Ali, H. M. (2024). Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications. *Progress in Energy and*

- Combustion Science*, 104, 101162.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101162>
- Sevault, A., Kauko, H., Bugge, M., Banasiak, K., Haugen, N. E., & Skreiberg, Ø. (2017). Phase change materials for thermal energy storage in low- and high-temperature applications: A state-of-the-art [Report]. SINTEF Energy Research.
- Shang, Y., Zhang, D., An, M., & Li, Z. (2022). Enhanced Thermal Performance of Composite Phase Change Materials Based on Hybrid Graphene Aerogels for Thermal Energy Storage. *Materials*, 15(15), 5380.
<https://doi.org/10.3390/ma15155380>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Singh, S. K., Verma, S. K., & Kumar, R. (2022). Thermal performance and behavior analysis of SiO₂, Al₂O₃ and MgO based nano-enhanced phase-changing materials, latent heat thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 48, 103977.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.103977>
- Soibam, J. (2017). Numerical Investigation of a heat exchanger using Phase Change Materials (PCMs): For small-scale combustion appliances. Norwegian University of Science and Technology
- Tao, Z., He, W., Xu, X., Fan, J., Zhang, Z., Yang, Z., Liu, Y., Ma, H., Qian, M., & Yang, M. (2023). Three-Dimensional Macroporous rGO-Aerogel-Based Composite Phase-Change Materials with High Thermal Storage Capacity and Enhanced Thermal Conductivity. *Materials*, 16(13), 4878.
<https://doi.org/10.3390/ma16134878>
- Trigui, A., Karkri, M., & Krupa, I. (2014). Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage properties of LDPE/wax as a shape-stabilized composite phase change material. *Energy Conversion and Management*, 77, 586-596. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.034>
- Tyagi, P. K., Kumar, R., & Said, Z. (2022). Recent advances on the role of nanomaterials for improving the performance of photovoltaic thermal systems: Trends, challenges and prospective. *Nano Energy*, 93, 106834.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106834>

- Vigneshwaran, P., Shaik, S., Arulmani, S., Arıcı, M., Alam, T., & Shaik, A. H. (2023). Incorporation of graphene nanoplatelets with organic phase change materials – Studies on thermal conductivity enhancement, and thermal and chemical stability. *International Journal of Thermofluids*, 20, 100456. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100456>
- Wei, D., Wang, Y., Yu, S., Zhang, Q., & Wang, Y. (2025). Metal–Organic Network-Based Composite Phase Change Materials with High Thermal and Photothermal Conversion Performance. *Materials*, 18(16), 3814. <https://doi.org/10.3390/ma18163814>
- Wong, W. P., Kagalkar, A., Patel, R., Patel, P., Dharaskar, S., Walvekar, R., Khalid, M., & Gedam, V. V. (2023). Nano-enhanced phase change materials for thermal energy storage: A comprehensive review of recent advancements, applications, and future challenges. *Journal of Energy Storage*, 74, 109265. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109265>
- Yang, X., Li, C., Ma, Y., Chi, H., Hu, Z., & Xie, J. (2023). High thermal conductivity of porous graphite/paraffin composite phase change material with 3D porous graphite foam. *Chemical Engineering Journal*, 473, 145364. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2023.145364>
- Zacharias, A., Baby, R., Maria, H. J., & Thomas, S. (2025). Preparation, characterization, and selection of nano-assisted phase change materials for thermal management and storage applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115195. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115195>
- Zhi, M., Fan, R., Yang, X., Meng, Z., Sun, Q., Liu, Q., & He, Y. (2023). Phase diagram prediction and experimental verification of a binary hydrated salt mixture as phase change thermal storage materials. *Journal of Energy Storage*, 61, 106731. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106731>
- Zhou, X., Zheng, Q., & Wang, R. (2026). Ammonium aluminum sulfate dodecahydrate based composite phase change materials for thermal energy storage and utilization: Properties, enhancements, and applications. *Journal of Energy Storage*, 141, 119185. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119185>

BÖLÜM 5

ANTALYA VE YOZGAT İLLERİ İÇİN GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Tuğçe TAĞRAF¹

Prof. Dr. Ahmet FERTELLİ²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17923638>

¹Sivas, Türkiye, tugcetagraf91@gmail.com, ORCID ID: 0009-0004-9172-6217

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sivas, Türkiye, fertelli@cumhuriyet.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-2279-1918

GİRİŞ

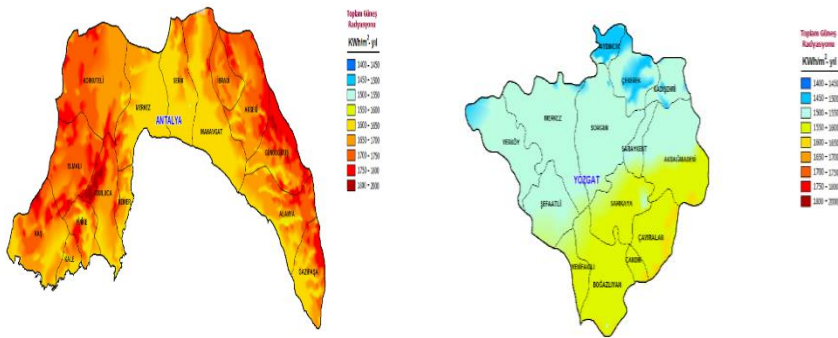
Günümüzde artan dünya nüfusu ile buna bağlı olarak yükselen enerji talebi, sürdürülebilir ve çevre dostu olan sahip yenilenebilir enerji kaynaklarına olan çalışmaları artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi kullanımı ve kurulum kolaylığı olması sebebiyle popüler sistemlerden birisidir. Güneş enerjisi üzerine yapılan bilimsel ve teknolojik çalışmalar 1970’li yıllarda başlamış ve günümüze kadar hem ileri teknolojik ürünler elde edilmiş hem de düşük maliyetli panellerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik sistemler, kullanım amaçlarına ve kurulum koşullarına göre çeşitli sınıflara ayrılmakta; en uygun sistem tipi, uygulama gereksinimlerine göre belirlenmektedir.

Umm Al-Qura Üniversitesinde 100 MW kapasiteli bir güneş PV şebekesine bağlı elektrik üretim sisteminin tasarımı ve simülasyonu için yapılan çalışmada, güneş PV sisteminin teknik, ekonomik potansiyelini ve yıllık performansı hesaplanmıştır. Tasarım, optimum boyutu, PV şebekesine bağlı sistemin özelliklerini ve elektrik enerjisi üretimini belirlemek için Pvsyst yazılımı kullanılarak doğrulanmış ve simüle edilmiştir. PV santralının işletme ve bakım maliyetleriyle birlikte özetlenmiş bir mali değerlendirmesini sağlamıştır (Alnoosani vd., 2019). Suudi Arabistan, Riyad sahası için 400 MW’lık şebekeye bağlı bir güneş enerjisi projesinin analizini, simülasyonunu ve boyutlandırılması Pvsyst 8 yazılımıyla PV panelinin çeşitli eğim ve yönelim çeşitleri ile yapılmıştır. Çalışmada güneş santralini tasarlamak için farklı boyutlarda üç tip PV modülü kullanılmıştır. Ana proje 580 WP kullanılarak tasarlanmış ve 330 WP ve 255 WP güç modülleriyle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, yüksek güçlü PV modüllerinin küçük modüllerden daha verimli olduğunu doğrulamıştır (Alkahtani vd., 2024). Diğer bir çalışmada ise Fransa’da 4 farklı bölgede bulunan 20 MW kapasiteli fotovoltaik paneller ile TenMerina ve Mekhedeki iki santralde bulunan 30 MW kapasiteli panellerin gerçek üretim verileri incelenilmiş ve yaygın olarak kullanılan üç model olan Retscreen, Pvgis ve Pvsyst kullanılarak simülasyonlar yürütülmüştür (Niang vd., 2024). PV sistemlerinin enerji üretimi için uzun vadeli kayıtlı ölçümleri ve Pvsyst simülasyonlarını karşılaştırıldığı başka bir çalışmada daha soğuk aylarda Pvsyst’in çıkış gücü ile simülasyon sonuçları arasında önemli bir fark olduğunu gösterilmektedir. Ancak, daha sıcak aylarda, kaydedilen ölçümler ile

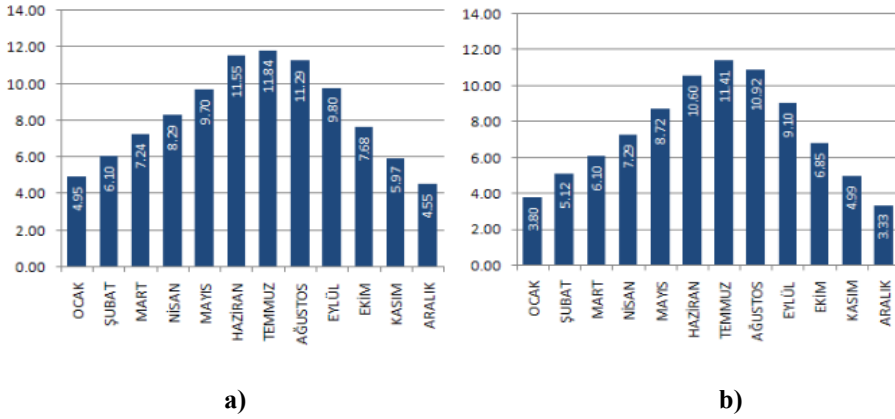
simüle edilen sonuçlar arasındaki fark %10'dan az olduğu görülmektedir. En büyük sapma, farkın %35'i aştığı Kasım ayında meydana geldiği görülmüştür. Genel olarak, PVsyst yazılımı, PV sisteminden gelen enerji çıkışını %10'dan daha az bir belirsizlikle tahmin edilmiştir (Nazıfıfard vd., 2023). Sinop iline ait güneş verileri Almanya Solargis ve World Weather firma elektrik üretimi verileri ile karşılaştırılmıştır. Sinop ili için alternatif bir üretim modeli, yenilenebilir ve temiz olan güneş ışığından enerji üretiminin kullanılabilirliği ve potansiyeli hakkında bilgiler verilmektedir (Alcan vd., 2018).

MATERYAL VE METOT

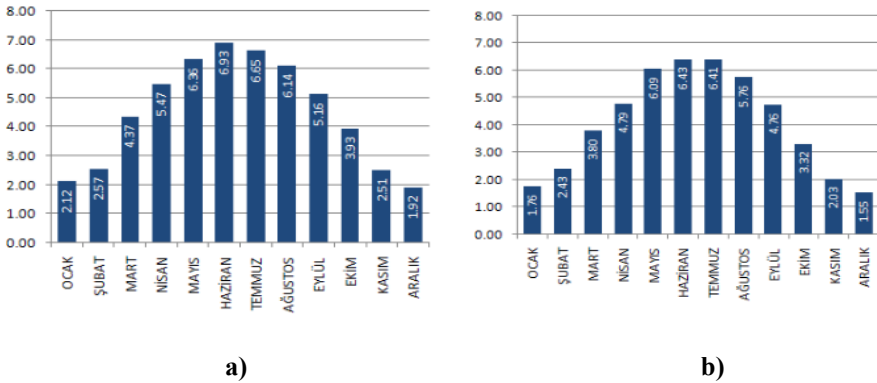
Analizler için ülkemizde Akdeniz Bölgesinde bulunan Antalya ve Orta Anadolu Bölgesinde bulunan Yozgat illeri seçilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi Antalya ili için güneş enerjisi potansiyeli son derece elverişlidir. Özellikle denizden uzak olan Antalya'da iç kısımlarda 1700 kWh/m^2 kadar radyasyon değerlerine ulaşılmaktadır. Yozgat ilinin güneş enerji potansiyeli merkezde $1500\text{-}1550 \text{ kWh/m}^2$ iken en yüksek $1550\text{-}1600 \text{ kWh/m}^2$ civarında güneye yakın yerlerde olduğu görülmüştür. Antalya ve Yozgat illerinin güneş enerji potansiyel atlasına ek olarak günlük küresel radyasyon değerleri (ışınım) ve günlük güneşlenme süresi Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Güneşlenme sürelerinde, her iki il için de güneşlenme süresinin en az olduğu aylar Aralık, en yüksek olduğu ay ise Temmuz görülmektedir. Antalya ilinde Haziran, Temmuz, Ağustos aylarında güneşlenme süreleri yakın ilerlerken Yozgat ilinde bu değerlerin uzak ilerlediği görülmektedir. Işınım değerlerinin güneşlenme süreleri ile paralel olarak değişim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 1 : Antalya ve Yozgat iline ait güneş enerjisi potansiyeli (GEPA)



Şekil 2 : Güneşlene Zamanları (Saat) (GEPA) a) Antalya b) Yozgat



Şekil 3 : Global Radyasyon Değerleri (kWh/m²-gün) (GEPA) a) Antalya b) Yozgat

RETSCREEN PROGRAMI

RETScreen Expert, profesyonellerin ve karar vericilerin potansiyel enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve kojenerasyon projelerinin uygulanabilirliğini belirlemesine ve değerlendirmesine olanak tanıyan kapsamlı bir temiz enerji yönetimi yazılım platformudur. RETScreen Expert, karar vericilerin ve enerji profesyonellerinin potansiyel temiz enerji projelerinin teknik ve finansal uygulanabilirliğini belirlemesine, değerlendirmesine ve optimize etmesini sağlar. Karar zekâsı yazılım platformu aynı zamanda yöneticilerin tesislerin gerçek performansını doğrulamasına ve ölçmesine olanak tanır. Çok tesisli portföylerin yönetimine olanak sağlar ve ek

enerji tasarrufu/üretim fırsatlarının belirlenmesine yardımcı olur Potansiyel yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği projelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesiyle ilgili zaman ve finansal maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir (Energypedia).

1,5 kW gücünde Antalya ve Yozgat illerinde kurulan fotovoltaiik güç santrallerinde Canadian Solar mono-Si-CS5A 150W marka monokristal panel kullanılmıştır. Bu panelin özellikleri Tablo1’de gösterilmiştir. Santrallerde tercih edilen inverter Huawei Sun2000-100KTL-M1 100kW olarak belirlenmiş ve özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1 : Canadian Solar mono-Si-CS5A 150W marka monokristal panel özellikleri (Secondsol, 2025)

Nominal kapasite	150W	Maksimum Voltaj	1000V
MPP akımı	4.31A	Uzunluk	1595mm
MPP voltajı	34.8V	Genişlik	801mm
Kısa devre akımı	4.74A	Derinlik	40mm
Açık devre voltajı	43.2V	Ağırlık	15.5 kg

Tablo 2 : Huawei Sun2000-100KTL-M1 100kW İnverter (Arerenerji, 2025)

HUAWEI 100 - 110 KW DC GİRİŞ ÖZELLİKLERİ	
Başlangıç Voltajı	200 V
Maks. Giriş Gerilimi	1100 V
Nominal DC Voltajı	600 V
MPPT Aralığı	200 – 1000 V
Çalışma Aralığı	200 – 1100 V
MPPT Maks. Akım	26 A
MPPT Maks. Kısa Devre Akımı	40 A
HUAWEI 100 - 110 KW AC ÇIKIŞ ÖZELLİKLERİ	
Nominal AC Aktif Güç	100000 W
Maks. AC Görünür Güç	110000 VA
Çıkış Gerilimi	400 V (3W / N / PE)
Nominal Frekans Aralığı	50 Hz / 60 Hz
Nominal Akım	144,4 A
Maks. Çıkış Akımı	160,4 A
Güç Faktörü	0.8 LG - 0.8 LD
Maks. Harmonik Bozulma (THD)	< % 3
Şebeke Fazlarının Sayısı	3 Adet
HUAWEI 100 - 110 KW MEKANİK ÖZELLİKLERİ	
Maksimum Verimlilik	%98.6
Avrupa Verimliliği	%98.4

BULGULAR VE TARTIŞMA

Antalya ili için 36,9 enlem ve 30,7 boylam ve Yozgat ili için 39,8 enlem ve 35,2 boylam derecelerine sahip merkezlerde 1,5 kW kapasitede fotovoltaiik güç santrali RETScreen yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Her iki il için de seçilmiş konuma ait RETScreen yazılımından elde edilen hava sıcaklığı, bağıl nem, yağış, yatay radyasyon miktarı, atmosferik basınç, rüzgâr hızı ve yer sıcaklığı değişimleri aylık olarak Tablo 3 ve Tablo 4’ de verilmiştir. Antalya’da hava sıcaklığının 9,7 °C -28,4 °C arasında değiştiği, ısıtım değerlerinin ise maksimum 7,18 (kWh/m²/g) değerine Temmuz ayında ulaştığı görülmektedir. Yozgat ilinde ise en yüksek sıcaklığın 20,7 °C olarak gerçekleştiği, ısıtım değerlerinin ise maksimum 7,30 (kWh/m²/g) değerine Haziran ayında ulaştığı görülmektedir.

Tablo 3 : Antalya ili için oluşan RETScreen yazılımındaki veriler

AY	HAVA SICAKLIĞI (°C)	BAĞIL NEM (%)	YAĞIŞ (mm)	GÜNLÜK GÜNEŞ RADYASYONU YATAY (kWh/m ² /g)	ATMOSFERİK BASINÇ (kPa)	RÜZGAR HIZI (km/sa)	YER SICAKLIĞI (°C)
OCAK	9,7	67,8	152,5	2,09	97,3	13,0	10,2
ŞUBAT	10,1	64,8	105,5	2,88	97,1	14,0	10,4
MART	12,3	66,7	72,54	4,12	97,0	12,2	12,2
NİSAN	16,0	68,9	57,30	5,12	96,9	10,8	15,4
MAYIS	20,5	66,6	34,72	6,13	96,9	10,1	19,8
HAZİRAN	25,2	60,0	8,40	7,17	96,7	11,2	25,0
TEMMUZ	28,4	57,2	5,27	7,18	96,4	10,8	29,0
AĞUSTOS	28,1	60,7	3,72	6,32	96,5	9,7	29,7
EYLÜL	24,9	59,4	14,10	5,30	96,8	10,4	26,2
EKİM	20,1	60,6	62,00	3,79	97,2	10,4	21,0
KASIM	14,4	66,9	103,2	2,58	97,3	11,2	15,5
ARALIK	10,9	70,1	160,2	1,85	97,3	12,2	11,8
YILLIK	18,4	64,1	779,6	4,55	97,0	11,3	18,9

Tablo 4 : Yozgat ili için oluşan RETScreen yazılımındaki veriler

AY	HAVA SICAKLIĞI (°C)	BAĞIL NEM (%)	YAĞIŞ (mm)	GÜNLÜK GÜNEŞ RAYAN YONU YATAY (kWh/m ² /g)	ATMOSFERİK BASINÇ (kPa)	RÜZGAR HIZI (km/sa)	YER SICAKLIĞI (°C)
OCAK	-1,8	82,2	40,30	2,08	88,0	14,8	-2,3
ŞUBAT	-0,8	77,7	35,84	2,82	87,8	15,9	-1,1
MART	3,1	71,2	41,54	3,94	87,8	15,2	3,2
NİSAN	8,5	66,8	53,10	4,92	87,8	13,7	8,9
MAYIS	13,1	63,0	53,94	6,05	87,9	11,7	13,7
HAZİRAN	17,3	55,8	40,20	7,09	87,9	12,8	18,5
TEMMUZ	20,4	49,1	14,26	7,30	87,8	15,7	22,2
AĞUSTOS	20,7	46,1	8,99	6,44	87,9	15,4	22,8
EYLÜL	16,8	47,6	17,10	5,16	88,1	13,0	18,2
EKİM	11,2	58,9	34,72	3,59	88,3	12,9	11,5
KASIM	4,6	71,8	43,50	2,32	88,2	13,4	4,0
ARALIK	-0,2	81,0	48,05	1,74	88,1	14,5	-0,9
YILLIK	9,5	64,2	431,54	4,46	88,0	14,1	10,0

Antalya ve Yozgat için tasarlanan fotovoltaik güç santralinde kullanılan panellerin; güneş izleme modu sabit, eğimi Yozgat için 38° ve Antalya için 35°, azimut açısı da her iki ilde 0° olarak alınmıştır. Toplamda 10 adet panel kullanılmıştır ve ışıınım değerleri ile şebekeye verilen elektrik aylara göre Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilmektedir. Panellerin eğimli yerleştirilmesiyle tüm değerlerin yaz ayları haricinde önemli oranda arttığı görülmektedir. Yozgat'ta Antalya'ya göre eğimli günlük güneş radyasyon değerleri kış için Ocak, Şubat ve Aralık ayları, yaz için ise Temmuz ve Ağustos aylarında daha fazla olduğu görülmektedir.

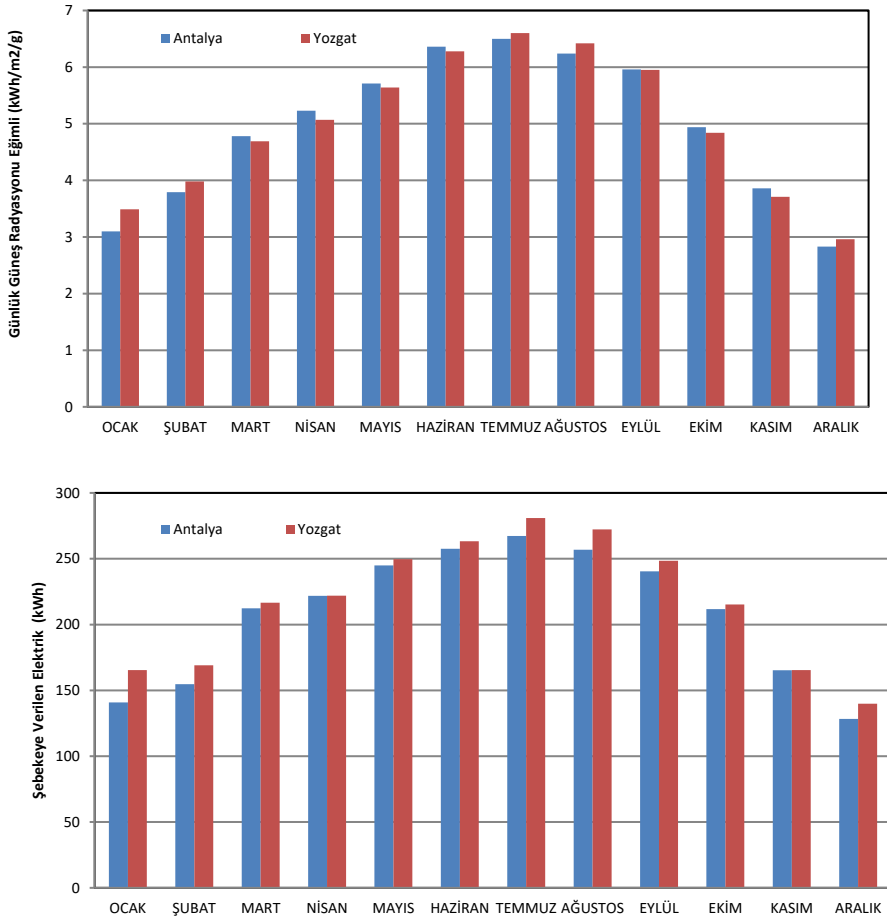
Tablo 5 : Antalya ilindeki Fotovoltaik güç santralinde üretilen elektrik enerjisi

AY	GÜNLÜK GÜNEŞ RADYASYONU YATAY (kWh/m ² /g)	GÜNLÜK GÜNEŞ RADYASYONU EĞİMLİ (kWh/m ² /g)	ŞEBEKEYE VERİLEN ELEKTRİK (kWh)
OCAK	2,09	3,10	140,898
ŞUBAT	2,88	3,79	154,715
MART	4,12	4,78	212,386
NİSAN	5,12	5,23	221,798
MAYIS	6,13	5,71	244,925
HAZİRAN	7,17	6,36	257,583
TEMMUZ	7,18	6,50	267,288
AĞUSTOS	6,32	6,24	256,778
EYLÜL	5,30	5,96	240,483
EKİM	3,79	4,94	211,766
KASIM	2,58	3,86	165,335
ARALIK	1,85	2,83	128,313
YILLIK	4,55	4,95	2502,268

Tablo 6 : Yozgat ilindeki Fotovoltaik güç santralinde üretilen elektrik enerjisi

AY	GÜNLÜK GÜNEŞ RADYASYONU YATAY (kWh/m ² /g)	GÜNLÜK GÜNEŞ RADYASYONU EĞİMLİ (kWh/m ² /g)	ŞEBEKEYE VERİLEN ELEKTRİK (kWh)
OCAK	2,08	3,49	165,373
ŞUBAT	2,82	3,98	169,038
MART	3,94	4,69	216,553
İSAN	4,92	5,07	221,999
MAYIS	6,05	5,64	249,694
HAZİRAN	7,09	6,28	263,341
TEMMUZ	7,30	6,60	280,944
AĞUSTOS	6,44	6,42	272,225
EYLÜL	5,16	5,95	248,456
EKİM	3,59	4,84	215,291
KASIM	2,32	3,71	165,424
ARALIK	1,74	2,96	139,920
YILLIK	4,46	4,97	2608,259

Antalya ve Yozgat illerinde RETScreen yazılımıyla eğimli panellerdeki radyasyon değerleri ve şebekeye verilen elektrik değerleri Şekil 4’de gösterilmiştir. Yozgat ilinin enlem derecesi fazla olmasına rağmen tüm aylarda eğimli panellerdeki şebekeye verilen elektrik değerleri enlem derecesi az olan Antalya iline göre fazla olduğu görülmüştür. Nisan ve Kasım aylarında ise Antalya iliyle Yozgat ilinin eğimli panellerdeki şebekeye verilen elektrik değerlerinin çok yakın gerçekleştiği görülmektedir. Her iki ilde de eğimli paneller in kullanılmasıyla şebekeye verilen elektrik değerleri Temmuz ayında fazla olmuştur.



Şekil 4: Antalya ve Yozgat illerinin eğimli panellerdeki ısıtım ve şebekeye verilen elektriğin değerlerinin karşılaştırılması

SONUÇ

Bu çalışmada ülkemizde İç Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi illerinden Yozgat ve Antalya'da kurulması planlanan 1,5 kW gücündeki fotovoltaik sistemlerin Retscreen yazılımı ile simülasyonları yapılmıştır. Analizlerde Antalya ve Yozgat illerinin merkez konumlarına panellerin hem eğimli hem de yatay yerleştirilmesi durumunda günlük güneş radyasyon değerlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Antalya ili için yıl olarak ortalamasında eğimli panelin yatay panele göre % 8,79 Yozgat ili için de % 11,43 daha fazla günlük güneş radyasyon değerlerinin olduğu görülmüştür. Antalya'da eğimli panel kullanılması durumunda yıllık olarak günlük güneş radyasyon değerinin Yozgat iline göre % 0,40 az olduğu, buna rağmen şebekeye verilen elektrik değerinin ise Yozgat iline göre % 4,06 daha az olduğu görülmektedir.

KAYNAKÇA

- Alcan, Y., Demir, M., & Duman, S. (2018). Sinop ilinin güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyelinin ülkemiz ve Almanya ile karşılaştırarak incelenmesi. *El-Cezeri*, 5(1), 35-44.
- Arerenerji Çevrim-içi: <https://arerenerji.com/huawei-sun2000-100ktl-m1-110kw-100kw-inverter>
- Alkahtani, M. M., Kamari, N. A., Zainuri, M. A., & Syam, F. A. (2024). Design of Grid-Connected Solar PV Power Plant in Riyadh Using PVsyst. *Energies*, 17(24), 6229.
- Alnoosani, A., Oreijah, M., Alhazmi, M., Samkari, Y., & Faqeha, H. (2019). Umm al-Qura Üniversitesinde (pvsyst) kullanarak 100mw güneş pv şebeke bağlantılı enerji santralinin tasarımı. *Uluslararası Bilim ve Araştırma Dergisi (IJSR)*, 8 (11), 356-363.
- Energypedia RETScreen Temiz Enerji Yönetim Yazılımı Çevrim-içi: https://energypedia.info/wiki/RETScreen_Clean_Energy_Management_Software
- Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası, <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/58.aspx>
- Nazififard, M., Hashemi-Dezaki, H., & Nazififard, K. (2023). Comparing Actual Measurement and PVsyst Simulation Results for Energy Generation of Microgrid-Connected PV Systems. In 2023 13th Smart Grid Conference (SGC) (pp. 1-6). IEEE.
- Niang, SAA, Drame, MS, Gueye, A., Sarr, A., Toure, MD, Nebon, B., Talla, K. (2024). Batı Afrika Senegaldeki altı güneş enerjisi santralinin mevsimsel üretiminin analizi ve simülasyonu. *Dünya Sistemlerinin ve Çevrenin Modellenmesi*, 10 (2), 1543-1554.
- Secondsol The Photovoltaic Market Place Çevrim-içi: <https://www.secondsol.com/en/anzeige/9541/photovoltaikmodule/mono-kristalline-module/bosch/c-si-m-60-eu42117-250wp>

BÖLÜM 6

YÜZER TEMELLİ RÜZGÂR TÜRBİNİ TİPLERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Yük. Müh. Güven NERGİZ¹, Prof. Dr. K. Turgut GÜRSEL²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.17923721>

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı, Haydar Aliyev Bulvarı, No: 32, Balçova - 35330 İzmir, Türkiye.
ORCID NO: 0000-0002-0415-0431 (guvennergiz@gmail.com, +90 506 500 2593)

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü, Gemi İnşaatı Programı, Haydar Aliyev Bulvarı, No: 32, Balçova - 35330 İzmir, Türkiye.
ORCID NO: 0000-0002-9681-680X (turgut.gursel@deu.edu.tr, +90 536 544 2802)

GİRİŞ

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında giderek artan bir öneme sahiptir ve küresel yeşil enerji dönüşümünün merkezinde yer almaktadır. Güncel verilere göre, dünya genelinde karasal rüzgâr türbinlerinin toplam kurulu kapasitesi 944 GW'ı aşmış durumdadır (Communication, 2024). Bununla birlikte, rüzgâr enerjisi bakımından zengin olan karasal bölgelerdeki uygun alanların sınırlı olması, yerleşim yoğunluğu ve artan enerji talebi, üretim altyapısının deniz ortamlarına taşınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda deniz üstü rüzgâr enerjisi teknolojileri hem araştırma hem yatırım alanında hızla öne çıkmıştır.

Deniz ortamında, rüzgârın karaya kıyasla daha istikrarlı, yüksek hızlı ve düşük türbülanslı olması, türbinlerin verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Rüzgâr akışının engellerle kesintiye uğramaması, enerji üretiminde sürekliliği ve istikrarı sağlar. Bu avantajlara karşın, deniz koşulları sistem tasarımı açısından yeni teknik zorluklar doğurmaktadır. Özellikle su derinliği, deniz tabanı özellikleri, akıntılar ve atmosferik etkiler, deniz üstü türbinlerin yapısal tasarımını ve işletme stratejilerini doğrudan etkilemektedir.

Deniz üstü rüzgâr türbinleri (DRES) genel olarak sabit temelli ve yüzer platformlu sistemler olarak iki temel sınıfta incelenmektedir. Sabit temelli sistemler genellikle 50 metreye kadar olan sığ denizlerde uygulanabilirken, derin sularda bu yöntem teknik açıdan sınırlı kalmaktadır. Bu tür ortamlarda yüzer türbin sistemleri, su derinliğinden bağımsız enerji üretimi sağlayarak önemli bir alternatif oluşturur. Bununla birlikte, yüzer platformlarda demirleme sistemleri, stabilite kontrolü ve bakım operasyonları gibi etkenler, sabit temelli sistemlere göre hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerini artırmaktadır. Türbin performansının henüz tasarım aşamasındayken optimize edilmesi, proje maliyetlerinin düşürülmesi ve sürdürülebilirlik açısından oldukça kritiktir.

Bu çalışmada amaç henüz fiziksel test veya prototip aşamasına gelmeden önce sayısal simülasyon temelli optimizasyon yöntemleriyle türbin performansının değerlendirilmesidir. Ayrıca hali hazırda literatürde test ve simülasyonlarla doğrulanmış model verilerinin makine öğrenmesi tekniğiyle işlenerek, belirli bir türbin tipinin tepki çıktısını veren matematik modelinin ve transfer fonksiyonunun oluşturulmasının gerekliliği bu çalışmada ele alınmıştır. Böylece tasarım uzayı oldukça geniş modellerin türbin performansı

saniyeler içerisinde belirlenebilmekte ve fizibilite projesi aşamasındayken en ideal türbin modeli dakikalar içerisinde elde edilebilmektedir.

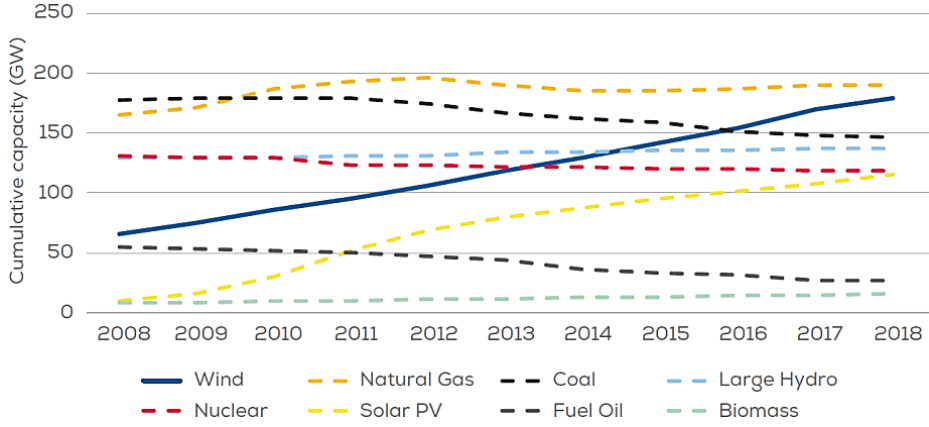
1. KÜRESEL ÖLÇEKTE RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Rüzgâr enerjisi, küresel ölçekte enerji üretiminde hızla önem kazanan sürdürülebilir kaynaklardan biri haline gelmiştir. Artan çevresel kaygılar, fosil yakıtların tükenme riski ve karbon emisyonlarının azaltılması yönündeki politik hedefler, yenilenebilir enerjiye olan talebi her zamankinden fazla artırmıştır. Bu dönüşüm sürecinde rüzgâr enerjisi hem karadaki hem de denizdeki uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bularak enerji dönüşümünün temel unsurlarından biri olmuştur (Şentürk ve Oğuz, 2020; Heflich vd., 2022; Lee ve Zhao, 2024).

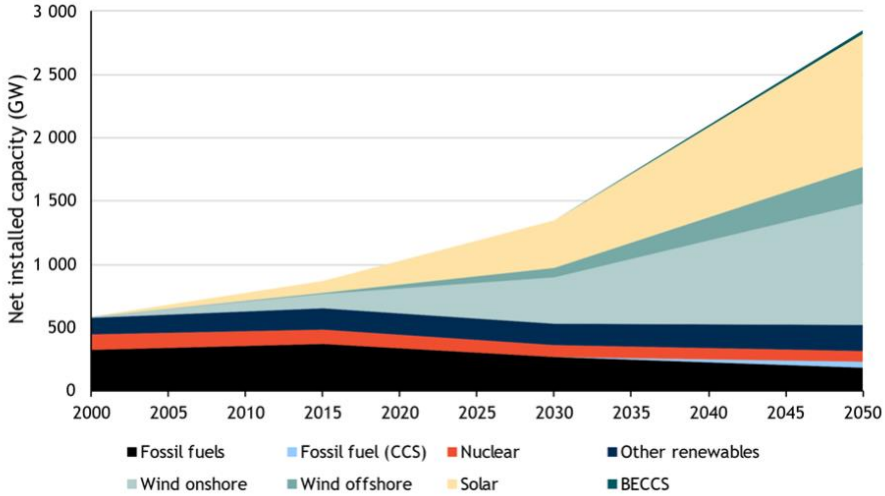
Teknolojik ilerlemeler, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik verimini ve güç dönüşüm etkinliğini etkili oranda yükseltmiş, buna bağlı olarak enerji üretim maliyetleri geçmişe kıyasla belirgin şekilde azalmıştır. Ayrıca, uluslararası kurumlar ve devletler tarafından yürürlüğe konulan teşvik politikaları, yenilenebilir enerjiye geçiş sürecini hızlandırmıştır. Bu gelişmeler sonucunda, rüzgâr enerjisinin küresel enerji üretimindeki payı son on yılda sürekli artış göstermiştir. Şekil 1a’da, 2008–2018 yılları arasında Avrupa’da yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı kurulu güçteki değişim gösterilmektedir. Grafik, rüzgâr enerjisindeki artış trendinin gelecekte de süreceğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Benzer bir projeksiyon da Heflich vd. (2022) tarafından yapılmıştır. Özellikle “net sıfır emisyon” hedefi senaryosu kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklı kurulu güç kapasitesine göre 2050 öngörüsü Şekil 1b’de gösterilmiştir. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinden elde edilecek enerjinin giderek artması, birim başına enerji maliyetlerinin de giderek azalması beklenmektedir.

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, aerodinamik kuvvetleri elektrik enerjisine dönüştüren rüzgâr türbinleri aracılığıyla sağlanmaktadır (Şekil 2). Rüzgâr akımı, kanat profilleri üzerinden geçerken bir kaldırma kuvveti oluşturur ve bu kuvvet kanatların dönmesini sağlar. Kanatların oluşturduğu dönme momenti, rotor mili aracılığıyla jeneratöre iletilir; burada mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik, transformatörlerle gerilimi yükseltilerek şebekeye aktarılır. Günümüz türbinleri, rüzgâr yönü ve hızındaki

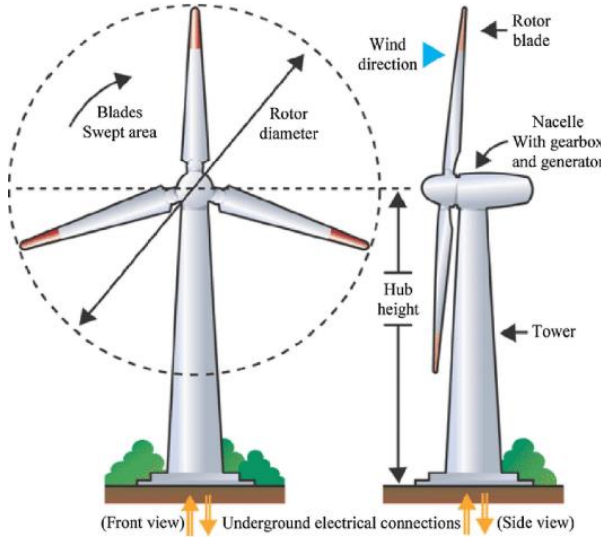
değişimleri anlık olarak izleyen akıllı kontrol sistemleri ve gerektiğinde enerji depolama üniteleriyle birlikte çalışabilen hibrit yapıdadır (Terzioğlu vd., 2019).



Şekil 1a: Avrupa'da yenilenebilir enerji kaynaklı kurulu güç kapasitesinin 2008 yılından 2018 yılına kadar olan değişimi (Komusanac vd., 2019)



Şekil 1b: 2050 yılına kadar (net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda), enerji kaynaklarına göre Avrupa Birliği'nin geleceğe yönelik net elektrik üretim kapasitesi tahmini (Heflich vd., 2022)



Şekil 2: Temel bir rüzgâr türbininin elemanları (Aminzadeh vd., 2023)

Rüzgâr türbinlerinden elde edilebilecek güç, esas olarak rüzgâr hızı ve kanatların tarama alanı ile ilişkilidir. Üretilen güç, hızın küpüyle orantılı olarak artar. Bu nedenle, rüzgâr hızının iki katına çıkması, enerji üretiminin yaklaşık sekiz kat artması anlamına gelir. Türbin kanat uzunluğu da üretim kapasitesinde belirleyici bir unsurdur; kanat yarıçapının büyümesiyle rotorun süpürdüğü alan artar ve daha fazla hava kütlesiyle etkileşim sağlanır. Rüzgâr enerjisinden elde edilen güç Denklem (1) ile ifade edilir:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 C_p \quad (1)$$

Burada,

P: Güç (Watt)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

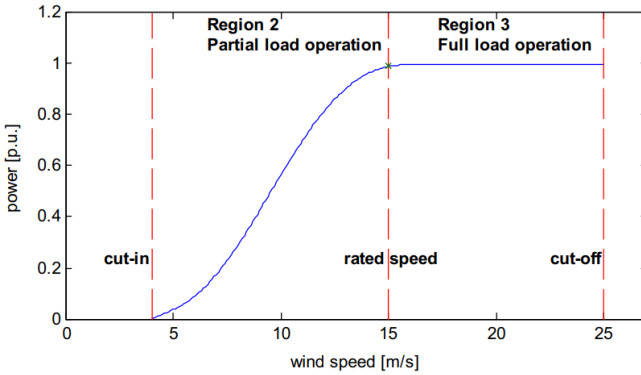
A: Pervanenin süpürdüğü alanı (m^2)

U_{∞} : Rüzgâr hızı (m/s)

C_p : Güç katsayısı ($C_p < 0,593$ Betz kriter sınırı)

olarak ifade edilir. Bu bağıntı, rüzgâr türbininin teorik verim sınırını tanımlar ve türbinin tasarım parametrelerinin enerji üretim üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koyar.

Bir türbin yalnızca belirli rüzgâr hızı aralıklarında enerji üretimi yapabilir (Şekil 3). Türbinin çalışmaya başladığı en düşük hız olan genellikle 3–4 m/s “cut-in hızı” olarak adlandırılır. Bu hızın altında kanatların dönmesi için gerekli kinetik enerji oluşmaz. Rüzgâr hızı nominal (rated) değere ulaştığında (yaklaşık 12–15 m/s), türbin maksimum kapasitede çalışır. Bu değer üzerindeki artışlar çıkış gücünü etkilemez; çünkü sistem bu noktada güç sınırlama moduna geçer. Cut-off hızı (yaklaşık 25 m/s) aşıldığında türbinin yapısal bütünlüğünü korumak ve servis ömrünü uzatmak için, türbin otomatik olarak durdurulur.



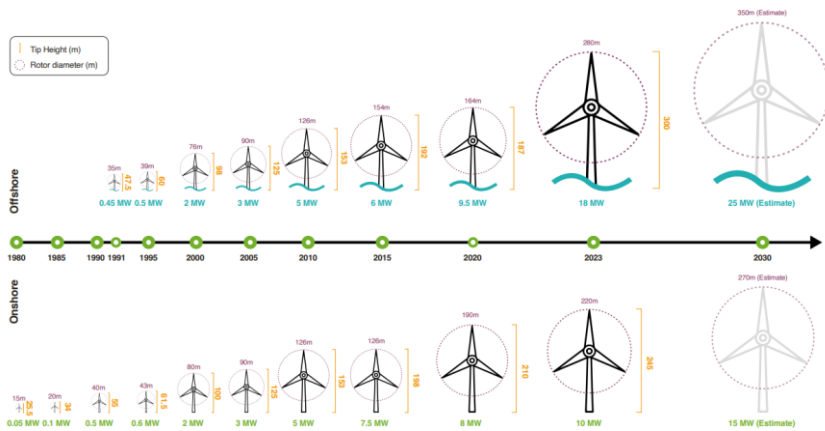
Şekil 3: Rüzgâr hızı ile türbin enerji çıkışı karakteristiği (Hall vd., 2010)

Rüzgâr hızının zamana göre istikrarlı olması, yani kaliteli rüzgâr koşullarının sağlanması, enerji üretiminde süreklilik açısından büyük önem taşır. Hızın ani değişim göstermemesi, türbin kanatları üzerindeki yükleri azaltır; böylece sistem daha kararlı çalışırken, sistemde oluşan mekanik yorulma değerlerinde azalma olur. Bu durum bakım aralıklarını uzatır ve işletme maliyetlerini düşürür. Aynı zamanda enerji üretimindeki kesintiler azaldığı için kapasite faktörü artar (Ünal vd., 2024).

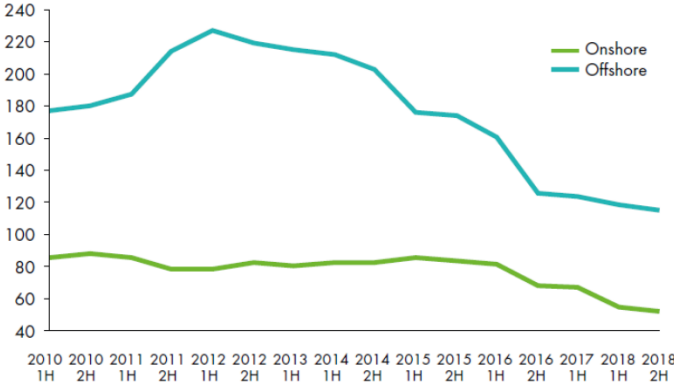
Kara üstü türbinler, erişilebilirlik ve düşük yatırım maliyeti açısından avantajlıdır. Karada kurulum ve bakım operasyonları daha kolaydır; ayrıca uzun yıllara dayanan mühendislik birikimi sayesinde teknolojik olarak daha olgun bir yapıdadır. Ancak, karasal alanlarda rüzgâr potansiyeli genellikle

düşüktür ve arazi pürüzlülüğü, binalar ve bitki örtüsü gibi engeller akış rejimini olumsuz etkiler. Bu nedenle türbin kulelerinin yüksekliği artırılmak zorunda kalınır. Ayrıca, görsel etki, gürültü ve arazi kullanımı gibi çevresel faktörler toplumsal kabulü zorlaştırabilir. Buna karşın, deniz üstü rüzgâr türbinleri daha düzenli (daha az türbülans, ortalama hızda daha az sapma) ve daha yüksek rüzgâr hızlarından faydalanır. Deniz yüzeyinin pürüzsüz sayılması nedeniyle daha düşük yüksekliklerde bile kaliteli rüzgâr koşulları elde edilebilir. Bu türbinler genellikle daha büyük boyutlarda tasarlanabilir ve birim türbin başına düşen üretim miktarı artar. Ayrıca, yerleşim alanlarından uzak oldukları için gürültü ve estetik kaygılar minimize edilir. Ancak bu avantajların yanında, deniz ortamında kurulum, bakım ve erişim maliyetleri çok daha yüksektir. Tuzlu suyun oluşturduğu korozyon, dalga yükleri ve erişim zorlukları türbinlerin ömrünü ve bakım gereksinimlerini doğrudan etkiler. Ayrıca, denizel ekosistem üzerindeki olası etkiler de dikkatle değerlendirilmelidir (Şentürk ve Oğuz, 2020).

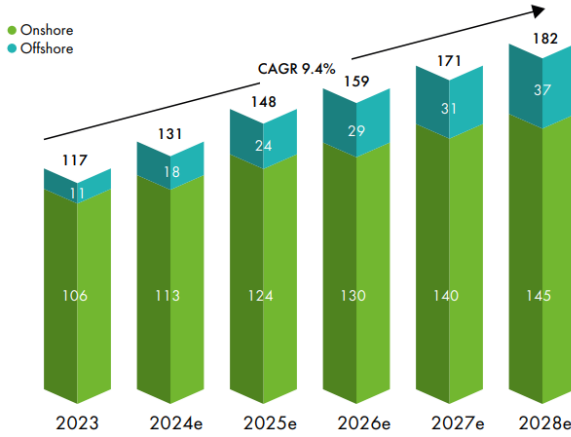
Son yıllarda düşen seyrüsefer ve kurulum maliyetleri, daha büyük rotor çapları ve gelişmiş malzeme teknolojileriyle birleşerek deniz üstü türbinlerin ekonomik açıdan giderek daha rekabetçi hale geldiğini göstermektedir. Şekil 4'te, 1980–2030 yılları arasında türbin boyutlarındaki gelişim; Şekil 5'te, türbin enerji maliyetlerinin zamana göre azalışı; Şekil 6'da ise 2024–2028 dönemi için kara ve deniz üstü türbinleri için kurulum beklentileri sunulmaktadır. Bu veriler, deniz üstü türbin teknolojilerinin gelecekte enerji sistemleri içinde daha baskın bir konuma yükseleceğini göstermektedir.



Şekil 4: Kara ve deniz üstü türbin büyüklükleri, 1980-2030 (Lee and Zhao 2024)



Şekil 5: Türbin başına (indirgenmiş) enerji maliyetinin tarihsel değişimi [\$/MWh] (Ohlenforst vd., 2019)



Şekil 6: 2024-2028 yılları arasındaki kara ve deniz üstü için türbin kurulum beklentisi [GW] (Ohlenforst vd., 2019)

2. BULGULAR

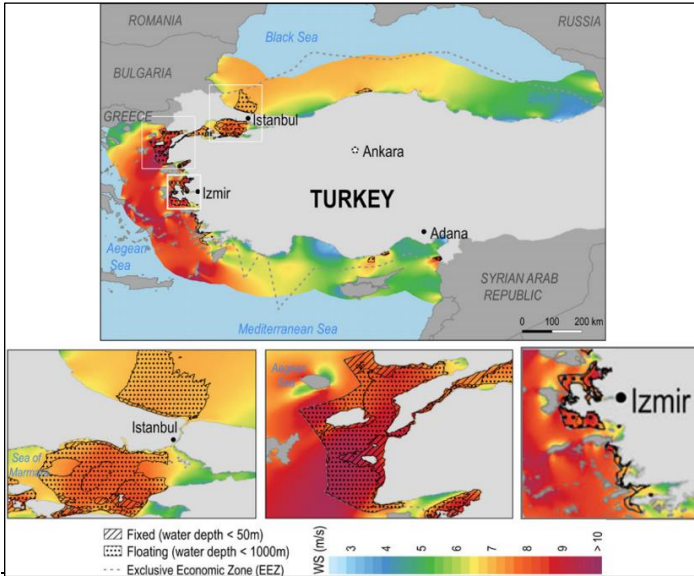
Dünya Bankası'nın yayımladığı Going Global 2019 raporunda (Dutton vd., 2019), Türkiye'nin kıyı bölgelerinde dikkate değer bir deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyeline sahip olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada özellikle Marmara ve Ege Denizi kıyılarının rüzgâr rejimi açısından uygun koşullar sunduğu, bu bölgelerin sabit ve yüzer tabanlı türbin teknolojileri için elverişli fırsatlar oluşturduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Çanakkale Boğazı ve çevresindeki

sığ deniz alanlarının, düşük maliyetli sabit temelli kurulumlara uygun olduğu ifade edilmiştir (Şekil 7).

Rüzgâr türbinlerinin kurulacağı alanlarda deniz derinliği önemli bir tasarım kriteridir. Türbinlerin güvenli ve uzun ömürlü çalışabilmesi için deniz tabanı koşullarına uygun temel tipinin seçilmesi gerekmektedir (Uzunoğlu vd., 2021). Temeller genel olarak sabit ve yüzer olmak üzere iki ana sınıfta incelenir (Şekil 8).

- 0–30 m derinliğe sahip sığ bölgelerde monopil temeller yaygın olarak kullanılır. Bu temeller, çelik boruların deniz tabanına çakılmasıyla oluşturulur ve düşük maliyetleriyle öne çıkar.
- 30–50 m aralığındaki orta derinliklerde ceket (jacket) tipi kafes yapılar tercih edilir. Dört ayaklı bu sistemler, yüksek stabilite sağlar ve zeminle geniş bir temas yüzeyi oluşturur.
- 50 m üzerindeki derin deniz koşullarında ise yüzer temeller (platformlar) kullanılır. Bu yapılar yüzeyde dengede kalır ve çelik halatlarla deniz tabanına demirlenir.

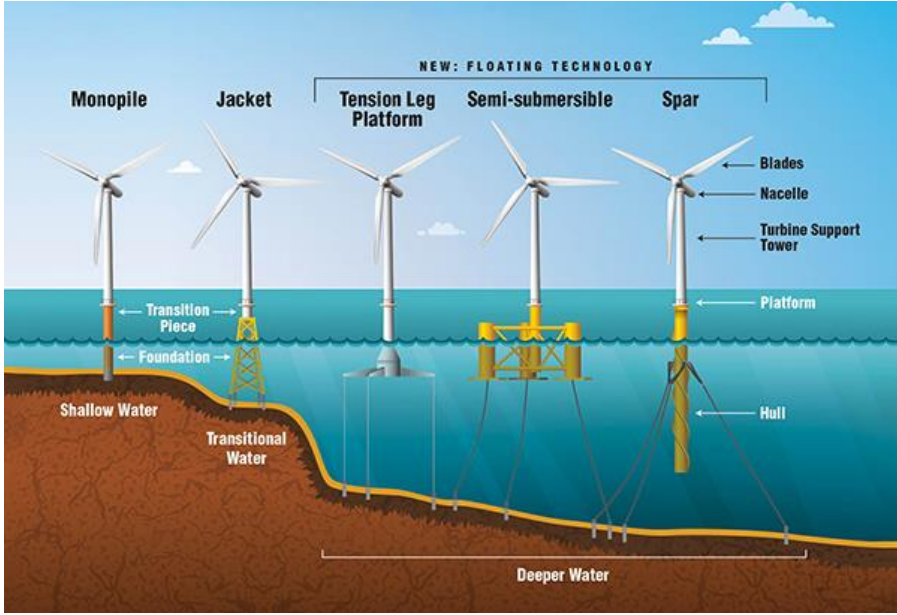
Doğru temel seçimi, yalnızca yapısal dayanıklılığı değil, aynı zamanda bakım sıklığını, ömür maliyetini ve enerji verimliliğini de doğrudan etkiler.



Şekil 7: Türkiye’de deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelinin yüksek olduğu bölgeler -

Dünya Bankası Raporu (Dutton vd., 2019)

Fizibilite çalışmalarında görüldüğü üzere, temel sistemi türbin maliyetinin en yüksek payına sahip bileşenlerden biridir. Yanlış temel seçimi, yatırım maliyetinin yükselmesine ve operasyon süresince performans düşüşüne neden olabilir.



Şekil 8: Deniz üstü rüzgâr türbinlerinde sabit ve yüzer tip temeller (Iraeta, 2021)

Yüzer platformlu türbinlerin ömrü, maruz kaldıkları rüzgâr, dalga ve akıntı yüklerinin dinamik karakterine doğrudan bağlıdır (Uzunoğlu vd., 2021). Bu kuvvetler, sistemde salınım, devrim ve eğilme momentleri oluşturarak türbin bileşenlerinde yorulma ve deformasyona neden olur. Bu nedenle, tasarım aşamasında doğal frekansın, çevresel yüklerin frekans aralığıyla çakışmaması büyük önem taşır; aksi durumda rezonans meydana gelir ve platform kararlılığı bozulur.

3. HESAP MODELLERİ

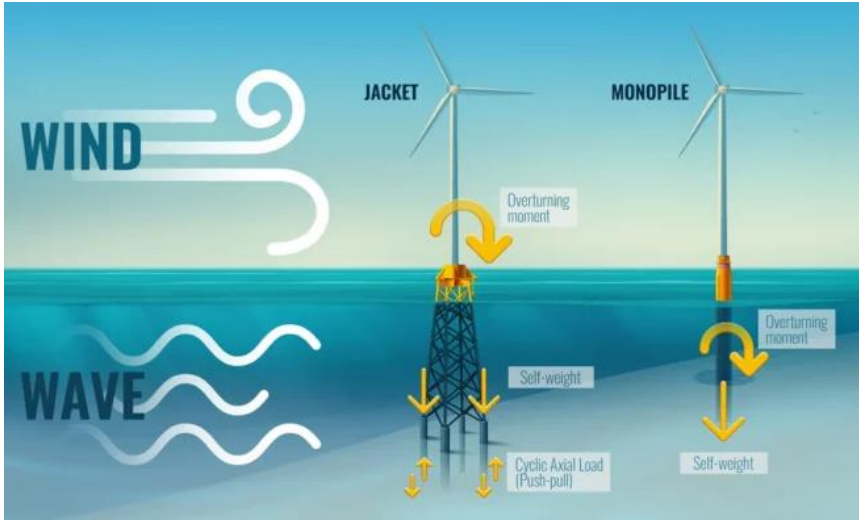
Deniz üstü türbinlerin yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, bilgisayar destekli simülasyonlar —özellikle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri— fizibilite sürecinin temel bir bileşenidir. Bu sayısal analizler, türbinin aerodinamik ve hidrodinamik yükler altındaki davranışını

öngörür ve fiziksel testlerin yerini büyük oranda alabilir. Böylece hem zamandan hem de prototip maliyetinden tasarruf edilebilir.

Bir HAD simülasyonunda, performans değerlendirmesi şu temel kriterlere göre yapılır:

- **Güç Üretimi:** Türbinin farklı rüzgâr hızlarındaki enerji üretim kapasitesi, nominal hız aralığında verimliliği belirler.
- **Rezonans Analizi:** Türbinin doğal frekansının dalga ve rüzgâr kaynaklı yüklerle etkileşimi kontrol edilerek yapısal güvenlik değerlendirilir.
- **Stabilite ve Hareket:** Platformun ileri-geri, yanal ve düşey hareketleri ile dönme, yalpa ve baş-kıç salınımı analiz edilir.

Sabit tabanlı türbinlerde rijitlik yüksek olduğu için serbestlik derecesi düşüktür ve yapılar çoğunlukla eğilme momentleri altında çalışır (Şekil 8 ve 9). Bu durumda, yorulma ve plastik deformasyonun doğru modellenmesi, ömür tahmini açısından kritik önemdedir (Yeter ve Garbatov, 2014).

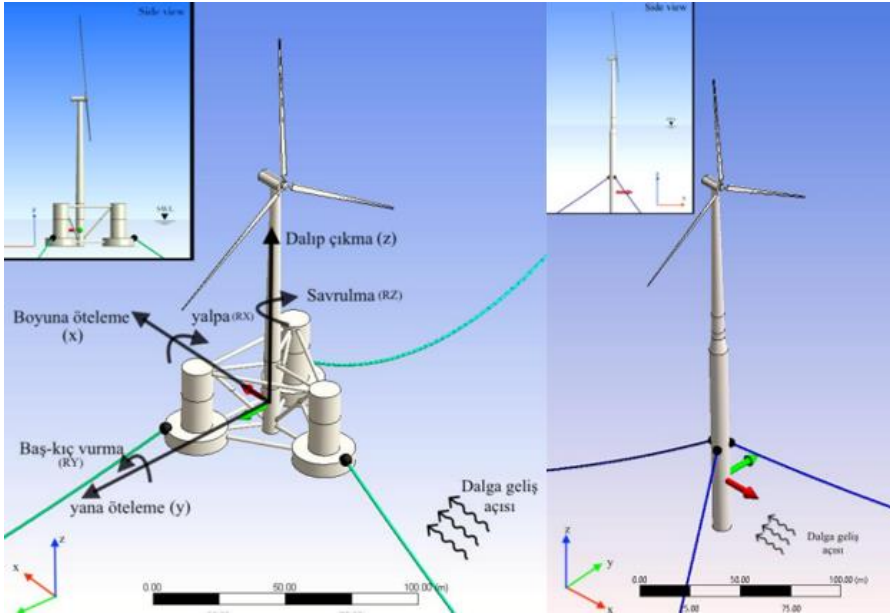


Şekil 9: Farklı sabit temel tiplerine sahip deniz üstü rüzgâr türbinlerine etkiyen yükler ve türbin tepkisi (Bentley Blog, 2022)

Yüzer türbinler, altı serbestlik derecesine sahip hareket dinamiği açısından karmaşık sistemlerdir. Bu tür platformlar genellikle çelik halatlarla (catenary mooring lines) deniz tabanına sabitlenir (Şekil 8 ve 9). Aktaş vd.

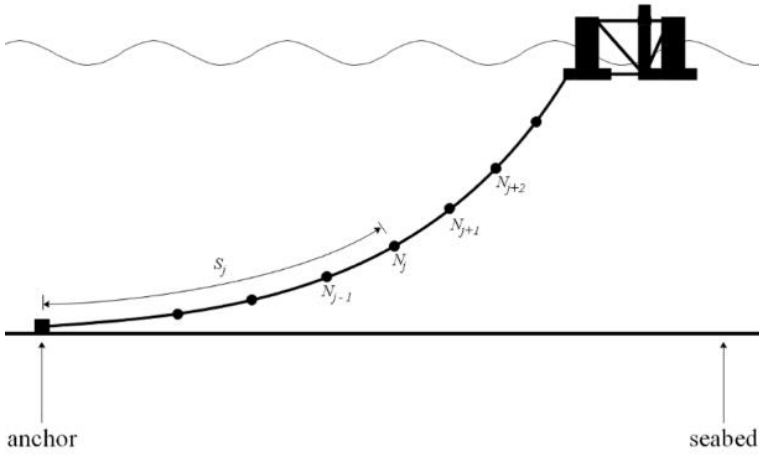
(2018), yarı batık (semi-submersible) tipi temeli ve spar tipi temeli karşılaştırarak sayısal modellerin doğruluğunu değerlendirmiştir (Şekil 10).

Çalışmada kaldırma kuvveti, balast sistemi ve doğal frekans analizleri incelenmiş; elde edilen sonuçlar deneysel veriler ve OC3/OC4 doğrulama modelleriyle karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım, simülasyon yazılımlarının gerçek sistem davranışını temsil etme yetkinliğini test etmiştir.



Şekil 10: Farklı yüzer temel tiplerinin sayısal modellenmesi- Yarı Batık tipi (semi-submersible, solda), Spar tipi (sağda) (Aktaş vd., 2018)

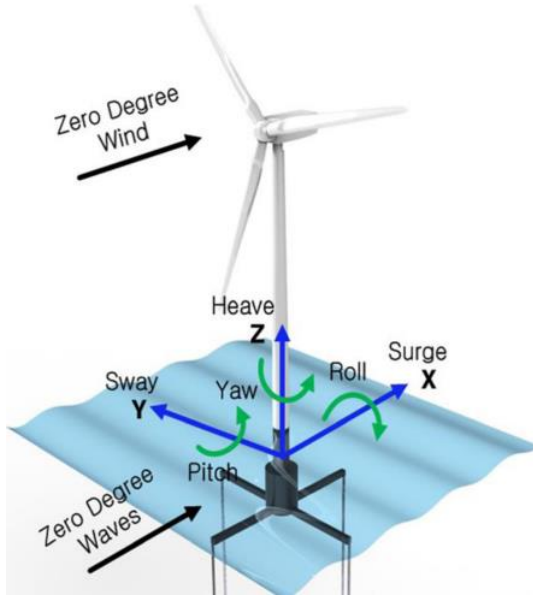
Yüzer türbinlerin demirleme sistemleri, platform dinamiğinde belirleyici unsurlardan biridir. Alkarem vd. (2021) çalışmalarında zincirleme hattı modelleriyle, kabloların kütlesi, akış sürüklemesi, elastik deformasyon ve eğilme momentlerinin sistem üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ayrıca ani gerilme (snap load) durumları analiz edilerek kablo güvenliği değerlendirilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11: Demirlemenin modellenmesi (Alkarem vd., 2021)

Yüzer türbin simülasyonlarında dinamik davranışı doğru tanımlayabilmek için hem sınır koşullarının hem de çözüm algoritmalarının doğru belirlenmesi gereklidir. Tran vd. (2015) tarafından önerilen UBEM (Unsteady Blade Element Momentum) yöntemi, üç boyutlu akış modellemesinin yüksek hesaplama maliyetini azaltmak için geliştirilmiş bir yaklaşımdır (Şekil 12). Bu yöntem, kanat elemanlarına etki eden kuvvetleri bir boyutlu momentum denklemleriyle hesaplayarak, yüksek doğrulukta ancak düşük maliyetli aerodinamik sonuçlar elde edilmesini sağlar.

Zhang vd. (2020) çalışmasında, türbinin dalga etkisi altındaki hareketlerini analiz etmek için frekans alanı ve zaman alanı denklemleri tanımlanmıştır. Bu modellerde sistemin atalet momenti, radyasyon sönümü, viskoz etkiler ve dalga kuvvetleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlarla, türbinin çevresel yükler altındaki yer değiştirme, hız ve ivme tepkileri belirlenmiş ve zaman-bağımlı güç üretimi tahmin edilmiştir.



Şekil 12: Deniz üstü yüzer temelli rüzgâr türbininin altı serbestlik derecesi (Tran vd., 2015)

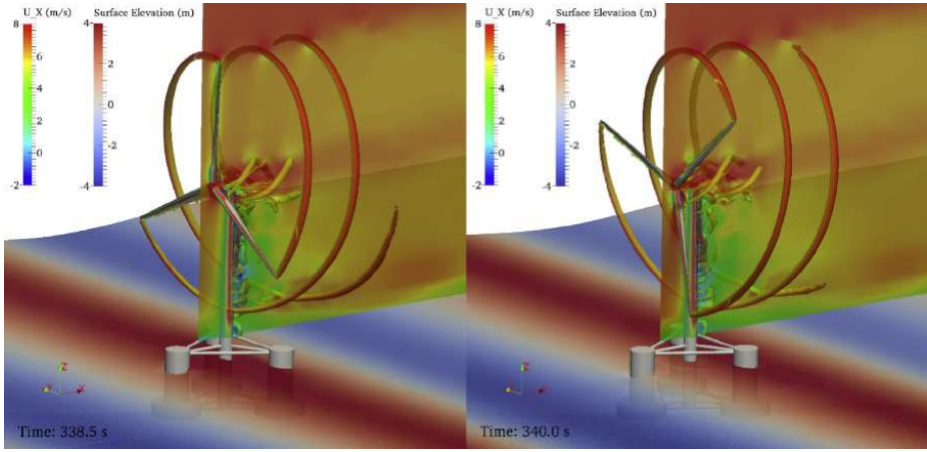
Kuşkusuz, hem yüksek doğruluk değerlerine sahip sonuçlar elde etmek için hassas analizler gerçekleştirme zorunluluğu dolayısıyla, hem de yapıların büyüklüğüyle ve karmaşıklığıyla orantılı olan büyük ağ yapısından dolayı bu tarz gerçekçi simülasyonların hem zaman bakımından hem de donanım bakımından maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca bir parametre değişiminde simülasyonun en baştan tekrarlanması ihtiyacı da parametrik analizlerdeki maliyetlerin daha da artmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeple Reduced Order Modelling (ROM – düşük mertebeli modelleme) ve matematiksel tepki fonksiyonlarının kullanılması, simülasyon süreçlerinin doğruluktan ödün verilmeden kısaltılması ve kolaylaştırılması bakımından kritiktir.

ROM, yüksek hesaplama maliyetine sahip sayısal analizlerin (örneğin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Yapısal Analiz gibi) sonuçlarını, daha düşük boyutlu matematiksel bir modelle temsil etmeyi amaçlayan indirgeme tekniğidir. Bu yöntem, tam mertebeli modellerin (Full Order Model – FOM) davranışını tanımlayan binlerce denklemi veya serbestlik derecesini, sistemin dinamik özelliklerini koruyarak daha az sayıda bağımsız bileşenle ifade eder (Benner vd., 2015). ROM'un temel amacı, karmaşık sistemlerin hesaplanma

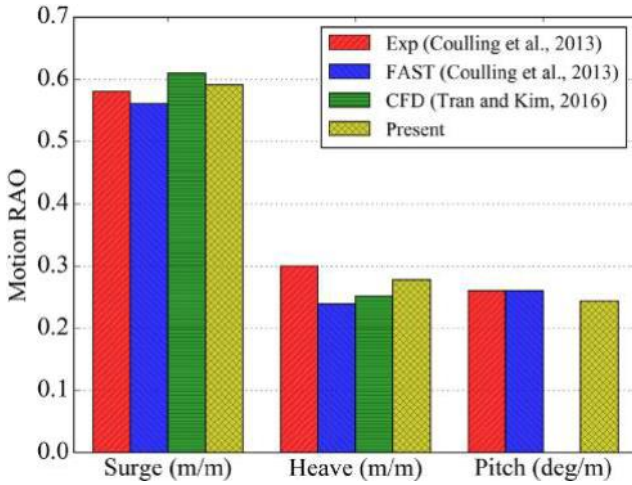
süresini büyük ölçüde azaltırken fiziksel doğruluğunu korumaktır. Bunun için genellikle Proper Orthogonal Decomposition (POD) gibi yöntemlerle sistemin baskın enerji modları belirlenir ve bu modlar üzerinden indirgenmiş bir temsil oluşturulur. Böylece, örneğin bir yüzer rüzgâr türbininin akışkan–katı etkileşimi gibi çoklu fizik analizlerinde günler süren hesaplamalar saniyeler içinde sonuçlanabilir.

Yüzer temelli türbinler için ROM, farklı çevresel koşullarda sistem tepkisinin (yer değiştirme, eğilme momenti, güç üretimi vb.) hızlı biçimde tahmin edilmesine olanak tanır. Bu özellik, bilhassa tasarım optimizasyonu ve fizibilite çalışmaları sırasında maliyetleri düşürmek ve tasarım süresini kısaltmak açısından stratejik öneme sahiptir.

Liu vd., (2017) gerçekleştirdiği çalışmada, yüzer rüzgâr türbinlerinin aerodinamik ve hidrodinamik davranışlarını aynı anda temsil edebilmek için tam akuple HAD analizleri (fully coupled simulations) uygulanmıştır (Şekil 13). Analizlerde, rüzgâr–dalga–yapı etkileşimlerini birlikte ele alan FSI (Fluid–Structure Interaction) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni, yüzer platformun altı serbestlik derecesine sahip karmaşık dinamik davranışlarının ve kanat dönme momentlerinin, çevresel yüklerle etkileşimini doğru biçimde saptayabilmesidir (Şekil 14). Elde edilen sonuçlar, özellikle platform hareketleri, rotor momentleri ve kuplajlı akış alanlarının zamanla değişimini ortaya koymuştur. Ancak çalışma, bu analizlerin yüksek çözüm ağına, zamana bağlı çözüm yöntemlerine ve türbinin her bir zaman adımında yapı deformasyonlarının güncellenmesine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu durum, hesaplama süresini günler mertebesine çıkararak yüksek donanım gereksinimi doğurmaktadır. Dolayısıyla bu tür tam akuple analizler, doğruluk açısından kritik olsa da mühendislik uygulamalarında hızlı karar verme süreçlerinde pratik değildir. Bu bağlamda, literatürde elde edilen bu yüksek doğruluk derecesine sahip sonuçlar, Reduced Order Model (ROM) oluşturulması için temel veri kaynağı niteliğindedir. ROM yaklaşımı, bu tip karmaşık FSI analizlerinden elde edilen verileri kullanarak saniyeler içinde tepki fonksiyonlarını tahmin edebilme potansiyeliyle, tasarım süreçlerini büyük ölçüde hızlandırabilir.



Şekil 13: Yarı-batık temelli deniz üstü rüzgâr türbini akuple simülasyonu (Liu vd., 2017)



Şekil 14: Savrulma, batma-çıkma ve eğilme tepkileri için RAO karşılaştırması. (Liu vd., 2017)

OC5 Projesi'nin ikinci aşamasında, DeepCwind yarı batık yüzer rüzgâr türbini sistemi hem 1/50 ölçekli havuz testleri hem de sayısal modeller aracılığıyla analiz edilmiştir (Robertson vd., 2017). Çalışmanın amacı, yüzer rüzgâr türbinlerinin toplam yüklerinin (global loads) doğrulanması ve farklı modelleme yaklaşımlarının sonuçlar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesidir (Şekil 15). Bu kapsamda, çeşitli kurumlar tarafından geliştirilen aerodinamik,

hidrodinamik ve halat bağlama modelleri karşılaştırılmış; özellikle dinamik halat modelleri, nonlinear dalga kinematığı ve süreksiz aerodinamik modellerin doğruluğu artırdığı belirlenmiştir. Doğrulama, MARIN test havuzunda gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ölçümlerle yapılmış; sekiz farklı rüzgâr-dalga senaryosu için nihai (ultimate) ve yorulma yükleri simülasyonlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 16). Elde edilen sonuçlar, genel yük tahminlerinde yüksek tutarlılık göstermiş ancak kule tepe momentlerinde ve ön halat gerilmelerinde lineer dalga bölgesinin ötesindeki dalga uyarımlarının eksik temsil edilmesinden kaynaklı sapmalar gözlenmiştir. Bu çalışma, FSI temelli modellerin doğrulanması açısından literatürdeki en kapsamlı örneklerden biridir ve yüksek doğrulukla elde edilen bu sonuçlar, gelecekte ROM oluşturma süreçleri için kritik bir referans veri tabanı sağlamaktadır. Böylece, günler süren FSI simülasyonları yerine, bu verilerle eğitilmiş ROM modelleri kullanılarak sistem tepkileri saniyeler içinde tahmin edilebilir.

Li vd., (2025a) çalışmalarında, yüzer rüzgâr türbini platformlarının kavramsal tasarım sürecini hızlandırmak ve maliyetleri azaltmak için bir Entegre Tasarım Optimizasyon (IDO) çerçevesi geliştirmişlerdir. Tasarım sürecinde üç ana modül kullanılmıştır: Floater tasarımı, entegre modelleme ve analiz, ayrıca optimizasyon. İlk modül, panel ağ oluşturma, adaptif balast dağılımı, hidrostatik özellik analizi ve hidrodinamik katsayıların hesaplanmasını içerirken; ikinci modül frekans-domain (FD) kodu ile platformun dinamik tepkilerinin hızlı şekilde tahmin edilmesini sağlamıştır (Şekil 17). Üçüncü modül ise stabilite, güvenlik ve maliyet-etkinlik kriterlerine göre tasarım boyutlarını optimize etmiştir. Çalışma, 15 MW sınıfı bir türbin için üç sütunlu yarı-batık (semi-submersible) bir platform üzerinde bir “case-study” uygulaması sunmaktadır ve bu yöntemle baş-kıç vurma (pitch) hareketlerinde %40 düşüş, kule tabanındaki baş-kıç eğilme momentinde ise %17 azalma sağlandığını göstermektedir. Bu yaklaşım, geleneksel çok-serbestlik dereceli FSI (akuple aero-hidro-yapı) simülasyonlarına kıyasla önemli ölçüde daha düşük donanım ve zaman gereksinimi sunmakta; bu durum, ilerleyen çalışmalarda ele alacağınız ROM yaklaşımının gerekçesiyle doğrudan örtüşmektedir.

Participant	Code	Aerodyn.		Hydrodynamics							Mooring		
		Dyn. Wake	Unst. Airfoil	nd 2 nd WK	1 st PF	2 nd PF	ME	Meas. Wave	Stretch	Inst. Pos.	Dyn.	Hydro Exc.	Seabed Fric.
4Subsea	OrcaFlex-FAST v8												
CENER	FAST v6 + OPASS												
CENTEC	FAST v8												
DNV GL	Bladed 4.8												
DTU ME	HAWC2												
DTU PF	HAWC2												
ECN-MARIN	aNysIM-PHATAS v10					Diff.-only							
IFE	3DFloat												
IFP_PRI	DeepLines Wind v5R2												
NREL PF	FAST v8												
NREL ME	FAST v8												
POLIMI	FAST v8.15			Diff.-only									
Siemens PLM	Samcef Wind Turbines												
Tecalia F70	FAST v7 + OrcaFlex 9.7												
Tecalia F8	FAST v8.16												
UC-IHC	Sesam												
UOU	UOU + FAST v8												
UPC	UPC + FAST												
UTokyo	NK-UTWind												
WavEC FAST	FAST v8												
WavEC FF2W	FF2W												

Şekil 15: Doğrulama çalışmasında yer alan katılımcıların, kullanılan araçların/kodların ve modelleme yaklaşımının özeti. (Robertson vd., 2017)

Table 10. Description of validation test (load) cases – irregular wave excitation with and without wind.

Load Case	Description	rpm	Blade Pitch (deg)	Wave Condition	Wind Condition	Sim. Length (min)
3.3	Operational Wave	0	90	Irregular: $H_s = 7.1$ m, $T_p = 12.1$ s, $\gamma=2.2$, JONSWAP	N/A	176
3.4	Design Wave	0	90	Irregular: $H_s = 10.5$ m, $T_p = 14.3$ s, $\gamma=3.0$, JONSWAP	N/A	180
3.5	White Noise Wave	0	90	White noise: $H_s = 10.5$ m, $T_{range} = 6-26$ s	N/A	180
4.1	Oper. Wave Steady Wind 1	12.1	1.2	Irregular: $H_s = 7.1$ m, $T_p = 12.1$ s, $\gamma=2.2$, JONSWAP	$V_{hub,z} = 12.91$, $V_{hub,z} = -0.343$ $\sigma_x = 0.5456$, $\sigma_z = 0.2376$	180
4.2	Oper. Wave Steady Wind 2	12.1	15.0	Irregular: $H_s = 7.1$ m, $T_p = 12.1$ s, $\gamma=2.2$, JONSWAP	$V_{hub,z} = 21.19$, $V_{hub,z} = -0.600$ $\sigma_x = 0.9630$, $\sigma_z = 0.4327$	180
4.3	Oper. Wave Dynamic Wind	12.1	1.2	Irregular: $H_s = 7.1$ m, $T_p = 12.1$ s, $\gamma=2.2$, JONSWAP	NPD spectrum, $\mu = 13.05$	180
4.4	Design Wave Steady Wind 1	12.1	1.2	Irregular: $H_s = 10.5$ m, $T_p = 14.3$ s, $\gamma=3.0$, JONSWAP	$V_{hub,z} = 12.91$, $V_{hub,z} = -0.343$ $\sigma_x = 0.5456$, $\sigma_z = 0.2376$	180
4.5	White N. Wave Steady Wind 1	12.1	1.2	White noise: $H_s = 10.5$ m, $T_{range} = 6-26$ s	$V_{hub,z} = 12.91$, $V_{hub,z} = -0.343$ $\sigma_x = 0.5456$, $\sigma_z = 0.2376$	180

Şekil 16: Doğrulama testi (yük) durumlarının açıklaması (Robertson vd., 2017)

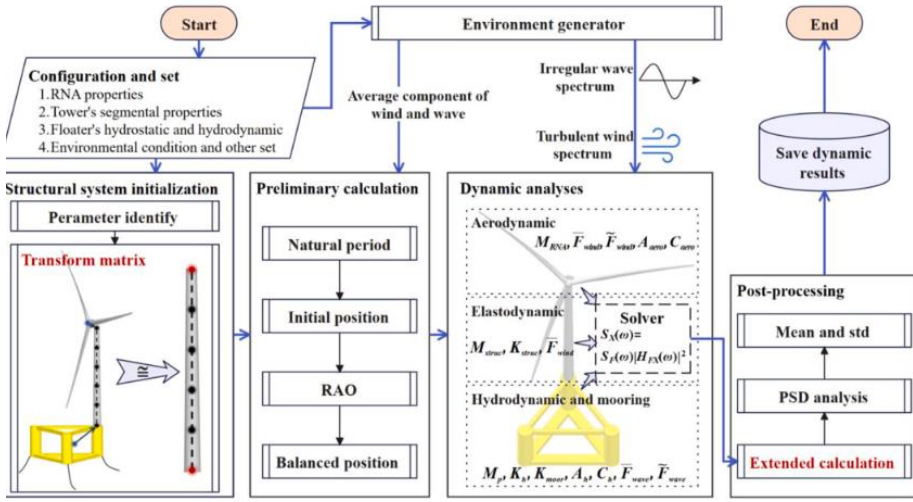
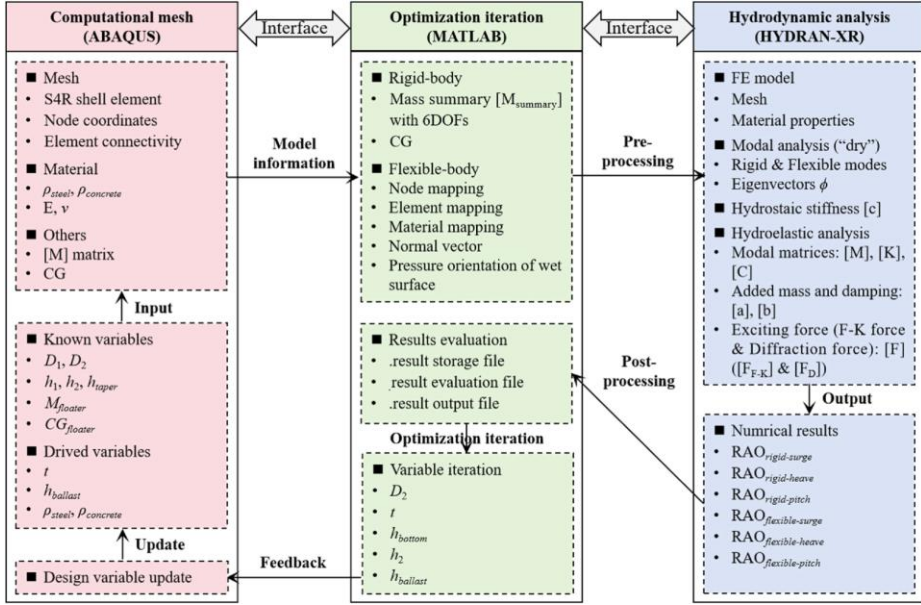


Fig. 1. Improved frequency-domain method flow chart considering the eccentricity of tower and rotor-nacelle assembly (RNA).

Şekil 17: Frekans düzlemleri hesaplama akış şeması (Li vd., 2025a)

Ma vd., (2025) çalışmalarında, OC3-spar tipi yüzer rüzgâr türbininin rijit hareket ve hidroelastik tepkisine dayalı olarak kapsamlı bir tasarım optimizasyonu yapmışlardır. Çalışmada kullanılan yöntem, HYDRAN-XR yazılımı ile ABAQUS–MATLAB entegrasyonuna dayanmakta olup; dalga yükleri altında rijit ve esnek gövde davranışlarını eşzamanlı değerlendiren bir çok-amaçlı pareto-ön cephesi algoritması uygulanmıştır. Optimizasyon değişkenleri arasında alt silindirik kısmın çapı, cidar kalınlığı, su çekimi derinliği ve balast yüksekliği yer almış; amaç fonksiyonu ise yapının boyuna ötelenme (surge), dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma yönlerindeki tepki genlik operatörlerinin (RAO) minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Hidroelastik analizde potansiyel akış teorisi ile sınır elemanlar yöntemi birleştirilmiş, deformasyonlar sonlu eleman modal üst üste bindirme tekniğiyle elde edilmiştir (Şekil 18). Optimizasyon sonucunda spar platformun $\gamma = 5,41$ incelik oranı ve CG = -54 m konfigürasyonu ile boyuna ötelenme, dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinde %20–40 oranında azalma sağlanmıştır. Çalışma, rijit modellemenin mühendislik düzeyinde kabul edilebilir olduğunu, ancak gerilme ve yorulma analizlerinde hidroelastik etkilerin göz ardı edilmemesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu kapsamlı optimizasyon süreci günler süren analiz gerektirmiştir ve literatürdeki yüksek doğruluk derecesine sahip bu veriler,

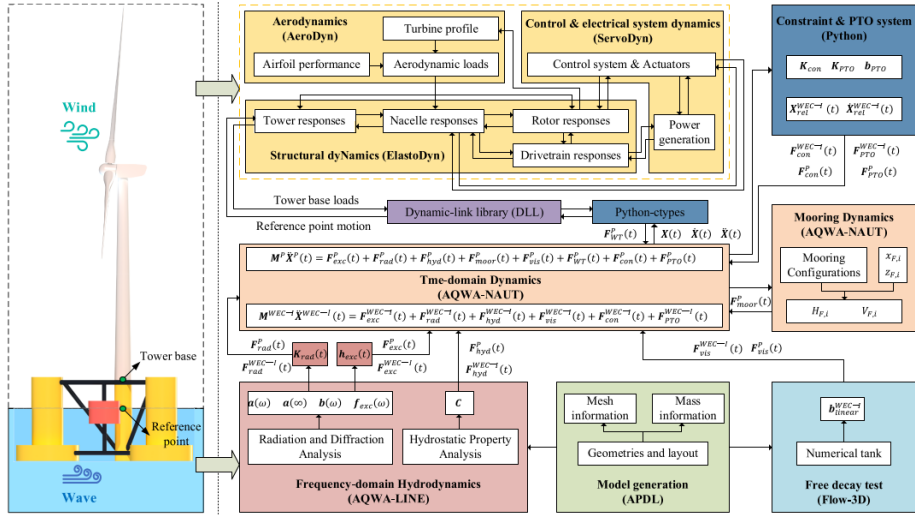
Reduced Order Model tabanlı hızlı tepki fonksiyonu oluşturma yaklaşımları için kritik bir eğitim veri kümesi niteliği taşımaktadır.



Şekil 18: Optimizasyon akış şeması (Ma vd., 2025)

Han vd. (2024), dalga ve rüzgâr enerjisini birlikte kullanan yüzer hibrit sistemlerin karmaşık dinamik davranışlarını çözümlemek amacıyla OFPA (OpenFAST-AQWA Python Architecture) adını verdikleri tam akupule aero-hidro-servo-elastik-mooring-multibody sayısal simülasyon çerçevesini geliştirmişlerdir (Şekil 19). Bu iş akışı, OpenFAST'in aerodinamik modüllerini ANSYS AQWA'nın hidrodinamik çözücüsüyle bütünleştirmiş, Python tabanlı harici kuvvet modülüyle PTO (Power-Take-Off) ve kılavuz-ray (guide-roller) sistemlerinin doğrusal olmayan etkileşimlerini modellemiştir. Geliştirilen model, 5 MW'lık OC4-DeepCwind tipi yarı batık platform ve heave tipi dalga enerjisi konverterlerin birleşiminden oluşan bir hibrit sistemde doğrulanmıştır. OFPA, farklı dalga-rüzgâr koşullarında sistemin altı serbestlik dereceli (6-DOF) hareketini, PTO sönüm etkilerini ve güç üretimini zamana bağlı olarak çözebilmiştir. Deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar, OFPA'nın hem yüzer rüzgâr türbini hem de dalga enerjisi konverter bileşenlerinin hareket genliklerini yüksek doğrulukla tahmin ettiğini göstermiştir. Bununla birlikte,

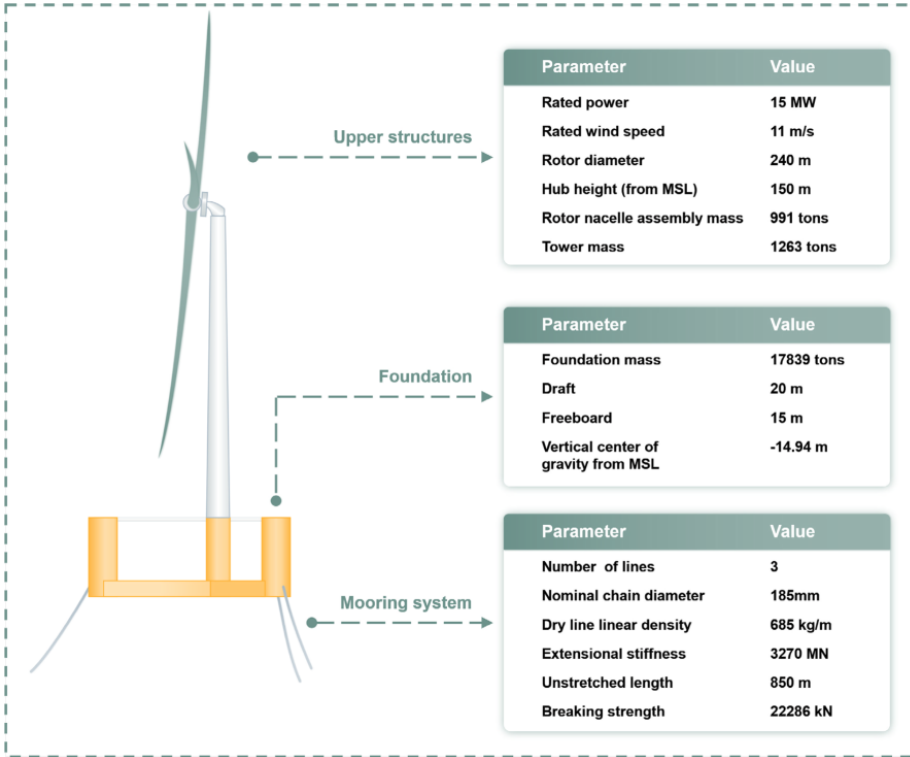
çalışmada bildirilen analizlerin her bir senaryosu için yüksek çözünürlüklü ağ yapısı ve paralel işlem desteği gerektiği, dolayısıyla birkaç gün süren hesaplama maliyetine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, bu tür tam akuple (FSI) simülasyonlardan elde edilen doğrulanmış veriler, ROM tabanlı yaklaşımların eğitimi ve doğrulanması açısından kritik öneme sahiptir; böylece benzer doğrulukta sonuçlar saniyeler içinde elde edilebilir.



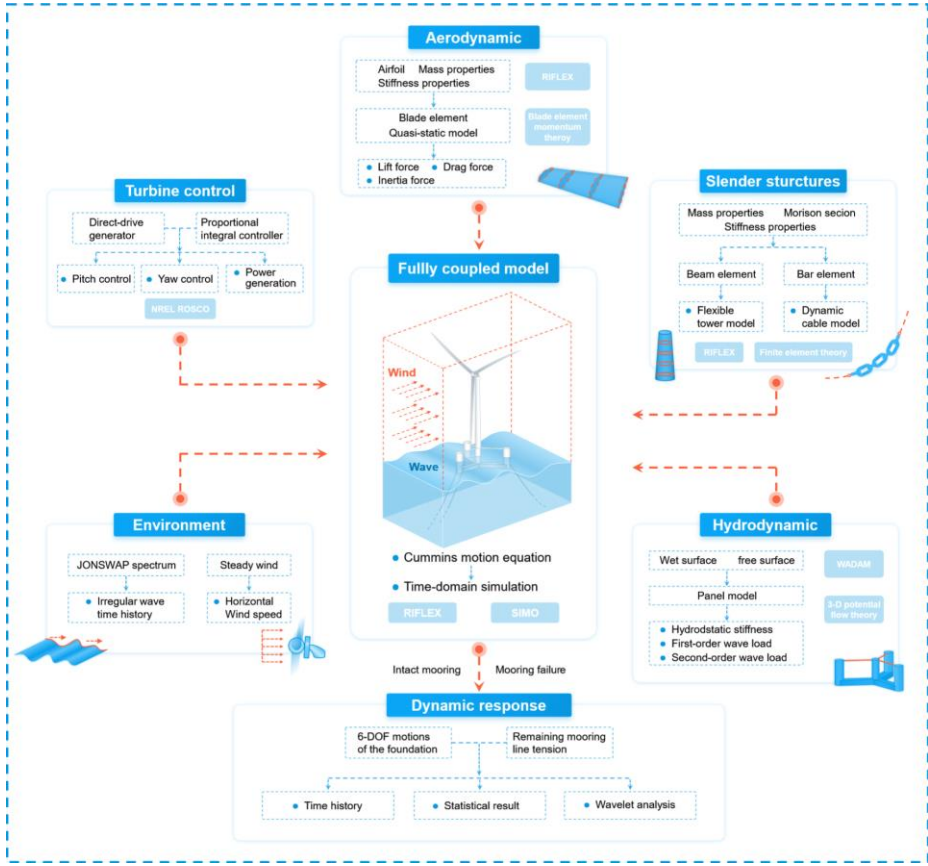
Şekil 19: Hibrit sistem dinamik analizi için tam akuple aero-hidro-servo-elastik-demirleme-çok gövdeli sayısal simülasyon şeması (Han vd., 2024)

Li vd. (2025a) ve Li vd. (2025b), 15 MW yarı-batık (semi-submersible) VoltornUS-S tipi yüzer rüzgâr türbininde (Şekil 20) bir halat kopması sonrası meydana gelen dinamik davranışları analiz etmek üzere tam akuple aero-hidro-servo-elastik bir model geliştirmiştir. Model, BEM (Blade Element Momentum) teorisine dayalı aerodinamik yükleri, potansiyel akış teorisi ve Boundary Element Method (BEM) tabanlı hidrodinamik kuvvetleri, ayrıca sonlu eleman yöntemi (FEM) yaklaşımıyla modellenmiş halat dinamiklerini içeren SIMO–RIFLEX yazılımı üzerine kurulmuştur (Şekil 21). Çalışmada dört senaryo (normal, halat kopması + kule ekseninde dönme hatası, halat kopması + acil durdurma, aktif kontrol) ele alınmış; her biri için 6 serbestlik dereceli (6-DOF) hareketler ve kalan halat gerilmeleri zaman-frekans (wavelet) analiziyle incelenmiştir. Sonuçlar, halat kopması sonrası platformda düşük frekanslı “slow drift” hareketlerinin geliştiğini ve boyuna öteleme yönünde 776

m'ye kadar sapma oluşabileceğini göstermektedir. Ayrıca, acil durdurma manevrasının sürüklenmeyi azaltmakla birlikte sistemin yeniden dengeye gelme süresini uzattığı ve halat gerilmelerinde yüksek frekanslı yorulma bileşenlerini artırdığı belirtilmiştir. Bu kapsamlı simülasyonlar, her senaryo için yaklaşık birkaç bin saniyelik zaman adımıyla günler süren hesaplama yükü oluşturmuştur. Dolayısıyla, bu tür yüksek doğruluklu FSI analizleri, ROM tabanlı yöntemlerin eğitilmesi ve doğrulanması için kritik referans veriler sağlamaktadır; ROM sayesinde benzer senaryoların tepkisi gelecekte saniyeler içinde tahmin edilebilir hale gelebilecektir.



Şekil 20: Deniz üstü yüzer temelli rüzgâr türbininin ve demirleme sisteminin özellikleri. (Li vd., 2025b)



Şekil 21: İş akışı görünümü (Li vd., 2025b)

SONUÇLAR

Yüzer rüzgâr türbinlerinin dinamik davranışlarının doğru biçimde modellenebilmesi, aerodinamik, hidrodinamik, yapısal ve kontrol sistemlerinin birbirleriyle olan etkileşimlerinin bütüncül olarak ele alınmasını gerektirir. Bu kapsamda kullanılan tam akupule analizler (FSI – Fluid–Structure Interaction), sistemin altı serbestlik derecesine sahip karmaşık hareketlerini, dalga ve rüzgâr kaynaklı zamana bağlı yük değişimlerini ve geri besleme etkilerini eş zamanlı olarak çözebilmektedir. Ancak, bu tür yüksek doğruluklu analizlerin en büyük dezavantajı, çözüm sürelerinin uzunluğu ve hesaplama maliyetlerinin yüksekliğidir.

Bir yüzer türbin modeli, aerodinamik (rüzgâr alanı ve kanat yükleri), hidrodinamik (dalga kuvvetleri, radyasyon ve difraksiyon etkileri), yapısal

(gövde ve kule deformasyonları) ve kontrol sistemleri (pitch–yaw kontrolleri, PTO sistemleri) olmak üzere dört ana bileşenin karşılıklı etkileşimini içerir. Bu bileşenlerin her biri için zamana bağlı denklemlerin eşzamanlı çözülmesi gerekir. Dolayısıyla çözüm süresi, modelin ağ yoğunluğu ve zamansal çözünürlüğü ile doğru orantılı olarak artar. Özellikle dalga spektrumlarının ve akış alanlarının üç boyutlu olarak modellenmesi, çözümün haftalarca sürebildiği durumlara yol açabilir.

Yüksek çözünürlüklü HAD veya FSI tabanlı bu analizlerin hesaplama maliyetleri, erken tasarım aşamalarında optimum türbin konfigürasyonlarının belirlenmesini zorlaştırır. Her senaryo için yüzlerce simülasyon yapılması gerektiğinde, sürecin toplam hesaplama yükü binlerce CPU-saat düzeyine ulaşabilir. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında, tam akupple modellerin yalnızca doğrulama veya nihai tasarım aşamalarında kullanılması yaygın bir yaklaşımdır.

Bu noktada Reduced Order Model (ROM) yaklaşımları devreye girmektedir. ROM, yüksek çözünürlüklü sayısal modellerden veya deneysel verilerden elde edilen fiziksel ilişkileri indirgenmiş bir matematiksel yapı hâline getirerek, aynı sistem tepkilerini çok daha kısa sürede belirlemeyi amaçlar. Böylece, tam akupple bir analizin günler süren hesaplaması yerine, benzer doğrulukta sonuçlar saniyeler içinde elde edilebilir. ROM'un en büyük avantajı, yüksek doğruluk ile düşük hesaplama maliyetini birleştirmesidir. Bu sayede mühendislik süreçlerinde hızlı optimizasyon, çoklu senaryo analizi ve kontrol stratejilerinin gerçek zamanlı testleri mümkün hâle gelir.

Sonuç olarak, deniz üstü yüzer rüzgâr türbinlerinde tam akupple analizlerin fiziksel doğruluk açısından vazgeçilmez olduğu, ancak tasarım döngüsünde kullanılabilirliğini sınırlayan temel faktörün hesaplama maliyeti olduğu görülmektedir. Bu nedenle, tam akupple analizlerden elde edilen güvenilir verilerin indirgenmiş matematiksel modeller yani ROM aracılığıyla yeniden yapılandırılması, modern rüzgâr enerjisi mühendisliğinde hem hız hem de doğruluk dengesini sağlayan yeni bir paradigma olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKÇA

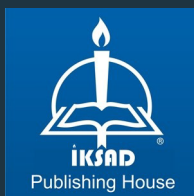
- Aktaş, K., Al Karem, R. A., Öztunalı Özbahçeci, B., & Özkol, Ü. (2018). Açık Deniz Rüzgar Türbinleri Yüzer Platformlarının Hidrodinamik Modellenmesi. In 9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu (pp. 788–801).
- Alkarem, Y. R., & Ozbahçeci, B. O. (2021). A Complemental Analysis of Wave Irregularity Effect on the Hydrodynamic Responses of Offshore Wind Turbines With the Semi-Submersible Platform. *Applied Ocean Research*, 113, 102757. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102757>
- Aminzadeh, A., Dimitrova, M., Meiabadi, M. S., Sattarpanah Karganroudi, S., Taheri, H., Ibrahim, H., & Wen, Y. (2023). Non-contact inspection methods for wind turbine blade maintenance: Techno–Economic Review of techniques for integration with industry 4.0. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 42(2). <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00967-5>.
- Benner, P., Gugercin, S., & Willcox, K. (2015). A survey of projection-based model reduction methods for parametric dynamical systems. *SIAM Review*, 57(4), 483–531. <https://doi.org/10.1137/130932715>
- Bentley Blog | Infrastructure Engineering Software & Solutions. (2024). All about offshore wind turbine foundations. <https://blog.bentley.com/software/all-about-offshore-wind-turbine-foundations/>
- Communication, C. (2024). Wind Energy: Potential for the Future. ReNew. <https://www.renew.com/blog-detail/wind-energy-potential-for-the-future>
- Dutton, A. S. P., Sullivan, C. C., Minchew, E. O., Knight, O., & Whittaker, S. (2019). (rep.). *Going Global : Expanding Offshore Wind to Emerging Markets* (Vol. 1, pp. 24–25). World Bank. Retrieved September 2024, from <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/716891572457609829/going-global-expanding-offshore-wind-to-emerging-markets>.
- Hall, J. F., Mecklenborg, C. A., Chen, D., & Pratap, S. B. (2011). Wind energy conversion with a variable-ratio gearbox: Design and analysis. *Renewable Energy*, 36(3), 1075–1080. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.037>

- Han, M., Shi, H., Cao, F., Zhu, K., Liu, B., & Yu, M. (2024). Dynamic characteristics and parameter analysis of a floating hybrid wind–wave energy system based on a novel coupled numerical framework. *Energy Conversion and Management*, 312, 118558. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118558>
- Heflich, A., & Saulnier, J. (2022). Towards carbon neutrality through ambitious transformation of the EU energy system. European Parliamentary Research Service (EPRS), European Added Value Unit. PE 730.346. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)730346](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)730346)
- Iraeta Energy Equipment Co., Ltd. (2021). IRAETA Provides Tower Flanges for European Floating Offshore Wind Power. <https://iraeta.com/index.php?s=%2FArticle%2Fdetail%2Fid%2F456.html>
- Komusanac, I., Fraile, D., & Brindley, G. (2019). (rep.). Wind Energy in Europe in 2018 (pp. 7–29). Wind Europe. Retrieved 2024, from <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>.
- Lee, J., & Zhao, F. (2024). Global Wind Report 2024 (p. 53). Global Wind Energy Council. Retrieved September 2024, from <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>.
- Li, C., Chen, P., Shui, Y., Cheng, Z., Wang, S., & Erfort, G. (2025a). An efficient integrated optimization framework for conceptual design of floater for floating wind turbines: A case study. *Renewable Energy*, 245, Article 122773. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122773>
- Li, Y., Li, G., Zhu, Q., Cui, Y., Feng, Y., Su, O., Li, H., Wang, B., & Meng, H. (2025b). Effects of mooring line fracture on 15 MW floating offshore wind turbine under different operation strategies. *Engineering Failure Analysis*, 179, 109754. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109754>
- Liu, Y., Xiao, Q., Incecik, A., Peyrard, C., & Wan, D. (2017). Establishing a fully coupled CFD analysis tool for floating offshore wind turbines. *Renewable Energy*, 112, 280-301. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.052>

- Ma, C., Lee, S., Zhu, X., & Zi, G. (2025). Design optimization of OC3 spar floater based on rigid motion and hydroelastic response. *Ocean Engineering*, 334, Article 121543. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121543>
- Ohlenforst, K., Sawyer, S., Dutton, A., Backwell, B., Fiestas, R., Lee, J., Qiao, L., Zhao, F., & Balachandran, N. (2018). (rep.). *Global Wind Report 2018* (pp. 17–54). Global Wind Energy Council. Retrieved 2024, from <https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/gwec-global-reports/>.
- Robertson, A. N., Jonkman, J. M., Masciola, M., Song, H., Goupee, A., Coulling, A., Luan, C., et al. (2017). OC5 Project Phase II: Validation of global loads of the DeepCwind semisubmersible floating system test campaign. *Renewable Energy*, 109, 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.052>
- Şentürk, A. E., & Oğuz, E. (2020). Karasal ve Deniz Üstü Rüzgâr Çiftliklerinin Ekonomik ve Çevresel Etkilerinin İncelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 28(217), 5-32.
- Terzioğlu, H., Arslan, M., & Demirok, H. D. (2019). Rüzgâr Enerjisi ile Elektrik Üretimi. In *Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri* (pp. 219–241). essay, Gece Akademi.
- Tran, T.T., Kim, D.-H., & Hieu Nguyen, B. (2015). Aerodynamic Interference Effect of Huge Wind Turbine Blades with Periodic Surge Motions Using Overset Grid-Based Computational Fluid Dynamics Approach. *Journal of Solar Energy Engineering*, 137(6). <https://doi.org/10.1115/1.4031184>
- Uzunoglu, E., Oğuz, E., & Soares, C. G. (2021). An Overview Of Platform Types Used In Floating Wind Energy. In *2nd International Congress on Ship and Marine Technology* (pp. 51–63). İstanbul; e-ISBN: 978-605-01-0713-5.
- Ünal, R., Akçay, M. T., & Özgünel, S. (2023). Enerji Veriminin Arttırılması ve Simülasyonunda Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinin etkisinin incelenmesi. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*. <https://doi.org/10.29137/umagd.1345819>.
- Yeter, B., & Garbatov, Y. (2013). Fatigue damage analysis of a fixed offshore wind turbine supporting structure. *Developments in Maritime*

Transportation and Exploitation of Sea Resources, 415–424.
<https://doi.org/10.1201/b15813-51>

Zhang, P., Yang, S., Li, Y., Gu, J., Hu, Z., Zhang, R., & Tang, Y. (2020).
Dynamic Response of Articulated Offshore Wind Turbines Under
Different Water Depths. *Energies*, 13(11), 2784.
<https://doi.org/10.3390/en13112784>



ISBN: 978-625-378-464-5