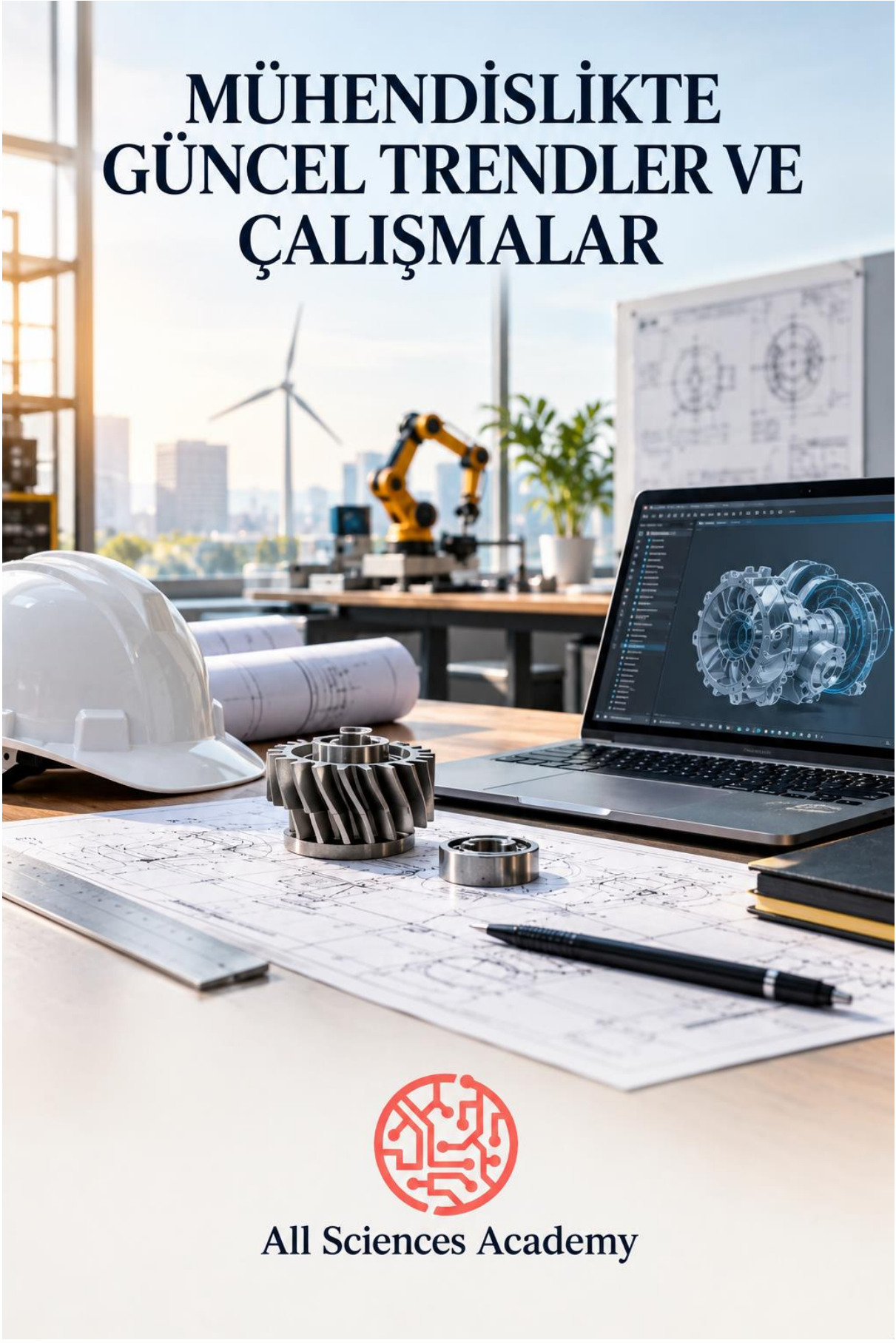


MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL TRENDLER VE ÇALIŞMALAR



All Sciences Academy

MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL TRENDLER VE ÇALIŞMALAR

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA





Mühendislikte Güncel Trendler ve Çalışmalar

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÖZKAYA

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Eylül 2026

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-5472-00-7

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	6
Kömür Karışımlarının Yanma Davranışı Üzerine Uçucu Madde ve Proses Parametrelerinin Etkisi	
<i>Bünyamin DÖNMEZ, Ahmet Umut ELTAŞ</i>	
2. Bölüm	36
Kil Katkılı PVC Polimer Kompozit Filmlerin XRD, FTIR, SEM, TEM ve Termal Analizler ile Karakterizasyonlarının Araştırılması	
<i>Ceyda BİLGİÇ, Şafak BİLGİÇ</i>	
3. Bölüm	61
İklim-Nötr ve Suya Dirençli Kentler İçin Çatı Stratejileri: Serin ve Mavi-Yeşil Çatıların Termal Performans, Su Yönetimi, Karbon ve Ekosistem Hizmetleri Açısından Karşılaştırılması	
<i>Gamze DEMİRTAŞ</i>	
4. Bölüm	87
Maden Göllerinin Yangın Havuzu (Su Toplama Çukuru) Olarak Kullanılması	
<i>Mehmet ÖZÇELİK</i>	
5. Bölüm	98
Mersin Ovacık Kuvarsit Ocağının Jeolojik Özellikleri ve Endüstriyel Süreçlerde Kullanımı	
<i>Mehmet ÖZÇELİK</i>	
6. Bölüm	111
İklim Değişikliğinin Turizm Sektörüne Etkilerinin Değerlendirilmesi	
<i>Mehmet Sait ERCEK, Murat BATAN</i>	
7. Bölüm	127
Makran Dalma-Batma Zonu'nun (İran) Manyetik ve Sismolojik Verilerle Değerlendirilmesi	
<i>Sercan KAYIN, M. Nuri DOLMAZ</i>	

Yüksek Katlı Konutlarda Enerji Etkin Tasarım Stratejileri ve İyileştirme Yaklaşımları

Aisha SHUQAIDEF, Özlem AYDIN

Kömür Karışımlarının Yanma Davranışı Üzerine Uçucu Madde ve Proses Parametrelerinin Etkisi

Bünyamin DÖNMEZ¹
Ahmet Umut ELTAŞ²

- 1- Prof. Dr. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, bdonmez@atauni.edu.tr ORCID No : 0000-0002-7680-0755
- 2- Kimya Mühendisi, İşletme, Erzurum Sukkar Şeker Fabrikası, ahmetumuteltas@gmail.com, ORCID No : 0009-0007-8282-2460

ÖZET

Bu çalışma, yüksek uçucu madde içeren kömür karışımlarından hazırlanan paçal örneklerin yanma davranışını üzerine parametre etkilerini inceleme üzerine tasarlanmıştır. Paçal süreci; teknik, çevresel ve ekonomik bir uygulamadır. Paçal hazırlamada; farklı kömür türlerinin karıştırılması ile yakıt kalitesinin artırılması, emisyon parametrelerinin kontrol edilmesi ve enerji santralleri gibi alanlarda yakıt esnekliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Yakıt kimyasını değiştirme ile, cüruf oluşumu, korozyon veya bazı hava kirleticilerinin (örneğin, partiküller, kükürt dioksit veya azot oksitleri) oluşumunu engellemek de teknik ve ekonomik faydalar sağlayabilir. Kömürlerin özelliklerine bağlı olarak, klasik yakma teknikleri genellikle bu tür katı yakıtların yanma davranışlarını tam olarak tahmin edemez. Kömür karışımlarının seçimine karar vermek için hem geleneksel hem de gelişmiş karakterizasyon tekniklerinin de bir arada çalışılması gerekmektedir. Bu tekniklerden elde edilen sonuçlar, optimum karışım oranlarını formüle etmek ve ayrıca paçal kömür yakıtı için kazanları verimli bir şekilde tasarlamak için kullanılabilir. Bu araştırma, paçal kömür yanma davranışı üzerine uçucu madde parametresinin belirleyici bir etki oluşturduğunu açıkça göstermektedir. Bazı çalışmalar, yüksek uçucu madde (YUM) varlığının katkısız özellik sergilediğini ve YUM içerikli kömür karışımlarının yanma davranışının öngörülebilir olduğunu ortaya koymuş ve bir takım deneysel verilere dayanarak, yanma indeksi ve tükenme özellikleri de izlenebilmiştir. Ayrıca, bitümlü kömür karışımlarına ait kül, YUM, kalorifik değer, gerçek parçacık yoğunluğu ve azotu salınımının katkısız özellik gösterdiği, linyit içeren kömür karışımlarında uçucu madde salınım hızı ve YUM içeriği katkısız olmadığı gözlenmiştir. Yine, oksijen konsantrasyonunun artırmanın, yanma performansını genel olarak iyileştirdiği ve bu performansı tanımlamak için aktivasyon enerjisinin yeterli olmadığını belirlenmiştir. Ayrıca, parçacık boyutunun azalması ile yanma performansının arttığı ve toz kömürü yakan sistemlerde 100 µm altında bir öğütmenin tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Biyokütle-kömür paçalarında yaklaşık %30' luk biyokütle oranı; uçucu organik bileşen (UOB), NO_x ve SO₂ emisyonlarını azalttığı ve prosesin ekonomik ve güvenilir işletimi açısından optimum bir değer olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler- Yüksek uçucu madde, Paçal kömürü oluşturma, Yanma karakterizasyonu, Katkısız özellik, Emisyon Etkisi

1. GİRİŞ

Ekonomideki hızlı büyüme ve enerji ihtiyacındaki artışla birlikte kömür, halen küresel elektrik üretiminin temel taşlarından birisi olmaya devam etmektedir (Cheng ve Pan, 2020:3). Bazı ülkelerde üretilen toplam elektriğin %60' dan fazlası kömür bazlı termik santrallerden karşılanmaktadır. Dünya

apında çıkarılan kömürün yalnızca %10'u uluslararası ticarete katkı sağlamaktadır (Raaj vd., 2016:11). Ancak, kömür yakılmasıyla ortaya çıkan emisyonlar, elektrik üretimine kısıtlama getirmektedir. Ekonomik verimliliğin azalması ve çevresel standartların sürekli iyileşmesiyle birlikte kömürle çalışan enerji santrallerinde kömür karışımlı bir trend haline gelmiştir (Tong vd., 2021:2). Fakat farklı kalite ve kökene sahip kömürlerin tek başlarına yakılması; ekonomik, operasyonel ve çevresel kısıtlamalar nedeniyle her zaman mümkün olmamakta ve pek fazla tercih de edilmemektedir. Avrupa'daki kömür tedarik anlaşmaları sona erdiğinden, dünya pazarında bulunan daha ucuz kömürlerden daha fazla yararlanmak artık mümkündür. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde kömür paçalı hazırlama konusunda çok sayıda araştırma yapılmıştır (Haas vd., 2001:1317; Li vd., 2020:2126). Yani, enerji santrallerini ekonomik olarak işletmek, yüksek/düşük kaliteli kömürlerden en iyi şekilde yararlanmak için birçok enerji santrali, karışıık kömür yakma teknolojisini kullanmaktadır. Düşük kaliteli kömürlerin yüksek kalorifik değerli ve düşük kül oranına sahip kömürlerle karıştırılması, kömür kalitesini iyileştirmekte ve kömür yıkama ihtiyaını ortadan kaldırmaktadır. Hindistan, Endonezya, Güney Afrika ve Avustralya gibi ülkelerden kömür ithal edilmekle birlikte bu kömürlerin özellikleri önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Raaj vd., 2016:12). Hollanda'da, SO_x emisyonlarını kısıtlamak için yüksek kükürt içeriğine sahip Doğu ABD kömürlerini düşük kükürt içerikli Batı ABD kmrleriyle karıştırma uygulaması, diğer ülkelere göre kömür harmanlama ihtiyaını çok daha erken başlatmıştır. Bu tür kömürler; tatmin edici kalorifik değerleri, makul kl içerikleri ve göreceli düşük kükürt konsantrasyonlarıyla enerji santrallerinde tercih edilen bir yakıt profiline sahiptir.

Kömürler, karbonlaşma dereceleri (rank) bakımından linyit, alt bitümlü kömür, bitümlü kömür ve antrasit olarak sınıflandırılmaktadır. Uçucu madde (UM), kömürün termik davranışını belirleyen temel parametrelerden biri olup; linyit ve alt bitümlü kömürler %40-70, bitümlü kömürler %15-45, antrasit ise yaklaşık %8 uçucu madde içermektedir. UOB genellikle, oda sıcaklığında buhar basıncı 0,01 kPa veya daha büyük ve atmosfer basıncında kaynama noktası 250 C veya daha düşük olan organik bileşikler olarak tanımlanır (Yan vd., 2023:4). Kömürün uçucu madde içeriğinin, genellikle partikül madde emisyon faktörü ve karbonlu bileşimleri etkilediği bildirilmiştir (Li vd., 2016:782; Chen vd., 2015:192). Yüksek uçucu madde içeriği; düşük tutuşma sıcaklığı, hızlı alevlenme ve genel olarak daha iyi yanma başlangıcı performansı anlamına gelmektedir. Buna karşın düşük uçucu madde içerikli kömürler, genellikle uzun tükenme süreleri ve yüksek sabit karbon içerikleriyle karakterize edilmekte, dolayısıyla yakma koşullarına daha uygun bir davranış göstermektedirler. Yanma davranışı açısından bir kömürün "yüksek uçucu madde içerikli" sayılabilmesi için uçucu madde içeriğinin kuru ve külsüz bazda %18-20' den yüksek olması gerekmektedir (Haas vd., 2001:1319). Genellikle yakıt oranı olarak adlandırılan sabit karbonun uçucu

maddeye oranı, kömürün yanma özelliklerini temsil etmektedir. Bu oran ne kadar düşükse, yanma verimliliği de o derece iyi olmaktadır (Basu, 2006:11). Karışım uygulaması ile birlikte gelen kömür yakma teknolojisi, sadece maliyetleri düşürmek ve kirletici emisyonları azaltmakla kalmaz, aynı zamanda fırına giren kömürün esnekliğini artırır ve fırındaki yanmayı da optimize eder (Tong vd., 2021:4). Bazen, farklı kömür türlerinin bileşimindeki büyük farklılıklar nedeniyle, tutuşma sıcaklığı, egzoz gazı oranı ve NOx emisyonu gibi kömür karışımının yanma özellikleri önemli ölçüde değişmektedir (Tong vd., 2021:5). Bu nedenle, laboratuvar da deneysel olarak kömür karışımının yanma özelliklerini incelemek ve sonrasında deneysel sonuçlar ile saha kazanlarına yönelik bazı teorik ifadeler çıkarmak gereklidir. (Ma vd., 2018:187), özel bir fırın kullanarak bitümlü ve antrasit kömür karışımları arasındaki etkileşimleri incelemiş ve yüksek uçucu kömürlerin yanmasının, düşük uçucu kömürlerin tutuşmasını teşvik eden yüksek bir sıcaklık bölgesi oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Paçal kömürlerin yanma performansı için önemli parametrelerden biri olan tutuşma sıcaklığı, karışık kömürün tutuşma zorluğunu ve yanma sıcaklığı ise yanmaya yatkın olup olmadığını belirlemektedir. Yapılan bir çalışmada (Tong vd., 2021:5), farklı karıştırma oranlarındaki karışık kömürlerin yanma özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Burada, ateşleme sıcaklığı (T_i) ve yanma sıcaklığı (T_b) Karışık kömürün yanma performansı için önemli parametrelerdir (T_p , maksimum yanma hızındaki sıcaklıktır). Tablo 1'den, petrol kokunun (A3) en yüksek tutuşma ve en yüksek yanma sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum esas olarak A3'ün düşük uçucu fraksiyon içeriğinden kaynaklanmakta olduğunu göstermekte olup tutuşma için elverişli olmadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 1. Farklı Oranlardaki Karışık Kömür Numunelerinin Yanma Özellikleri

Numune Kodu	$T_i/^{\circ}\text{C}$	$T_b/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$
A1	431.8	651.2	508.2
A2	451.5	647.5	546.2
A3	485.9	660.2	546.2
A4	453.5	642.8	538.2
A5	450.2	636.8	530.7
A6	449.6	636.1	533.0
A7	446.8	636.6	535.0
A8	469.9	640.3	543.4
A9	459.3	638.1	539.7
A10	445.8	638.5	536.7
A11	440.9	648.6	529.1
A12	444.9	641.0	539.2
A13	463.0	640.2	544.4

Giderek daha katı hale gelen çevre politikaları nedeniyle, geleneksel kirleticilerin azaltılması daha hassas bir hal almıştır. Bu açıdan daha az ilgi gören kömürlerdeki UOB'ler, bilimsel araştırmalar için giderek daha değerli

hale gelmektedir. Yan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (2023:6), biyokütle-kömür paçalarının yanma koşullarında UOB emisyonlarına yönelik çevresel boyut ele alınmıştır. Bazı çalışmalarda uçucu madde, aynı kömür türü için bile farklı türlerin farklı kombinasyonları incelenmiştir. Örneğin, aynı Newlands bitümlü kömürü için uçucu maddeler; CH_4 , C_2H_2 , CO , vb. gibi hafif gazların bir kombinasyonu olarak değerlendirilirken, hafif gazlar ve büyük hidrokarbonlar da çalışmaya dahil edilmiştir (örneğin C_6H_6) (Rieth vd., 2017:2184; Hwang vd., 2005:385). Literatürdeki çalışmalar, organik kömür fazına ait özelliklerin büyük ölçüde katkısız olduğunu gösterirken, inorganik (mineral) fazın neden olduğu etkileşimler katkısız olmayan davranışlara yol açabilmektedir (Haas vd., 2001:1319). Yüzbaşı ve Selçuk (2012:140), petkok/linyit karışımlarının hava ve oksijenli ortamda, yanma davranışını incelemiş ve enerji santrallerinde bu teknolojinin sadece maliyeti etkilemediği, aynı zamanda karışım kömürün yanma özelliklerini de iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Sahu ve arkadaşları (2014:578), yanma özellikleri ve kirlетici emisyonları açısından biyokütle-kömür karışımının birlikte yakılmasının avantajlarını incelemiş ve bu tür bir uygulamanın yakıtın yanma özelliklerini iyileştirebileceğini ve NO_x , SO_x vb. emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceğini gözlenmiştir. Tong vd. (2021:5) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, termogravimetrik analiz (TGA) yöntemiyle bitümlü kömür, zayıf (fakir) kömür ve petrol koku üçlü karışımlarının yanma özellikleri ve kinetik parametreleri araştırılmıştır. Bununla birlikte, uçucu maddenin farklı proseslerinin toz kömür yakma özelliklerine olan etkileri konusu henüz araştırılmamıştır. Bazı çalışmalarda, karışım kömürün kapsamlı yanma performansını ortaya koymak amacı ile yanma indeksi kullanılmıştır (Xuexin, 2002).

Bu çalışma, paçal kömürlerin yanma davranışı üzerine, uçucu madde parametresinin etkisi ve yanma karakterizasyonunu etkileyen diğer proses parametreleri ve sonuçları ele alınmaktadır. Kömür özelliklerinde büyük farklılıklar gösteren paçal kömürler için, yalnızca tek tek kömürlerin özelliklerini değil, aynı zamanda kömürler arasındaki etkileşimleri de dikkate almak önemlidir.

2. PARAMETRE İLİŞKİLERİ

Birçok enerji santrali; uygun bir hammadde kaynağı sağlamak, yakıt maliyetlerini ve cüruf oluşumunu azaltmak gibi farklı gereksinimleri karşılamak amacı ile paçal kömür uygulamaları yoluna gitmektedir. Kömür karışımları, farklı madenler veya farklı damarlardan elde edilen kömürlerin karıştırılmasıyla oluşturulabilmektedir. Sürekli bir şekilde gelişen teknolojilere paralel olarak, kömürden daha fazla verim elde etme amacı ile, CO , SO_x , NO_x emisyonlarını ve bir takım toz atıklarını azaltma düşüncesi

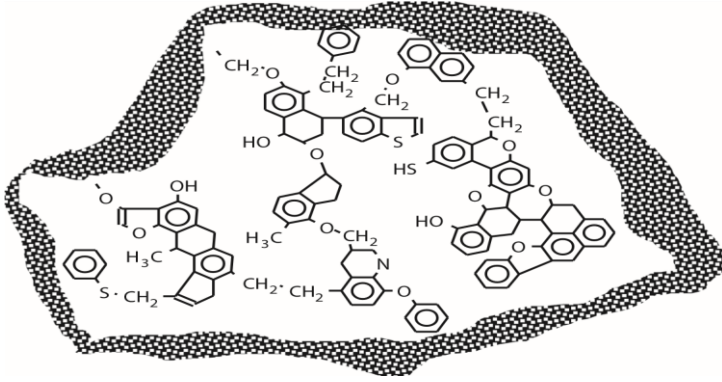
yaygın bir düşüncedir. Farklı şekillerde karıştırılmış kömürlerin özellikleri ve karıştırma oranları, kömür kalitesine etki eden parametrelerin de şekillenmesine yol açabilmektedir. Yani, kömür kalitesinin; nem, kül içeriği, ısıl değer ve kömürü menşei gibi etkilerin kömür petrografisinin bir kombinasyonu olarak ortaya çıktığı bir gerçektir. Kömür analizine yönelik programlar işletilirken dahi, örneğin kalorifik değer-kül içeriği ilişkisi, birçok uygulamalarda global olarak ele alınmakta ve sonuçta ölçüm doğruluğu da bu durumdan etkilenmektedir. Benzer durumlarla ilgili örneklemeler çoğaltılabilir. Bu sebeple, kömür ve kömürün yapısal özellikleri, kül yapıcı madde ve kül içeriği ilişkisinin çok daha detaylı bir şekilde örneklendirildiği çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kalori-nem ilişkisinde, ters orantı vardır. Yani, kömürde bulunan her bir gram su, yanma esnasında buharlaşmak için sistemden enerji çeker (buharlaşma gizli ısı). Nem arttıkça, kömürün Alt Isıl Değeri (AID) düşer. Kalori-uçucu madde ilişkisi, kömürün olgunluk derecesine (rank) bağlıdır. Kalitesi düşük kömürlerde uçucu madde fazla olur ve karbon içeriği düşük olduğu için de toplam kalori düşük olur. Yanma anında, uçucu maddeler hızla alev alarak sıcaklığı yükseltir ve sabit karbonun yanmasını tetikler (Chang vd., 2026:3; Onifade ve Genc, 2019:155). Kalori- kükürt ilişkisi durumu için; kükürt genellikle kömürde kül ve mineral madde ile birlikte bulunur. Bu yüzden kükürt fazlalığı, teknik olarak kaloriye katkı sağlasa da çevresel kısıtlamalar ve safsızlıklar açısından, kömürün kalitesini ve net ısıl değerini düşüren bir faktör olarak kabul edilir. Tane boyutu-yanma kapasitesi ilişkisi; burada yüzey alanı/hacim oranı önemlidir. Tane boyutu küçüldükçe toplam temas yüzeyi artar. Bu da oksijenin karbon yüzeyine difüzyonunu hızlandırarak yanma kapasitesini ve reaksiyon hızını artırır (Boylu ve Karaağaçlıoğlu, 2018:223). Tane boyutu-uçucu madde ilişkisinde; tane boyutu, uçucu maddelerin salınım hızını (devolatilization), dolayısıyla alevin kararlılığını ve tutuşma hızını belirler. Küçük tanelerde ısı merkeze çok hızlı iletilir, bu da uçucu maddelerin neredeyse anında gaz fazına geçmesini sağlar. Büyük taneciklerde (parça kömür) ise, ısı transfer direncinin kütle transfer direncine baskın gelmesi sonucu, tanecik merkezinde hapsolan uçucu bileşenler yüksek iç basınç oluşturur (Chang vd., 2026:3; Onifade ve Genc, 2019:155). Bu durum, termal şok etkisiyle birleşerek taneciğin mekanik bütünlüğünün bozulmasına ve birincil parçalanmaya yol açmaktadır.

3. PAÇAL OLUŞUMLARININ HAZIRLANMASI

Birçok bilim adamı kömürün yapısından çok etkilenmiş ve onu aydınlatmak için oldukça fazla çalışma yapmışlardır. Bu yapı kömürün yaşına

ve oluştuğu şartlara bağlıdır. Şekil 1, tipik bir kömür taneciği yapısını göstermektedir (Moulijn vd., 2013:30).



Şekil 1. Tipik bir kömür yapısının modeli.

Kömürleşme sürecinde dönüşüm olayı, aslında H/C ve O/C oranlarının azalması anlamına gelir. Kömür yaşlandıkça oksijen ve hidrojen atomları uzaklaşır, geriye daha yoğun bir karbon yapısı kalır. Kömürleşme derecesi (rank) arttıkça, yani kömür turbadan antrasite doğru evrildikçe, uçucu madde miktarı azalır. Bunun sebebi, yerin derinliklerinde artan sıcaklık ve basınçla birlikte kömürün yapısındaki oksijen ve hidrojen içeren fonksiyonel grupların (CH_4 , CO_2 ve H_2O gibi gazlar şeklinde) yapıdan uzaklaşmasıdır (Erik, 2022: 24-25).

Kömürleşme süreci, turbadan antrasite doğru ilerleyen aşamalı bir metamorfizma dizisi olarak tanımlanabilir. Bu yüzden her basamakta kömürün "olgunluğu" (rank) artar. Tablo 2, önemli kömür türlerinin bazı özelliklerini sergilemektedir.

Tablo 2. Önemli Kömür Türlerinin Bazı Özellikleri

Kömür Türü	Karbon Oranı (%)	Kalori Değeri	Temel Özellik
Turba (Peat)	< 60	Düşük	İlk aşama, yüksek nem.
Linyit	60 - 71	Düşük-Orta	Genç kömür, yüksek uçucu madde.
Alt Bitümlü	71 - 77	Orta	Isınma ve sanayi kullanımı.
Bitümlü	77 - 87	Yüksek	Koklaşabilir, sanayi için kritik.
Antrasit	> 87	Çok Yüksek	En yaşlı ve en temiz yanan tür.

Kömürleşme (coalification) sadece fiziksel bir sıkışma değil, aynı zamanda karmaşık bir kimyasal dönüşümdür. Bu süreci takip etmek için en çok Van Krevelen Diyagramı kullanılır. Bu

diyagramda H/C (Hidrojen/Karbon) atomik oranı ile O/C (Oksijen/Karbon) atomik oranı karşılaştırılır (Tsuji vd., 2023:536).

Kömürleşme ilerledikçe (yani turbadan antrasite geçtikçe):

- Dekarboksillenme ve Dehidrasyon: Yapıdan -COOH (karboksil) ve -OH (hidroksil) grupları su (H_2O) ve karbondioksit (CO_2) şeklinde ayrılır.
- Aromatikleşme: Alifatik zincirler azalırken, aromatik halkaların miktarı ve bu halkaların birbirine bağlanma derecesi artar.

Paçal hazırlama; farklı kömür türlerinin karıştırılması yoluyla istenilen yakıt özelliklerinin elde edilmesini, emisyon parametrelerinin kontrol altında tutulmasını ve enerji santrallerinin yakıt esnekliğinin artırılmasını amaçlamaktadır (Haas vd., 2001:1319; Tong vd., 2021:4). Paçal oluşumunda temel hedef, paçal kömürlerin özelliklerinden hareketle karışım davranışını önceden tahmin edebilmektir. Bu tahmin sürecinin güvenilirliği; kül miktarı, uçucu madde, kalorifik değer ve yanma kinetiği gibi parametrelerin katkısız (additive) davranış gösterip göstermediğine, yani bileşen değerlerinin ağırlıklı ortalamasıyla uyum içinde olup olmadığına bağlıdır. Termik santraller için karıştırma prosesi, sirkülasyonlu akışkan yataklı kazanlarda gerçekleştirilir ve her karıştırma oranı için örnekler alınır. Paçal hazırlamada, havada kurutulmuş ve öğütülmüş kömür parçacıkları yaklaşık 250 μm den geçecek şekilde elenir ve farklı oranlarda karıştırıldıktan sonra torbalanır. Her bir numune için gaz torbası, numune almadan önce genellikle 5 kez, yüksek saflıkta azotla temizlenir ve vakum altında saklanır. Bu deneylerle; karıştırma oranı, oksijen konsantrasyonu ve parçacık boyutu kombinasyonunun paçal kömürlerin yanma performansı üzerindeki etkisi araştırılabilir. Enerji şirketlerinin harmanlama için hangi kömür türünü seçeceklerine karar vermelerine yardımcı olmak için birtakım çalışmalar yapılmıştır.

Uluslararası paçal çalışmalarında en sık kullanılan kömür grubu, YUM içeren bitümlü kömürlerdir. Riley ve arkadaşları (1989:35), kömürlerin elementel C, H, N, O, S analizi, nem içeriği ve AID 'inin katkısız özellik sergilediklerini ortaya koymuştur. ASTM standart yöntemiyle belirlenen karışımların kül seviyesinin, hesaplanan külden genellikle % 0,36 daha fazla olduğu bulunmuştur. Düşük dereceli kömürden gelen alkali minerallerin ve yüksek dereceli kömürden gelen kükürdün bileşik etkisi, sülfat oluşum hızının artmasına neden olur. Her bir ana kömür, %75 ağırlıkça <75 μm partikül boyut dağılımına kadar ayrı ayrı öğütülmüş ve daha sonra 20 μm 'den küçük partikülleri uzaklaştırmak için sınıflandırılmıştır. Tablo 3, 15 karışım hazırlamak için kullanılan 6 tür kömürün nihai ve kül bileşimi analizini göstermektedir. Karışımlar, üç yüksek hacimli kömürden (Polonya, El Cerrejon, Götteleborn) birini, diğer derecelerdeki kömürlerle (Great White Tip (lvb), Klein Kopje (mvb), TBK (lig)) ağırlıkça 50/50 oranında karıştırarak şekilde seçilmiştir.

Tablo 3. Kömürlerin Nihai ve Kül Bileşimi Analizi (Haas vd., 2001:1318)

Boş Hücre	Lehçe	Göttelborn	El Cerrejon	Kurutulmuş kahverengi	Büyük beyaz uçlu	Klein Kopje
Boş Hücre	Ağırlıkça (% , külsüz)					
C	79.90	79.30	78.70	64.40	88.80	81.20
H	5.00	5.20	5.20	4.90	4.20	4.40
N	1.32	1.48	1.49	0,72	1.44	1.83
O	12.90	12.90	13.70	26.70	4.00	12.00
S (toplam)	0,98	1.26	0,68	0,41	1.65	0,57
	Kuru ağırlık (%)					
SiO ₂	46.8	43.3	61.6	4.8	45.3	47.2
Al ₂ O ₃	27.5	24.4	20.4	5.1	29.9	33.6
MgO	2.8	3.4	1.0	16.2	1.1	1.8
Na ₂ O	0.6	0.3	0.4	1.0	0.8	0.1
CaO	4.2	5.3	1.9	37.0	2.0	6.4
K ₂ O	2.3	3.1	2.1	0,5	2.0	0.7
TiO ₂	1.1	0.9	0.9	0.3	1.1	1.7
MnO	0.1	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1
Fe ₂ O ₃	8.7	12.5	8.7	18.5	13.5	3.0
Kül	14.3	10.3	5.5	7.9	4.1	12

Birbirinden çok farklı özelliklerdeki kömürler, basit katkısız tahmin modelleriyle değerlendirilemez. Bu tür karışımlar için deneysel doğrulama zorunludur. Benzer dereceli kömürlerin karışımlarında ise ağırlıklı ortalama tabanlı tahminler güvenilir ve maliyet etkin sonuçlar vermektedir. Petrol koku içeren üçlü paçallarda %30 eşik değeri kritik bir operasyonel kısıt olarak benimsenmeli; bu oran aşılrken hem ekonomik optimizasyon hem de tatmin edici yanma performansı elde edilebilir. Biyokütle-kömür paçallarında ise %30 oranı optimal değer olarak öne çıkmakta; bu seviyede UOB, NO_x ve SO₂ azaltımı ile kazanın sürdürülebilir işletimi arasında en uygun denge sağlanmaktadır (Yan vd., 2023:6).

4. PAÇAL KÖMÜRÜ VE YAKMA ZORLUKLARI

Paçal kömürlerine ait sorunlar hem ekonomik hem de ekonomik olmayan niteliktedir ve tüm karıştırma projelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle enerji üreticilerinin farklı kömür türlerini kullanmak zorunda kalmaları nedeni ile bir takım zorluk ortaya çıkmaktadır. Kömür karışımı , birçok enerji santrali tarafından tutarlı bir hammadde kaynağı sağlamak veya ulaşım sorunlarını çözmek, yakıt maliyetini düşürmek, cüruf oluşumunu azaltmak gibi farklı gereksinimleri karşılamak için uygulanan bir yöntemdir . Kömür kullanıcıları ve üreticilerinin karışım uygulamalarını kullanmasının diğer nedenleri arasında bunlar da yer almaktadır. Kömürlerin özellikleri; kazanların verimliliği, güvenilirlik ve kullanılabilirliği etkiler ve bu durumdan, santralin ekonomisi ve kısa-uzun vadeli işletim de etkilenir (Nalbandian, 2011:13). Yakma sistemlerinde, yakıt oranı, yanma profili, kül kimyası ve karbon yanması önemli faktörlerdir. Yüksek uçucu madde içeren ithal kömürler, yüksek ortam atmosfer sıcaklıklarında dikkatli bir şekilde işlenmelidir, çünkü tutuşmaya eğilimlidirler. Kömürdeki kül içeriği, kazan fırınının boyutlandırılmasını ve performansını etkiler. Tahmin edilenden daha yüksek kül değerleri, daha düşük dereceli kömürlerdeki alkali mineraller tarafından tutulan kükürt oksitlerin küldeki sülfat artışına sebebiyet verebilmektedir (Raaj vd., 2016:8). Yüksek kül içeriği, daha fazla sayıda değirmen gerektirmekte olup, birincil hava fanlarının, hava ön ısıtıcılarının, elektrostatik çöktürücüler ve kömür ve kül taşıma sistemlerinin boyutlandırılmasını da etkiler. Yüksek kükürtlü kömürlerde, iletken gazların uçucu küle olan adsorpsiyonunun artması nedeniyle kül direnci azalır ve elektrostatik çöktürücülerin toplama verimliliğini artırır (Liu ve Liptak, 1999:15). Tutuşma sıcaklığı, kömür alevlerinin kararlılığını ve kirleticilerin oluşumunu etkileyen parametrelerden biridir (Chi vd., 2009:5).

Kömürdeki nem, parçacıkların yanması sırasında parçalanmalara yol açtığı, yani yüksek nem içeriğinin parçalanma olasılığını artırdığı görülmüştür. 150 µm'nin altındaki boyuttaki parçacıklar, nemin varlığı nedeniyle homojen tutuşma olasılığını artırır. Bununla birlikte, nem içeriğinin veya parçacık boyutunun artması, homojen veya hetero-hojen tutuşma oranını artırmaz. Nem içeriği %5 ve parçacık boyutu 125–150 µm olan parçacıkların gaz fazında tutuşma olasılığı en yüksektir ve nem içeriğinin %5'ten %10'a artmasıyla tutuşma modu homojen tutuşmadan hetero-hojen tutuşmaya dönüşür (Li vd., 2022:34914).

Kömürün yanması esnasında, alev kararlılığı ve tutuşma davranışı, kirleticiler madde oluşumu ve yanmayı önemli ölçüde etkiler. Katı yakıt yakıldığında hem homojen hem de heterojen tutuşma meydana gelir. Homojen tutuşmada, kömür parçacığından uçucu maddelerin salınımı gerçekleşirken, heterojen tutuşmada oksitleyici, doğrudan yakıt/kömür yüzeyine saldırır. Birlikte yanma sırasında yakıt özelliklerindeki ve parçacık boyutundaki farklılık, tutuşma performansını ve alev özelliklerini etkiler. Hava ortamında

yanmaya kıyasla oksijenli yakıtla yanma; tutuşma düzeyini, alev kararsızlığı ve sıcaklığını, ısı transfer değişimlerini ve NO_x ve SO_x emisyonu etkilemektedir. Oksijenli yakıtla yanmanın performansındaki bu farklılıklar, CO₂ ve N₂'nin farklı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. CO₂, N₂'den daha yüksek molar ısı kapasitesine sahiptir; bu nedenle CO₂'nin, N₂'den daha iyi bir ısı absorplayıcı olduğu söylenebilir. Bu, oksijenli yakıt ortamında alev sıcaklığının azalmasının ana nedenidir. Oksijenli yakma ortamındaki ısı transfer özelliklerindeki değişim, CO₂ ve H₂O konsantrasyonundaki artışın yanı sıra kömürleşmiş kalıntı, uçucu kül vb. gibi partikül madde konsantrasyonundaki artışa atfedilmektedir (Yadav ve Mondal, 2019:3137).

Kömürün yanması esnasında karmaşık fiziksel ve kimyasal dönüşümlerden sonra toz haline gelen kül; sıvı, buhar ve katı halde olabilir. Kömürün bileşimi ve yanma koşulları, kül türlerinin bileşimini ve boyutunu etkiler. Kirlenme, cüruf oluşumu, erozyon ve korozyon sorunları, kül türlerinin bileşimi ve boyutundan önemli ölçüde etkilenir. Kurose ve arkadaşları (2001:1451) kademeli ve standart yanma koşullarında kömürdeki kül içeriğinin toz kömürün yanma özelliklerini nasıl etkilediğini incelemiştir. Öğütme, kömür yanması, tutuşma, cüruf oluşumu, alev kararlılığı ve kirlenme gibi yakıt özellikleri katkısız olmayıp genellikle kazan performansı ve paçal kömürlerin performansı gibi verilerden tahmin edilemez. Ayrıca, harmanlanmış kömürün akış özellikleri, her bir kömürün akış özelliklerinden farklı olacaktır. Yani, paçal kömürün bileşimi, kazan için tasarlanan kömüre benzese bile, karışım beklendiği gibi davranmayabilir. Farklı dereceli kömürler veya farklı kül kimyasına sahip kömürler harmanlandığında sorunlar daha olasıdır. Bu nedenle, kömür karışımlarının karakterizasyonu, kazan ve fırın tasarımı, bakımı ve boyutlandırılması açısından oldukça önemlidir. Doğası gereği oldukça heterojen yapıya sahip olan kömür karakterizasyonu için, geliştirilmiş birçok teknik vardır (Raa vd., 2016:12; Wen vd., 2016:99). Kömür karışımlarının yanmayla ilgili özellikler, yanma prosesinin doğası ve kömürdeki bazı yanıcı bileşenler arasındaki etkileşimler nedeni ile, tek tek kömürlerin ağırlıklı ortalama değerleriyle orantılı olmayabilir. Veya farklı kömürler karıştırılıp yakıldığında, meydana gelen reaksiyonlar daha karmaşık olabilir. Yani, harmanlanmış kömürün bileşimi, teorik olarak tasarlanan kömüre çok benzese de karışım beklendiği gibi davranmayabilir. Özellikle düşük uçucu maddeli (DUM) kömürler ile yüksek uçucu maddeli kömürlerin karıştırılması, karmaşık etkileşimler doğurabilmektedir.

Geleneksel hava yakıtlı fırınlarda, yanma sırasında yüksek miktardaki azot da ısıtılır ve egzoz gazı salınımı sırasında tekrar soğutulur. Egzoz gazının sıcaklığı ortam sıcaklığından daha yüksektir. Bu nedenle, hava yakıtlı kazanlarda ısının yaklaşık %10'u kaybolur. Oysa oksijen yakıtlı fırınlarda (ki saf oksijen kullanılır) egzoz gazında fazla miktarda azot bulunmaz, bu da baca gazının kütlesini ve hacmini azaltır. Bu durum, baca gazıyla ısı kaybının azalmasına ve oksijen yakıtlı koşullar altında kazanın ısı verimliliğinin artmasına sebep olmaktadır. Oksijen yakıt teknolojisinde, esas olarak teknik

ve ekonomik zorluklar olabilir. Teknik zorluklar arasında kazan tasarımı ve sistem işletimi yer alırken, ekonomik zorluklar arasında O₂ üretimi ve CO₂ ayrıştırmasının yüksek enerji maliyeti bulunmaktadır. Toz kömür yakmanın da birtakım zorlukları olup yüksek basınçta hem gaz fazı hem de partikül fazı özellikleri önemli ölçüde değişir. Birçok yazar hava ve oksijenli yakıt ortamında emisyon özelliklerini araştırmıştır, ancak özellikle oksijenli yakıt ortamında kül davranışı ve cüruf oluşumu üzerine yapılan çalışmalar yetersiz olduğu görülmektedir. Kömür yakma fırınlarında radyasyon baskın olduğundan, sıcaklık alanını iyileştirmek için daha iyi türbülans-radyasyon ve gaz emisyonu/absorpsiyonu modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, düşük küllü kömürlerin daha yüksek oranda karıştırılması ve yüksek küllü kömürler için tasarlanmış kazanlarda yakılması durumunda, kazanın radyatif ve konvektif bölümleri arasındaki ısı transfer profili etkilenir. Bu durumda, nominal buhar parametrelerini elde etmede bazı zorluklar olabilir (Raaj vd., 2016:10).

Katkısallık, bir karışımın belirli bir özelliğinin bileşen kömürlerin ağırlıklı ortalamasıyla tahmin edilebildiği durumu ifade etmektedir. Bir X özelliği için katkısallık koşulu şu şekilde yazılabilir:

$$X_{kar} = x_1 \cdot X_1 + x_2 \cdot X_2 + \dots + x_n \cdot X_n$$

Burada x_i bileşen kömürün kütle oranını, X_i ise ilgili özelliğin değerini temsil etmektedir. Katkısallık, özellikle kömürün organik fazına özgü özellikler (kalorifik değer, gerçek yoğunluk, yanma kinetiği) için geçerli iken; inorganik (mineral) faza ait özellikler bu kuraldan sapabilmektedir. Kömür mineral maddesinin buharlaşabilmesi veya diğer paçal kömür bileşenleriyle reaksiyona girebilmesi durumu, katkısallık olmayan davranışa neden olabilmektedir (Haas vd., 2001:1321). Pratik açıdan bu ayrım önemlidir. Birbirine yakın derecelerdeki kömür karışımlarında ağırlıklı ortalama tabanlı tahminler büyük ölçüde güvenli iken; çok farklı derecelerdeki kömür karışımlarında kül bileşimindeki belirgin farklılıklar mineral faz etkileşimlerine zemin hazırlamakta ve katkısallık olmayan davranışı tetiklemektedir.

5. KÖMÜR KARAKTERİZASYONU ve PAÇAL TASARIMI

Düşük kaliteli kömürler, ekonomik, çevresel ve kalite şartnamelerini karşılamak için yüksek kaliteli kömürlerle karıştırılır. Bu nedenle, kömür karışımlarının öğütülebilirliği ve aşındırıcılığı, ekonomik ve operasyonel açıdan kritik parametrelerdir. Günümüzde kömürle çalışan enerji santrallerinde ekonomik performansı artırmak, kazan gereksinimlerini karşılamak ve çevre düzenlemelerine uymak amacıyla kömür karıştırma yaygın bir uygulamadır. Kömürün maliyeti ve bulunabilirliği öncelikli hususlar olsa da kömür karıştırmanın nedenleri, kömürle çalışan enerji santrallerinde karşılaşılan zorluklara bağlı olarak değişmektedir. Emisyon

sorunlarının ve operasyonel zorlukların üstesinden gelmek için yüksek kükürt, azot ve kül içeriğine sahip kömürler yüksek kaliteli kömürlerle karıştırılabilir. Kömürün veya kömür karışımının öğütülebilirliği, madencilik, zenginleştirme ve kullanımında hayati bir kalite parametresidir ve toz yakıtlı enerji santrallerinde ekonomiyi, kapasiteyi ve verimliliği belirler (Idris vd., 2022: 1144).

Yapılan bir çalışmada, YUM içerikli üç farklı bitümlü kömür ile bu kömürlerin paçal olarak kullanıldığı üç farklı kömür tipi test edilmiş olup bu karışıma ait bileşim ve bazı test sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Altı Tür Paçal Kömürünün Analiz Sonuçları (Haas vd., 2001:1320)

Parametre	Polonya	Göttelborn	El Cerrejon	K. Linyit	Gr. White Tipi	Klein Kopje
C (% daf)	79,90	79,30	78,70	64,40	88,80	81,20
H (% daf)	5,00	5,20	5,20	4,90	4,20	4,40
N (% daf)	1,32	1,48	1,49	0,72	1,44	1,83
O (% daf)	12,90	12,90	13,70	26,70	4,00	12,00
S-toplam (% daf)	0,98	1,26	0,68	0,41	1,65	0,57
Kül (% kuru)	14,3	10,3	5,5	7,9	4,1	12,0
UM (% daf)	19,9	19,2	12,2	54,6	9,3	20,8
AID (MJ/kg)	27,28	28,00	28,50	27,57	30,74	27,66
Gerçek Yoğunluk (kg/m ³)	1840	1828	1836	1950	1758	1821

*daf: külsüz

Tablodaki veriler incelendiğinde, çoğu kömürün uçucu madde içeriğinin benzer seviyelerde olduğu (%12,2-19,9) görülmektedir. Buna karşın, Great White Tipi kömürde, bu değer belirgin biçimde düşük (% 9,3), kurutulmuş linyitte ise çok yüksektir (% 54,6). Kül bileşimi açısından ise farklı kömürler arasında fazla bir farklılık görülmemektedir (liniyit külü yüksek CaO ve MgO içerirken, hvb kömür külleri SiO₂ ve Al₂O₃ bakımından zengindir). Bu mineralojik farklılık, paçal katkısallığını etkileyen temel mekanizmalardan birini oluşturmaktadır (Haas vd., 2001:1318).

Karışım tasarımı açısından 15 farklı paçal oluşturulmuştur. Temel paçal; üç YUM’ li kömürden birini diğer türdeki kömürlerle ağırlıkça %50-%50 oranında birleştirmektedir. Ayrıca, Gottelborn-Great White Tip ve El Cerrejon-Great White Tipi ikilisi için %25, %50 ve %75 oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Bu genişletilmiş tasarım hem kömür türünün hem de karışım oranının etkisinin sistematik olarak incelenmesine imkân tanımaktadır. Tüm karışımlar için ölçülen analiz değerleri Tablo 5’de sunulmaktadır. Bu tablo; kül içeriği, PUM (yaklaşık uçucu madde), YUM, alt

ısı değer ve yoğunluk verilerinin katkısız tahminlerle karşılaştırılmasına zemin oluşturmaktadır.

Tablo 5. Test Edilen Kömür Karışımlarının Seçilmiş Analiz Sonuçları (Haas vd., 2001:1320)

Numune	Simge	Paçal Oranı (%)	Kül (%)	PUM (% daf)	YUM (% daf)	AID (MJ/kg)	Ger. Yoğ (kg/m ³)	Gör. Yoğ (kg/m ³)
Polonya	P	100	12,0	19,9	34,3	27,28	1840	415
Göttelborn	G	100	10,4	19,2	37,1	28,00	1828	407
El Cerrejon	E	100	5,6	12,2	39,4	28,50	1836	431
Kuru Linyit	B	100	4,5	54,6	70,6	27,57	1950	434
Great White Tip	W	100	7,9	9,3	14,8	30,74	1758	579
Klein Kopje	K	100	14,7	20,8	28,3	27,66	1821	604
Blend1 PB	PB	50	8,5	43,9	55,0	29,66	1854	432
Blend2 PW	PW	50	10,0	25,1	38,0	28,78	1793	513
Blend3 PK	PK	50	13,5	30,6	39,1	27,12	1886	505
Blend5 GW	GW	50	9,1	26,2	29,9	29,57	1740	509
Blend7 EW	EW	50	6,5	28,9	35,3	30,19	1768	498

5.1. Üçlü Paçal Sistemi

Aynı çalışmada, bitümlü kömür (B), fakir kömür (A) ve petrol koku (P) bileşenlerinden oluşan üçlü paçal sistemi için yanma davranışı araştırılmıştır (FC, sabit karbon). Üç yakıtın yaklaşık ve nihai analiz değerleri Tablo 6'da verilmektedir (Tong vd., 2021:4).

Tablo 6. Üç Ayrı Yakıtın Yaklaşık ve Nihai Analiz Değerleri

Kömür/bileşim (%)	M	Kül	UM	FC	C	H	O	N	S
Bitümlü (B)	2,74	26,94	26,64	43,68	53,87	3,43	10,21	0,86	1,95
Fakir (A)	1,82	21,52	20,04	56,62	62,64	3,47	6,00	0,94	3,61
Petrol koku (P)	0,66	3,61	11,84	83,97	76,03	3,62	4,12	1,14	5,90

Tablo değerleri incelendiğinde, birkaç kritik özellik için, petrol kokunun diğer kömürlerden belirgin biçimde ayrıştığı görülmektedir. Petrol koku; son derece düşük kül içeriği (%3,61), çok yüksek sabit karbon (%83,97) ve düşük uçucu madde (%11,84) içeriğiyle karakterize edilmektedir. Yine, kükürt içeriğinin bitümlü kömürün yaklaşık üç katı olması, bu durumun SO₂ emisyonları açısından paçal oranının belirlenmesinde kısıtlayıcı bir faktör oluşturmaya yol açmaktadır.

DeneySEL matris; karışım oranı (13 farklı B:A:P kombinasyonu), oksijen konsantrasyonu (%5-30) ve parçacık boyutu kombinasyonu (10-150 µm) olmak üzere üç bağımsız değişken üzerinden kurgulanmıştır. Bu çok boyutlu tasarım, her bir parametrenin yanma performansına katkısının izole

edilmesine ve etkileşim etkilerinin analiz edilmesine olanak tanımaktadır (Tong vd., 2021:5).

Uçucu madde, kömürün standart kaba analiz yöntemiyle (ASTM D3174 veya DIN 51718) belirlenen yaklaşık uçucu madde değeri (PUM) olarak ifade edilmektedir. YUM, belli bir tane boyutu aralığına sahip kömürün 900°C'de inert atmosferde belli bir bekleme süresinde ısıtılmasıyla açığa çıkan gaz ve buhar bileşenlerinin kütsel oranını ifade etmektedir. Yüksek uçucu madde (YUM) değeri ise izotermal piston akışlı reaktör gibi özel deneysel sistemlerde ölçülebilen gerçek yanma koşullarına (yüksek sıcaklık, kısa bekleme süresi) daha yakın olan bir değeri ifade eder. YUM değerleri, biraz daha yüksek olmakta ve bu fark kömür türü ve ısıtma hızına bağlı olarak artmaktadır (Haas vd., 2001:1321).

6. STANDART KÖMÜR ANALİZ DEĞERLERİNİN KATKISALLIĞI

6.1. Kül Düzeyi

Kül katkısallığı kritik önem taşımaktadır; zira kül izleyici (ash tracer) yöntemi, YUM ve yakıt azotu gibi diğer yanma özelliklerinin hesaplanmasında temel referans olarak kullanılmaktadır (Haas vd., 2001:1322). Kömürler için ölçülen kül seviyesinin hesaplanan katkısallık değerden yaklaşık %4,6 daha yüksek olduğu saptanmıştır. Ancak iki farklı laboratuvarı elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırması da benzer büyüklükte bir fark sergilemiş; bu durum analitik tekniğin doğasından kaynaklanan ~%5'lik ölçüm belirsizliğine işaret etmektedir. Bu bulgular; kül değerinin deneysel hata dahilinde katkısallık özellik gösterdiği sonucunu doğrulamaktadır. Kömürleşmiş kalıntı (char) kül seviyesi analizi için de benzer bir sonuca varılmıştır.

6.2. Yaklaşık Uçucu Madde (PUM)

PUM katkısallığı değerlendirildiğinde; ortalama olarak hesaplanan PUM değerlerinin laboratuvar ölçümlerinden yaklaşık %3 daha yüksek çıktığı görülmüştür. Mutlak değer olarak bu fark yaklaşık %0,78 uçucu maddeye karşılık gelmekte olup analitik tekniğe özgü ~%0,3'lük hata payının yanı sıra numune homojenizasyonu ve bileşim dalgalanmaları gibi ek belirsizlikler dikkate alındığında genel ölçüm doğruluğu içinde kabul edilebilir bir sapma oluşturmaktadır (Haas vd., 2001:1321). Kül buharlaşmasının PUM katkısallığı üzerinde küçük bir sistematik etki oluşturabileceği de değerlendirilmiştir. Organik ve inorganik uçucu madde birbirinden ayrıştırılamadığından, kısmi kül buharlaşması durumunda PUM'de sanal bir artış gözlemlenebilmektedir. Bu olası kaynaktan kaynaklanan belirsizliğe rağmen PUM'nin katkısallık davranış gösterdiği sonucu korunmaktadır.

6.3. Yüksek Uçucu Madde (YUM)

Ölçülen YUM değerleri, PUM'ye kıyasla sistematik olarak daha yüksek çıkmaktadır. Bu fark; yüksek ısıtma hızı ve kısa bekleme sürelerinin organik matriksin termal bozulmasını PUM koşullarına kıyasla daha kapsamlı biçimde tetiklemesinden kaynaklanmaktadır. İki laboratuvar analizi arasındaki HVM sapması yaklaşık %3,1 ağırlık (%6 bağıl hata) düzeyinde bulunmuştur. Analiz edilen YUM değerinin hesaplanan değerden yaklaşık %2,9 daha düşük olduğu saptanmış; bu da kül izleyicisinin inert kabul edilmesi koşuluyla YUM'nin de katkısız özellik sergilediğine işaret etmektedir. Bu bulgu son derece önemlidir: YUM değeri, char yanma modellemesinde kullanılan başlangıç char ağırlık oranlarının hesaplanmasında doğrudan kullanıldığından, YUM katkısallığı karışım yanma tahminlerinin de katkısız yapılabilmesinin önünü açmaktadır (Haas vd., 2001:1322).

6.4. Kalorifik Değer ve Yoğunluk

AID, ölçülen ve hesaplanan değerler arasında ortalama 0,6 MJ/kg'lık (%2,1) sapmayla katkısız davranış sergilemiştir. Bu sonuç, Riley ve diğer araştırmacıların daha önceki bulgularıyla tutarlıdır. Gerçek parçacık yoğunluğu (gözenekler hariç), ölçülen ve hesaplanan değerler arasında ortalama %2,5'lik sapma ile katkısız özellik göstermiştir. Buna karşın görünür parçacık yoğunluğu (gözenekler dahil) için çok daha büyük bir sapma gözlemlenmiş; ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki ortalama fark %15,7 olmuştur. Bu sapmanın temel kaynağı metodolojik bir kısıtlama olarak görülebilir. Şöyleki, ASTM standardı 25 mm'den büyük parçacıkların kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada, toz kömür kullanıldığından parçacıklar arası hacim de ölçüme dahil olmuş ve yanıltıcı sonuçlara sebep olmuştur (Haas vd., 2001:1322).

7. UÇUCU MADDE SALINIMININ KATKISAL ETKİSİ

1200°C'de gerçekleştirilen uçucu madde uzaklaştırma ölçümlerinde, linyit içeren karışımlar dışındaki tüm bitümlü kömür karışımlarının (tekrarlanabilirlik aralığı içerisinde) katkısızlık kuralıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Üç yüksek uçuculu kömürün (El Cerrejon, Polonya, Göttelborn), Great White Tip ve Klein Kopje ile oluşturduğu 50/50 karışımlarında; bekleme süresine göre ağırlık kaybı eğrisi ve uçucu madde salınım miktarı, ana kömürlerin değerleri ile tatmin edici bir biçimde uyduğu gözlemlenmiştir (Haas vd., 2001:1322).

Göttelborn ile Great White Tip kömürlerinin %25, %50 ve %75 oranlarındaki karışımlarında da bu katkısız davranış korunmuştur; bu sonuç, uçucu madde salınımının yalnızca tek bir karışım oranında değil, geniş bir kompozisyon aralığında öngörülebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer

şekilde El Cerrejon ile Great White Tip karışımları için de katkısız hesaplama ile deneysel ölçüm arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Bu bulgu; birbirinden çok farklı derecelerdeki kömürler söz konusu olmadığı sürece, uçucu madde salınım hızının ve YUM içeriğinin ana bileşen kömürlerin özelliklerinden güvenilir biçimde tahmin edilebildiğini göstermektedir.

Göttelborn veya Polonya kömürü ile kurutulmuş linyitin 50/50 karışımlarında, uçucu madde uzaklaştırma davranışı, ana kömür özelliklerinden tam tahmin edilememiştir. Katkısız tahmin ile deneysel ölçüm arasındaki sapma, diğer karışımlarda gözlemlenen dalgalanma aralığının belirgin biçimde üzerine çıkmıştır. Bu katkısız olmayan davranışın sorumlusu, inorganik kömür fazı olarak tahmin edilmektedir. Temel mekanizma şu şekilde işlemektedir: İkili paçal karışımın reaktif kül bileşenleri, kül izleyici hesaplamasında önemli bir hataya yol açmaktadır. Farklı derecelerdeki kömürlerin kül bileşimleri arasındaki geniş uçurumun (YUB kömürleri Si/Al zengin kül, linyit ise Ca/Mg zengin kül içermektedir), bu bileşenlerin yüksek sıcaklıkta birbirleriyle reaksiyona girme ihtimaline atfedilebilir. Mineral bileşikler buharlaşabilmekte ve ikinci paçal bileşenleriyle kimyasal reaksiyona girebilmektedir (Haas vd., 2001:1323).

Bu bulgunun pratik bir önemi vardır: Kömür cinsi farkı ne kadar büyük olursa, kül bileşimindeki farklılık da o kadar belirgin olacak ve katkısız olmayan davranış daha güçlü biçimde ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla, yüksek uçucu madde içerikli kömürlerin linyitle karıştırılması söz konusu olduğunda, basit katkısız tahmin modellerine dayanmak, yanıltıcı sonuçlar doğurabilir; bu tür paçallar için deneysel doğrulama zorunludur.

7.1. Yanma Karakteristiği ve TG/DTG Analizleri

Paçal karışımlarının hazırlanmasında, belli bir miktar numune uygun şekilde homojenize edildikten sonra farklı elek fraksiyonlarına ayrılır. Bu tasarımda; karışım oranı, oksijen konsantrasyonu ve parçacık boyutu gibi parametreler eşliğinde O₂/N₂ atmosferinde ve belli bir akış hızında deneylere tabi tutulur.

Yanma özelliklerinin sayısal olarak ifade edilmesinde standart endeksler kullanılmaktadır. Tutuşma sıcaklığı (T_i); DTG eğrisinde maksimum ağırlık kaybı oranı noktasından geçen dikey çizginin TG eğrisini kestiği noktadan çizilen teğet doğrunun, TG başlangıç noktası ile kesişimi olarak tanımlanmaktadır. Yanma sıcaklığı (T_f), TG eğrisinde %98 ağırlık kaybına karşılık gelen sıcaklık olarak alınmaktadır. 20 K/dak ısıtma hızında yapılan bir çalışmada elde edilen TG eğrilerine göre, her bir paçal numunelerine ait TG eğrilerinin, tek bileşenli kömürler (bitümlü ve petrol koku) arasında kaldığı görülmüştür. 200°C öncesinde su uzaklaşmadan kaynaklanan hafif bir ağırlık kaybı gözlemlenirken, 200-300°C arasında paçal kömür yüzeyinde kimyasal adsorpsiyon (kemisorpsiyon) nedeniyle hafif bir ağırlık artışı dikkat çekmektedir. Bu süreçte, oksijen moleküllerinin adsorpsiyonu, ilerleyen

aşamalardaki yanmayı artırıcı bir ön oksidasyon sürecinin başlangıcı olarak değerlendirilebilir (Tong vd., 2021:4). 400°C sonrası, DTG eğrisinde belirginleşen artış, uçucu kısmın buharlaşmasına işaret etmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte, önce uçucu yapı alevlenir, sonrasında char yanması başlar ve bu durum tükenmeye kadar devam eder. Farklı paçal oranlarındaki numunelerin DTG eğrisinde yalnızca tek bir tepe noktasının gözlemlenmesi, heterojen tutuşma teorisiyle uyumlu olmakta, yani uçucu kısım ile char eş zamanlı yanmaktadır. Ancak %30 oksijen konsantrasyonunda (B5) homojen tutuşma davranışına geçilmekte ve DTG eğrisinde iki ayrı tepe noktası görülmektedir (Tong vd., 2021:4).

7.2. Tutuşma ve Tükenme Özellikleri

Tükenmişlik parametresi (E); tutuşma noktasından %98 ağırlık kaybına kadar geçen süreyi (t_b), başlangıç yanma hızını (f_0) ve nihai yanma hızını (f_f) ifade eden bileşik bir indekstir. Yanıcılık indeksi (S) ise, maksimum yanma hızı, ortalama yanma hızı ile tutuşma ve yanma sıcaklıklarını birleştiren kapsamlı bir performans göstergesidir. S değeri arttıkça yanma karakteristikleri iyileşmektedir. Tek bileşenli kömürler arasında en düşük tutuşma sıcaklığı bitümlü kömüre aittir ($T_i = 431,8^\circ\text{C}$), en yüksek tutuşma sıcaklığı ise petrol kokuna aittir ($T_i = 485,9^\circ\text{C}$). Bu fark, doğrudan uçucu madde içeriğiyle ilişkili olup; bitümlü kömürün yüksek uçucu madde içeriği (%26,64) tutuşmayı kolaylaştırırken, petrol kokunun çok düşük uçucu madde içeriği (%11,84), tutuşma eşiğinin daha yüksek olmasına yol açtığı anlamına gelmektedir (Tong vd., 2021:7).

Yanıcılık indeksi (S) bakımından en yüksek değer, tek bileşenli kömürler arasında zayıf (fakir) kömüre (A2, $S = 132,44$) aittir. Paçal kömürler arasında ise en üstün yanma performansını, bitümlü kömür/zayıf (fakir) kömür /petrol koku oranının 1/6/3 olduğu A9 numunesi ($S = 134,09$) sergilemektedir (Tablo 7). Bu sonuç; zayıf (fakir) kömür ün hem sabit karbon içeriği hem de uçucu madde dengesi açısından optimal yanma koşullarına en yakın yapı olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 7. Seçilmiş Numunelerin TGA Yanma Karakteristik Parametreleri (Tong vd., 2021:8)

Örnek	T_i (°C)	T_f (°C)	T_m (°C)	t_b (dk)	f_0 (%)	f_f (%)	S	Açıklama
A1 (Bitümlü)	431,8	651,2	508,2	11,18	15,72	82,28	115,61	Tek kömür
A2 Zayıf (Fakir)	451,5	647,5	546,2	10,28	16,76	81,24	132,44	En iyi tek

A3 (Petrol koku)	485,9	660,2	546,2	8,92	8,95	89,05	89,31	Yüksek Ti
A4 (3:5:2)	453,5	642,8	538,2	9,68	15,68	82,32	133,33	Karışım
A6 (5:3:2)	449,6	636,1	533,0	9,81	13,95	84,05	119,51	Karışım
A9 (1:6:3)	459,3	638,1	539,7	9,12	14,68	83,32	134,09	En iyi karışım
A13 (1:4:5)	463,0	640,2	544,4	9,07	11,81	86,19	112,17	>%50 PK

7.3. Petrol Koku Oranının Yanma Performansına Etkisi

Paçal kömür numunelerinde petrol koku oranı arttıkça yanma sonrası performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, petrol kokunun çok yüksek sabit karbon içeriğine sahip olmasıdır. Yapılan çalışmada, kritik bir eşik değeri tespit edilmiştir: Petrol koku oranı %30'u aştığında (A13/ B/A/P = 1/4/5 gibi yüksek PK oranları), karışımın toplam uçucu madde içeriğinde belirgin bir düşüş olmuş, bu ise yanıcılık indeksi ve ilk yanma hızını ciddi şekilde etkilemiştir (Tong vd., 2021:6). Bu eşik değerinin mekanizması şöyle açıklanabilir: Bitümlü ve zayıf (fakir) kömür ler baskın olduğunda başlangıç yanma hızı (f_0) yüksek olmakta (petrol kokunun yaklaşık iki katı); dolayısıyla ilk aşamalarda tutuşma kolaylaşmaktadır. Petrol koku oranı arttıkça hem f_0 hem de toplam uçucu madde içeriği düşmekte; bu da özellikle ilk yanma bölgesinde soğuk bölgeler oluşturarak yanma kararlılığını zayıflatmaktadır. Bu yüzden, enerji santrallerinde, petrol koku oranının %30 ile sınırlandırılması önerilmektedir. Diğer yandan, farklı karışım oranlarındaki deneysel ve hesaplanan yanma indeksleri karşılaştırıldığında, deneysel değerin genel anlamda hesaplanan değeri aştığı görülmüştür. Bu bulgu; üç kömür türü arasındaki yanma etkileşimini engelleyici değil, destekleyici bir nitelik taşıdığını göstermekte ve enerji santrallerinde, paçal kömür yakma teknolojisinin hem ekonomik hem de teknik açıdan avantajlı olduğunu vurgulamaktadır.

7.4. Tutuşma ve Yanma Özellikleri Üzerine Oksijen Konsantrasyonunun Etkisi

Oksijen konsantrasyonunun artması hem tutuşma hem de yanma sıcaklığı üzerinde bir etki bırakmaktadır. O_2 konsantrasyonunun %5'ten %30'a yükselmesiyle tutuşma sıcaklığı yaklaşık 50°C kadar düşmüştür (468,3°C'den 417,9°C'ye). Bu mütevazı düşüşün pratik bir önemi vardır. Ki bu durum,

yakıtın ilk yanma bölgesindeki oksijen miktarını minimize ederek yakıt kaynaklı NO_x oluşumu azaltabilmekte ve tutuşma performansını marjinal düzeyde bozabilmektedir (Tong vd., 2021:8). Yanma sıcaklığı üzerindeki etki ise çok daha belirgindir: O₂ konsantrasyonunun %5'ten %10'a yükselmesiyle yanma sıcaklığında yaklaşık 116°C'lik keskin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu eşiğin üzerinde, konsantrasyon artmaya devam etse de yanma sıcaklığındaki düşüş eğilimi yavaşlamaktadır. Tükenmişlik süresi (t_b) ise, oksijen konsantrasyonu arttıkça düzenli bir şekilde azalmaktadır (Tablo 8). Ancak %30 oksijen koşulunda (B5) başlangıç yanma hızı azalmakta; bu durum yanma karakteristik parametresinin önce artma sonra azalma eğilimi göstermesine neden olmaktadır.

Tablo 8. Farklı Oksijen Konsantrasyonlarında Yanma Karakteristik Parametreleri (Tong vd., 2021:9)

Örnek	O ₂ (%)	T _i (°C)	T _f (°C)	t _b (dk)	f _o (%)	f _r (%)	S	E _m (kJ/mol)
B1	5	468,3	—	15,59	11,82	86,18	65,31	70,97
B2	10	—	—	10,72	13,85	84,15	108,67	83,41
B3	15	449,6	636,1	9,81	15,82	82,18	138,85	85,86
B4	21	—	—	9,27	16,58	81,42	145,56	86,34
B5	30	417,9	—	9,06	10,62	87,38	102,41	97,98

7.5. Yanma Performansı üzerine Parçacık Boyutunun Etkisi

Klasik anlamda, parçacık boyutu azaldıkça yanma performansı sistematik biçimde iyileşmektedir. Bu durum, küçük parçacıklarda, birim kütleye düşen özgül yüzey alanı artmakta ve oksijenle temasını hızlandırmaktadır. En küçük parçacık boyutu grubunu içeren C4 örneği (10~58 µm), tüm örnekler arasında en yüksek yanma indeksine (S = 141,48) ve en düşük yanma sıcaklığına (T_f = 627,5°C) sahip olmuştur (Tong vd., 2021:9). Parçacık boyutu 100 µm'nin üzerine çıktığında yanma performansı belirgin biçimde azalmaktadır (Tablo 9). C1, C7 ve C8 örneklerindeki 106-150 µm boyutuna sahip partiküller hem tutuşma sıcaklığını yükseltmekte hem de yanma indeksini önemli ölçüde düşürmektedir. Bu nedenle toz kömür yakıtlı kazanlarda, karışımındaki tüm bileşenler için parçacık boyutunun 100 µm altında tutulması önerilmektedir.

Tablo 9. Farklı Parçacık Boyutu Kombinasyonlarında Yanma Karakteristik Parametreleri (Tong vd., 2021:9)

Örnek (Boyut μm)	T_i ($^{\circ}\text{C}$)	T_f ($^{\circ}\text{C}$)	t_b (dk)	f_o (%)	f_f (%)	S	Açıklama
C1 (106~150 μm)	463,5	671,0	10,58	14,67	83,33	115,58	En kaba
C2 (75~106 μm)	453,1	645,2	9,91	15,15	82,85	126,64	—
C3 (58~75 μm)	449,6	640,4	9,76	15,47	82,53	130,86	Standart
C4 (10~58 μm)	449,1	627,5	9,08	15,59	82,41	141,48	En ince – EN İYİ
C5 (75~106/58~75/10~58 μm)	442,1	632,3	9,74	14,79	83,21	126,37	Min T_i (karışık)
C7 (10~58/75~106/106~150 μm)	452,2	661,7	10,68	14,64	83,36	114,23	100 μm + bileşen

Farklı bileşenlerin birbirinden farklı parçacık boyut aralıklarında bulunduğu karışık boyut kombinasyonları (C5-C8) incelendiğinde, C5'in (75~106/58~75/10~58 μm) en düşük tutuşma sıcaklığına sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, bileşen kömürlerin farklı parçacık boyutlarında hazırlanmasının tutuşmayı olumlu etkileyebileceğine işaret etmektedir.

8. YANMA KİNETİĞİ ve AKTİVASYON ENERJİSİ

Yanma prosesinin kinetik analizinde genellikle Coats-Redfern yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, TG eğrisinden elde edilen dönüşüm oranı (α) ile sıcaklık arasındaki ilişkinin lineerleştirilmesi sonrası, aktivasyon enerjisi (E_i) ve frekans faktörü hesaplanmaktadır. Ortalama aktivasyon enerjisi (E_m), farklı sıcaklık aralıklarındaki E_i değerlerinin kütle kaybı oranlarına (F_i) göre ağırlık ortalaması olarak ifade edilmektedir. $E_m = \sum E_i \cdot F_i$ ifadesi, karışımın genel reaktivitesini temsil etmektedir (Tong vd., 2021:9). Coats-Redfern yöntemiyle gerçekleştirilen kinetik analiz, yanma prosesinin 500 $^{\circ}\text{C}$ sınırında iki farklı basamağa ayrıldığını ortaya koymaktadır. 500 $^{\circ}\text{C}$ öncesi, uçucu kısmın buharlaşması ve tutuşması gerçekleşmekte olup çok sayıda kimyasal bağ kırılmakta ve hidrojen bağları oluşmaktadır. Bu sürecin yüksek enerji gereksinimi, 1. basamaktaki aktivasyon enerjisinin 2. basamaktakine göre daha yüksek çıkması ile açıklanmaktadır (Tong vd., 2021:9). 500 $^{\circ}\text{C}$ sonrasında

ise, charın yanması baskın olup 1. mertebe reaksiyon modeli bu aşamaya çok daha iyi uyum sağlamaktadır ($R^2 > 0,99$). Bu bulgu, char yanmasının daha homojen ve öngörülebilir bir reaktivite sergilediğini göstermektedir. Aktivasyon enerjisi tablosundan (Tablo 10) görüldüğü gibi, diğer kömürlere kıyasla petrol kokunun 1. aşamadaki aktivasyon enerjisi (A_3 : 206,54 kJ/mol) çarpıcı bir şekilde yüksektir. Bu durum, petrol kokunun olağandışı yüksek tutuşma sıcaklığına ait kinetiğin perspektifini doğrular nitelik taşımakta olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 10. Seçilmiş Numunelerin İki Aşamalı Aktivasyon Enerjisi Parametreleri (Tong vd., 2021:9)

Örnek	Aşama (°C)	Fi oranı	E_i (kJ/mol)	E_m (kJ/mol)	R^2	Açıklama
A1 (Bitümlü)	330~500	0,48	92,14	81,52	0,971	
	500~600	0,48	77,69	—	0,991	
A3 (Petrol koku)	410~500	0,14	206,54	113,86	0,963	En yüksek E_i
	500~700	0,84	113,86	—	0,994	
A6 (5:3:2)	350~500	0,36	101,78	85,86	0,962	Standart karışım
	500~680	0,63	78,12	—	0,992	
A9 (1:6:3)	370~500	0,30	100,43	90,23	0,962	En iyi yanıcılık
	500~640	0,68	88,39	—	0,999	

Farklı karışım oranları için E_m değerleri karşılaştırıldığında, petrol koku oranı arttıkça E_m 'nin yükseldiği görülmektedir (A_{10} 'dan A_{13} 'e). Bu eğilim, petrol kokunun karışım reaktivitesini azalttığını göstermekte ve petrol kokunun yanma gecikmesini kinetiğin diliyle doğrulamaktadır. Fakat, E_m değeri ile yanma performansı arasındaki ilişki her zaman doğru orantılı olmayabilir. Oksijen konsantrasyonu çok yüksek olduğunda (B_5 , %30 O_2), E_m değeri de yüksek (97,98 kJ/mol) olur ancak, bu durumda yanma indeksi (S) beklendiği kadar yüksek değildir. E_m 'nin tek başına kullanılmasının yanıltıcı sonuçlar doğurabileceği; difüzyon sınırlaması, organik safsızlıkların giderilmesi ve artan ekzotermik oksidasyonun kok yapısında oluşturduğu değişim gibi faktörlerin E_m ile S arasındaki korelasyonu olumsuz şekilde etkileyebileceği sonucuna varılmıştır (Tong vd., 2021:9). Parçacık boyutu ile E_m arasındaki ilişki de benzer karmaşıklık gösterebilmektedir, öyle ki, parçacık boyutu azaldıkça E_m artmakta (C_1 'den C_4 'e), ancak yanma performansı da aynı yönde iyileşmektedir. Bu durum, paçal kömürlerin yanma özelliklerinin yalnızca ortalama aktivasyon enerjisi yöntemiyle değil, çoklu parametre kullanılarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

8.1. Yakıt Azotunun Salınımı

Yakıt azot salınımı, uçucu madde uzaklaştırma sırasında incelenmiş olup reaktörden alınan numunelerin azot analizine dayanmaktadır. Daha önceki araştırmalarda (Haas vd. 1997:40; Lorenz vd., 2000:1165), kömür azotunun kömür yanması sırasında gaz fazına öncelikli olarak salınmadığı bulunmuştur. Bu nedenle, yanma ve kömür azot salınımı arasında bir orantı olduğu varsayılmıştır. Uçucu madde uzaklaştırma sırasında yakıt-N salınımı, aşağıdaki denkleme göre anlık yakıt-N içeriğinin (N_{numune}) başlangıçtaki kömür azotu ($N_{başlangıç}$) ile normalize edilmesiyle hesaplanmıştır:

$$UN = 1 - (1 - UM)N_{numune} / N_{başlangıç}$$

Burada UN, uçucu yakıt azotunun oranını ve UM ise uçucu maddeyi ifade etmektedir. Ölçülen ve tahmin edilen uçucu yakıt-N oranı arasında %8'lik ortalama bir sapma bulunmuştur; bu da %24,4'lük bir bağıl hataya karşılık gelmektedir. Hata analizi, bu sapmada önemli payın, UM ve N ölçümüne özgü analitik tekniklerden kaynaklanan tedrici hatalardan ileri geldiğini göstermektedir. Bu nedenle, uçucu yakıt-N salınımının toplanabilirliğinin değerlendirilmesi çok zordur [Haas vd., 2001]. Ancak alternatif bir yaklaşımla, kömürler ve karışımlar için, uçucu azot oranı ile uçucu madde salınımı arasında güçlü bir doğrusal ilişki tespit edilmiştir. Kömürlerin doğrusal regresyonu için korelasyon katsayısı 0,88 iken, karışımlar daha güçlü bir korelasyon göstermiş ve 0,93 olmuştur. Hem kömürler hem de karışımlar aynı eğilimi izliyor gibi görünmektedir; uçucu azot oranı, uçucu madde salınımı sırasında salınan uçucu maddeyle doğrudan orantılıdır.

9. KÖMÜR YANMASININ KATKISALLIĞI ve TAHMİN MODELİ

Bazı çalışmalarda, ana kömürlerin (%5 O₂ içeren bir gaz atmosferinde) yanma davranışı 1223, 1473 ve 1673 K sıcaklıklarında belirlenmiş; bu ölçümlerden modifiye edilmiş yalancı-kinetik (pseudo-kinetic) yanma modeli (Menendez vd., 1994:1011; Unsworth vd., 1991) kullanılarak Arrhenius parametreleri (frekans faktörü ve aktivasyon enerjisi) hesaplanmıştır. Bir karışımın yanma süresini tahmin etmek için, karışımdaki her bir kömür parçasının (char) yanma hızlarına göre bir hesaplama metodu geliştirilmiştir. Kömür yanma miktarı, her bir bileşen için bağımsız olarak hesaplanmış ve anlık kül içerikleri, başlangıçtaki kömür oranlarına göre değerlendirilmiştir.

Great White Tip (DUM) ile iki YUM li kömürün (Göttelborn ve El Cerrejon) %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarındaki karışımları için hesaplanan yanma eğrileri deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında, her iki durumda da düşük uçucu madde içerikli kömürün (Great White Tip) yanma davranışı baskın çıkmıştır. Bu beklenen bir sonuç olup, uçucu madde uzaklaştırılması sonrasındaki char ağırlık oranı yüksek uçucu madde içerikli kömürünkünden önemli ölçüde yüksek çıktığı gözlenmiştir. Pseudo-kinetik

model, saf Götteleborn kömürünün dönüşümünü zayıf da olsa düşük tahmin etmekte; ancak bu sapma, yüksek karışım oranlarında lvb kömürünün baskın etkisi tarafından maskelenmektedir (Haas vd., 2001:1320). Yapılan bu analiz; ana kömürlerin kinetiğine ait bilgiler eşliğinde, paçal kömürün yanma davranışının tatmin edici biçimde öngörülebildiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, kömür karışımı çalışmalarında tüm karışım oranları için ayrı ayrı yanma testi yapmak yerine, yalnızca bileşen kömürlerin verilerini elde etmek ve katkısız tahmin modelini uygulamak, önemli ölçüde kaynak tasarrufu sağlayabilmektedir.

9.1. Biyokütle–Kömür Paçalarında UOB Emisyon Karakterizasyonu

Yan ve arkadaşları (2023:8) tarafından yürütölen saha çalışması, 58 MW'lık sirkölasyonlu akışkan yataklı reaktörde, yer fıstığı kabuğu biyokütlesinin farklı oranlarda kömürle birlikte yakılması sonrası, UOB emisyon profilini belirlemeyi hedeflemektedir. Kömürün kaba analizinde: nem %4,02, kül %18,09, UM %27,00, **FC** %50,89 değerleri ile birlikte biyokütle için ise; nem %5,14, kül %5,82, UM %65,80, **FC** %23,24 sonuçları elde edilmiştir. Uçucu madde içerikleri karşılaştırıldığında, biyokütlenin yer fıstığı kabuğunun %78,04 ile kömürün %49,41'inin yaklaşık 1,6 katı olduğu görölmektedir. Bu yüksek uçucu madde içeriği, biyokütlenin piroliz ve yanma sürecinde belirleyici bir rol oynamasını sağlamaktadır.

9.2. NO_x ve SO₂ Emisyon Eğilimleri

Biyokütle oranının artmasıyla SO₂ emisyonları belirgin biçimde azalmıştır. %0 biyokütle koşulunda 733,0 mg/m³ olan SO₂ konsantrasyonu, %40 biyokütle oranında 170,8 mg/m³'e kadar azalarak yaklaşık %76,7'lik bir düşüş sergilemiştir. Bu düşüşün birincil nedeni, kullanılan yer fıstığı kabuğu biyokütlesinin ihmal edilebilir düzeyde kükürt içermesidir; dolayısıyla biyokütle oranı arttıkça yakıt karışımının efektif kükürt içeriği orantısız biçimde azalmaktadır.

NO_x emisyonları ise farklı bir eğilim sergilemiştir. Biyokütle oranı %0'dan %20'ye yükselirken NO_x değerleri 259,8'den 296,9 mg/m³ değerine yükselmiştir; ancak oranın %30'a ve %40'a yükselmesiyle, bu değerler sırasıyla, 216,8 ve 180,6 mg/m³'e düşmüştür. İlk artışın sebebi, biyokütlenin yüksek uçucu madde içeriğinin gaz fazında N₂ ile reaksiyon yollarını artırması iken; gerçekleşen düşüşün ikinci sebebi ise, biyokütlenin düşük N içeriği (%0,91, kömüre kıyasla yaklaşık %30 daha az) ve yüksek UM'nin oluşturduğu indirgeyici atmosferin NO_x'i azaltmasıdır (Yan vd., 2023:8).

9.3. UOM Emisyon Profili

Toplam UOM konsantrasyonu, %30 ve %40 biyokütle oranlarında belirgin biçimde düşmüştür. %0 oranında 1,44 mg/m³, %20 oranında ise 1,71

mg/m³ olan UOM değerleri; %30 oranında 0,32 mg/m³'e ve %40 oranında ise 0,41 mg/m³'e düşmüştür. Bu keskin düşüşün sebebi; %30 eşğine ulaşıldığında yanma veriminin yeterince artarak uçucu bileşiklerin daha tam şekilde oksitlenmesi ile açıklanabilir. Düşük biyokütle oranlarında (%20) yanma sıcaklığı ve karışımın yanma özellikleri henüz yeterince değişmemiştir; bu nedenle oluşan uçucu organik bileşiklerin tam yandığı söylenemez.

UOB profiline göre, her iki test koşulunda da benzenin baskın bileşen olduğu görülmektedir (%20 karışımında %44,4; %40 karışımında %33,8 kütle oranı). Biyokütle oranı arttıkça UOB türlerinin sayısı artmaktadır: %0 koşulunda 12 tür tespit edilirken %40 koşulunda 21 türe yükselmektedir. Sonraki türlerin büyük bölümünü alkanlar oluşturmaktadır. Biyokütlenin yüksek uçucu madde içeriği, piroliz sırasında kömürde bulunmayan organik fraksiyonların gaz fazına geçmesine neden olmaktadır (Yan vd., 2023:8).

9.4. BTEX Karakteristik Oranları ve Ozon Oluşum Potansiyeli

BTEX karakteristik oranları, emisyon kaynağı tespitinde önemli bir kriterdir. B/T (benzen/toluen) oranı %20 paçal oranında 2,48 iken, %40 oranında 7,12 olarak belirlenmiştir. Her iki değer de B/T > 1 kriterini sağlamakta olup bu kriter, yanma sonrası biyokütle veya kömür kökenli emisyonların karakteristik göstergesidir.

Ozon oluşum potansiyeline (OOP) yönelik yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçlar, her iki karışım oranında da aromatik bileşiklerin OFP'ye en büyük katkıyı yaptığını ortaya koymaktadır (%20 oranında %69,9; %40 oranında %70,24). Düşük konsantrasyonlarına karşın yüksek reaktiviteleri nedeniyle o-ksilen ve stiren, OFP katkısının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu bulgu; kazanlarda kömür-biyokütle paçalı yakarken yalnızca birincil kirleticilerle değil, ikincil ozon oluşumuna katkıda bulunan yüksek reaktiviteli organik uçucu bileşenler ile de ilgilenilmesi gerektiğine işaret etmektedir (Yan vd., 2023:8).

10. SONUÇ

Bu çalışmanın hedefi, yüksek uçucu madde içeren kömür karışımlarından paçal hazırlama noktasında yanma davranışını ve etki düzeyini ortaya koymaktadır. Geleneksel analitik teknikler, kömürlerin sadece genel özelliklerini ortaya koyar fakat yanma davranışları hakkında pek bilgi vermez. Dolayısıyla, yanma sürecinde ısı transfer profili, karbon dönüşümü derecesi ve cüruf oluşumu gibi kütle ilgili sorunların tahmini, yalnızca bu geleneksel analizlere dayanarak yapılamaz. Geleneksel analizler kömürü, homojen bir yakıt olarak ele alır; oysa TG/TGA gibi gelişmiş karakterizasyon teknikleri kömürün heterojenliğini de dikkate alır ve çok daha güvenilir bilgiler sağlayabilir. Bu tekniklerden elde edilen sonuçlar, pilot tesis çalışmalarıyla birlikte, optimum karışım oranlarını formüle etmek ve ayrıca paçal kömür yakıtı için kazanları verimli bir şekilde tasarlamak için de

kullanılabilir. Bu nedenle, kömür karışımlarının seçimine karar verebilmek için hem geleneksel hem de gelişmiş karakterizasyon tekniklerinin bir kombinasyonu gereklidir. Paçal kömürlerinin yanma davranışı üzerine uçucu madde parametresinin belirleyici bir etki oluşturduğu açıkça görülmektedir. Bazı çalışmalar, YUM'in katkısız özellik sergilediğini ve yüksek uçucu madde içerikli kömür karışımlarının yanma davranışının öngörülebilir olduğunu kanıtlamış ve bir takım deneysel veriler ile yanma indeksi ve tükenme özelliklerinin izlenmesi mümkün olmuştur. Çalışmadan elde edilen diğer temel bulgular aşağıda özetlenmektedir:

- ✓ Bitümlü kömür karışımlarında kül, YUM, kalorifik değer, gerçek parçacık yoğunluğu ve yakıt azotu salınımı katkısız özellik göstermektedir. Görünür parçacık yoğunluğu metodolojik kısıtlamalar nedeniyle katkısız davranış sergilememektedir.
- ✓ Linyit içeren kömür karışımlarında uçucu madde salınım hızı ve YUM içeriği katkısız değildir; katkısız olmayan davranışa sebep olan şey, farklı düzeylerdeki kömürlerin kül bileşimlerinin farklılıklarından kaynaklanan mineral faz etkileşimleridir.
- ✓ Bitümlü kömür, fakir kömür ve petrol kokunun oluşturduğu üçlü paçal sisteminde, petrol koku oranının %30 olması gerekmektedir; bu oranın üzerindeki karışımlarda, toplam uçucu madde içeriğindeki düşüş nedeniyle tutuşma özellikleri ve yanıcılık indeksi belirgin biçimde azalabilmektedir.
- ✓ Oksijen konsantrasyonunun artması yanma performansını genel olarak iyileştirmekte; ancak 500°C' den sonra aktivasyon enerjisi paradoksal biçimde yükselmektedir. Bu durum, ortalama aktivasyon enerjisinin yanma performansını tek başına tanımlamak için yeterli olmadığını vurgulamaktadır.
- ✓ Parçacık boyutunun azalması yanma performansını artırmaktadır. 100 µm üzerindeki parçacık boyutları yanma indeksini belirgin biçimde düşürmekte olduğundan; toz kömür yakıtlı sistemlerde 100 µm altında bir öğütme tercih edilmelidir.
- ✓ Biyokütle-kömür paçalarında %30' luk biyokütle oranı, UOB, NO_x ve SO₂ emisyonlarının azaltılması ile kazanın ekonomik ve güvenilir işletimi açısından optimum değeri oluşturmaktadır. Biyokütle oranı arttıkça UOB tür çeşitliliği artmakta; bu durum emisyon yönetimi süreçlerini güçleştirmektedir.
- ✓ Ana kömürlere ait YUM ve kinetik verilerin değerlendirilmesi sonucu, paçal yanma davranışının tatmin edici biçimde öngörülebilir olduğu bulgusu, paçal tasarımında tüm karışım oranları için kapsamlı reaktör testlerinin yapılması zorunluluğunu önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.

REFERANSLAR

- Basu, P. (2006). Combustion and gasification in fluidized beds. CRC press.
- Boylu, F., & Karaağaçhoğlu, İ. E. (2018). Kömür bileşenlerinin kalorifik değer üzerindeki etkisi üzerine değerlendirme. *Yerbilimleri*, 39(3), 221-236.
- Chang, H., Su, H., Zhang, G., Zhang, F., Liu, G., Gao, Z., ... & Deng, J. (2026). Coupled Environmental Factors Affecting Coal Low-Temperature Oxidation: A Machine Learning Prediction Model. *Combustion Science and Technology*, 1-29.
- Chen, Y., Tian, C., Feng, Y., Zhi, G., Li, J., & Zhang, G. (2015). Measurements of emission factors of PM_{2.5}, OC, EC, and BC for household stoves of coal combustion in China. *Atmospheric Environment*, 109, 190-196.
- Cheng, Y., & Pan, Z. (2020). Reservoir properties of Chinese tectonic coal: A review. *Fuel*, 260, 116350.
- Chi, T., Zhang, H., Zhou, H., & Kan, R. (2009, February). Ignition characteristic of blended coal in a drop-tube furnace. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 147, No. 1, p. 012066).
- Erik, N. Y. (2022). KÖMÜR ÖZELLİKLERİNİN TEMİZ KÖMÜR TEKNOLOJİLERİNE (GAZLAŞTIRMA, SIVILAŞTIRMA, KARBON ELYAF VE KOK ÜRETİMİ) ETKİSİ: DERLEME. *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(2), 22-56.
- Haas, J. H. P., Maalman, T., Gallagher, G., & van de Kamp, W. (1997). Pulverized fuel combustion. Characterization of coal blends. Report on CC10 Trails, IFRF DOC No. F, 37.
- Haas, J., Tamura, M., & Weber, R. (2001). Characterisation of coal blends for pulverised fuel combustion. *Fuel*, 80(9), 1317-1323.
- Hwang, S. M., Kurose, R., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H., & Katsuki, M. (2005). Application of optical diagnostics techniques to a laboratory-scale turbulent pulverized coal flame. *Energy & fuels*, 19(2), 382-392.
- Idris, A., Man, Z., Bustam, A., Rabat, N. E., Uddin, F., & Abdul Mannan, H. (2022). Grindability and abrasive behavior of coal blends: Analysis and prediction. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(4), 1143-1169.
- Kurose R, Ikeda M, Makino H. Combustion characteristics of high ash coal in a pulverized coal combustion. *Fuel*. 2001; 80(10): 1447-1455.
- Li, L., Bai, X., Qu, C., Zhou, K., & Sun, Y. (2022). Effects of moisture on the ignition and combustion characteristics of lignite particles: Modeling and experimental study. *ACS omega*, 7(39), 34912-34920.
- Li, L., Tahmasebi, A., Dou, J., Lee, S., Li, L., & Yu, J. (2020). Influence of functional group structures on combustion behavior of pulverized coal particles. *Journal of the Energy Institute*, 93(5), 2124-2132.
- Li, Q., Jiang, J., Zhang, Q., Zhou, W., Cai, S., Duan, L., ... & Hao, J. (2016). Influences of coal size, volatile matter content, and additive on primary particulate matter emissions from household stove combustion. *Fuel*, 182, 780-787.
- Liu, D. H., & Liptak, B. G. (1999). Environmental engineers' handbook on CD-ROM. CRC press.
- Lorenz, H., Carrea, E., Tamura, M. ve Haas, J. (2000). The role of char surface development in pulverized fuel combustion. *Fuel*, 79(11), 1161-1172.

- Lorenz, H., Carrea, E., Tamura, M., & Haas, J. (2000). The role of char surface structure development in pulverized fuel combustion. *Fuel*, 79(10), 1161-1172.
- Ma, L., Guo, A., Fang, Q., Wang, T., Zhang, C., & Chen, G. (2018). Combustion interactions of blended coals in an O₂/CO₂ mixture in a drop-tube furnace: experimental investigation and numerical simulation. *Applied Thermal Engineering*, 145, 184-200.
- Menendez, R., Alvarez, D., Fuertes, A. B., Hamburg, G., & Vleeskens, J. (1994). Effects of clay minerals on char texture and combustion. *Energy & Fuels*, 8(5), 1007-1015.
- Moulijn, J. A., Makkee, M., & Van Diepen, A. E. (2013). *Chemical process technology*. John Wiley & Sons.
- Nalbandian, H. (2011). Expert systems and coal quality in power generation. Report CCC/186, IEA Clean Coal Centre, London.
- Onifade, M., & Genc, B. (2019). Spontaneous combustion liability of coal and coal-shale: a review of prediction methods. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(2), 151-168.
- Raaj, S. S., Arumugam, S., Muthukrishnan, M., Krishnamoorthy, S., & Anantharaman, N. (2016). Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants. *Applied Thermal Engineering*, 102, 9-16.
- Rieth, M., Clements, A. G., Rabaçal, M., Proch, F., Stein, O. T., & Kempf, A. M. (2017). Flamelet LES modeling of coal combustion with detailed devolatilization by directly coupled CPD. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(2), 2181-2189.
- Riley, J. T., Gilleland, S. R., Forsythe, R. F., Graham Jr, H. D., & Hayes, F. J. (1989, March). Nonadditive analytical values for coal blends. In *Proceedings of the Seventh International Coal Testing Conference*, Charleston, WV (pp. 32-38). Standard Laboratories Inc Charleston, WV.
- Sahu, S. G., Chakraborty, N., & Sarkar, P. (2014). Coal–biomass co-combustion: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 575-586.
- Tong, C., Yang, X., Chen, G., Zhang, Y., Chen, L., Zhou, Y., ... & Jin, B. (2021). Experimental investigation for the combustion characteristics of blends of three kinds of coal. *Fuel*, 300, 120937.
- Tsuji, N., Suzuki, T., Tobu, Y., Hata, Y., Sugiyama, M., Nishifuji, M., & Kanehashi, K. (2023). Detection and Characterization of Organic Gases during Coal Carbonization Using VUV-SPI-TOFMS. *ISIJ International*, 63(3), 534-542.
- Unsworth, J. F., Barratt, D. J., & Roberts, P. T. (1991). Coal quality and combustion performance: an international perspective. *Coal science and technology*, 19, 1-609.
- Wen, C., Gao, X., & Xu, M. (2016). A CCSEM study on the transformation of included and excluded minerals during coal devolatilization and char combustion. *Fuel*, 172, 96-104.
- Xuexin, S. (2002). *The Experiment Technology and Method of Boiler Combustion [M]*. Chinese Electrical Power Press: Beijing.
- Yadav, S., & Mondal, S. S. (2019). A complete review based on various aspects of pulverized coal combustion. *International Journal of Energy Research*, 43(8), 3134-3165.

- Yan, Z., Gao, Y., Zhang, Y., Jiang, N., Pu, L., Ji, L., & Liu, X. (2023). Study on the emission characteristics of VOCs under the condition of biomass blending combustion. *Heliyon*, 9(12).
- Yuzbasi, N.S. ve Selcuk, N. (2012). Air and oxy-fuel combustion behaviour of petcoke/lignite blends. *Fuel*, 92(1), 137–144.

Kil Katkılı PVC Polimer Kompozit Filmlerin XRD, FTIR, SEM, TEM ve Termal Analizler ile Karakterizasyonlarının Araştırılması

**Ceyda BİLGİÇ¹
Şafak BİLGİÇ²**

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

² Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü safakbilgic@gmail.com Orcid No: 0000-0002-9336-7762

ÖZET

Polivinil klorür (PVC) veya PVC polimer matrisine kil katılarak hazırlanmış kompozit filmler düşük maliyet, yüksek üretim hacmi ve geniş uygulama alanı gibi avantajları nedeniyle birçok endüstriyel alanda uygulama alanı bulmaktadırlar. Kil katkılı PVC polimer kompozit filmler'den üretilmiş malzemeler günlük hayatımızda önemli bir yere sahip olup, tüketimi de günden güne artmaktadır. Bu çalışmada, PVC'nin polimerizasyonundan, katkı (dolgu) maddesi olarak kullanılacak killerin çeşitlerinden ve katkı maddesi modifikasyonları hakkında literatür araştırmasından bahsedilmiştir. Killer, kimyasal kararlılık ve takviye gibi mükemmel özellikleri nedeniyle PVC modifikasyonu için ideal bir dolgu maddesidir. Çoğu çalışma, yüksek yüzey enerjisi ve benzersiz yüzey kimyası nedeniyle kümelenme eğiliminde olan ve kompozitlerde arayüzey yapışmasını azaltan modifiye edilmemiş nano-killer kullanılmaktadır.

Modifiye edilmiş nano-kil katılarak hazırlanmış PVC kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri oldukça iyileşmiştir. Çözelti döküm (Solvent Casting), sol-jel ve yerinde (in situ) polimerizasyon yöntemleriyle PVC/ nano-kil kompozitlerinin hazırlanmasının işlem özellikleri, avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Sodyum montmorillonit (Na^+ -MMT) ve organik olarak modifiye edilmiş montmorillonit organo montmorillonit (O-MMT) miktarının, polimer matris PVC'ye katılarak hazırlanmış PVC/ Na^+ -MMT ve PVC/O-MMT kompozitlerinin X-ışını kırınımı (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) analizleri morfolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile, kil katkılı PVC polimer kompozit filmlerin yüzey kimyasal bağlarını ve yüzey bileşimini değerlendiren yapısal karakterizasyonu incelenmiştir. Kil katkılı PVC polimer kompozit filmlerin termal bozunması ve kararlılığı, çeşitli ısıtma hızlarındaki termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Yapılan araştırma sonucunda; belirli ağırlık oranlarında kil ilavesiyle elde edilmiş PVC polimer kompozit filmlerinin, vücut sistemlerinde (solunum, sindirim gibi) kullanılan PVC biyomalzemelerde ve nanoteknolojinin birçok alanında yapılması planlanan ileriki çalışmalar için zemin oluşturacağı kanaatindeyiz.

Anahtar Kelimeler: Polivinil klorür (PVC), Nano-kil, Montmorillonit (MMT) X-ışını difraksiyon analizi (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Geçirimli elektron mikroskobu (TEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Termal Kararlılık

GİRİŞ

Çözelti döküm (solvent casting), sol-jel ve yerinde (in situ) polimerizasyon yöntemleriyle PVC polimer matrisine nano-killerin katılması, kil katkılı PVC polimer kompozit filmleri elde etmek için kullanılan geleneksel yaklaşımlardandır. Aktif metallerin polimer matrislerine dahil edilmesi antibakteriyel özelliklere sahip polimerlerin geliştirilmesinde etkili bir metodu temsil etmektedir. PVC, işleme kolaylığı, farklı maddelerle uyumluluk ve çok yönlülük açısından farklı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PVC malzemeler biyomedikal alanda geniş bir yer kaplar. Tıbbi ve biyomedikal alanda, steril tek kullanımlık biyomalzemeler, tıbbi cihazlar, parenteral beslenme torbaları, enteral beslenme tüpleri, solunum tüpleri gibi birçok biyomalzemeyi üretmede yaygın şekilde kullanılır (Das vd., 2022; Triandafillu vd., 2003).

PVC içerikli medikal malzemeler biyomedikal alanda 40 yıla varan bir geçmişi vardır ve bu alanda geniş bir yer kaplar. PVC, işleme kolaylığı, farklı maddelerle uyumluluk ve çok yönlülük açısından uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. PVC'nin biyomalzeme içeriği olarak tercih edilmesinin diğer nedenleride maliyet avantajı ve medikal alanda kullanılan tüm sterilizasyon yöntemleri ile steril edilebilir olmasıdır. Vücut sistemlerine yardımcı tek kullanımlık olarak kullanılan biyomalzemeler, parenteral beslenme torbaları, enteral beslenme tüpleri, kataterler, ekstrakorporeal oksijenizasyon dolaşım setleri, solunum maskeleri, endotrakeal tüpler gibi birçok üründe bulunabilir. PVC'lerin avantajlarının yanı sıra içerdiği veya esnekliğin sağlanması için eklenen maddelerden kaynaklı birçok toksik etkisi ve enflamasyon etkisi mevcuttur. PVC biyomalzemelerinin neden olduğu enflamasyonun süresinin, şiddetinin veya ilaç salınımının etkisi, biyomalzeme büyüklüğüne, şekline ve kimyasal-fiziksel özelliğinin yanı sıra in vitro/in vivo olmasına bağlı olarak değişmektedir. PVC biyomalzemelerin neden olabileceği etkileri en aza indirmek ve biyoyumluluğu artırmak için yeni materyallerin araştırılıp, geliştirilmesi yönündeki çalışmalar hızla artmaktadır (Das vd., 2022; Morgan ve Mukhopadhyay, 2022).

Aynı zamanda günümüzde kullanılan pek çok polimer içinde PVC, kablo üretiminde yalıtkan malzemesi olarak, diğer ülkelerde olduğu gibi Türkiye'de de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle insan yoğunluğunun yüksek olduğu hastane, okul, alışveriş merkezleri gibi tesislerde geleneksel kablolar yerine yeni nesil alev geciktirici kablolar kullanılmalıdır. Böylece geçmişte tüm dünyada ve ülkemizde yaşadığımız tatsız olayların tekrarlanması ve birçok insanın hayatını kaybetmesi

engellenmiş olur (Demirel ve Altındaş, 2005). Yapılan çalışmalar, PVC ve PVC içerikli ürünlerde alev geciktirici olarak antimon, çinko borat, bor fosfat, trifenil fosfat, alüminyum trihidratın iyi birer alev geciktirici olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Üretim şartları incelenen PVC kablo için antimon hidroksit, çinko borat, bor fosfat ve trifenil fosfat ile birlikte yapısal özellikleri bakımından sepiyolit, trimetil borat ve admontit alev geciktirici olarak kullanılabilir. Alev geciktiriciler farklı metotlarla çalışır ve beraber kullanıldıklarında sinerjik etki gösterebilirler. Yapılan çalışmalarda çinko borat; bor fosfat, trifenil fosfat ve antimon trihidrat ile sinerjik etki göstermektedir (Demirel ve Altındaş, 2005; Dündar vd., 2023).

Polivinilklorür (PVC) en yaygın kullanılan ikinci termo plastik malzemedir. PVC'nin yaygın kullanılmasının nedeni kimyasal direnci ve katkı malzemeleriyle karıştırılarak farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerde bileşiklerin yapılabilmesidir. PVC'nin ana zinciri üzerindeki her iki karbon atomundan birine takılan klor atomları, amorf ve kristalleşmeyen bir polimer malzeme meydana getirir. PVC polimer zincirleri arasındaki yüksek çekim kuvvetlerinin başlıca nedeni, klor atomlarının çift kutup momentleridir. Fakat klor atomları büyük oldukları ve negatif yükle yüklü oldukları için bir üç boyutlu engelleme ve elektrostatik itme yaratırlar ve bu nedenle polimer zincirlerinin eğilebilirliği azalır. Bu molekül hareketsizliğinden dolayı türdeş polimerlerin işlenmesinde zorluk oluşacağından, PVC işlenmesini kolaylaştıran katkılar eklenmeden son ürün haline pek şekillendirilemez. PVC türdeş polimerlerine nispeten yüksek dayanıma (51,75-62,1 MPa) sahiptir ve gevrek bir malzemelerdir. PVC orta değerde ısı dayanıma (57-82 °C), iyi elektriksel özelliklere ve çözücülere karşı yüksek çözücü direnci vardır. PVC'deki yüksek klor miktarı alevlenmeye ve kimyasal maddelere direnç sağlar çünkü halojen içeren plastikler yangına karşı dayanıklılık özelliği kazanırlar (Karaoğlu ve Demir, 2025).

PVC veya Polivinil klorid en fazla kullanılan amorf plastiklerin başında gelir. PVC'nin sert ve esnek olarak iki çeşit kullanım alanı vardır. Sert PVC daha çok boru, pencere profili, duvar kaplamaları v.b. alanlarında kullanılır. Bunlar şartlarına dayanıklı, mukavemeti yüksek, sert ve kendi kendine yanmamazlık özelliklerine sahiptirler. Yumuşak veya esnek PVC türleri ise daha çok kablo sanayi, yer döşemeleri, oyuncak ve eldiven yapımında kullanılmaktadır. Özellikle düşük ısı stabilitesine sahip olan PVC ısıtıldığı zaman metal yüzeylere yapışma özelliği çok yüksektir. PVC hava şartlarına olan yüksek dayanıklılığı, kolay işlenebilmesi, metal yüzeye yapışma özelliğinin olması ve iyi elektriksel özelliklerinin bulunması nedeni ile kablo imalatında geniş yer almıştır. PVC direkt olarak ısıya maruz

kaldığında hidrojen klorür (HCl) açığa çıkar ve PVC rengine sararmalar meydana gelir. Bozunma derecesine bağlı olarak PVC rengine sırası ile sararma, kızılama, kahverengi ve siyah renkler görülür. Bununla birlikte ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişimler meydana gelir. Proses sırasında meydana çıkan atık gazlar ve nem vakum ile ortamdan uzaklaştırılarak bertaraf edilir. PVC üretim proseslerinde ürün tipine bağlı olarak bazı yardımcı katkı maddelerinin eklenmesi zorunludur (Demirel ve Altındaş, 2005; Karaoğlu ve Demir, 2025; Dündar vd., 2023).

Poli(vinil klorür) (PVC), toplumumuzda en yaygın kullanılan plastiklerden biridir. Başlıca kullanım alanları arasında borular, elektrik telleri, pencere profilleri, dış cephe kaplamaları vb. yer almaktadır. Son zamanlarda, kabul edilebilir mekanik özellikleri, neme ve mantara karşı direnci, uzun ömrü, ahşap benzeri yüzey performansı ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle ahşap lif takviyeli PVC daha popüler hale gelmektedir (Clemons, 2002; Ramesh vd., 2022). Bu malzemenin düşük darbe dayanımı ve termal kararlılığı gibi bazı zayıf yönleri, uygulamasına kısıtlama getirmekte ve bu önemli ürün üzerinde ek araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Plastik bir matrise doğal lif eklenmesi, ortaya çıkan kompozitlerin modülünü artırabilir, ancak aynı zamanda darbe dayanımını da düşürür (Selke ve Wichman, 2004).

Poli (vinil klorür) (PVC), yaygın olarak kullanılan bir termoplastik polimerdir. PVC uygulamalarını genişletmek için PVC/MMT nanokompozitleri incelenmiştir. (Wan vd., 2003; Zaman ve Beg, 2014; Chen vd., 2006; Wang vd., 2001; Wang vd., 2002). Çoğu polimer/MMT nanokompozit sisteminde, polimer moleküllerinin araya girmesinden önce MMT, kilin yeterince organofilik hale getirilmesi ve ardından polimer moleküllerinin MMT'nin silikat katmanları arasına yerleştirilmesine izin verilmesi için organik amonyum tuzu ile işleme tabi tutulması (muamele edilmesi) gerekmektedir. Bazı koşullar altında, polimer/Na⁺-MMT nanokompozitini hazırlamak amacıyla sadece Na⁺-MMT kullanılabilir (Wan vd., 2003; Wan vd., 2004).

Birçok çalışmada PVC/MMT nanokompozitleri incelenmiş olmasına rağmen, PVC/Na⁺-MMT ve PVC/O-MMT nanokompozitlerine çok az dikkat gösterilmiştir. Çeşitli katkı maddelerinin PVC bileşiklerinin morfolojisi ve erime özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Comeaux vd., 1994; Çetin vd., 2019; Chen vd., 2005; Chen vd., 2021; Boraei vd., 2024; Bouchareb, vd., 2022). Bu arada, çözelti döküm (solvent casting), yöntemiyle hazırlanan PVC/Na⁺-MMT ve PVC/O-MMT nanokompozitlerinin erime, termal, mekanik ve kısmi morfolojik özellikleri de ortaya konulmuştur (Chen vd.,

2005). Bu nedenle, PVC/Na⁺-MMT ve PVC/O-MMT nanokompozitlerindeki MMT'nin katmanlı yapısı XRD ve TEM ile karakterize edilmektedir. Ayrıca, PVC/Na⁺-MMT ve PVC/O-MMT nanokompozitlerinin kırık yüzeylerinin özellikleri ve SEM mikrografları arasındaki ilişki gösterilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kil katkılı PVC polimer kompozit filmlerin yüzey kimyasal bağlarını ve yüzey bileşimini değerlendiren yapısal karakterizasyonu FTIR spektroskopisi (FTIR) ile, termal bozunması ve kararlılığı, çeşitli ısıtma hızlarındaki termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenebilmektedir.

KİL KATKILI PVC POLİMER KOMPOZİT FİMLERİN XRD İLE İNCELENMESİ

XRD spektroskopisi kristal yapılı materyallerin atomik boyuttaki üçüncül yapısını tamamen aydınlatmak için kullanılan esas yöntemdir. X-ray kırınımı bir hızadaki X-Ray ışınlarının örnek üzerindeki kristal düzlemlere yansımaları olayıdır. Tipik olarak X-Ray'lerin geniş açılı elastik yayılımını esas alan XRD tekniği, kristalin boyutunu, şeklini ve yapısını karakterize etmek için kullanılan bir tekniktir (Lin vd., 2014). Nanodolguların XRD desenlerinden elde edilen veriler incelendiğinde kristalin yapıdaki nano-killerin $2\theta = 30.91^\circ$, $2\theta = 31.59^\circ$, $2\theta = 32.54^\circ$, $2\theta = 39.42^\circ$ ve $2\theta = 46.37^\circ$ derecelerinde karakteristik pikleri gözlenmiştir (Ragu vd., 2014).

X-ışınları kırınım (XRD) analizi özellikle polimer matris içine dağıtılmış organokilin tabaka genişlikleri hakkında fikir edinilmesinde ve dolayısıyla, nanokompozitlerin eksfoliye veya interkale davranışlarının analizinde oldukça etkili bir tekniktir. Zira bu teknikte, organokilde yer alan kil tabakaları arası mesafenin (galerilerin) kırınım açısı ile değişimi kaydedilebilmektedir. Kil galerilerinin yüksekliği (d_{001} mesafesi), Bragg's yasası: $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$ kullanılarak pik pozisyonundaki değişimden belirlenebilmektedir. Burada, λ : X-ışını dalgaboyuna karşılık gelmektedir ($1.5418 \text{ \AA}$) (Sudhakar vd., 2021).

XRD, bileşenlerin kristal veya amorf yapısını ve polimer matrisi içindeki dağılımlarını değerlendirmek için kullanılır. Polimerlerin XRD desenlerinden gözlemlenen bir maksimum ile geniş bantlı bir kırınım deseni sunmaktadır ve bu kırınım deseni polimerinin amorf yapısını göstermektedir (Huang vd., 2020). Değişen konsantrasyonlarda ultra ince kil nanopartikülleri içeren polimer /kil nanokompozitlerinin XRD desenlerinde ise; amorf kilin 22° 'de (2θ)'da (101) Miller indeksine karşılık gelen karakteristik bir kırınım deseni sergilediği iyi bilinmektedir (Nandanwar vd., 2015). Literatürden görülebileceği gibi, kil nanopartiküllerinin polimer matrisine dahil edilmesiyle, polimerin XRD deseninde önemli bir değişikliğe neden olduğu gözlenmiştir. Kil ve polimerin kırınım maksimum pikleri birbirine yakın

olduğundan (sırasıyla 22° ve 20°), polimerin amorf fazında önemli bir değişiklik gözlemlenmemektedir (Kim vd., 2002; Noh ve Lee, 1999; Xi vd., 2004; Ma vd., 2010; Yeh vd., 2008; Yalçınkaya vd., 2010).

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Na⁺-MMT ve PVC/Na⁺-MMT nanokompozitlerinin XRD desenleri incelendiğinde; amorf PVC'nin 1 ila 10° arasında değişen 2θ bölgesinde herhangi bir kırınım pik noktası bulunmadığından, nanokompozitlerin XRD desenlerinde görünen kırınım pik noktaları tamamen Na⁺-MMT'nin kırınım pik noktalarından kaynaklanmaktadır. Na⁺-MMT'nin XRD deseni, (001) pik noktasının yaklaşık 7,2°'de bulunduğunu ve bunun 1,226 nm'lik bir bazal aralığa karşılık geldiğini göstermektedir. PVC/Na⁺-MMT nanokompozitleri için, karakteristik (001) kırınım pik noktasının yoğunluğu önemli ölçüde azalmakta ve pik noktası Na⁺-MMT'ye kıyasla daha küçük bir açıya kaymaktadır. Bu arada, PVC içindeki Na⁺-MMT içeriği %1 ağırlık oranından %5 ağırlık oranına kadar aralıklarla sürekli olarak artırıldığında, PVC içindeki MMT'nin katmanlar arası mesafeleri sırasıyla 1,54, 1,55, 1,50, 1,48 ve 1,43 nm olmuştur. Bu durum, PVC zincirlerinin Na⁺-MMT'nin katmanlar arasına iyice yerleştiğini göstermektedir (Chen vd., 2006).

O-MMT ve PVC/O-MMT nanokompozitlerinin XRD desenleri incelendiğinde, PVC/Na⁺-MMT nanokompozitlerinde olduğu gibi, nanokompozitlerin XRD desenlerinde görünen kırınım pikleri tamamen O-MMT'nin kırınım piklerinden kaynaklanmaktadır. O-MMT'nin (001) pikinin, O-MMT'nin silikat katmanları içindeki organofilik bir gruba (alkilamonyum katyonları) sahip organik değiştirici nedeniyle 4,5–3,58'e kaydığı ve bunun da 1,96–2,49 nm'lik bir bazal aralığa karşılık geldiği görülmektedir. Ayrıca, 170 °C, 60 rpm ve 5 dakikalık karıştırma süresiyle Haake tork reometresinde karıştırılan çeşitli ağırlık oranında PVC/O-MMT nanokompozitlerinde (001) kırınım piki hareketlerinin benzer eğilimini göstermektedir. O-MMT'nin silikat katmanları içindeki organik katyonik moleküllerin uzaklaştırılması, karıştırma işlemi sırasında gerçekleşebilir; bu nedenle, karıştırma sırasında bazı O-MMT'ler çökebilmektedir. Bu durum, PVC/%3 ağırlık oranında O-MMT ve PVC/ %3 ağırlık oranında O-MMT nanokompozitlerinin XRD desenlerinde küçük ve geniş bir kırınım pik noktası (silikat katmanlarının karşılık gelen d-aralığı 1,83 nm'dir) oluşmasına neden olmuştur. PVC/%5 ağırlık oranında O-MMT içeren nanokompozit için, bu kırınım pik noktasının yoğunluğu, PVC/%3 ağırlık oranında O-MMT içeren nanokompozitininkinden daha güçlüdür (Chen vd., 2006).

%5 ağırlık oranında O-MMT içeren yüklemenin pik noktası 2,588'e kaymıştır ve silikat katmanlarına karşılık gelen d-aralığı 3,41 nm'dir. %3 ağırlık oranında O-MMT içeren yükleme için pik noktası 2,58'e kaymıştır (silikat katmanlarının karşılık gelen d-aralığı 3,52 nm'dir) ve pik yoğunluğu belirgin şekilde azalmıştır. Daha az O-MMT yüklemesiyle pik yoğunluğu zayıflamıştır. Bu olgu, PVC/O-MMT nanokompozitlerinde pul pul dökülmüş ve ara katmanlı yapıların bir arada bulunduğunu göstermektedir. Sonuç ayrıca,

O-MMT yüklemesinin azaltılmasının, PVC zincirlerinin silikat katmanlarına hem pul pul dökülmesini hem de ara katmanlanmasını destekleyeceğini göstermektedir (Wang vd., 2001; Yoon vd., 2001; Chen vd., 2006).

Kumari ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, saf PVC polimer filminin, saf kil bazlı polimer kompozit filminin ve organokil bazlı PVC polimer kompozit filminin XRD desenlerini göstermektedir. Saf kil bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde, Montmorillonit, Bentonit ve Vermikülit'de herhangi bir kırınım pik noktası bulunmamaktadır; bu da kil bazlı polimer kompozit filmlerinin yapısının ya pul pul dökülmesini ya da kısmi pul pul dökülmesini ve kısmi ara katmanlaşmasını düşündürmektedir (Kumari vd., 2023; Chen vd., 2020).

Kumari ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, Organo montmorillonit ve Organo Bentonit bazlı PVC polimer kompozit filminin XRD deseni, karakteristik kırınım pik noktasının $3,27^\circ$ ve $4,04^\circ$ açılara doğru kaydığını ve katmanlar arası mesafenin sırasıyla $27,01 \text{ \AA}$ ve $21,87 \text{ \AA}$ olduğunu göstermektedir. Bu durum, Organo montmorillonit ve Organo Bentonit'in katmanlar arası bölgesinde PVC bulunduğunu düşündürmektedir. Organo Vermikülitin kırınım pik noktası, Organo Vermikülit bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde pratik olarak aynı kalmıştır; bu durum da Organo Vermikülitin dağılımının olmadığını veya çok az olduğu bir mikrokompozit yapıyı göstermektedir. Saf PVC polimer filmlerinin belirgin bir karakteristik kırınım pik noktası bulunmamıştır; bu durum, PVC polimerinin amorf yapısından kaynaklanmaktadır (Kumari vd., 2023).

KİL KATKILI PVC POLİMER KOMPOZİT FİLMLERİN TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İLE İNCELENMESİ

Sentezlenen kil katkılı pvc polimer kompozit filmlerin yüzey görüntüleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniği kullanılarak kaydedilmiştir. Numunelerin sulu dispersiyonundan bir damla, numune tutucularına yerleştirilir, hava ile kurutulur ve vakumlu buharlaştırıcıda altınla kaplanır ve 30 KV hızlandırma voltajına sahip bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak fotoğraflanmıştır. SEM tekniği, esas olarak saf ve modifiye edilmiş kil minerallerinin morfolojisindeki değişiklikleri analiz etmek için kullanılmaktadır. Saf kil mineralleri, bazı faz ayrışmaları olan büyük plakalara sahiptir. Moleküller arası kuvvetler nedeniyle, saf kil minerallerindeki parçacıklar birbirine sıkıca bağlıdır ve agregasyon halindedir. Katyonik yüzey aktif madde ile etkileşimde, morfolojide önemli bir değişiklik meydana gelir. Kilin katmanlar arası boşluğunun artması nedeniyle, daha fazla boşluğun küçük ve agregasyon halindeki parçacıklara sahip olduğu görülebilir. Vermikülit katmanları, pul pul dökülmüş kenarlara sahip çokgen tabakalara zayıf bir şekilde sıkıştırılmıştır; oysa Organo

vermikülit durumunda, belirgin, gözenekli bir mikro yapı gözlemlenmiştir (Kumari vd., 2023).

Literatürde polimer-kil sistemleri üzerine yapılan çalışmada gözlemlenen morfoloji, farklı sentez tekniklerinin farklı mikro yapılara yol açtığını göstermiştir. Mikro yapı, gözenekli ağlardan kırık yüzeylere ve çekirdek-kabuk konfigürasyonlarına kadar değişebilir ve her biri malzemenin mekanik, termal ve fonksiyonel özelliklerini etkiler. En sık gözlemlenen morfolojilerden biri, birbirine bağlı gözenekli ağların oluşmasıdır. Xia ve arkadaşları; sol-jel türevli polimer-silika kaplamalarının, düzensiz, köpük benzeri gözeneklerin açık hücreli bir çerçeve oluşturduğu sünger benzeri gözenekli bir yapı sergileyen olarak karakterize etmişlerdir (Xia vd., 2017). Bu morfoloji türü, özellikle filtrasyon membranları ve katalitik destekler gibi yüksek gözeneklilik gerektiren uygulamalar için büyük önem taşır. Bazı durumlarda, polimer-silika sistemleri kendiliğinden düzenli yapılara dönüşür. Chen ve arkadaşları, buharlaşma kaynaklı kendiliğinden birleşme (evaporation-induced self-assembly) yoluyla petek desenli polimer/kil kaplamaların oluşumunu rapor etmişlerdir (Chen vd., 2008). Altıgen şeklinde düzenlenmiş gözenekler, rastgele süngerimsi oluşumlarla tezat oluşturan yapılandırılmış bir morfoloji sağlamıştır. Bu petek deseni, kontrollü gözenek mimarisi nedeniyle özellikle optik ve sensör uygulamalarında kullanışlıdır.

Yan ve arkadaşları, silika dolgulu polimer kompozitlerin genellikle çatlak sapması ve mikro çatlak oluşumu gibi enerji dağılımı mekanizmalarının göstergesi olan pürüzlü kırılma yüzeyleri sergilediğini açıklamışlardır (Yan vd., 2023). Mikro çatlakların ve çatlak benzeri yapıların varlığı, kırılma enerjisini emdikleri (absorbladıkları) ve çatlak yayılımını yavaşlattıkları için gelişmiş tokluğu göstermektedir. Ayrıca, bu sistemlerde sıklıkla parçacık kopması gözlemlenir; silika parçacıkları kırılan polimer matrisinde belirgin boşluklar bırakır ve bu da mekanik özelliklerin belirlenmesinde arayüzey yapışmasının rolünü vurgulamaktadır. Bazı polimer-silika sistemleri ayrıca kırışık veya pürüzlü yüzey dokuları da sergilemektedirler. Su ve arkadaşları tarafından, muhtemelen işleme sırasında farklı büzülme veya faz ayrışması nedeniyle tekdüze (uniformly) kırışık bir morfoloji sergileyen bir grafen oksit-silika kompozit kaplama rapor edilmiştir (Su vd., 2014). Bu yüzey pürüzlülüğü, hidrofobiklik, yapışma ve optik saçılma gibi fonksiyonel özellikleri artırabilir. Kompozit (hibrit) nanoyapılarda, polimer ve silika çekirdek-kabuk morfolojileri oluşturabilir.

Chen ve arkadaşları, polimerin çekirdek görevi gördüğü, mezogözenekli bir silika kabuğunun ise onu çevrelediği polistiren-silika nanopartiküllerini tanımlamaktadır. Sentez yaklaşımına bağlı olarak, silika kabuk, ilaç dağıtımında ve diğer nanoteknoloji uygulamalarında kontrollü salınım için faydalı olan sünger benzeri veya solucan benzeri mezogözenekli dokular sergileyebilir (Chen vd., 2017). Ek olarak, silika dolgu maddelerinin doğal yapısı, kompozit morfolojisinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Subramanian ve arkadaşları, silika morfolojilerini fraktal benzeri agregatlar

(füme silika), sünger benzeri çökelti ve ayrı kolloidal silika olarak sınıflandırmıştır (Subramanian vd., 2021). Bu temel yapısal farklılıklar, silikanın polimer matrisi içinde nasıl dağıldığını etkiler ve sonuçta kompozitin ortaya çıkan kompozitin mekanik ve termal davranışını etkilemektedir.

Son olarak, bazı gelişmiş hibrit sistemler, iç içe geçmiş polimer-silika ağları sergilemektedir. Shirinova ve arkadaşları, sol-jel polimer-silika hibritlerinin, her iki fazın da ayrı parçacıklar veya gözenekler olarak var olmak yerine yapısal olarak bütünleştiği, eş sürekli iç içe geçmiş ağlar oluşturabileceğini belirtmektedir. Bu tür kompozit ağ yapıları, gelişmiş termal kararlılık ve mekanik bütünlük sağlayarak, yüksek performanslı kaplamalar ve yapısal malzemeler için umut vadeden bir potansiyel sunmaktadırlar. Genel olarak, polimer-silika sistemlerinin morfolojik çeşitliliği, sentez ve işleme tekniklerinin kritik rolünün altını çizmektedirler. Gözenekli ağlar, kırık yüzeyler, çekirdek-kabuk yapıları veya kompozit iç içe geçmiş matrisler oluşturmaları fark etmeksizin, bu malzemeler, belirli uygulamalar için uyarlanabilen geniş bir mikro yapısal özellik yelpazesi sergilemektedir (Shirinova vd., 2025).

KİL KATKILI PVC POLİMER KOMPOZİT FİLMLEİN GEÇİRİMLİ ELEKTRON MİKROSKOBU (TEM) İLE İNCELENMESİ:

İnterkale ve floküle kil tabakalarının dağılım mikroyapısı da TEM analizleri aracılığıyla incelenebilmektedir. Polimer nanokompozitlerdeki interkale ve floküle dağılım eğilimi, TEM analizleri ile doğrulanmalıdır. Nanopartiküllerin katmanlarının iyi bir düzen içinde yapılandırıldığını ve polimer matrisi içinde iyi bir şekilde dağıldığını gösteren TEM görüntüleridir. Görüntü, sentezlenen kompozitin nano ölçekli bir malzeme olduğunu ve interkalasyon sırasında organoyapıcının katmanlarında herhangi bir ayrılma olmadığını doğrulamaktadır. Geçirimli elektron mikroskobu, görüntüleme ve analiz için yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda sistemde bulunan EDX aparatı ile bölgesel element dağılım analizi de yapılabilmektedir. Cihaz patoloji, biyoloji, kalite kontrolü, nanoteknoloji, polimer ve materyal geliştirme alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kim vd., 2003; Morgan vd., 2004; Hoffman vd., 2000).

PVC-%3 ağırlık oranında O-MMT katkıli nanokompozitinin TEM mikrografından gözlemlendiği üzere, yaklaşık 10 nm kalınlığında ve yaklaşık 100-300 nm uzunluğunda ara katmanlar ve küçük kil agregaları PVC matrisinde homojen olmayan bir şekilde dağılmıştır. TEM mikrografındaki koyu çizgiler silikat katmanlarının kesitleri olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kesitler yaklaşık 10 nm kalınlığındadır ve bu da beş paralel istiflenmiş silikat katmanının boyutuna karşılık gelmektedir. Koyu çizgiler arasındaki mesafe 200 nm'nin üzerindedir ve bu da (001) kırınım pik noktasının yoğunluğundaki azalmayı veya sola kaymayı açıklayabilir (Kornmann vd., 2001). PVC- %3

ağırlık oranında O-MMT nanokompozitinin TEM mikrografı, istiflenmiş katmanların kalınlığının 4-10 nm olduğu ve bu kalınlığın 2-5 istiflenmiş katmanın boyutuna karşılık geldiği, ara katmanlı yapılara sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bazı tekil silikat katmanları da gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle, PVC- %3 ağırlık oranında O-MMT nanokompozitinde kısmen ara katmanlı ve kısmende pul pul dökülmüş yapılar tespit edilmiştir (Chen vd., 2005).

Silikat katmanlarının çoğu tek tek ara katmanlanmamıştır, birkaç katmanlı olarak mevcuttur. Ara katmanlardaki Na^+ ve oksijen arasındaki Coulomb etkileşimi nedeniyle, Na^+ -MMT, iyon-dipol etkileşimleri yoluyla fazla pozitif yükleri nötralize etmek için büyük miktarda su tutabilir. Bu çaba, katmanların yüksek hidrofilikliğine yol açmaktadır. Bu arada, nano ölçekli Na^+ -MMT katmanı yüksek özgül yüzey alanına ve yüzey enerjisine sahiptir. Bu nedenle, Na^+ -MMT, özellikle yüksek Na^+ -MMT yüklemelerinde, sürekli PVC matrisinde homojen olarak dağılmaktan ziyade bir araya toplanma eğilimindedir. Bu nedenle, sonuçlar, işlem koşulları altında PVC zincirlerinin Na^+ -MMT katman yığınlarına ara katmanlanmasının, tek tek Na^+ -MMT katmanlarına ara katmanlanmasından çok daha kolay olduğunu göstermektedir (Bastida ve Pardo-Ibañez, 2024).

PVC zincirlerinin yüksek derecede elektronegatif klorür atomları, PVC'ye güçlü polarite kazandırır. Ek olarak, Na^+ -MMT katmanlarının yüzeyinde bulunan büyük miktarda polar hidroksil grubu ve silika-oksijen katmanları, katman yüzeyini de polar hale getirmektedir. Bu durumda, PVC zincirleri ve silikat katmanları arasındaki dipol-dipol etkileşimi, PVC zincirlerinin silikat katmanlarına ara katman oluşturması için itici bir güç görevi görebilmektedir. Dahası, yüksek işlem sıcaklığı ve kayma gerilimi, çözeltileri karıştırma işlemi sırasında ara katman oluşturmayı kolaylaştırabilir. Bu durum, polar naylon/kil çözeltilerin birleştirilmesi yöntemiyle elde edilen kompozit ara katman oluşturma çalışmasında da ortaya çıkmıştır (Krishnamoorti vd., 1996).

PVC ve hidrofilik Na^+ -MMT'nin çözelti karıştırması sırasında, diğer zayıf polar polimer/ Na^+ -MMT sistemlerinde elde edilemeyen, düzensiz ve kısmen ara katman oluşturmuş PVC/ Na^+ -MMT nanokompozitlerinin oluşabileceğini belirtmek ilginçtir. Benzer sonuçlar, PEO/ Li^+ -MMT eriyik karıştırma sistemlerinin incelenmesinde de gözlemlenebilir (Vaia ve Giannelis, 1997). Buna bağlı olarak, nispeten polar polimer zincirleri ile Na^+ -MMT katmanlarının yüzeyi arasındaki dipol etkileşimlerinin, PVC zincirlerinin silikat katmanlarına ara katman oluşturmalarının ana itici gücü olduğu sonucuna varılmıştır (Wan vd., 2003). Önceki bir makalede de bildirildiği gibi (Giannelis, 1996), tam pul pul dökülme malzemeleri yerine, geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip bir malzeme üretmek için polimerik matris boyunca homojen olarak dağılmış 2-10 katmanlı küçük yığınlar gerekiyordu. Bu nedenle, PVC/ Na^+ -MMT'nin ara katmanlı yapısı ve PVC/O-

MMT nanokompozitlerinin kısmen ara katmanlı yapısı, mekanik özellikleri iyileştirmek için elverişli olabilir (Giannelis, 1996).

KİL KATKILI PVC POLİMER KOMPOZİT FİMLERİN FOURİER DÖNÜŞÜMLÜ KIZILÖTESİ (FTIR) SPEKTROSKOPİ

Nanokompozitlerin FTIR analizleri değerlendirilirken polimer matriksin spektrumu baz alınır. Nanokompozitlerin FTIR spektrumları polimerin spektrumuna benzemelidir ancak çeşitli kaymalar da gözlemlenebilir. FTIR analizi, IR spektroskopisi sistemini kullanmaktadır. IR spektroskopisinin, maddenin infrared ışınlarını absorblamasını esas aldığı ve elde edilen spektrumdaki karakteristik dalgaların, yoğunluk ve bant genişliklerinin moleküllerdeki fonksiyonel grupların ve farklı yapıların belirlenmesinde kullanılabileceği bilinmektedir. FTIR-ATR ölçümleri 4000–500 cm^{-1} aralığında çekilebilmektedir (Wu vd., 2008).

Öğütülmüş ve kalsine edilmiş sepiyolit tozlarının FTIR-ATR spektrum analizleri ve bununla birlikte diğer kompozitlerle karşılaştırmak için kalsine edilmiş sepiyolit kimyasal etkileşimlerinin doğasını anlamak gereklidir (Turhan vd., 2013; Erdoğan vd., 2008; Nieto-Suárez vd., 2009). Özetle, sonuçlar her iki tozun da (öğütülmüş ve kalsine edilmiş sepiyolit tozlarının) 3600 cm^{-1} 'de bir Mg_3OH bandına sahip olduğunu göstermiştir. Bant, sepiyolit dış yüzeyinden uzanan OH grupları nedeniyle düşük bağlanma gücüne sahiptir. Spektrumların ortasında, 1650 cm^{-1} 'de (OH gerilmesi) bulunan pik noktası, her iki toz için de koordine edilmiş suya atfedilmiştir. Son önemli pik noktası, her iki toz için de 1100 cm^{-1} ve 970 cm^{-1} 'de Si-O bandının gerilmesine karşılık gelmektedir ve bu da Si-O-Si grubundan kaynaklanmaktadır. Birçok çalışma, PVC'nin FTIR geçirgenliğinin O-H (3500-3700 cm^{-1}), C-H (2800-3000 cm^{-1}), nitrür grupları (2000-2250 cm^{-1}), C-H alifatik bükülme bağı (1400-1600 cm^{-1}), C-H bükülme bağı (1100-1250 cm^{-1}), C-C alifatik bükülme bağı (1000-1100 cm^{-1}) ve C-Cl (600-650 cm^{-1}) gerilme bağı olduğunu ortaya koymuştur (Liu ve ak., 2006; Turhan vd., 2013; Chen vd., 2004).

PVC/kalsine sepiyolit ve PVC/öğütülmüş sepiyolit kompozitlerinin 4000 cm^{-1} ile 500 cm^{-1} arasındaki spektrumdaki kimyasal yapısını göstermektedir. 3500-3700 cm^{-1} (O-H), 2800-3000 cm^{-1} (C-H), 1400-1600 cm^{-1} (C-H alifatik bükülme bağı) ve 1100-1250 cm^{-1} (C-H bükülme bağı) aralığındaki pikler, öğütülmüş sepiyolit tozlarının eklenmesiyle azalmıştır. Bu durum özellikle 3700 cm^{-1} 'de bulunan pik için geçerlidir; bu pik, %15 ağırlık oranında öğütülmüş sepiyolit ilavesinden sonra ortadan kalkmıştır. 600-650 cm^{-1} 'deki (C-Cl) pik yoğunluğu, eklenen öğütülmüş sepiyolit miktarıyla artmıştır. Turhan ve arkadaşları, bu yükselişi PVC'den HCl moleküllerinin salınmasıyla açıkladı; bu da çift bağların oluşmasına neden oldu. %10 ağırlık oranında öğütülmüş sepiyolit ilavesinden sonra 2200 cm^{-1} 'de yeni bir pik ortaya çıkmış; bu durum, C-O bağından kaynaklanmıştır. PVC/ kalsine

sepiyolit kompozitinde O-H, C-H ve C-C pikleri gözlenmemiştir. 2000 – 2200 cm⁻¹'deki C-O gruplarına atfedilen pikler, kalsine sepiyolit ilavesiyle yoğunlaşmıştır (Turhan vd., 2013).

KİL KATKILI PVC POLİMER KOMPOZİT FİLMLERİN TERMAL KARAKTERİZASYONU

Termal analiz, kontrollü bir sıcaklık programına tabi tutulan bir numunenin bir veya daha fazla fiziksel parametresinin değişimini sıcaklık veya zamanın bir fonksiyonu olarak izlemek anlamına gelir. Bu tanım, birçok durumda sıcaklığa bağlı özellik değişikliklerinin bir fazı kimyasal formülü veya yapısı kadar kesin bir şekilde karakterize edebileceğini kabul eder. Çeşitli termal karakterizasyon yöntemi araştırılır ve tanımlanır; bunlardan en çok kullanılanları TGA, DTA ve DSC'dir. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC); DSC, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak materyaldeki geçişler ile ilişkili sıcaklıkları ve ısı akışını ölçer. Katıların ve sıvıların termal karakterizasyonu alanında en sık kullanılan tekniklerden biridir. Maddelerin termal geçişleri diferansiyel taramalı kalorimetri analizleriyle belirlenir. Termal geçişler, maddeler ısıtıldığında ortaya çıkan değişikliklerdir. Kristal özellikleri olan polimerin erimesi ya da camı geçişi termal geçişlere örnek verilebilir. DSC ile maddelerin erime/kristalleşme davranışı, katı-katı reaksiyonları, polimorfizm, kristallik derecesi, camı geçişleri, çapraz bağlanma reaksiyonları, oksidatif stabiliteleri, ayrışma davranışı, saflık tayini ve öz ısı gibi özellikleri belirlenir. DSC kavramı başlangıçta daha önceki DTA cihazlarından türetilmiştir. İki teknik arasındaki temel fark, DTA'nın sıcaklıkta bir fark ölçtüğü, buna karşılık teoride DSC'nin entalpi değişimini ölçebilmesidir (Feist, 2015).

Saf PVC polimer filmlerinin ve kil bazlı PVC polimer kompozit filmlerinin termal davranışı, 30–800 °C sıcaklık aralığında, 10 mL/dakika akış hızında ve 10 °C/dakika hızında azot atmosferinde TGA cihazları kullanılarak analiz edilebilmektedir. PVC'nin termal kararsızlığı, moleküler zincirlerindeki kararsız fonksiyonel gruplardan (örneğin, klor atomları) kaynaklanır ve bu gruplar yüksek sıcaklıklarda dehidroklorinasyon reaksiyonlarını başlatır. Açığa çıkan HCl gazı, yalnızca sonraki zincir kırılmasını hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda konjuge polien yapılarının oluşumunu da teşvik ederek moleküler çerçeveyi de stabilize eder ve otokatalitik "fermuar benzeri" termal bozunmayı tetikler (Hungwe vd., 2024; Yu vd., 2016; Krongauz, 2024). Termal bozunma süreci iki aşamalı bir mekanizma sergiler: (1) dehidroklorinasyon (deHCl) yoluyla HCl eliminasyonu, polien dizilerinin oluşumu ve ardından (2) konjuge polienlerin parçalanması ve siklizasyonu, düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonlar, benzen türevleri ve ilgili ürünler elde edilmesidir (Xu vd., 2020; Cruz vd., 2021).

PVC matrislerine nanokiller dahil edildiğinde, yüksek özgül yüzey alanı ve yüzey reaktivitesinden yararlanan nano-SiO₂, kompozitin genel

termal kararlılığını artırır. Piroliz sırasında oluşan HCl moleküllerini adsorbe ederek, nano-SiO₂, otokatalitik bozunma zincir reaksiyonlarını etkili bir şekilde bozar, böylece moleküler zincir parçalanmasını bastırır ve konjuge polien yapılarının oluşumunu engellemektedir. Çalışmalar, ilk bozunma aşamasında ($\leq 220^{\circ}\text{C}$), TGA eğrilerinin saf PVC ve nano-SiO₂ ile modifiye edilmiş PVC arasında kütle kaybında önemli bir fark göstermediğini bulmuştur (Tomaszewska vd., 2021). Bunun nedeni, PVC'nin bu sıcaklıkta önemli ölçüde dehidroklorinasyona uğramaması ve salınan HCl miktarının nano-SiO₂'nin adsorpsiyon eşiğinin altında olmasıdır. Ana bozunma aşamasında (230°C – 350°C), DTG eğrisindeki pik yüksekliği bozunma hızını yansıtır. Modifiye edilmiş numunenin azalmış pik yüksekliği, nano-SiO₂'nin HCl'yi adsorbe ederek deklorsiyonun otokatalitik sürecini yavaşlattığını göstermektedir.

Han ve arkadaşları, bir SiO₂-(Polycaprolactone)PCL/PVC kompozit sistemi geliştirmiştir. Termogravimetrik analiz (TGA), artan kömür veriminin (SiO₂-PCL içeriğiyle artan) PVC'nin ilk bozunma sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmedikçe ortaya koydu; bu da modifiye edilmiş nano-SiO₂'nin termal kararlılığı esas olarak termal bozunmanın başlangıcını geciktirmekten ziyade kömür yapısını iyileştirerek artırdığını gösteriyor. Yükleme %8'i aştığında, dolgu maddesinin kümelenmesi düzensiz dağılıma yol açarak kömür tabakasının sürekliliğini ve koruyucu etkinliğini tehlikeye atmıştır (Han vd., 2023).

Klapiszewski ve arkadaşları, hibrit SiO₂-lignin dolgu maddelerinin ($\geq$ %2,5 ağırlık) sinerjik etkiler yoluyla PVC pirolizinden HCl gazını verimli bir şekilde hapsediğini gözlemlemiştir (Klapiszewski vd., 2015). Termal kararlılık iyileşmesi dolgu maddesi içeriğiyle artmıştır. Bu sinerji, alev geciktiriciliği daha da optimize etmiştir: SiO₂, yanma sırasında yoğun kömür oluşumunu teşvik etmiş ve alev geciktiricilerle sinerjik olarak etki etmiştir (Zhang vd., 2025). Dekan'ın araştırma grubu, yüzey modifiye edilmiş SiO₂'nin odun unu ile sinerji oluşturmaları yoluyla PVC kompozitlerini geliştirmiştir. Yüzde 1, 3 ve 5 nano-SiO₂ içeren kompozitlerden sırasıyla %10,3, %14,3 ve %12,1 kömür verimi elde edilmiştir. Nano-SiO₂, termal bozunma sırasında yüksek performanslı karbonlu-SiO₂ kömür tabakası oluşumunu kolaylaştırmıştır. Daha yüksek yüklemeler daha fazla kömür üreterek, matrisin daha fazla bozunmasını azaltmak için termal yalıtım ve oksijen bariyeri etkileri sağlamıştır. Ancak aşırı yükleme (örneğin, yüzde 5 nanodolgu içeren) kümelenmeye neden olarak diğer bileşenlerle olan etkileşimleri zayıflatmış ve erken ayrışmaya dolayısıyla kömür veriminin azalmasına yol açmıştır. Nano-SiO₂/PVC kompozitlerinin termal kararlılığı, hazırlama yöntemleri, malzeme gözenekliliği ve bileşen oranları dahil olmak üzere birden fazla faktörden etkilenmektedir (Deka vd., 2012).

Tomaszewska ve arkadaşları, nano-SiO₂'nin PVC termal bozunması sırasında dehidroklorinasyon ürünlerini adsorbe ederek bozunmayı geciktirdiğini göstermiştir (Tomaszewska vd., 2021). Ancak, stabilizasyon

etkinliği, işleme parametrelerine ve malzeme mikro yapısına (örneğin, gözeneklilik, parçacık boyutu) bağlıdır. Özellikle, nano ölçekli dağılım (5–15 nm parçacıklar) yüksek yüzey temas alanı ve üstün stabilizasyon sağlarken, mikron boyutlu dolgu maddeleri (örneğin, 1,5 μm) daha zayıf etkiler göstermektedir. Özellikle, SiO_2 'deki yapısal farklılıklar, termal stabilizasyon mekanizmalarını değiştirmektedir. Nisar'ın ekibi, ticari olarak temin edilebilen çöktürölmüş SiO_2 'nin mekanik olarak karıştırılmış sistemlerde PVC bozunmasını katalize ettiğini ve maksimum termal bozunma sıcaklığını düşürdüğünü bulmuştur (Nisar vd., 2018).

Hazırlama yöntemi termal stabilizeyi kritik olarak etkilemektedir; Shu ve arkadaşları, in situ polimerizasyon yoluyla hazırlanan PVC kompozitlerinin artan başlangıç bozunma sıcaklığı, %10 ağırlık kaybı sıcaklığı ve maksimum bozunma sıcaklığı gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Bunun aksine, eriyik karıştırmalı kompozitler, zayıflamış arayüzey bağları ve nanopartiköl kümelenmesinin neden olduğu hızlanmış bozunma kinetiği nedeniyle 280°C'de önemli bir ağırlık kaybı sergilemişlerdir (Shu vd., 2013). Ek olarak, SiO_2 parçacık boyutu termal özellikleri derinden etkilemektedir. Daha küçük SiO_2 parçacıkları daha büyük özgül yüzey alanları sunarak PVC matrisiyle daha sıkı arayüzey bağları oluşturur ve ısı altında moleköler zincir hareketliliğini bastırarak bozunmayı geciktirmektedir. Kötü dağılmışlarsa, daha büyük parçacıklar, oksijen/ısı penetrasyonunu hızlandıran ve PVC'nin dehidroklorinasyonunu teşvik etmektedir ve sonuç olarak termal kararlılığı azaltan "bariyer bölgeleri" görevi gören gerilim konsantrasyon noktaları veya boşluklar oluşturabilmektedirler (Khanum vd., 2022).

Miao ve arkadaşları, ara katmanların sırasıyla düşük konsantrasyonlu küçük boyutlu (15 nm) ve düşük konsantrasyonlu büyük boyutlu (50 nm) SiO_2 'yi içerdiiği, üst katmanın ise yüksek konsantrasyonlu SiO_2 içerdiiği bir gradyan kaplama tasarımııı araştırdılar (Miao vd., 2023). Hibrit parçacık boyutu (15 - 50 nm) ve yüksek dolgu konsantrasyonu, ısı iletim yollarını tıkayarak, katman sayısı ve konsantrasyon arttıka termal iletkenliği azaltmaktadır. Tek yönlü ısıtma altında, yüzey ile sıcak plaka arasındaki sıcaklık farkı 9,4°C'ye ulaşmıştır (kaplanmamış numunelerin dört katı) ve termal iletkenlik %91,73 oranında azalmıştır. Bu, parçacık boyutu kontrolö yoluyla PVC kompozitlerin termal yalıtımının optimize edilmesi için bilgiler sağlamaktadır. Özetle, nano- SiO_2 'nin eklenmesi, PVC bazlı kompozitlerin termal kararlılığını artırmaktadır. Bu iyileşme iki mekanizmadan kaynaklanır: matris içindeki iç arayüz etkileşimleri yoluyla termal performansın optimizasyonu ve malzeme yüzeyinde termal bariyer tabakası oluşturulması yoluyla kütle/enerji transferinin bastırılmasıdır. Özellikle, SiO_2 'nin morfolojik yapısı, kompozitlerin termal bozunma ve alev geciktirici özellikleri üzerinde farklı etkiler göstermektedir.

Camsı geçiş sıcaklığının (T_g) daha yüksek sıcaklığa kayması, nanodolgular tarafından polimer zincirinin hareketliliğinin azalmasından kaynaklanabilir ve polimer ile dolgu maddesi arasındaki etkileşimin bir

kanıtıdır. Amorf polimerler için Tg, polimer zincirinin tekrarlayan biriminin kimyasal yapısı, zincirin esnekliği ve nanodolgu maddesinin doğası ile büyük ölçüde değişebilir. Burada etkileşim, nanodolgu ve polivinil klorür arasındaki zayıf van der Waals çekim kuvveti olabilir. Dolgu maddesi yüklemesiyle Tg'nin değişimi, nanokompozitlerde dolgu konsantrasyonu arttıkça artan bir eğilim göstermektedir. Saf polimer PVC'nin Tg'si 308°C'dir ve yüzde 5 dolgu maddesi yüklemesiyle 378°C'ye yükselmektedir. Dolgu maddesi yüzeyinin etrafındaki hareketsizleştirilmiş polimer tabakası, polimer ve dolgu maddesi arasındaki etkili etkileşimin bir sonucudur (Yaragalla vd., 2015; Bindu ve Thomas, 2013).

Saf ve modifiye edilmiş kil için termogramlarından, ilk ağırlık kaybının, fiziksel olarak adsorbe edilmiş su nedeniyle 30 °C ile 150 °C arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, organo-killerde daha az bulunur ve kil minerallerinin yüzeyinde katyonik bir yüzey aktif maddenin varlığını göstermektedir; bu durum DTG eğrilerinden de doğrulanabilmektedir. İkinci ağırlık kaybı aşaması 150 °C ile 400 °C arasında gerçekleşmiştir. Saf kil minerallerinde ağırlık kaybının, ara katman suyunun kaybindan kaynaklanmaktadır (DTG eğrisinden doğrulanan Montmorillonit için 236 °C ve Vermikülit için 178 °C), organik killerde ise ağırlık kaybı, ara katmanlarında veya yüzeylerinde bulunan organo yapıcının ayrışmasını göstermektedir. DTG verileri, Organo-Montmorillonit için 400 °C ve Organo-Bentonit için 395 °C'de ağırlık kaybının ara katmanda bulunan organo yapıcının ayrışmasından kaynaklandığını göstermektedir (Kumari vd., 2023).

DTG eğrisi polimer zincirinin dehidroklorinasyonundan kaynaklanmaktadır ve başlangıç bozunması olarak bilinmektedir. İkinci bozunma, yüksek bir sıcaklık aralığında (450 °C'den itibaren 465 °C ve 535 °C) meydana gelir ve bu, PVC'deki konjuge polien dizisinin aromatik bileşikler oluşturmak üzere siklizasyonundan kaynaklanmaktadır; bu aşama en hızlı bozunma olarak bilinmektedir. PVC'nin bozunma sıcaklığının, organo-Montmorillonit, -Bentonit ve - Vermikülit'nin PVC polimer matrisine dağıtılmasından sonra her iki aşamada da yüksek olduğu bulunmuştur. PVC matrisindeki kil, kömür oluşumuna neden olur ve uçucu ürünlerin dağılımını engeller, bu da termal kararlılığın artmasına yol açmaktadır. Saf kil ve organokiller içeren PVC polimer filmlerinin termal davranışını göstermektedir. Saf PVC'nin termal bozunması iki ana aşamada gerçekleşti. 220–350 °C aralığında gözlemlenen ilk bozunma (DTG eğrisinden 294 °C doğrulandı), polimer zincirinin dehidroklorinasyonundan kaynaklanmaktadır ve başlangıç bozunması (Tonset) olarak bilinir. İkinci bozunma, 450 °C'den itibaren yüksek bir sıcaklık aralığında (465 °C ve 535 °C) meydana geldi ve PVC'deki konjuge polien dizisinin kalıntı kömürle aromatik bileşikler oluşturmak üzere siklizasyonundan kaynaklanmaktadır; bu aşama en hızlı bozunma (Trpd) olarak bilinir (Hadj-Hamou ve Yahiaoui, 2019).

PVC polimer matrisine /organo- Montmorillonit, -Bentonit ve Vermikülit'nin dağıtılmasından sonraki her iki aşamada da PVC'nin bozunma

sıcaklığının yüksek olduğu tespit edilmiştir. PVC matrisindeki kil, kömür (çar) oluşumuna yol açar ve uçucu ürünlerin dağılımını engeller, bu da termal kararlılığın artmasına neden olur. O-Montmorillonit -, O-Bentonit- ve O-Vermikülit bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde, PVC klorürü ile güçlü etkileşime giren amonyum tuzunun etkisiyle, başlangıç sıcaklığı 220–350 °C aralığında (O-Montmorillonit Mt-PVC'de 281 °C; O-Bentonit-PVC'de 275 °C; O-Vermikülit -PVC polimer kompozit filminde 272 °C) düşmüştür. Organik kil, katalizör görevi görerek PVC'nin klor giderme işlemini hızlandırır. Organik kil bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde en hızlı bozunma değeri yüksektir, çünkü bu filmler PVC'nin termal bozunması sırasında oluşan küçük moleküllerin buharlaşmasını önleyen bir bariyer görevi görür. Kil bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde ise kilin varlığı, uçucu ürün difüzyonunu engelleyen kömür oluşumunu artırmıştır. Ayrıca, kil bazlı kompozit filmlerde kalıntı miktarı yüksektir ve bu da PVC matrisinde kil bulunduğunu gösterir. (Bertuoli vd., 2014; Ye vd., 2019).

Saf kil/organo-kil bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde kütle kaybının 250 °C ile 300 °C arasında daha düşük (%3-5) olduğu bulunmuştur. Mondragon ve ark. ayrıca, PVC polimerlerinin 10 °C'de organo-montmorillonit ile işlem gördükten sonra termal kararlılıklarının azaldığını doğrulayarak, organo-montmorillonitin PVC'nin termal bozunmasını teşvik ettiğini öne sürmüşlerdir (Andrunik ve Bajda, 2019; Bee vd., 2014; Khaleghi vd., 2017). Sand Chee ve Jawaid de montmorillonitin epoksi/organo-kil nanokompozitlerin morfolojisi, termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini göstermiş ve nanokompozitlerin saf epoksiye kıyasla daha düşük bozunma sıcaklığına sahip olduğunu doğrulamışlardır. Termal kararlılığın azalması, kilin yüzeyinde organik kısımların varlığından kaynaklanmaktadır ve bu da termal kararlılığın azalmasına neden olmaktadır (Sand Chee ve Jawaid, 2019; Mondragon vd., 2011).

SONUÇLAR

Kil katkılı PVC polimer kompozit filmlerin başarılı bir şekilde hazırlanabilmesi amacıyla, saf kil minerallerinin yüzeyi, iyon değişimi yoluyla katyonik bir yüzey aktif madde kullanılarak başarılı bir şekilde modifiye edilmelidir. Katyonik yüzey aktif madde ile kil mineralleri arasındaki etkileşim, XRD, SEM, TEM, FTIR ve termal Analiz teknikleri aracılığıyla doğrulanabilmektedir. Organo-Montmorillonit ve -Bentonitin yüzeylerinde çift katman halinde yüzey aktif maddelerin bulunması nedeniyle pozitif yüklü yüzeyler oluşurken, vermikülit'in yüzey yükü negatif kalmış ve yüzeyinde tek bir yüzey aktif madde katmanı oluşmuştur. Termal analiz, modifikasyondan sonra kil minerallerinin termal stabilitesinin iyileştiğini doğrulamak amacıyla kullanılmaktadır. Saf kil ve organo-killerin PVC polimer filmlerinin yapısal, termal ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için karşılaştırmalı bir çok çalışma yapılmıştır. XRD

çalışmaları, saf kil bazlı PVC polimer kompozit filmlerinin pul pul dökülme yapısını doğrulamıştır; Organo-Montmorillonit/Bentonit bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde ara katmanlama gözlemlenirken, Vermikülit bazlı PVC polimer kompozit filmlerinde mikro yapısal kompozit oluşmuştur. Organik kil bazlı PVC polimer kompozit filmler, saf kil bazlı PVC polimer kompozit filmlere kıyasla daha gelişmiş mekanik özellikler (çekme dayanımı, Young modülü ve sertlik) göstermiştir; çünkü organik killer doğaları gereği hidrofobiktir; bu nedenle, hidrofobik PVC polimer ile daha yüksek uyumluluk gösterirler ve bu da polimerik matrise daha homojen bir dağılımla sonuçlanmaktadır. Ayrıca, kil yüzeyinin modifikasyonundan sonra, kil ve polimer arasındaki arayüzey yapışmasının arttığı ve bunun da PVC polimer kompozit filmlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi açısından sonuçları artırdığı söylenebilir.

PVC bileşiğine eklenen Na^+ -MMT veya O-MMT miktarının değiştirilmesiyle, PVC/MMT nano-kompozitlerinin XRD, morfolojik, yapısal ve termal özellikleri üzerindeki etkiler incelenmiştir. PVC/ Na^+ -MMT nano-kompozitlerinde, silikat katmanlarının çoğu, tek tek ara katmanlar halinde değil, birkaç istiflenmiş katman halinde dağılmıştır. Dahası, ara katmanların ve yaklaşık 10 nm kalınlığında ve 100-300 nm uzunluğunda küçük kil agregalarının PVC matrisinde homojen olmayan bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. PVC/O-MMT nano-kompozitlerinde ise kısmen ara katmanlanmış ve pul pul dökülmüş yapılar oluşmuş ve istiflenmiş katmanlar 4-10 nm kalınlığında olup, bu da 2-5 istiflenmiş katmanın boyutuna karşılık gelmektedir.

Ayrıca, bazı bireysel silikat katmanları da gözlemlenmiştir. Hem Na^+ -MMT hem de O-MMT, %1-3 ağırlık oranına kadar dolgu maddesi MMT eklenmesiyle PVC'nin mekanik özelliklerini iyileştirebilir. SEM incelemelerine göre, PVC/MMT nanokompozitlerinde farklı miktarlarda Na^+ -MMT ve O-MMT bulunması, farklı çekme kırılma yüzey morfolojilerine yol açmaktadır. Termal kararsızlık nedeniyle, PVC bileşiğindeki Na^+ -MMT veya O-MMT miktarının artmasıyla PVC/MMT nanokompozitlerinin şeffaflığı azalmış ve rengi koyulaşmıştır. Bu nedenle, PVC/MMT nanokompozitlerinde dolgu maddesi olarak MMT ilavesi %3 ağırlık oranından fazla olmamalıdır. PVC bazlı polimer kompozit filmlerin termal stabilitesinin iyileştirilmesi gerektiği dikkate değerdir; çünkü PVC'deki klorür ile güçlü etkileşime giren amonyum tuzunun etkisiyle başlangıç sıcaklığı düşmektedir. Bu nedenle, PVC için daha iyi bir stabilizasyon etkisi sağlayacak bir yüzey aktif maddeye alternatif belirlemek için araştırmalar yapılmalıdır.

REFERANSLAR

- Andrunik, M., ve Bajda, T. (2019). Modification of bentonite with cationic and nonionic surfactants: Structural and textural features. *Materials*, 12(22), 3772.
- Bastida, J., ve Pardo-Ibañez, P. (2024). Applications of X-ray powder diffraction microstructural analysis in applied clay mineralogy. *Minerals*, 14(6), 584.

- Bee, S. T., Ratnam, C. T., Sin, L. T., Tee, T. T., Hui, D., Kadhum, A. A. H., ve Lau, J. (2014). Effects of electron beam irradiation on mechanical properties and nanostructural–morphology of montmorillonite added polyvinyl alcohol composite. *Composites Part B: Engineering*, 63, 141-153.
- Bertuoli, P. T., Piazza, D., Scienza, L. C., ve Zattera, A. J. (2014). Preparation and characterization of montmorillonite modified with 3-aminopropyltriethoxysilane. *Applied Clay Science*, 87, 46-51.
- Bindu, P., ve Thomas, S. (2013). Viscoelastic behavior and reinforcement mechanism in rubber nanocomposites in the vicinity of spherical nanoparticles. *The journal of physical chemistry B*, 117(41), 12632-12648.
- Boraci, S. B. A., Bakhshandeh, B., Mohammadzadeh, F., Haghighi, D. M., ve Mohammadpour, Z. (2024). Clay-reinforced PVC composites and nanocomposites. *Heliyon*, 10(7).
- Bouchareb, B., Haddaoui, N., ve Zahra, S. (2022). Effect of montmorillonite addition (modified and unmodified) on the structural, mechanical, thermal, and morphological properties of nanocomposites based poly (vinyl chloride). *Matériaux & Techniques*, 110(1), 103.
- Chen, C. H., Liou, Y. L., Mao, C. F., ve Liao, W. T. (2021). Effects of dioctyl phthalate on the properties of poly (vinyl chloride)/organically modified montmorillonite nanocomposites. *Polymer Bulletin*, 78(1), 283-294.
- Chen, C. H., Teng, C. C., ve Yang, C. H. (2005). Preparation and characterization of rigid poly (vinyl chloride)/MMT nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 43(12), 1465-1474.
- Chen, C. H., Teng, C. C., Tsai, M. S., ve Yen, F. S. (2006). Preparation and characterization of rigid poly (vinyl chloride)/MMT nanocomposites. II. XRD, morphological and mechanical characteristics. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(15), 2145-2154.
- Chen, N., Wan, C., Zhang, Y., ve Zhang, Y. (2004). Effect of nano-CaCO₃ on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend. *Polymer Testing*, 23(2), 169-174.
- Chen, T.S., Wang, I.H., Lee, Y.R., ve Hsieh, T.H. (2020). Mechanical property of polymer composites reinforced with nanomaterials. *Polym. Polym. Compos*, 29, 696.
- Chen, X., Richman, E.K., Kirsch, B.L., Senter, R., Tolbert, S.H., ve Gupta, V. (2008). Measurement of anisotropic fracture energies in periodic templated silica/polymer composite coatings. *J. Appl. Phys.*.
- Chen, Y., Chen, A., ve Qin, J. (2017). Polystyrene core–silica shell composite particles: Effect of mesoporous shell structures on oxide CMP and mechanical stability. *RSC Advances*, 7(11), 6548-6558.
- Clemons, C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: The interfacing of two industries. *Forest products journal. Vol. 52, no. 6 (June 2002): Pages 10-18*.
- Comeaux, E. J., Chen, C. H., Collier, J. R., ve Wesson, R. D. (1994). Fusion study of polyvinyl chloride (PVC): Relation of processing time and processing temperature to the degree of fusion. *Polymer Bulletin*, 33(6), 701-708.
- Cruz, P. P. R., da Silva, L. C., Fiuza-Jr, R. A., ve Polli, H. (2021). Thermal dehydrochlorination of pure PVC polymer: Part I—thermal degradation kinetics by thermogravimetric analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(25), 50598.

- Çetin, A., Erzengin, S. G., ve Alp, F. B. (2019). Various combinations of flame retardants for poly (vinyl chloride). *Open Chemistry*, 17(1), 980-987.
- Das, P., Mannaa, S., Behera, A.K., Shee, M., Basak, P., ve Sharma, A.K. (2022). Current synthesis and characterization techniques for clay-based polymer nano-composites and its biomedical applications: A review. *Environ. Res.*, 212, 113534.
- Deka, B. K., ve Maji, T. K. (2012). Effect of silica nanopowder on the properties of wood flour/polymer composite. *Polymer Engineering & Science*, 52(7), 1516-1523.
- Demirel, F., ve Altındaş, S. (2005). Yapı elemanlarının yangına dayanım performanslarının Avrupa Birliği direktiflerine göre sınıflandırılması ve konunun Türkiye-Avrupa genelinde irdelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 8(4), 381-395.
- Dündar, M. Ş., Tural, M., ve Caner, C. (2023). Alüminyum Ve Antimon İçerikli Alev Geciktiricilerin Polimer ve Kaplama Numunelerinde Tayini, *Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi*, 11(1), 41-52.
- Erdoğan Alver, B., Sakici, M., Yörükoğullari, E., Yilmaz, Y., ve Güven, M. (2008). Thermal behavior and water adsorption of natural and modified sepiolite having dolomite from Turkey. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 94(3), 835-840.
- Feist, M. (2015). Thermal analysis: basics, applications, and benefit. *ChemTexts*, 1(1), 8.
- Giannelis, E.P. (1996). Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced materials*, 8(1), 29-35.
- Hadj-Hamou, A. S., ve Yahiaoui, F. (2019), August). Performances of PCL/PVC/organoclay nanobioblends films for packaging applications. In *Macromolecular Symposia*, 386 (1), 1800239.
- Han, K., Shi, X., Su, Y., ve Chen, Y. (2023). Modified silica to strengthening and toughening soft polyvinyl chloride. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 29(1), 100-108.
- Hoffman, B., Dietrich, C., Thomann, R., Friedrich, C., ve Mülhaupt, R., (2000). Morphology and rheology of polystyrene nanocomposites based upon organoclay, *Macromol Rapid Commun*, 21(1), 57-61, 2000.
- Huang, G., Xu, J., Geng, P., ve Li, J. (2020). Carrier flotation of low-rank coal with polystyrene. *Minerals*, 10(5), 452.
- Hungwe, D., Hosokawa, S., Xu, H., Ding, L., ve Yamasaki, Y. (2024). Dual nature of noncatalytic hydrothermal dechlorination kinetics of PVCs: Insights from thermal dehydrochlorination. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155360.
- Karaoğlu, S., ve Demir, A. P. T. (2025). PVC'nin Çevresel Koşullar Altındaki Bozunma Mekanizmaları, Stabilizasyon Yaklaşımları ve Mikroplastik Potansiyelinin Değerlendirilmesi, *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 9(2), 156-170.
- Khaleghi, M., Didehban, K., ve Shabanian, M. (2017). Effect of new melamine-terephthaldehyde resin modified graphene oxide on thermal and mechanical properties of PVC. *Polymer Testing*, 63, 382-391.
- Khanum, K. K., Kostalas, A., Jayaram, S. H., ve Ulcar, J. (2022). Synergistic effect of nano-silica and micro-silica fillers on the rheological and thermal properties of epoxy resins. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(5), 6576-6582.

- Kim, T. H., Jang, L. W., Lee, D. C., Choi, H. J., ve Jhon, M. S. (2002). Synthesis and Rheology of Intercalated Polystyrene/Na⁺-Montmorillonite Nanocomposites, *Macromolecular Rapid Communications*, 23(3), 191-195.
- Kim, T. H., Lim, S. T., Lee, C. H., Choi, H. J., ve Jhon, M. S., (2003). Preparation and rheological characterization of intercalated polystyrene/organophilic montmorillonite nanocomposite, *Journal of Applied Polymer Science*, 87(13), 2106-2112, 2003.
- Klapiszewski, Ł., Pawlak, F., Tomaszewska, J., ve Jesionowski, T. (2015). Preparation and characterization of novel PVC/silica–lignin composites. *Polymers*, 7(9), 1767-1788.
- Kornmann, X., Lindberg, H., ve Berglund, L. A. (2001). Synthesis of epoxy–clay nanocomposites: influence of the nature of the clay on structure. *Polymer*, 42(4), 1303-1310.
- Krishnamoorti, R., Vaia, R. A., ve Giannelis, E. P. (1996). Structure and dynamics of polymer-layered silicate nanocomposites. *Chemistry of Materials*, 8(8), 1728-1734.
- Krongauz, V. V. (2024). Kinetics of Plasticized Poly (vinyl chloride) Thermal Degradation, Induction, Autocatalysis, Glass Transition, Diffusion. *ChemistrySelect*, 9(23), e202401031.
- Kumari, N., Mohan, C., ve Negi, A. (2023). An investigative study on the structural, thermal and mechanical properties of clay-based PVC polymer composite films. *Polymers*, 15(8), 1922.
- Lin, P. C., Lin, S., Wang, P. C., ve Sridhar, R. (2014). Techniques for physicochemical characterization of nanomaterials. *Biotechnology advances*, 32(4), 711-726.
- Liu, P., Zhao, M., ve Guo, J. (2006). Thermal stabilities of poly (vinyl chloride)/calcium carbonate (PVC/CaCO₃) composites. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 45(6), 1135-1140.
- Ma, Y., Zhu, J., He, H., Yuan, P., Shen, W., ve Liu, D. (2010). Infrared investigation of organo-montmorillonites prepared from different surfactants. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 76(2), 122-129,.
- Miao, J., Shen, Y., Tao, J., Zeng, X., Liu, S., ve Wang, Z. (2023). Design and spraying-preparation of the gradient coatings with various diameters and contents of SiO₂ nano-particles for the enhanced anti-impact and thermal insulation performance. *Progress in Organic Coatings*, 179, 107491.
- Mondragón, M., Sánchez-Valdés, S., Sanchez-Espindola, M. E., ve Rivera-López, J. E. (2011). Morphology, mechanical properties, and thermal stability of rigid PVC/clay nanocomposites. *Polymer Engineering ve Science*, 51(4), 641-646.
- Morgan, A. B., ve Harris, J. D., (2004). Exfoliated polystyrene–clay nanocomposites synthesized by solvent blending with sonication. *Polymer*, 45(26), 8695-8703,
- Morgan, A.B., ve Mukhopadhyay, P. (2022). A targeted review of bio-derived plasticizers with flame retardant functionality used in PVC, *J. Mater. Sci.*, 57, 7155–7172.
- Nandanwar, R., Singh, P., ve Haque, F. Z. (2015). Synthesis and characterization of SiO₂ nanoparticles by sol-gel process and its degradation of methylene blue. *Am. Chem. Sci. J*, 5(1), 1-10.
- Nieto-Suárez, M., Palmisano, G., Ferrer, M. L., Gutiérrez, M. C., Yurdakal, S., Augugliaro, V., ... ve Del Monte, F. (2009). Self-assembled titania–silica–

- sepiolite based nanocomposites for water decontamination. *Journal of Materials Chemistry*, 19(14), 2070-2075.
- Nisar, J., Khan, M. S., Iqbal, M., Shah, A., Ali, G., Sayed, M., ... ve Mahmood, T. (2018). Thermal decomposition study of polyvinyl chloride in the presence of commercially available oxides catalysts. *Advances in Polymer Technology*, 37(6), 2336-2343.
- Noh, M. W., ve Lee, D. C., (1999). Synthesis and characterization of PS-clay nanocomposite by emulsion polymerization, *Polymer Bulletin*, 42, 619-626,
- Ragu, A., Senthilarasan, K. and Sakthivel, P., (2014). "Synthesis and characterization of nano hydroxyapatite with poly vinyl pyrrolidone nano composite for bone tissue regeneration", *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 4 (7), 50–54,
- Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneswari, V., ve Bhoopathi, R. (2022). A critical review on wood-based polymer composites: Processing, properties, and prospects. *Polymers*, 14(3), 589.
- Sand Chee, S., ve Jawaid, M. (2019). The effect of Bi-functionalized MMT on morphology, thermal stability, dynamic mechanical, and tensile properties of epoxy/organoclay nanocomposites. *Polymers*, 11(12), 2012.
- Selke, S. E., ve Wichman, I. (2004). Wood fiber/polyolefin composites. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 35(3), 321-326.
- Shirinova, H., Hasanova, M., Mammadov, H., ve Gahramanli, L. (2025). Revisiting the structural and functional properties of polystyrene–silica nanocomposites: optical bandgap modulation and photoluminescence properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(16), 945.
- Shu, H., Liu, K., Liu, F., Zhang, Z., ve Li, X. (2013). Improving mechanical properties of poly (vinyl chloride) by doping with organically functionalized reactive nanosilica. *Journal of Applied Polymer Science*, 129(5), 2931-2939.
- Su, S., Chen, B., He, M., ve Hu, B. (2014). Graphene oxide–silica composite coating hollow fiber solid phase microextraction online coupled with inductively coupled plasma mass spectrometry for the determination of trace heavy metals in environmental water samples. *Talanta*, 123, 1-9.
- Subramanian, A. S., Peng, E., Lau, W. C., Goh, D. C. W., Pramono, S., Sriramulu, D., ... ve Su, P. C. (2021). Morphological effects of various silica nanostructures on the mechanical properties of printed parts in digital light projection 3D printing. *ACS Applied Nano Materials*, 4(5), 4522-4531.
- Sudhakar, Y.N., Selvakumar, M., ve Bhat, D.K. (2021). Investigations on thermo-mechanical properties of organically modified polymer clay nanocomposites for packaging application. *Polym. Polym. Compos.*, 29, 1191.
- Tomaszewska, J., Sterzyński, T., ve Walczak, D. (2021). Thermal stability of nanosilica-modified poly (vinyl chloride). *Polymers*, 13(13), 2057.
- Triandafillu, K., Balazs, D.J., ve Aronsson, B.O., (2003). Adhesion of *Pseudomonas aeruginosa* strains to untreated and oxygen-plasma treated poly (vinyl chloride) (PVC) from endotracheal intubation devices. *Biomaterials*; 24: 1507-18,
- Turhan, Y., Doğan, M., ve Alkan, M. (2013). Characterization and some properties of poly (vinyl chloride)/sepiolite nanocomposites. *Advances in Polymer Technology*, 32(S1), E65-E82.
- Wan, C., Qiao, X., Zhang, Y., ve Zhang, Y. (2003). Effect of different clay treatment on morphology and mechanical properties of PVC-clay nanocomposites. *Polymer Testing*, 22(4), 453-461.

- Wan, C., Zhang, Y., ve Zhang, Y. (2004). Effect of alkyl quaternary ammonium on processing discoloration of melt-intercalated PVC-montmorillonite composites. *Polymer Testing*, 23(3), 299-306.
- Wang, D., Parlow, D., Yao, Q., ve Wilkie, C. A. (2001). PVC-clay nanocomposites: Preparation, thermal and mechanical properties. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 7(4), 203-213.
- Wang, D., Parlow, D., Yao, Q., ve Wilkie, C. A. (2002). Melt blending preparation of PVC-sodium clay nanocomposites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 8(2), 139-150.
- Wu, D., He, Y., Feng, S., ve Sun, D.W. (2008). Study on infrared spectroscopy technique for fast measurement of protein content in milk powder based on LS-SVM. *J Food Eng*;84(1):124–131.
- Xi, Y., Ding, Z., He, H., ve Frost, R.L., (2004), Structure of organoclays - an X-ray diffraction and thermogravimetric analysis study, *Journal of Colloid and Interface Science*, 277(1): p. 116-120, 2004.
- Xia, B., Luo, J., Li, Y., Yang, B., Zhang, S. ve Jiang, B. (2017). Preparation of sponge-like porous SiO₂ antireflective coatings with excellent environment-resistance by an acid-catalysed solgel method. *RSC Adv.* 7(43), 26834–26838
- Xu, Z., Kolapkar, S. S., Zinchik, S., Bar-Ziv, E., ve McDonald, A. G. (2020). Comprehensive kinetic study of thermal degradation of polyvinylchloride (PVC). *Polymer Degradation and Stability*, 176, 109148.
- Vaia, R. A., ve Giannelis, E. P. (1997). Lattice model of polymer melt intercalation in organically-modified layered silicates. *Macromolecules*, 30(25), 7990-7999.
- Yalçınkaya, S.E, Yıldız, N., Saçak, M., ve Çalımlı, A., (2010). Preparation of polystyrene/montmorillonite nanocomposites: optimization by response surface methodology (RSM), *Turkish Journal of Chemistry*, 34 (4), 581-592,
- Yan, S., Wang, K., ve Wang, Z. (2023). A Comparative study on the microscale and macroscale mechanical properties of dental resin composites. *Polymers* 15(5), 1129
- Yaragalla, S., Meera, A. P., Kalarikkal, N., ve Thomas, S. (2015). Chemistry associated with natural rubber–graphene nanocomposites and its effect on physical and structural properties. *Industrial Crops and Products*, 74, 792-802.
- Ye, F., Ye, Q., Zhan, H., Ge, Y., Ma, X., Xu, Y., ve Wang, X. (2019). Synthesis and study of zinc orotate and its synergistic effect with commercial stabilizers for stabilizing poly (vinyl chloride). *Polymers*, 11(2), 194.
- Yeh, J. M., Yao, C.T., Hsieh, C.F., Lin, L.H., Chen, P.L., Wu, J. C., Yang, H.C., ve Wu, C.P. (2008). Preparation, characterization and electrochemical corrosion studies on environmentally friendly waterborne polyurethane/Na⁺-MMT clay nanocomposite coatings, *European Polymer Journal*, 44, 3046-3056,
- Yoon, J. T., Jo, W. H., Lee, M. S., ve Ko, M. B. (2001). Effects of comonomers and shear on the melt intercalation of styrenics/clay nanocomposites. *Polymer*, 42(1), 329-336.
- Yu, J., Sun, L., Ma, C., Qiao, Y., ve Yao, H. (2016). Thermal degradation of PVC: A review. *Waste management*, 48, 300-314.
- Zaman, H. U., ve Beg, M. D. H. (2014). Effect of Processing Parameters on the Properties of Rigid PVC/Organoclay Nanocomposites. *Journal of Polymer Materials*, 31(1).

Zhang, C., Chai, R., Chen, T., ve Zhang, J. (2025). High rubber elasticity and thermal conductivity in plasticized polyvinyl chloride film with flame retardancy and smoke suppression properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(5), e56426.

İklim-Nötr ve Suya Dirençli Kentler İçin Çatı Stratejileri: Serin ve Mavi-Yeşil Çatıların Termal Performans, Su Yönetimi, Karbon ve Ekosistem Hizmetleri Açısından Karşılaştırılması

Gamze DEMİRTAŞ¹

1- Arş. Gör.; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.
demirtas@sakarya.edu.tr ORCID No: 0000-0001-6045-8564

ÖZET

İklim değışikliği, kentlerde aşırı sıcaklık, enerji talebi, şiddetli yağış, taşkın ve ekosistem kaybı gibi birbiriyle ilişkili çevresel baskıları artırmaktadır. Bu çalışma, serin ve mavi-yeşil çatı sistemlerini Avrupa'nın iklim-nötr, suya dirençli ve doğa-pozitif kent dönüşümü bağlamında karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda 2021–2026 dönemindeki güncel literatür, termal ve enerji performansı, yağmur suyu yönetimi, yaşam döngüsü karbonu, ekolojik işlevler, malzeme ve yapısal gereksinimler ile mevcut bina stokuna uygulanabilirlik açısından gösterge temelli çok kriterli bir yaklaşımla incelenmiştir. Bulgular, serin çatıların özellikle soğutma ağırlıklı iklimlerde güneş kaynaklı ısı kazancının ve bina soğutma enerjisi talebinin azaltılmasında belirgin bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. İncelenen çalışmalarda serin çatılarda soğutma enerjisi azalması %67,18–86,70 aralığına ulaşmakla birlikte, kış dönemindeki ısıtma gereksinimi bu kazanımı sınırlandırabilmektedir. Mavi-yeşil çatılarda ise yağmur suyu tutma oranları %64–88, pik akış azaltımı %82–85 düzeyine ulaşırken, tahmin kontrollü sistemlerde aşırı yağış yakalama oranının %70–97'ye çıkabildiği görülmektedir. Bunun yanında mavi-yeşil çatılar bitkilendirme, su depolama ve evapotranspirasyon yoluyla termal ve ekolojik işlevleri bütünleştirebilmekte; ancak daha yüksek yapısal yük, malzeme kullanımı ve bakım gereksinimi ortaya çıkarabilmektedir. Sonuçlar, serin çatı ve mavi-yeşil çatı sistemlerinden birinin bağlamdan bağımsız üstünlüğünü desteklememekte; bu çatıların iklim, bina özellikleri, yapısal kapasite ve öncelikli çevresel hedeflere göre farklı katkılar sunan tamamlayıcı çatı stratejileri olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler – Serin çatı, mavi-yeşil çatı, iklim-nötr kentler, yaşam döngüsü karbonu, su direnci.

1. GİRİŞ

İklim değışikliği ve hızlı kentleşme, yapıların enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları üzerindeki etkilerinin yanı sıra kentlerin aşırı sıcaklık, şiddetli yağış, taşkın, kuraklık ve biyolojik çeşitlilik kaybı gibi çevresel baskılara karşı kırılganlığını da artırmaktadır. Bu durum, şehir merkezlerinin çevresindeki kırsal alanlara göre belirgin şekilde daha sıcak olmasına yol açmaktadır. Literatürde "Kentsel Isı Adası" etkisi olarak tanımlanan bu durum, özellikle yaz aylarında ve durgun hava koşullarında kentsel yaşam kalitesini tehdit eden birincil faktör haline gelmektedir. Bu etkiler, sürdürülebilir yapı tasarımının yalnızca işletme enerjisinin azaltılmasına dayanan bir yaklaşımdan uzaklaşarak iklim değışikliğinin azaltılması ve

iklim değişikliğine uyum, su yönetimi, ekosistem hizmetleri ve yaşam dngs etkilerini birlikte değerlendiren daha bütüncül bir çerçeveye yönelmesini gerekli kılmaktadır.

Bu dnşm, Avrupa Birliği'nin güncel kent ve yapılı evre politikalarında da görülmektedir. Climate-Neutral and Smart Cities Mission, 2030 yılına kadar 100 Avrupa kentinin iklim-nötr ve akıllı kentlere dnşmn desteklerken; European Water Resilience Strategy su dngsnn korunması ve suyla ilişkili iklim risklerine karşı direncin güçlendirilmesini ne çıkarmaktadır (European Commission, 2025; 2026a). Bu ereve, enerji ve karbon azaltımının iklim uyumu ve su yönetimiyle birlikte ele alındığı bütüncül bir kentsel dnşm yaklaşımına işaret etmektedir.

Bu gelişmeler, bina çatılarının kentlerin iklim değişikliğine uyumundaki rolünün yeniden değerlendirilmesine neden olmaktadır. Geleneksel yaklaşımda çatı, yapıyı dış ortam koşullarından koruyan ve yağmur suyunu yapıdan uzaklaştıran bir bina kabuğu elemanı olarak ele alınırken, güncel sürdürülebilirlik yaklaşımlarında çatı yüzeyleri enerji, ısı ve su akışlarının yönetilebildiği aktif çevresel yüzeyler olarak değerlendirilmektedir. Çatıların güneş işınımına doğrudan maruz kalması, aynı zamanda kentsel alanlarda önemli miktarda yüzey alanı oluşturması, bu yüzeyleri hem bina enerji performansının iyileştirilmesi hem de kent ölçeğindeki iklim uyum stratejileri açısından önemli hale getirmektedir.

Bu kapsamda serin çatılar (cool roofs), güneş işınımının çatı yüzeyinde soğurulmasını azaltmak amacıyla yüksek güneş yansıtıcılığı ve termal yayınım özelliklerinden yararlanan pasif çatı stratejileridir. Güneş enerjisinin daha büyük bir bölümünün atmosfere geri yansıtılması, çatı yüzey sıcaklığını ve buna bağlı olarak binaya aktarılan ısı miktarını azaltabilmektedir. Bu mekanizma özellikle soğutma talebinin yüksek olduğu iklimlerde bina enerji tüketiminin ve kentsel yüzey sıcaklıklarının azaltılması açısından önem taşımaktadır. Bununla birlikte serin çatıların performansı yalnızca yüzey malzemesinin optik özelliklerine değil; iklim koşulları, yalıtım düzeyi, termal ktle ve binanın kullanım özellikleri gibi çok sayıda parametreye bağlıdır (Yazdani ve Baneshi, 2021).

Kentlerin iklim değişikliğine uyumu ise yalnızca aşırı sıcaklıkların azaltılmasıyla sınırlı değildir. şiddetli yağışların yönetilmesi, yüzey akışının azaltılması, yağmur suyunun geçici olarak depolanması ve kurak dönemlerde

bitki örtüsünün desteklenmesi de kentsel direncin önemli bileşenleridir. Bu noktada mavi-yeşil çatılar (blue-green roofs), geleneksel yeşil çatılarda bulunan bitki örtüsü ve yetiştirme ortamını ilave su depolama veya retansiyon katmanlarıyla bütünleştiren sistemlerdir. Bu sistemlerde yağış suyu doğrudan drenaj sistemine aktarılmak yerine çatı üzerinde geçici veya daha uzun süreli olarak depolanabilmekte; depolanan su bitkiler tarafından kullanılabilen veya evapotranspirasyon yoluyla atmosfere geri dönebilmektedir. Böylece çatı aynı anda yağmur suyu yönetimi, bitki gelişimi, evapotranspiratif soğutma ve ekosistem hizmetleri sağlayabilen çok işlevli bir altyapı bileşenine dönüşmektedir.

Bu noktada serin ve mavi-yeşil çatılar arasındaki temel farklılık belirginleşmektedir. Serin çatı, temel olarak güneş ışınlamının ve ısı transferinin yönetilmesine dayanan görece yalın bir pasif iklim stratejisiyken; mavi-yeşil çatı su depolama, bitkilendirme, evapotranspirasyon ve ekolojik süreçlerin birlikte çalıştığı daha karmaşık bir sistemdir. Dolayısıyla iki yaklaşımın yalnızca yüzey sıcaklığı veya bina soğutma enerjisi gibi tek bir performans göstergesi üzerinden karşılaştırılması, sistemlerin kent ölçeğinde sağlayabileceği farklı hizmetleri yeterince temsil etmemektedir.

Öte yandan, mavi-yeşil çatının daha fazla çevresel işlev sunması yaşam döngüsü boyunca otomatik olarak daha sürdürülebilir olduğu anlamına gelmemektedir. Çatı sistemlerinde malzeme üretimi, katmanlaşma, işletme enerjisi, bakım ve sistem sınırları çevresel sonuçları önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle farklı çatı stratejilerinin yalnızca kullanım aşamasındaki enerji veya su performanslarıyla değil, yaşam döngüsü etkileriyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Scolaro ve Ghisi, 2022; Fiorentin vd., 2024; Rizzo vd., 2023).

Mevcut literatür birlikte değerlendirildiğinde serin çatı araştırmalarının ağırlıklı olarak güneş yansıtıcılığı, yüzey sıcaklığı, bina enerji talebi ve kentsel ısı adası azaltımı üzerinde yoğunlaştığı; yeşil ve mavi-yeşil çatı araştırmalarının ise yağmur suyu yönetimi, evapotranspirasyon, bitkilendirme ve ekosistem hizmetleri gibi daha geniş bir performans alanına yöneldiği görülmektedir (Yazdani ve Baneshi, 2021; Richter ve Dickhaut, 2023). Yaşam döngüsü araştırmaları ise çok katmanlı çatı sistemlerinde malzeme üretimi, bakım, işletme enerjisi ve yaşam sonu süreçlerinin sonuçları önemli ölçüde etkileyebildiğini göstermektedir

(Scolaro ve Ghisi, 2022; Fiorentin vd., 2024). Bununla birlikte yeni nesil serin çatı ve mavi-yeşil çatı sistemlerini termal performans, enerji, su, karbon, biyolojik çeşitlilik, uygulanabilirlik ve yaşam döngüsü etkileri bakımından ortak bir değerlendirme çerçevesinde ele alan çalışmaların sınırlı olması, bütüncül bir karşılaştırmaya yönelik araştırma ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Bu araştırma boşluğundan hareketle bu bölüm, literatürde büyük ölçüde ayrı gelişen ısı ve enerji odaklı serin çatı araştırmaları ile su yönetimi ve ekosistem hizmetleri odaklı mavi-yeşil çatı araştırmalarını ortak bir çok kriterli değerlendirme çerçevesinde bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda 2021–2026 dönemindeki güncel literatür temel alınarak iki çatı yaklaşımı; termal performans ve kentsel ısı azaltımı, bina enerji performansı, yağmur suyu yönetimi ve su direnci, biyolojik çeşitlilik ve ekosistem hizmetleri, yaşam döngüsü karbon etkileri ve mevcut bina stokuna uygulanabilirlik açısından incelenmekte; elde edilen bulgular Avrupa'nın iklim-nötr, suya dirençli ve doğa-pozitif kent dönüşümü bağlamında değerlendirilmektedir.

2. İKLİM-NÖTR, SUYA DİRENÇLİ VE DOĞA-POZİTİF KENT VİZYONU

Avrupa'da iklim değişikliğiyle mücadele, yalnızca binaların enerji tüketiminin azaltılmasına değil; kentlerin karbon emisyonları, aşırı sıcaklıklar, taşkın ve kuraklık riskleri ile biyolojik çeşitlilik kaybı karşısında bütüncül biçimde dönüştürülmesine yönelmektedir. Bu çalışma kapsamında söz konusu dönüşüm; iklim-nötr kent, suya dirençli kent ve doğa-pozitif kent olmak üzere birbiriyle ilişkili üç eksen üzerinden ele alınmaktadır.

2.1. İklim-Nötr Kentler ve Yapıların Dönüşümü

İklim nötrlüğü yalnızca tekil teknolojilerin uygulanması veya enerji üretiminin karbonsuzlaştırılmasıyla sınırlandırılmamaktadır. Kentlerin hazırladığı Climate City Contracts; enerji, binalar, atık yönetimi ve ulaşım gibi farklı kentsel sistemleri birlikte ele alan eylem ve yatırım planlarını içermektedir (European Commission, 2026a). Bu yaklaşım, bina ölçeğinde alınan tasarım kararlarının daha geniş bir kentsel karbonsuzlaşma stratejisinin bileşeni olarak değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Çatı sistemleri bu bağlamda özellikle önemlidir. kentsel yüzey alanının yaklaşık %20–25'ini oluşturan çatı yüzeyleri; güneş ışıınımı, bina ısı kazançları, soğutma enerjisi talebi ve çevresel sıcaklıklarla doğrudan

ilişkilidir. Bu nedenle çatı yüzeyinin termal özelliklerinde gerçekleştirilen değişiklikler yalnızca tek bir binanın enerji tüketimini değil, uygulamanın ölçeğine bağlı olarak kentsel mikroiklimi de etkileyebilir. Serin çatıların yüksek güneş yansıtıcılığı ve termal yayılım yoluyla güneş kaynaklı ısı kazançlarını azaltmaya odaklanması, bu sistemi iklim-nötr kent yaklaşımının özellikle enerji talebi ve ısı azaltımı boyutlarıyla ilişkilendirmektedir.

Ancak Avrupa'nın yapılı çevrede karbon azaltımına ilişkin yaklaşımı giderek operasyonel enerji performansının ötesine geçmektedir. 2024 yılında kabul edilen revize Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), yeni binaların yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu küresel ısınma potansiyelinin değerlendirilmesini politika çerçevesine dahil etmiştir. Buna göre yaşam döngüsü küresel ısınma potansiyelinin 1 Ocak 2028'den itibaren 1.000 m²'den büyük yeni binaların, 1 Ocak 2030'dan itibaren ise tüm yeni binaların enerji performans belgelerinde hesaplanması ve açıklanması öngörülmektedir (European Commission, 2026b). Avrupa Komisyonu ayrıca 2026 yılında bu hesaplamaların üye ülkeler arasında karşılaştırılabilir biçimde yapılabilmesi amacıyla ortak bir Birlik hesaplama çerçevesi yayımlamıştır.

Bu gelişme çatı sistemlerinin değerlendirilmesi açısından önemli bir metodolojik sonuç doğurmaktadır. Bir çatı çözümünün sürdürülebilirliği yalnızca kullanım aşamasında sağladığı enerji tasarrufuyla değil, Çatı sistemini oluşturan malzemelerin üretimi, taşınması, kurulumu, bakımı, yenilenmesi ve yaşam sonu süreçleri ile değerlendirilmelidir. Dolayısıyla serin ve mavi-yeşil çatılar arasındaki karşılaştırmada operasyonel karbon ile gömülü karbonun birlikte değerlendirilmesi, Avrupa'da gelişen tüm yaşam döngüsü karbonu ile doğrudan ilişkilidir.

2.2. Suya Dirençli Kent ve Kentsel Su Döngüsünün Yeniden Düşünülmesi

İklim değişikliğinin Avrupa kentleri üzerindeki etkileri yalnızca sıcaklık artışıyla sınırlı değildir. Değişen yağış rejimleri, şiddetli yağış olayları, taşkınlar, uzun kuraklık dönemleri ve su kıtlığı kentlerin su yönetimi sistemleri üzerinde yeni baskılar oluşturmaktadır. Bu nedenle suyun kentten mümkün olan en kısa sürede uzaklaştırılmasına dayanan geleneksel drenaj yaklaşımı, yağmur suyunun yerinde tutulması, depolanması, yeniden kullanılması ve doğal su döngüsüne mümkün

olduğunca yeniden dahil edilmesine dayanan daha bütüncül yaklaşımlarla tamamlanmaktadır.

Bu dönüşüm Avrupa Birliği'nin 2025 yılında yayımladığı European Water Resilience Strategy ile belirgin bir politika çerçevesine kavuşmuştur (European Commission, 2025). Strateji üç temel hedef üzerinde şekillenmektedir: su döngüsünün korunması ve yeniden tesis edilmesi, su-akıllı ve rekabetçi bir ekonominin geliştirilmesi ve herkes için temiz ve erişilebilir su ile sanitasyonun güvence altına alınması. Strateji ayrıca Avrupa genelinde su verimliliğinin 2030 yılına kadar en az %10 artırılmasını hedefleyen bir yönelim ortaya koymaktadır (European Commission, 2025).

Su direnci kavramı, çatıların kent içindeki işlevinin yeniden değerlendirilmesi açısından özellikle önemlidir. Geleneksel çatılarda yağış suyu çoğunlukla yüzeyden mümkün olduğunca hızlı uzaklaştırılırken, mavi-yeşil çatılarda yağış suyunun çatı üzerinde tutulması ve geciktirilmesi sistemin temel tasarım amaçlarından biridir. Depolanan suyun bitki örtüsü tarafından kullanılması ve evapotranspirasyon yoluyla atmosfere geri verilmesi, çatı yüzeyini kentsel su döngüsünün aktif bir bileşeni haline getirmektedir.

Mavi-yeşil çatıların su direncine katkısı yalnızca toplam yağmur suyu tutma miktarıyla sınırlı değildir. Pik akışın azaltılması, drenaj sistemine ulaşan suyun geciktirilmesi, ardışık yağış olayları arasında depolama kapasitesinin yeniden oluşturulması ve kurak dönemlerde depolanan suyun bitki örtüsünü desteklemek amacıyla kullanılması da sistem performansının önemli bileşenleridir.

Su yönetimindeki dijitalleşme de bu yaklaşımın yeni araştırma yönlerinden birini oluşturmaktadır. Avrupa Water Resilience Strategy, dijitalleşme ve yapay zekâyı su yönetiminin geliştirilmesinde öncelikli eylem alanlarından biri olarak tanımlamaktadır (European Commission, 2025). Çatı ölçeğinde bunun karşılığı, yağış tahminlerini, sensörleri ve kontrollü drenaj elemanlarını kullanan akıllı mavi-yeşil çatı sistemlerinde görülebilir. Böylece çatı, yağışı pasif biçimde tutan bir sistemden gelecekteki yağış koşullarına göre depolama kapasitesini yönetebilen adaptif bir altyapıya dönüşmektedir.

2.3. Tüm Yaşam Döngüsü Karbonu, Mevcut Bina Stoku ve Çatıların Dönüşüm Potansiyeli

Avrupa'daki sürdürülebilir yapı yaklaşımında öne çıkan bir diğer değişim, bina performansının tüm yaşam döngüsü karbonu perspektifiyle değerlendirilmesidir. Bu yaklaşım, kullanım aşamasındaki enerji tüketiminden kaynaklanan operasyonel emisyonlarla sınırlı kalmayarak yapı malzemelerinin üretimi ve taşınması, şantiye süreçleri, kullanım dönemi, malzeme değişimleri, yıkım, atık taşınması, yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki sera gazı emisyonlarını birlikte ele almaktadır.

Bu yaklaşım mevcut bina stokunun dönüşümü açısından da önem taşımaktadır. Revize EPBD, 2050'de tamamen karbonsuzlaştırılmış bir bina stokuna yönelik çerçeve oluştururken mevcut binaların enerji performansının iyileştirilmesine ilişkin yenileme araçlarını da içermektedir. Bu nedenle mevcut yapıların tümünün yıkılıp yeniden yapılması yerine, kullanım ömürlerinin uzatılması ve performanslarının uygun müdahalelerle geliştirilmesi, yaşam döngüsü yaklaşımıyla doğrudan ilişkilidir.

Çatılar, mevcut bina stokunda bu dönüşümün gerçekleştirilebileceği önemli müdahale yüzeylerinden biridir. Ancak mevcut yapıların taşıyıcı kapasitesi, çatı geometrisi, mevcut yalıtım ve su yalıtımı, drenaj altyapısı, erişilebilirlik ve bakım gereksinimleri uygulanabilecek çatı stratejisini sınırlandırabilir.

Bu durum, mevcut bina stokunun dönüşümünde çatı teknolojilerinin yalnızca operasyonel enerji tasarrufuyla değil, yapısal taşıma kapasitesi ve yaşam döngüsü karbonuyla birlikte ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kavramsal çerçeveden hareketle izleyen bölümde serin ve mavi-yeşil çatı sistemleri; çalışma prensipleri, termal ve enerji performansı, yağmur suyu yönetimi ve çevresel işlevleri ile tüm yaşam döngüsü karbonu ve mevcut bina stokuna uygulanabilirlikleri bakımından 2021–2026 dönemindeki literatür bulguları üzerinden karşılaştırılmaktadır.

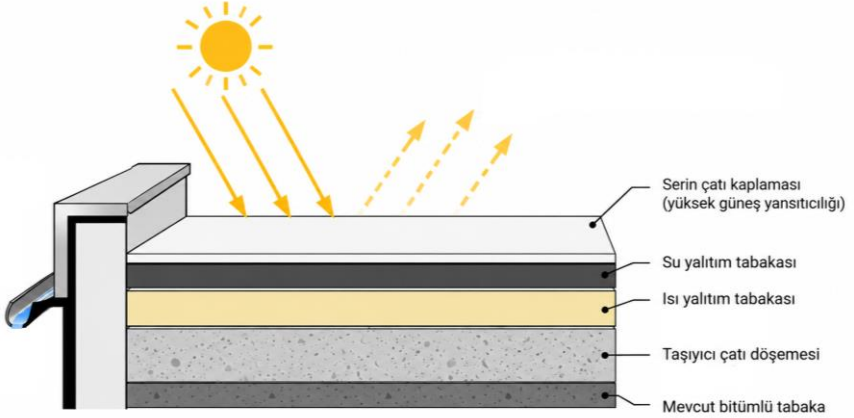
3. SERİN VE MAVİ-YEŞİL ÇATI SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

Serin çatılar ile mavi-yeşil çatılar, farklı fiziksel mekanizmalara dayanan ancak kentsel iklim uyumu açısından ortak hedeflerle ilişkilendirilebilen iki çatı stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Serin çatılara

ilişkin literatür ağırlıklı olarak yüzey sıcaklığı, soğutma enerjisi, kentsel ısı azaltımı ve farklı iklimlerdeki enerji performansına odaklanırken; mavi-yeşil çatı araştırmalarında yağmur suyu tutma ve geciktirme, evapotranspirasyon, termal düzenleme, bitkilendirme ve son dönemde gerçek zamanlı su yönetimi konuları öne çıkmaktadır. Bu farklılık, iki sistemi yalnızca tek bir performans göstergesi üzerinden karşılaştırmanın yeterli olmayacağını göstermektedir.

3.1. Serin ve Mavi-Yeşil Çatı Sistemleri: Çalışma Prensipleri ve Teknolojik Gelişim

Serin çatıların temel çalışma prensibi, çatı yüzeyinin yüksek güneş yansıtıcılığı (solar reflectance) ve çoğunlukla yüksek termal yayılım (thermal emittance) özellikleri aracılığıyla güneş ışınımından kaynaklanan ısı kazanımını sınırlandırmasına dayanmaktadır (Şekil 1). Gelen güneş enerjisinin daha büyük bir bölümünün atmosfere geri yansıtılması, çatı yüzey sıcaklığının ve yapı içine doğru gerçekleşen ısı akısının azalmasını sağlamaktadır. Bu mekanizma özellikle soğutma talebinin baskın olduğu iklimlerde bina enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir.



Şekil 1. Serin çatı sisteminin temel katmanları

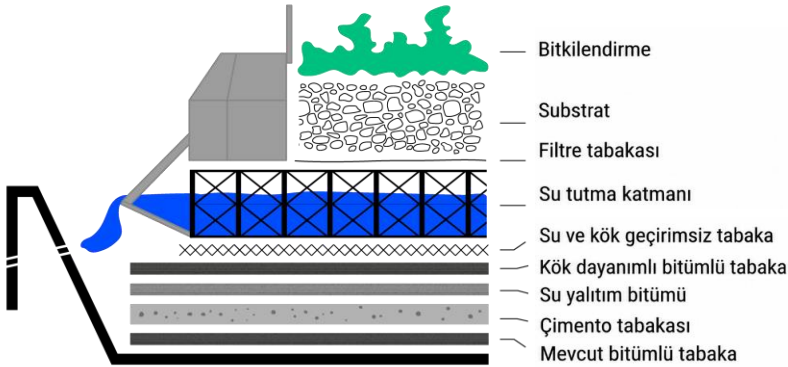
Bir çatının "serin" çatı olarak sınıflandırılabilmesi için iki temel fiziksel parametrede yüksek performansa sahip olması gerekir:

1. Güneş Yansıtıcılığı (Solar Reflectance - SR / Albedo): Bir malzemenin yüzeyinin görünür ve görünmez güneş ışınlarını (kıızılötesi ve ultraviyole) yansıtma yeteneği, güneş yansıtma katsayısı veya albedo olarak bilinir (Meier, t.y.). 0 (tam soğurucu/siyah) ile 1 (tam yansıtıcı/beyaz)

arasında bir değerle ifade edilir. Standart bir siyah asfalt çatı 0.05-0.10 gibi çok düşük bir SR değerine sahipken, yüksek performanslı bir serin çatı 0.65-0.90 aralığında bir SR değerine ulaşabilmektedir. Bu özellik, çatının güneş altında ne kadar ısınacağını belirleyen en kritik faktördür.

2. Termal Yayımlım (Thermal Emittance - TE): Malzemenin emdiği ısı enerjisini kızılötesi radyasyon formunda tekrar gökyüzüne yayma kapasitesidir. SR gibi bu da 0 ile 1 arasında ölçülür. Yüksek yayılım değerine sahip bir yüzey, ısınsa bile bu ıyı bnyesinde hapsetmez, hızla çevreye vererek soğur. Özellikle gece soğuması ve binanın termal yükünün boşaltılması için bu parametre kritiktir.

Bu iki özelliğın bileşimi, Solar Reflectance Index (SRI) adı verilen birleşik bir metrik ile ifade edilmektedir. SRI, standart siyah bir çatıyı 0, standart beyaz bir çatıyı 100 kabul eden bir skaladır. Bazı gelişmiş malzemelerde bu değer 100'ün üzerine çıkabilmektedir. SRI değeri ne kadar yüksekse, çatı kaplama malzemesinin binaya ısı transferini azaltma kabiliyeti o kadar iyidir. (Energy Code Ace, 2020)



Şekil 2. Mavi-yeşil çatı sisteminin temel katmanları (RESILIO)

Bununla birlikte yüksek yansıtıcılık kış aylarında yararlı güneş kazançlarını azaltarak soğuk iklimlerde 'ısıtma cezası' (heating penalty) oluşturabilmektedir. Bu sınırlama, son yıllarda statik serin çatıların ötesinde dinamik sistemlerin araştırılmasını beraberinde getirmiştir. Yazdani ve Baneshi (2021), ısıtma döneminde güneş yansıtıcılığını azaltabilen dinamik serin çatıların (dynamic cool roof) geleneksel statik serin çatının mevsimsel dezavantajını azaltabileceğini göstermektedir. Çalışmada serin çatı ve yeşil

çatı performansının iklim, yalıtım seviyesi ve termal kütleye bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir.

Mavi-yeşil çatılar ise farklı bir fiziksel mekanizmaya dayanmaktadır. Geleneksel yeşil çatının bitkilendirme, substrat, filtre, drenaj ve su yalıtımı katmanlarına, yağmur suyunun daha uzun süre tutulmasını veya kontrollü biçimde boşaltılmasını sağlayan bir depolama bileşeni eklenmektedir (Şekil 2). Yan vd. (2024), mavi-yeşil çatıda geleneksel drenaj katmanının su depolama işleviyle geliştirilmesinin yağmur suyu tutma kapasitesini artırdığını; depolanan suyun kurak dönemlerde üst katmanlara geri sağlanmasının ise bitki yaşamını ve evapotranspirasyonu destekleyebildiğini belirtmektedir.

Mavi-yeşil çatı teknolojisindeki güncel gelişmeler ise depolamanın pasif bir işlev olmaktan çıkarılarak adaptif biçimde yönetilmesine yönelmektedir. Sensörler, hava tahminleri ve kontrol edilebilir drenaj elemanları aracılığıyla yağış öncesinde depolama kapasitesinin boşaltılması veya kurak dönemler için su tutulması mümkün olabilmektedir. Hamidiaa vd. (2026), gerçek zamanlı kontrolün (real-time control) mavi-yeşil çatı araştırmalarında gelişmekte olan bir alan olduğunu, ancak bu konuda karşılaştırmalı ve uzun dönemli kanıtların hâlen sınırlı kaldığını göstermektedir.

Dolayısıyla iki sistem arasındaki temel teknolojik ayrım, serin çatının öncelikle ısıtım ve ısı yönetimine, mavi-yeşil çatının ise su-bitki-ısı etkileşiminin yönetimine dayanmasıdır. Bununla birlikte her iki sistemdeki teknolojik gelişmeler statik çatı yüzeylerinden çevresel koşullara tepki verebilen daha dinamik ve adaptif çatı sistemlerine doğru ortak bir yönelime işaret etmektedir.

3.2. Termal, Enerji ve Çevresel Performans Açısından Karşılaştırmalı Değerlendirme

Serin ve mavi-yeşil çatıların ortak performans alanlarından biri termal düzenlemedir; ancak soğutmanın gerçekleşme mekanizması farklıdır. Bu farklılık, iklim koşulları ve sistem tasarımına bağlı olarak termal ve enerji performansının da değişmesine neden olmaktadır.

Meng vd. (2022), subtropikal iklim koşullarında serin çatı, yeşil çatı, çift kabuklu çatı ve konvansiyonel çatıyı deneysel olarak karşılaştırmıştır. Gündüz saatlerinde dış çatı yüzeyi sıcaklığındaki azalma yeşil çatıda 13,7

°C, serin çatıda 12,0 °C olarak belirlenmiştir. Gece saatlerinde ise yeşil ve serin çatılarda referans çatıya göre sırasıyla yaklaşık 2,3 °C ve 1,9 °C daha yüksek yüzey sıcaklıkları gözlenmiştir. Bu sonuçlar, her iki sistemin de gündüz aşırı yüzey ısınmasını sınırlandırabildiğini, ancak termal davranışlarının gün içindeki zaman dilimine göre değişebildiğini göstermektedir.

Enerji performansındaki farklılık iklim koşulları dikkate alındığında daha belirgin hale gelmektedir. Yazdani ve Baneshi (2021), dinamik serin çatı ile kuru ve sulanan yeşil çatıları farklı iklim, termal kütle ve yalıtım düzeylerinde karşılaştırmıştır. Sıcak ve nemli iklimde düzenli sulanan yeşil çatılar referans binanın yıllık termal yükünü %21,3–66,0 azaltırken, sıcak yaz–soğuk kış koşullarında dinamik serin çatılar yıllık enerji talebinde %22,4–35,4 azalma sağlamıştır. Isıtma gereksiniminin baskın olduğu koşullarda ise kuru yeşil çatılarda yıllık enerji tasarrufu %6,9–44,1 aralığında gerçekleşmiştir. Ayrıca yüksek yalıtım düzeylerinde dinamik serin çatı ile kuru yeşil çatı arasındaki enerji performansı farkının %1,5'in altına düşebilmesi, çatı stratejisinin etkisinin mevcut yapı kabuğu özelliklerine de bağlı olduğunu göstermektedir.

Ilıman Avrupa ikliminde gerçekleştirilen doğrudan karşılaştırmalar da benzer bir bağlam bağımlılığı ortaya koymaktadır. Ouldboukhithine vd. (2024), Fransa'nın Poitiers kentinde sedum ve çim bitkilendirilmiş çatılar ile beyaz boyalı ve çakıl kaplı çatıları saha ölçümleri ve dinamik enerji simülasyonu aracılığıyla karşılaştırmıştır. Yaz döneminde çakıl çatıya göre ısı akışı sedum çatıda %52, çim çatıda %71 azalmış; toplam enerji tüketiminde ise sedum çatı için %12'ye varan azalma belirlenmiştir. Bulgular, ılıman iklimlerde yıllık enerji performansının yalnız yüzey yansıtıcılığına değil, bitkilendirme tipi ve mevsimsel ısıtma–soğutma dengesi gibi değişkenlere de bağlı olduğunu göstermektedir.

Jia vd. (2024), serin ve yeşil çatıların bina enerji performansını altı farklı kentte mevcut ve gelecek iklim senaryoları altında incelemiştir. Mevcut iklim koşullarında serin çatılarda soğutma enerjisi azalması %67,18–86,70, yeşil çatılarda ise %63,38–83,21 aralığında bulunmuştur. Buna karşılık serin çatının incelenen altı kentte de ısıtma enerjisini artırdığı ve bazı koşullarda bu artışın %22,5'e ulaşabildiği belirlenmiştir. Gelecek iklim senaryolarında her iki çatı sisteminin de toplam ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme enerjisinde yüksek azalma potansiyeli gösterdiği ve bazı

senaryolarda azalmanın %65'in üzerine çıkabildiği bildirilmiştir. Bu sonuçlar, serin çatıların özellikle soğutma ağırlıklı koşullarda yüksek enerji azaltma potansiyeline sahip olduğunu, ancak yıllık performansın kış dönemindeki ısıtma gereksinimiyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Mavi-yeşil çatılarda termal düzenleme, yağmur suyu yönetimiyle birlikte gerçekleştirilmektedir. Almaaitah ve Joksimovic (2022) tarafından Toronto'da gerçekleştirilen tam ölçekli mavi-yeşil çatı çalışmasında yağmur suyunun %85–88'i tutulmuş, pik akış %82–85 azaltılmış ve pik akış yaklaşık 7,7–8 saat geciktirilmiştir. Aynı çalışmada bitki seviyesindeki hava sıcaklığında bitkilendirme türüne bağlı olarak 1,4–2,5 °C'ye ulaşan farklılıklar ölçülmüş; özellikle öğleden sonra ve akşam saatlerinde soğutma etkisi gözlenmiştir. Bu bulgular, mavi-yeşil çatılarda su depolama ve bitkilendirmenin hidrolojik ve termal performansı aynı sistem içerisinde bir araya getirebildiğini göstermektedir.

Mavi-yeşil çatıların yağmur suyu performansı sistem konfigürasyonuna bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Almaaitah vd. (2022) tarafından yeşil, mavi-yeşil ve mavi çatıların doğrudan karşılaştırıldığı deneysel çalışmada organik substrata sahip mavi-yeşil çatı en yüksek yağmur suyu tutma, pik akış azaltma ve geciktirme performansını göstermiştir. Bununla birlikte FLL esaslı mavi-yeşil çatı konfigürasyonunun aynı substrata sahip geleneksel yeşil çatının yağmur suyu tutma performansını aşmaması, ilave su depolama katmanının tek başına daha yüksek hidrolojik performansı garanti etmediğini göstermektedir.

Uzun dönemli saha çalışmaları da bu performansın büyüklüğünü ortaya koymaktadır. Richter ve Dickhaut (2023), Hamburg'da dört tam ölçekli mavi-yeşil çatıyı 2017–2023 döneminde izlemiş ve yıllık yağışın yaklaşık %64–74'ünün sistemler tarafından tutulduğunu belirlemiştir. Özellikle yaz döneminde çatı çıkışının oldukça sınırlı olması, depolanan suyun evapotranspirasyon yoluyla yeniden atmosfere verilmesinin kentsel su döngüsündeki rolünü göstermektedir. Aynı çalışmada farklı su depolama rejimlerinin bitki kompozisyonu ve tür çeşitliliğini etkilediği de belirlenmiştir.

Yan vd. (2024), mavi-yeşil çatılarda yağmur suyu tutma kapasitesinin mevsimsel olarak 11,34–32,53 mm arasında değiştiğini göstermiştir. Pekin

koşullarında substrat kalınlığının yaklaşık 300 mm, su depolama katmanının ise yaklaşık 30 mm düzeyinden sonra sağladığı ilave hidrolojik kazanımın sınırlanmaya başladığı belirlenmiştir. Bu sonuç, sistem performansının yalnız daha fazla substrat veya daha büyük depolama hacmi kullanılmasıyla doğrusal biçimde artmadığını göstermektedir.

Mavi-yeşil çatıların hidrolojik performansı aktif kontrol sistemleriyle daha da geliştirilebilmektedir. Busker vd. (2022), hava tahminine dayalı kontrollü mavi-yeşil çatılarda aşırı yağışların %70–97'sinin yakalanabildiğini; aynı değerin pasif mavi-yeşil çatılarda %59, geleneksel yeşil çatılarda ise %12 düzeyinde kaldığını bildirmiştir. Sıcak yaz koşullarında kontrollü mavi-yeşil çatılardaki evapotranspirasyonun potansiyel evapotranspirasyonun yaklaşık %70'ine ulaşması, depolanan suyun hem yağmur suyu yönetimi hem de bitkilendirmenin sürdürülmesi açısından kullanılabileceğini göstermektedir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, serin çatının etkisi özellikle soğutma ağırlıklı koşullarda güneş kaynaklı ısı kazanımının azaltılması üzerinden belirginleşirken, soğuk dönemlerde azalan güneş kazancı yıllık enerji avantajını sınırlayabilmektedir. Bitkilendirilmiş çatılarda ise termal ve enerji performansı iklimin yanı sıra substrat, bitkilendirme, sulama ve yalıtım özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Buna karşılık mavi-yeşil çatılarda yağmur suyunun tutulması, depolanması ve geciktirilmesi daha tutarlı ve doğrudan bir performans alanı olarak ortaya çıkmakta; aktif kontrol sistemleri bu hidrolojik katkıyı daha da artırabilmektedir. Ekolojik katkılar açısından ise bitkilendirme ve su rejiminin habitat ve tür çeşitliliğini destekleme potansiyeli bulunmakla birlikte, bu etkinin büyüklüğü sistem tasarımına ve bitki–substrat bileşimine bağlıdır.

3.3. Literatür Bulgularının Karşılaştırılması

2021–2026 dönemindeki çalışmalar, serin ve mavi-yeşil çatıların farklı performans alanlarında yoğunlaşan bir araştırma birikimine sahip olduğunu göstermektedir. Tablo 1'de çalışmaların yöntemleri ve çalışmada doğrudan ölçülen başlıca performans çıktıları birlikte verilmiştir.

Tablo 1: Serin ve mavi-yeşil çatı literatüründe başlıca performans bulguları

Çalışma	Sistem	İklim / yer	Termal ve enerji performansı	Su / ekolojik performans
Yazdani ve Baneshi (2021)	Dinamik serin çatı- Yeşil çatı	İran, üç iklim bölgesi	Sıcak yaz-soğuk kış koşullarında dinamik serin çatıda yıllık enerji talebi %22,4–35,4 azalmış; sonuçların yalıtım ve termal kütleyle duyarlı olduğu belirlenmiştir.	-
Meng vd. (2022)	Serin çatı/Yeşil çatı/Çift kabuklu çatı	Subtropikal iklim	Dış yüzey sıcaklığında serin çatıda 12,0 °C, yeşil çatıda 13,7 °C'ye ulaşan azalmalar belirlenmiştir.	-
Busker vd. (2022)	Akıllı mavi-yeşil çatı	Amsterdam	Sıcak yaz günlerinde evapotranspirasyon, potansiyel evapotranspirasyonun mavi-yeşil çatıda yaklaşık %70'ine, yeşil çatıda %30'una ulaşmıştır.	Şiddetli yağış yakalama oranı kontrollü sistemde %70–97, pasif mavi-yeşil çatıda %59 ve geleneksel yeşil çatıda %12 olarak belirlenmiştir.
Almaaitah vd. (2022)	Yeşil çatı/mavi-yeşil çatı/ mavi çatı	Toronto	Mavi-yeşil çatının termal performansının sistem konfigürasyonuna bağlı olduğu belirlenmiştir.	Organik substrat kullanılan mavi-yeşil çatı güçlü yağmur suyu tutma, pik akış azaltma ve geciktirme performansı göstermiştir.
Richter ve Dickhaut (2023)	Mavi-yeşil çatı	Hamburg	-	Yıllık yağışın %64–74'ü tutulmuş; uzun dönemde bitki kompozisyonu ve çeşitliliğinde değişimler gözlenmiştir.
Cristiano vd. (2023)	Katmanlı mavi-yeşil çatı	Akdeniz	-	Yağış tahmini ve depolama düzeyine göre adaptif işletmenin taşkın azaltımı ve su depolama performansını geliştirebildiği belirlenmiştir.
Jia vd. (2024)	Serin çatı/Yeşil çatı	Kahire, Hong Kong, Seul, Londra, Los Angeles ve São Paulo	Serin çatıda soğutma enerjisi %67,18–86,70 azalmış; incelenen bütün kentlerde ısıtma enerjisinde artış belirlenmiştir.	-
Yan vd. (2024)	Mavi-yeşil çatı	Pekin	Evapotraspirasyonun depolama kapasitesinin	Yağmur suyu tutma kapasitesi 11,34–32,53

			yenilenmesinde etkili olduğu belirlenmiştir.	mm arasında değişmiş; substrat ve su depolama katmanı için yaklaşık 300 mm ve 30 mm optimum üst sınırlar belirlenmiştir.
Ouldboukhite vd. (2024)	Beyaz/sedum/çim/çakıl çatı	Fransa	Yaz ısı akısı çakıl çatıya göre sedumda %52, çimde %71 daha düşük; sedumda toplam enerji tüketiminde %12'ye varan azalma belirlenmiştir.	-
Mourou vd. (2025)	Geri dönüştürül müş cam serin çatı	İspanya	Soğutma enerjisinde %13'e kadar tasarruf belirlenmiştir.	-
De Masi vd. (2025)	Serin çatı	Altı Avrupa iklimi	Akdeniz iklimlerinde soğutma enerjisinde %34–39'a varan azalma sağlanırken, daha soğuk iklimlerde ısıtma enerjisi gereksiniminin artabildiği belirlenmiştir.	-
Scolaro ve Ghisi (2025)	Serin/yeşil/standart çatı	Brezilya; üç iklim bölgesi	Serin ve yeşil çatıda standart çatıya göre yaşam döngüsü enerji tüketimi %13–22 daha düşük bulunmuştur	-
Johnson vd. (2026)	Mavi-yeşil çatı	Almanya	-	Su depolama işlevi fonksiyonel değerlendirmeye dahil edilmiştir.
Hamidiaala vd. (2026)	Yeşil çatı/mavi-yeşil çatı	Çoklu iklim	-	Gerçek zamanlı kontrol sistemlerinin su depolama ve taşkın yönetimini iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır.

Tablo 1'deki bulgular, serin ve mavi-yeşil çatıların yalnızca teknik performansları bakımından değil, Avrupa'nın iklim-nötr, suya dirençli ve doğa-pozitif kent dönüşümüne sağlayabilecekleri katkılar bakımından da farklılaştığını göstermektedir. Serin çatı çalışmalarında yüzey sıcaklığı, soğutma enerjisi ve yıllık enerji talebi gibi göstergelerin ağırlık kazanması, bu sistemin iklim nötrlüğü ve düşük karbon hedefleriyle bağlantısının özellikle bina enerji talebinin azaltılması üzerinden kurulabileceğini göstermektedir. Mavi-yeşil çatı literatüründe yağmur suyu tutma ve

geciktirme, evapotranspirasyon, kontrollü drenaj ve ekolojik işlevlerin öne çıkması, bu sistemlerin iklim uyumu, su direnci ve kentsel ekosistem hizmetleriyle daha doğrudan ilişki kurduğunu göstermektedir.

Bu katkıların büyüklüğü sistem türünden bağımsız ve sabit değildir. Serin çatılarda iklim koşulları, yalıtım düzeyi ve yıllık ısıtma-soğutma dengesi enerji kazanımlarını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Benzer biçimde mavi-yeşil çatılarda substrat özellikleri, su depolama kapasitesi, bitkilendirme, drenaj konfigürasyonu ve işletme stratejisi hidrolojik, termal ve ekolojik performansı etkilemektedir. İki sistemin Avrupa'nın kentsel sürdürülebilirlik hedeflerine katkısı, yalnızca teknoloji türüne göre değil, uygulama bağlamı ve hedeflenen çevresel hizmetlerle birlikte değerlendirilmelidir.

3.4. Yaşam Döngüsü Karbonu, Uygulanabilirlik ve Mevcut Bina Stoku Açısından Değerlendirme

Operasyonel enerji veya yağmur suyu performansı, bir çatı sisteminin çevresel performansını tek başına belirlememektedir. Malzeme üretimi, uygulama, bakım, yenileme, servis ömrü ve yaşam sonu süreçlerinin hesaba katılması, özellikle Avrupa'da yapıların yaşam döngüsü performansının giderek daha fazla önem kazanması nedeniyle gereklidir. EPBD kapsamında yeni binaların yaşam döngüsü küresel ısınma potansiyelinin (life-cycle GWP) 2028'den itibaren 1000 m² üzerindeki yeni binalar, 2030'dan itibaren ise bütün yeni binalar için hesaplanarak enerji kimlik belgelerinde açıklanması öngörülmektedir.

Serin çatı tarafında Mourou vd. (2025), geri dönüştürülmüş atık cam içeren yüksek yansıtıcılığa sahip çatı kaplamalarını yaşam döngüsü yaklaşımıyla incelemiştir. Atık cam geri dönüşüm işleminin üretim aşamasındaki çevresel etkiye katkısının %5'in altında kaldığı, bazı senaryolarda ise soğutma enerjisi tasarrufunun %13'e ulaşabildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte çalışma bütün yaşam döngüsünü kapsayan bir değerlendirme değildir; üretim aşaması tesis sınırları içerisindeki süreçlerle değerlendirilmiş ve kullanım aşaması enerji simülasyonu ile desteklenmiştir.

Yağmur suyu tutma ve geciktirme işlevli bitkilendirilmiş çatı sistemleri açısından Johnson vd. (2026), Almanya pazarındaki dört farklı yağmur suyu tutma ve geciktirme özellikli bitkilendirilmiş çatı

konfigürasyonunu, su depolama işlevini de dikkate alan bir yaşam döngüsü değerlendirmesiyle karşılaştırmıştır. Çalışmanın önemli sonucu, sistemin “yeşil” olarak tanımlanmasının kendi başına düşük gönüllü karbon anlamına gelmediğini göstermektedir. Malzeme seçimi ve sistem konfigürasyonu üretim aşamasındaki küresel ısınma potansiyeli üzerinde belirleyici olmuş; özellikle yoğun çelik bileşenlerin çevresel yükü artırdığı görülmüştür. Hizmet ömrü varsayımlarının değiştirilmesi de yıllıklaştırılmış çevresel sonuçları önemli ölçüde etkilemiştir.

Bu bulgular, iki çatı stratejisinin yaşam döngüsü karşılaştırmasında fonksiyonel birim ve sistem sınırlarının önemini göstermektedir. Serin çatı daha düşük malzeme yoğunluğuyla ağırlıklı olarak güneş kaynaklı ısı kazancının azaltılmasına odaklanırken, mavi-yeşil çatı daha fazla malzeme kullanarak su yönetimi, evapotranspiratif soğutma ve habitat gibi çoklu işlevler sağlayabilmektedir. Bu nedenle yalnızca birim alan başına karbon etkisine veya yalnızca sağlanan ekosistem hizmetlerine dayalı karşılaştırmalar sistemler arasındaki farklılıkları eksik temsil edebilir.

Mevcut bina stokunda uygulanabilirlik de benzer biçimde iki sistem arasında ayrılmaktadır. Serin çatı, mevcut yüzeye yansıtıcı bir kaplama veya yeni yüzey katmanı uygulanabilmesi nedeniyle genellikle sınırlı yapısal müdahaleyle gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte mevcut çatının yalıtım seviyesi enerji kazanımının büyüklüğünü etkilemektedir. Yazdani ve Baneshi (2021), yüksek yalıtım düzeyinde dinamik serin çatı ile kuru yeşil çatı arasındaki enerji performansı farkının önemli ölçüde azalabildiğini göstermektedir.

Mavi-yeşil çatıların mevcut yapılara uygulanmasında ise substrat, bitkilendirme ve özellikle depolanan su nedeniyle yapısal kapasite daha belirleyici bir ön koşuldur. Andenæs vd. (2021), mevcut binalara mavi-yeşil çatı eklenirken sistemin kendi ağırlığının yanı sıra tutulan suyun ve gerekli durumlarda kar yükünün de hesaba katılması gerektiğini; aşırı yükün deformasyon ve drenaj problemlerine, uygun olmayan koşullarda ise daha ciddi yapısal risklere yol açabileceğini vurgulamaktadır. Bu nedenle tam doygun durumdaki toplam ağırlık, drenaj ve acil drenaj yolları ile bakım erişiminin tasarım sürecinde birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bakım gereksinimleri de sistemler arasında farklılaşmaktadır. Serin çatılarda yüzey yaşlanması, kirlenme ve yansıtıcılık kaybı; mavi-yeşil çatılarda ise bitki bakımı, drenaj kontrolü, su birikiminin önlenmesi ve varsa

sensör-kontrol bileşenlerinin işletilmesi uzun dönem performans açısından dikkate alınmalıdır.

Dolayısıyla mevcut bina stokunda serin çatılar daha düşük müdahale gerektiren enerji ve ısı odaklı dönüşümlerle, mavi-yeşil çatılar ise yapısal kapasitenin uygun olduğu ve çok işlevli çevresel performansın hedeflendiği dönüşümlerle daha doğrudan ilişkilendirilebilir. Yaşam döngüsü karbonu açısından ise mevcut çalışmalar, iki sistemi aynı fonksiyonel birim ve sistem sınırları altında doğrudan karşılaştırmaya yeterli değildir; bu nedenle bu boyutta genel bir karbon üstünlüğü belirlemek yerine, operasyonel kazanımlar ile malzeme ve bakım kaynaklı etkilerin ayrı olarak ortaya konması daha güvenilir bir sonuçtur.

3.5. Avrupa'nın İklim-Nötr, Suyla Dirençli ve Doğa-Pozitif Kent Vizyonu Açısından Çok Kriterli Sentez

Serin ve mavi-yeşil çatıların Avrupa'nın kentsel dönüşüm hedeflerine katkısı tek bir performans göstergesi üzerinden açıklanamamaktadır. İklim-Nötr ve Akıllı Kentler Misyonu, Su Direnci Stratejisi, EPBD ve doğa restorasyonu politikalarının ortaya koyduğu yönelimler doğrultusunda bu çalışmada çatı sistemlerinin katkısı; iklim nötrlüğü ve enerji, düşük karbon, su direnci, aşırı sıcağa uyum, doğa-pozitiflik ve mevcut bina stokunun dönüşümü olmak üzere altı boyutta sentezlenmiştir.

Literatür, serin çatıların iklim nötrlüğüne yönelik en doğrudan katkısının soğutma enerjisi talebinin azaltılması üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla serin çatının enerji katkısı güçlü fakat iklime duyarlıdır. Mavi-yeşil çatıda ise doğrudan yıllık enerji verisi daha sınırlı olup katkı, su depolama, bitkilendirme ve evapotranspirasyona bağlı termal düzenleme üzerinden ortaya çıkmaktadır.

Serin çatılarda operasyonel enerji azalmasına bağlı CO₂ azaltımı uygun koşullarda 20,2–34,5 kg CO₂/m²·yıl düzeyine ulaşabilmektedir. Mavi-yeşil çatıda ise substrat, depolama ve yapısal bileşenler gömülü karbon üzerinde belirleyicidir. Mevcut çalışmalar iki sistemi aynı fonksiyonel birim ve sistem sınırlarında karşılaştırmaya yeterli olmadığından, bütün yaşam döngüsü karbonu açısından bağlamdan bağımsız bir üstünlük belirlenmemektedir.

Su direnci iki sistemin en belirgin biçimde ayrıştığı boyuttur. Geleneksel serin çatının doğrudan su depolama ve geciktirme işlevi

bulunmazken, mavi-yeşil çatı sistemleri yüksek yağış tutma, pik akış azaltımı ve belirgin pik geciktirme performansı ile temel nicel üstünlüğü su direncinde ortaya çıkmaktadır. Akıllı kontrol entegrasyonu ise bu hidrolojik kapasiteyi en üst seviyeye taşımaktadır.

Her iki sistem de farklı mekanizmalarla aşırı sığağa uyuma katkı sağlamaktadır. Serin çatı radyatif, mavi-yeşil çatı ise ağırlıklı olarak bitkilendirme ve evapotranspirasyona dayalı termal düzenleme sağlamaktadır. Çalışmalarda kullanılan termal göstergelerin farklı olması, sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını sınırlandırmaktadır.

Geleneksel serin çatı doğrudan bitkilendirme veya habitat bileşeni içermezken, mavi-yeşil çatı bitki, substrat ve suyu bütünleştirerek kentsel yeşil altyapıya katkı potansiyeli sunmaktadır. Ancak ekolojik performans bitki seçimi, substrat, su rejimi, bakım ve çevredeki habitat bağlantılarına bağlıdır.

Serin çatı, görece düşük yapısal müdahale gerektirmesi nedeniyle mevcut bina stokunda daha geniş bir uygulanabilirlik alanı sunarken, enerji performansı yalıtım ve iklime bağlıdır. Mavi-yeşil çatıda ise substrat ve depolanan su nedeniyle taşıma kapasitesi, drenaj ve bakım gereksinimleri daha belirleyicidir. Buna karşılık uygun yapılarda su yönetimi, termal düzenleme ve ekolojik işlevlerin aynı müdahalede birleştirilebilmesi daha geniş bir çevresel işlev kümesi sağlamaktadır.

Tablo 2: Serin ve mavi-yeşil çatıların Avrupa kentsel dönüşüm hedeflerine katkılarının gösterge temelli sentezi

Çalışma	Serin çatı	Mavi-yeşil çatı	Sentez sonucu
İklim-nötrlük	Soğutma enerjisinde azalma sağlayabilir; sonuç iklime bağlıdır; kışın ısıtma artışı görülebilir.	Evapotranspirasyon ve bitkilendirme yoluyla termal düzenlemeye katkı sağlayabilir; ancak yıllık bina enerji performansına ilişkin kanıt serin çatıya göre daha sınırlıdır.	Serin çatının enerji etkisi daha doğrudan belgelenmiştir; mavi-yeşil çatının katkısı daha çok çoklu çevresel hizmetlerle birlikte değerlendirilmelidir.
Kentsel ısı azaltımı	Yüksek güneş yansıtıcılığı sayesinde çatı yüzey sıcaklığını ve absorbe edilen güneş enerjisini azaltır.	Gölgeleme, substrat ve evapotranspirasyon aracılığıyla yüzey ve yakın çevre sıcaklıklarını düzenleyebilir. Depolanan su evapotranspirasyonunun devamlılığını destekleyebilir.	İki sistem farklı fiziksel mekanizmalarla soğutma sağlar. Sonuçlar iklim, nem, su bulunabilirliği ve kentsel morfolojiye duyarlıdır.
Su direnci	Geleneksel serin çatının yağmur	Yağışı tutabilir, pik akışı azaltabilir/geciktirebilir ve	Mavi-yeşil çatının temel çok işlevli avantajlarından

Doğa- pozitif kent	suyunu tutma, depolama veya kontrollü boşaltmaya yönelik doğrudan bir mekanizması yoktur. Kendi başına bitkisel habitat oluşturmaz; doğrudan biyoçeşitlilik işlevi sınırlıdır. Görece düşük malzeme yoğunluğu avantaj sağlayabilir; ancak kaplama üretimi, yaşlanma ve yenileme döngüleri dikkate alınmalıdır.	depolanan suyu kurak dönemlerde kullanabilir. Akıllı mavi-yeşil çatı depolama hava tahminine göre yönetilebilir. Bitki, substrat ve su rejimi aracılığıyla habitat ve ekosistem hizmetleri sağlayabilir.	biridir. Serin çatı ile arasındaki en belirgin fonksiyonel ayrımlardan birini oluşturur. Doğrudan ekolojik işlev potansiyeli mavi-yeşil çatıda belirgindir.
Düşük karbon		Gömülü karbon; substrat, depolama ve yapısal bileşenlere duyarlıdır	Yaşam döngüsü karbonu açısından genel üstünlük belirlenmemektedir
Mevcut bina stoku / retrofit	Genellikle daha düşük ek ağırlık ve daha sınırlı fiziksel müdahaleyle mevcut çatılara uygulanabilir.	Substrat ve özellikle depolanan su ek yapısal yük oluşturur; taşıma kapasitesi, su yalıtımı ve drenaj kontrol edilmelidir.	Yapısal rezerv kapasitesi sınırlı mevcut yapılarda Serin çatının uygulanması daha basit olabilir; mavi- yeşil çatı uygulanabilirliği bina bazında doğrulanmalıdır.

Tablo 2, sistemlerin katkı profilinin hedefe göre değiştiğini göstermektedir. Serin çatının en belirgin katkısı özellikle soğutma ağırlıklı koşullarda enerji talebinin ve operasyonel emisyonların azaltılması ile mevcut yapılara görece düşük müdahaleyle uygulanabilmesidir. Mavi-yeşil çatının en belirgin katkısı ise yağmur suyunun tutulması ve geciktirilmesi ile termal ve ekolojik işlevlerin aynı sistemde bütünleştirilebilmesidir. Bu çok işlevlilik, daha yüksek yapısal yük ve bakım gereksinimleriyle birlikte ortaya çıkmaktadır.

Bu nedenle serin çatı ve mavi-yeşil çatı, birbirinin doğrudan alternatifi olmaktan çok farklı kentsel dönüşüm hedeflerine farklı katkı profilleri sunan çatı stratejileridir. Isı ve bina enerji talebinin baskın olduğu veya mevcut yapının müdahale kapasitesinin sınırlı kaldığı koşullarda serin çatının katkısı daha doğrudanken; yağmur suyu yönetimi, kentsel yeşil altyapı ve çoklu ekosistem işlevlerinin öncelikli olduğu koşullarda mavi-yeşil çatının katkı alanı genişlemektedir.

Sonuç olarak Avrupa'nın iklim-nötr, suya dirençli ve doğa-pozitif kent dönüşümü açısından tek ve evrensel bir çatı stratejisi tanımlamak yerine, çatı seçiminin iklim bölgesi, baskın iklim riski, mevcut bina özellikleri, yapısal kapasite, su yönetimi gereksinimi, ekolojik hedefler ve yaşam döngüsü

performansın birlikte değerlendirildiği bağlama duyarlı bir karar süreci olarak ele alınması gerekmektedir. Bu yaklaşımda serin ve mavi-yeşil çatılar birbirini dışlayan çözümler değil, farklı bina ve kentsel koşullarda farklı işlevleri karşılayabilen tamamlayıcı çatı stratejileri olarak ortaya çıkmaktadır.

4. SONUÇ

Bu çalışma, serin ve mavi-yeşil çatı sistemlerini termal ve enerji performansı, su yönetimi, yaşam döngüsü karbonu, malzeme kullanımı, ekolojik işlevler ve mevcut bina stokuna uygulanabilirlik açısından karşılaştırarak Avrupa'nın iklim-nötr, suya dirençli ve doğa-pozitif kent dönüşümü bağlamında değerlendirmiştir. 2021–2026 dönemindeki literatürün gösterge temelli sentezi, iki sistemin aynı çevresel hedeflere aynı mekanizmalarla katkı sağlamadığını ortaya koymaktadır.

Serin çatılarda en güçlü kanıt, güneş kaynaklı ısı kazancının ve soğutma enerjisi talebinin azaltılması üzerinde yoğunlaşmaktadır. Görece düşük malzeme ve yapısal müdahale gereksinimi ise bu sistemlerin mevcut bina stokunun enerji ve ısı odaklı dönüşümünde uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Mavi-yeşil çatılarda temel kazanım su direnci ve çok işlevlilik alanında ortaya çıkmaktadır. Yağmur suyunun tutulması ve pik akışın azaltılmasının yanı sıra bitkilendirme, substrat ve su depolama bileşenleri termal düzenleme ve ekolojik işlevleri desteklemektedir. Bununla birlikte bu çok işlevlilik daha yüksek yapısal yük, malzeme kullanımı ve bakım gereksinimleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Yaşam döngüsü açısından mevcut kanıtlar, sistemlerden birinin genel karbon üstünlüğünü ortaya koymak için yeterli değildir. Serin çatılarda operasyonel enerji ve karbon kazanımları daha doğrudan nicelleştirilirken, mavi-yeşil çatılarda malzeme kaynaklı etkilerin sağlanan su yönetimi ve ekosistem hizmetleriyle birlikte ele alınması gerekmektedir. Ayrıca iki sistemi aynı fonksiyonel birim, sistem sınırı ve servis ömrü altında doğrudan karşılaştıran çalışmaların sınırlı olması, yaşam döngüsü karşılaştırmasının temel belirsizliğini oluşturmaktadır.

Sonuç olarak, Avrupa'nın kentsel dönüşümü açısından tek ve evrensel bir çatı çözümü yerine hedefe ve bağlama duyarlı çatı seçimi öne

çıkılmaktadır. Isı ve bina enerji talebinin baskın olduğu, yapısal müdahale kapasitesinin sınırlı kaldığı koşullarda serin çatılar daha doğrudan bir katkı profili sunarken; yağmur suyu yönetimi, yeşil altyapı ve çoklu ekosistem işlevlerinin öncelikli olduğu koşullarda mavi-yeşil çatıların katkı alanı genişlemektedir. Bu nedenle iki sistem, birbirinin doğrudan alternatifi olmaktan çok, iklim, bina özellikleri, yapısal kapasite, su yönetimi gereksinimi ve yaşam döngüsü performansına göre seçilebilecek tamamlayıcı çatı stratejileri olarak değerlendirilebilir.

REFERANSLAR

- Almaaitah, T., Drake, J., ve Joksimovic, D. (2022). Impact of design variables on hydrologic and thermal performance of green, blue-green and blue roofs. *Blue-Green Systems*, 4(2), 135–155. <https://doi.org/10.2166/bgs.2022.016>
- Almaaitah, T., ve Joksimovic, D. (2022). Hydrologic and thermal performance of a full-scale farmed blue-green roof. *Water*, 14(11), 1700. <https://doi.org/10.3390/w14111700>
- Andenæs, E., Time, B., Muthanna, T. M., Asphaug, S. K., ve Kvande, T. (2021). Risk reduction framework for blue-green roofs. *Buildings*, 11(5), 185. <https://doi.org/10.3390/buildings11050185>
- Busker, T., de Moel, H., Haer, T., Schmeits, M., van den Hurk, B., Myers, K., Cirkel, D. G., ve Aerts, J. (2022). Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes. *Journal of Environmental Management*, 301, 113750. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113750>
- Cristiano, E., Lai, F., Deidda, R., ve Viola, F. (2023). Management strategies for maximizing the ecohydrological benefits of multilayer blue-green roofs in Mediterranean urban areas. *Journal of Environmental Management*, 343, 118248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118248>
- De Masi, R. F., Gigante, A., Ruggiero, S., Russo, A., ve Papadaki, D. (2025). Would climate change reduce the negative impact of cool roof on the winter energy balance? Optimization study starting from monitored data on different roof types and weather zones. *Energy*, 328, 136645. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136645>
- Energy Code Ace. (2020). Residential cool roofs and reroofing: 2019 Title 24, Part 6. <https://coolroofs.org/documents/FactSheet.Res-CoolRoof.2019-010320v2.pdf>
- European Commission. (2024). EU missions: 100 climate-neutral and smart cities—Cities on a journey to climate neutrality. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/169604>
- European Commission, Directorate-General for Environment. (2025). European water resilience strategy. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2779/0686902>
- European Commission. (2026). Calculation framework for new building life-cycle global warming potential. Directorate-General for Energy.

- European Parliament & Council of the European Union. (2024a). Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union.
- European Parliament & Council of the European Union. (2024b). Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on nature restoration and amending Regulation (EU) 2022/869. Official Journal of the European Union.
- Föllmi, D., Corpel, L., Solcerova, A., ve Kluck, J. (2023). Influence of blue-green roofs on surface temperature and indoor temperature on building scale. *Nature-Based Solutions*, 4, 100076. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100076>
- Hamidiaala, S., Shirkhani, H., Mohammadian, A., ve Duchesne, S. (2026). A review of real-time control approaches in nature-based solutions for enhanced stormwater management: Applications in green and blue-green roof systems. *Urban Climate*, 66, 102834. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102834>
- Jia, S., Weng, Q., Yoo, C., Xiao, H., ve Zhong, Q. (2024). Building energy savings by green roofs and cool roofs in current and future climates. *npj Urban Sustainability*, 4, Article 23. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00159-8>
- Johnson, D., Kleespies, L., Bluhm, H., Lenk, C., ve Dehnhardt, A. (2026). Do sponge city concepts collide with climate mitigation goals? A life-cycle analysis of green roofs for stormwater retention. *Cleaner Environmental Systems*, 23, 100508. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2026.100508>
- Meier, H. (t.y.). *How is energy efficiency of cool roofs measured?* Sika. <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/cool-roofs-and-energy-efficiency.html> adresinden 8 Temmuz 2026 tarihinde alınmıştır.
- Meng, E., Yang, J., Cai, R., Zhou, B., ve Wang, J. (2022). Experimental comparison of summer thermal performance of green roof (GR), double skin roof (DSR) and cool roof (CR) in lightweight rooms in subtropical climate. *Journal of Building Physics*, 45(6), 809-832. <https://doi.org/10.1177/17442591211040545>
- Mourou, C., Bonoli, A., Zamorano, M., ve Martín-Morales, M. (2025). Environmental impact of roof tiles using recycled waste glass coatings: A Life Cycle Assessment approach. *Building and Environment*, 270, 112481. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112481>
- Ouldboukhitine, S.-E., Bakkour, A., Amziane, S., & Belarbi, R. (2024). A comparative study of energy performance of Green, White, and gravel roofs in a temperate climate through In-Situ measurement and dynamic simulation. *Energy and Buildings*, 320, 114630. DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114630.
- Pons Fiorentin, D., Martín-Gamboa, M., Rafael, S., ve Quinteiro, P. (2024). Life Cycle Assessment of green roofs: A comprehensive review of methodological approaches and climate change impacts. *Sustainable Production and Consumption*, 45, 598–611. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.004>
- RESILIO. (t.y.). *Smart blue-green roofs*. Erişim tarihi: 24 Eylül 2026. RESILIO – Smart Blue-Green Roofs
- Richter, M., ve Dickhaut, W. (2023). Long-term performance of blue-green roof systems—Results of a building-scale monitoring study in Hamburg, Germany. *Water*, 15(15), 2806. <https://doi.org/10.3390/w15152806>

- Rizzo, G., Cirrincione, L., La Gennusa, M., Peri, G., ve Scaccianoce, G. (2023). Green roofs' end of life: A literature review. *Energies*, 16(2), 596. <https://doi.org/10.3390/en16020596>
- Scolaro, T. P., ve Ghisi, E. (2022). Life cycle assessment of green roofs: A literature review of layers, materials and purposes. *Science of the Total Environment*, 829, 154650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154650>
- Scolaro, T. P., & Ghisi, E. (2025). Assessing the energy and economic performance of green and cool roofs: A life cycle approach. *Sustainability*, 17(13), 5782. DOI: 10.3390/su17135782.
- Wang, X., Li, H., ve Sodoudi, S. (2022). The effectiveness of cool and green roofs in mitigating urban heat island and improving human thermal comfort. *Building and Environment*, 217, 109082. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>
- Yan, J., Zhang, F., Zhang, S., Liu, W., Zhang, S., Li, R., He, Y., ve Wang, K. (2024). Stormwater retention capacity of blue-green roofs with various configurations: Observational data and modelling. *Journal of Hydrology*, 645, 132092. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132092>
- Yan, X., Liu, J., Zhang, W., Wang, Z., Jia, R., Wang, L., Liu, N., ve Zhu, Y. (2025). Examination of green roofs' cooling effects in a big city based on multi-source remote sensing data: An example from central Xi'an, China. *Sustainable Cities and Society*, 130, 106545. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106545>
- Yazdani, H., ve Baneshi, M. (2021). Building energy comparison for dynamic cool roofs and green roofs under various climates. *Solar Energy*, 230, 764–778. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.076>

Maden Göllerinin Yangın Havuzu (Su Toplama Çukuru) Olarak Kullanılması

Mehmet ÖZÇELİK¹

1- Prof. Dr.: Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ozcelikmehmet@sdu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4511-1946

ÖZET

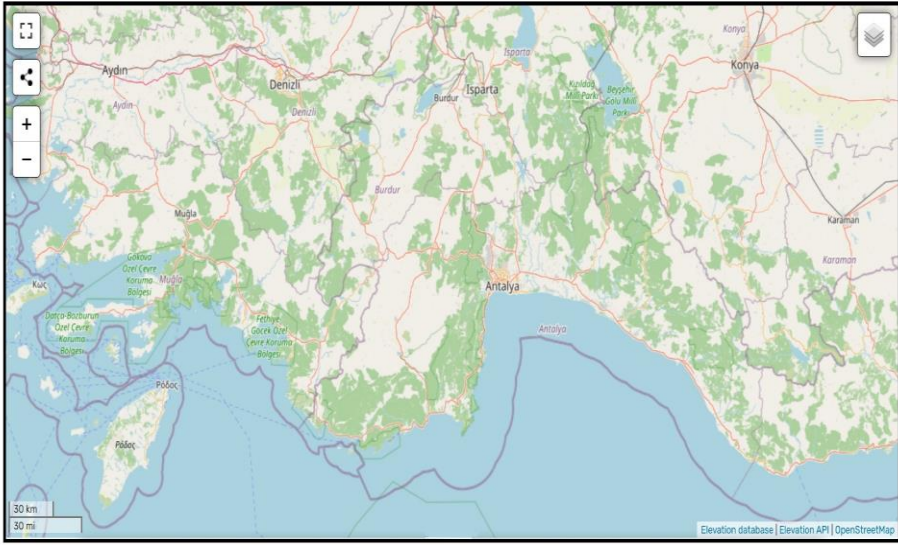
Terk edilmiş maden çukurları ve maden gölleri, maden ocağının kapanışından sonra önemli problemler oluşturabilmektedir. Toplum tarafından maden göllerinin, özellikle çevre açısından, maden kapatma sırasında önemli prosesler içerdiği giderek daha fazla kabul görmektedir. Özellikle son yüzyılda birçok ülkede açık ocak madenciliği yapılmaktadır. Günümüzde ise terk edilmiş maden çukurları ile birlikte oluşan maden göllerinin de uzun vadeli ve önemli sağlık, güvenlik ve çevresel riskler oluşturduğu ve bunların çözülmesinin zor olduğu kanıtlanmıştır. Bu durum genellikle açık ocak gölünde oluşan suyun kalitesine ve özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Maden gölleri genellikle bölgesel fayda sağlama ve hem kendi hem de genel proje kapanışının kalan risklerini ele alma ve hatta yeni kullanım alanları yaratarak madenciliğin çevresel maliyetlerini dengeleme fırsatları da sunabilmektedir. Bu fırsatlar büyük ölçüde su kalitesine, eğim duraylılığına ve güvenlik sorunlarına bağlıdır. Ne yazık ki, birçok maden çukurları, herhangi bir kullanım amacı için yeniden değerlendirilmeden terk edilmeye devam etmiştir. Terk edilmiş maden çukurları ve maden göllerinin yangın havuzu (su toplama çukuru) olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Şöyle ki, günümüzde orman yangınlarının artan sıklığıyla birlikte, çevre, ekosistemler ve topluluklar için de ciddi sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Orman yangınlarının daha sık ve yoğun hale gelmesi dolayısıyla bu konunun önemi tartışılmazdır. Bu çalışmada batı Akdeniz bölgesinde bulunan terk edilmiş veya faal maden çukurları ile birlikte maden göllerinin yangın havuzu olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Terk edilmiş maden çukuru; maden gölü; yangın havuzu; su toplama çukuru

GİRİŞ

Maden çukurlarında oluşan maden gölleri, açık ocak maden boşluklarının madencilik ve su tahliyesi sona erdikten sonra suyla dolmasıyla kasıtlı veya kasıtsız olarak oluşmaktadır. Dünyada terk edilmiş maden çukurlarının yeniden değerlendirilmesine ilişkin birçok kullanım amacı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan başlıcaları; pasif ve aktif rekreasyon, doğa koruma, balıkçılık ve su ürünleri yetiştiriciliği, içme ve endüstriyel su depolama, sera gazı karbon fiksasyonu, selden korunma ve su yolu iyileştirme, maden ve diğer atıkların bertarafı, maden suyu arıtma ve muhafaza, eğitim ve araştırmadır. Bu çalışmada batı Akdeniz bölgesinde bulunan terk edilmiş maden çukurları veya maden göllerinin yangın havuzu olarak değerlendirilmesi konusu ele alınmıştır. Dünya genelinde artan orman yangınları sayısı, kötüleşen küresel iklim durumundan da etkilenmektedir. Yakıt yığılması veya kentleşme gibi çeşitli orman yönetimi uygulamaları,

orman yangınlarının oluşumunu ve yoğunluğunu olumsuz etkiler. Az sayıda itfaiyeci ve gönüllünün bulunduğu uzak bölgeler, yangınların geniş alanlara hızla yayılmasını engelleyemez (Stoks vd. 2002, Tedim vd. 2015). Akdeniz Bölgesi de, yüksek sıcaklıklar, kurak yaz iklimi ve kuvvetli rüzgar nedeniyle Türkiye'de orman yangını riskinin en yüksek olduğu alandır. Bölgede yaz aylarında artan hava sıcaklıkları ve insan ihmalleri, kritik orman yangınlarına yol açmaktadır. Batı Akdeniz Bölgesi'nde ise dağlar ormanlık bölgelere sınır oluşturur ve ormanlık bölgeler daha kıyı kısımlarla sınırlı kalmaktadır (Şekil 1). Bu sebepler Akdeniz Bölgesinde yangın alanlarının büyümesine neden olmaktadır.



Şekil 1. Batı Akdeniz bölgesinde ormanlık alanların dağılımı

AKDENİZ BÖLGESİNDEKİ MADENCİLİK FAALİYETLERİ

Akdeniz Bölgesi, boksit, krom ve kükürt başta olmak üzere zengin endüstriyel hammadde ve metal yataklarına sahiptir. Bölge, alüminyumun ham maddesi olan boksit ile enerji ve sanayi sektörü için kritik önem taşıyan madenlerin merkezidir. Akdeniz Bölgesi, zengin mermer ve doğal taş potansiyeline sahiptir; özellikle Burdur, Isparta ve Antalya illeri yoğunlaşma alanlarıdır. Bölge, farklı renk ve desen seçenekleri sunan taş yapılarıyla ülke ekonomisine katkı sağlamaktadır (Şekil 2).



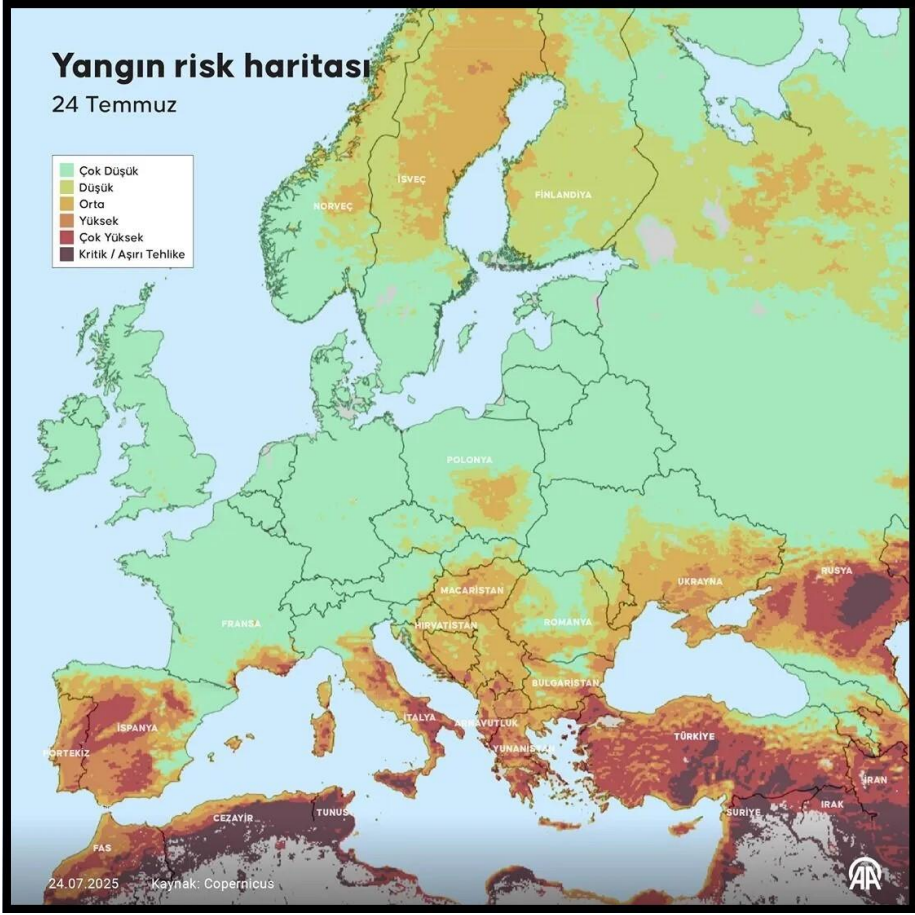
Kaynak: <http://www.mermerbank.com> 2020

cografyaharita.com R.SAYGILI 2020

Şekil 2. Türkiye mermer madeni haritası

ORMAN YANGINLARINDA YANGIN HAVUZLARININ (SU TOPLAMA ÇUKURU) ÖNEMİ

Ormanlar, farklı bitki ve hayvan türleri için yaşam alanıdır. İklimi düzenler, toprağı erozyondan korur ve su döngüsünde önemli bir rol oynar. Önemli bir ekonomik ve sosyal kaynak oluşturmalar (Tomašková vd. 2025). Çeşitli endüstriler için hammadde olarak odun sağlarlar, turizm ve rekreasyon faaliyetlerini desteklerler ve orman yönetimi ve odun işleme alanlarında iş imkanları yaratırlar (Monosi vd. 2015). Her yıl Avrupa'da binlerce hektar ormanı yok eden, hem doğrudan hem de dolaylı hasara neden olan yıkıcı orman yangınları meydana gelmektedir (Şekil 3). Doğrudan hasar, yaşayan ağaçların yok edilmesi veya hasar görmesi, yangın bölgesinde bulunan odunsu malzemenin bozulması ve ormanın diğer üretken veya üretken olmayan işlevlerinin bozulması veya aksaması gibi durumları içerir. Çeşitli zararlıların ortaya çıkması veya ormanlık alanların fizyolojik olarak zayıflaması dolaylı hasar olarak değerlendirilebilir. Son yıllarda, Avrupa Birliği üye devletleri bir dizi ölümcül yangından etkilenmiştir. Yüzlerce insan hayatını kaybetmiş ve hasar milyarlarca avroya ulaşmıştır (West vd, 2023).



Şekil 3. Avrupa ve Akdeniz kuşağı yangın risk haritası

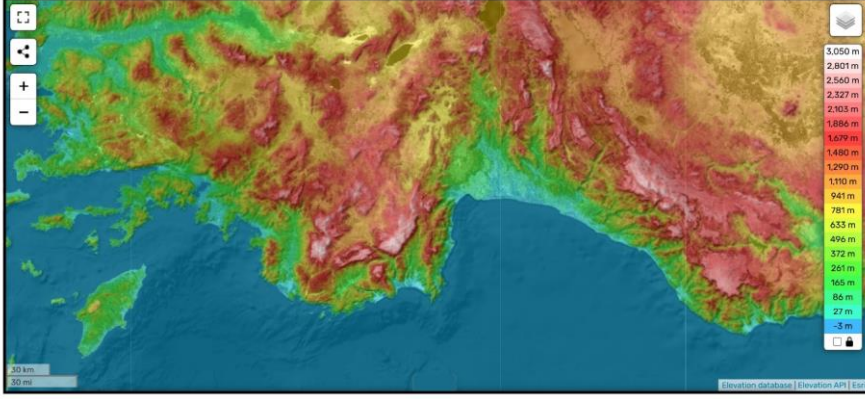
Yangın havuzlarının (su toplama çukuru), stratejik olarak belirlenmiş ve orman yangınlarına yatkın alanlarda hızlı ve istikrarlı bir su temini sağlayarak, yangın söndürme operasyonlarının verimliliğini artırır ve acil durum ekipleri için riskleri azaltır. Yüksek riskli bölgelerin, ormanlık alanların ve savunmasız toplulukların yakınında stratejik olarak konumlandırılan bu rezervuarların yerleri, helikopterlerin erişilebilirliği ve risk altındaki nüfusa yakınlık gibi hususlar dikkate alınarak belirlenir. Ayrıca, yerleşimleri, geçmiş yangın verileri, mevcut su kaynakları, arazi mülkiyeti, yol erişilebilirliği, coğrafi yükseklik ve risk çalışmaları gibi kritik alanları belirleyen diğer değişkenlere dayanarak belirlenir.

Akdeniz iklimindeki bölgelerde, kuraklıkta bile büyüyeabilen Akdeniz bitkileri yetişir. Bu bitkiler, temel olarak orman ve çalılık alanlarında, özellikle makilik gibi yerlerde bulunan bitki örtüsünün bir parçasıdır. Bu iki bitki örtüsü türü, Akdeniz coğrafyasında birbirinin yerine geçebilecek şekilde varlığını sürdürüyor. Akdeniz bölgesi de dahil olmak üzere her yaz döneminde o

bölgede olduğu gibi çok sayıda orman yangını çıkmaktadır. Orman yangınları, etkileri ve doğurduğu sonuçlar açısından küresel ölçekte en ciddi doğal afetlerden biridir. Türkiye, Avrupa yangın risk haritasına göre hâlâ riskli bir alandadır (Şekil 4). İstatistiksel veriler incelendiğinde ülkemizde orman yangınlarının yapılarının değişken olduğu görülmektedir. Ancak son yıllarda nüfusun artmasıyla birlikte yangın sayısı önemli ölçüde artmaktadır. Bu durum, erozyon, heyelan, çölleşme, kütle kaybı ve doğanın döngüsünün bozulmasına neden oluyor. Yangınlardan sonra zarar gördüğünde ormanlar ve bitki örtüsü yenilenmesi, arazi yönetimi açısından çok büyük öneme sahiptir. Orman yangınlarının nasıl oluştuğu ve nasıl davrandığı tahmin edilmesi, yangınla mücadele çalışmaları için çok önemli bir durumdur. 2021 yılı yaz aylarında ülkemizin birçok bölgesinde, farklı boyutlarda ve şiddetlerde gerçekleşen yüzlerce orman yangını, yaklaşık 250 bin hektarlık alanları etkiledi. Söz konusu alanların neredeyse yarısını, Manavgat, Gündoğmuş, Köyceğiz, Marmaris ve Milas arasındaki bölgede büyük yangınlarla zarar görmüş ormanlar ve makilikler oluşturmaktadır. Orman Bölge Müdürlükleri tarafından yapılan değerlendirmelere göre, yangınlar yaklaşık 77 bin hektar orman alanını doğrudan etkiledi, yaklaşık 117 bin hektarlık bir alan ise dolaylı olarak etkilenmiştir

(<https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/ormanyanginlarweb.pdf>).

Yangınlar çok geniş alanlarda uzun süre devam ettiğinden, bu süreç boyunca farklı derecelerde yangın şiddetleri yaşanmıştır. Yanma şiddetleri “düşük”, “orta-düşük”, “orta-yüksek” olarak sınıflandırıldığında, “düşük” ve “orta-düşük” seviyedeki yangınların daha fazla görüldüğü tespit edilmektedir. Bu durum, yaşanan büyük yangınların, sadece yüksek şiddetten ziyade, daha geniş alanları etkilemesi açısından dikkat çektiğini göstermektedir. Yanan alanlarda topoğrafik yapısına bakıldığında; neredeyse hepsinde düşük (% 9-17) ve orta (% 17-36) eğimli alanlar bulunmakta ve bu alanlar genellikle kuzey ve güney yönünde bakıya sahiptir. Yangınların meydana geldiği alanlar, yükseklik katmanlarına göre incelendiğinde 0 ile 2000 metre arası hemen her yükseklikte farklı yoğunluklarda yangın görülmektedir. Ancak büyük yangınlar genellikle 600-1200 metre arasındaki doğal alanlarda yoğun olarak görülmektedir (Şekil 4). Manavgat, Milas ve Marmaris bölgelerinde yangınlar nedeniyle meydana gelen tahribatlar, çoğunlukla 0-600 metre yükseklik aralığında yoğunlaşmaktadır. Bu bölge, kırsal yerleşimlerin, turizm ve tarım alanlarının olduğu yerlerle kesişmektedir. Bu yüzden yangınların sosyo-ekonomik etkileri oldukça yüksektir. (https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/ormanyanginlarweb.pdf.)



Şekil 4. Batı Akdeniz Bölgesi Yükseklik Haritası

TERK EDİLMİŞ VEYA FAAL MADEN ÇUKURLARI İLE MADEN GÖLLERİNİN YANGIN HAVUZU (SU TOPLAMA ÇUKURU) OLARAK KULLANIMI

Orman yangınlarının önlenmesi, yangınlar meydana geldikten sonra hızlı müdahalenin edilmesi, tahribatın tespit edilmesi ve olumsuz etkilerin giderilmesi için yangınların, bütünsel şekilde sürdürülebilir arazi yönetimi perspektifinde değerlendirilmesi gerekmektedir (Coruhlu et al., 2020). Dünyada günümüze kadar birçok orman yangını meydana gelmiş ve milyonlarca ha orman alanı tahrip ya da yok olmuştur. Terk edilmiş maden çukurlarının kullanım modelleri dört açıdan sınıflandırılabilir: Enerji depolama, Atık işleme, Ekolojik restorasyon ve karbondioksit (CO_2) tutma. Pompalı depolama, basınçlı hava depolama, tuz mağarası gaz/petrol depolama inşaatı, karbondioksit depolama ve kullanımı, radyoaktif atık bertarafı ve işlenmesi ve turizm geliştirme gibi terk edilmiş madenlerin bir dizi uygulama ve kullanım alanı bulunmaktadır. Terk edilmiş veya faal maden çukurlarının yangın havuzu (su toplama çukuru) olarak kullanılması, özellikle ormanlık alanlar, sanayi bölgeleri veya yerleşim yerlerinde yangınlara havadan hızlı müdahale edebilmek amacıyla uygulanan bir yöntem olabilecektir (Şekil 5).



Şekil 5. Örnek yangın havuzu görünümü

Açık ocak madenciliği sonucu oluşan bu çukurlar, helikopterlerin su ikmali için hayati bir su rezervi oluşturabilecektir (Şekil 6).



Şekil 6. Terk edilmiş maden ocağında oluşan maden gölü

Orman yangınlarını kontrol altına almak için çeşitli teknikler mevcuttur. Bunlardan biri, yakınlardaki rezervuarlardan yangın bölgesine Bambi Kova sistemleri (genellikle yaklaşık 2000 litre kapasiteli) kullanarak su taşıyan helikopterlerin kullanılmasıdır. Stratejik olarak konumlandırılmış rezervuarların varlığı, yangından etkilenen bölgeye yakın bir alanda verimli su temini sağlayarak helikopter operasyonlarını kolaylaştırır. Bu da

operasyonel verimliliğin artmasına, kapsama alanının genişlemesine ve riskin azalmasına yol açar. Bu azaltma yaklaşımı için su rezervuarlarının konumunun bilinmesi önemlidir. Helikopterin su toplamak için ne kadar uzağa gitmesi gerekiyorsa, geri dönmesi o kadar uzun sürer ve bu da yangının yayılmasını potansiyel olarak kolaylaştırabilir (Şekil 7).



Şekil 7. Bambi Kova sistemleri (genellikle yaklaşık 2000 litre kapasiteli) kullanarak su taşıyan helikopterlerin kullanılması (OGM, 2026)

SONUÇ

Son yıllarda dünya genelinde orman yangınları artış göstermekte ve bu durum ormansızlaşmaya neden olmaktadır. Batı Akdeniz bölgesi küresel iklim değişikliğinin artırdığı orman yangınlarına karşı yüksek tehdit altında bulunmaktadır. Bu yüzden, meydana gelen orman yangınlarının söndürülmesinde ihtiyaç olan suyun temini için terk edilmiş veya faal maden çukurları ile maden göllerinin yangın havuzu (su toplama çukuru) olarak kullanılmasının alternatif bir çözüm olacağı düşünülmektedir. Bundan dolayı, Türkiye'nin güneyindeki Batı Akdeniz Bölgesi çalışma alanı olarak seçilmiş ve terk edilmiş veya faal maden çukurları ile maden gölleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, terk edilmiş veya faal maden çukurları ile maden göllerinin yangın havuzu (su toplama çukuru) olarak kullanılabilmesi için kullanılması planlanan suyun kalitesinin, coğrafi konumunun ve jeopolitik risklerinin araştırılması gerekmektedir. Maden göllerinin yangın havuzu (su toplama çukuru) olarak kullanılması sistemi tüm koşullar için uygun bir çözümdür. Erişilemeyen dağlık bir ortamda yangın çıkarsa ve durum hava koşulları (veya diğer olumsuz faktörler) nedeniyle daha da karmaşıklarsa, yangın sahasına su sağlamak için bir gölet sistemi kullanmak en uygundur.

Başlıca avantajı, aşırı arazi koşullarında söndürme için gerekli su akışlarını sağlamanın mümkün olmasıdır. Yangın havuzu kullanımı ile ormanların korunması, en iyi şekilde yönetilmesi, gelecek nesillere aktarılması, orman yangınlarının azaltılması ve önlenmesine katkıda bulunabilecektir.

REFERANSLAR

- Hacettepe Üniversitesi, 2021. Akdeniz Bölgesindeki Büyük Orman Yangınlarının Sebepleri Ve Yangın Sonrası Yapılması Gerekenler Hakkında Rapor, Ağustos 2021 (https://yunus.hacettepe.edu.tr/~ctavsan/papers/Hacettepe_Universitesi_yangin_rapor_2021.pdf)
<https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/ormanyanginlarweb.pdf>
- Monoši, M.; Majlingová, A.; Kapustniak, J. Lesné Požiare; EDIS—Vydavatel'stvo ŽU: Žilina, Slovakia, 2015; ISBN 978-80-554-0971-9.
- West, A.G.; Bloy, S.T.; Skelton, R.P.; Midgley, J.J. Hydraulic segmentation explains differences in loss of branch conductance caused by fire. *Tree Physiol.* 2023, 43, 2121–2130.
- Stocks, B.J.; Mason, J.A.; Todd, J.B.; Bosch, E.M.; Wotton, B.M.; Amiro, B.D.; Flannigan, M.D.; Hirsch, K.G.; Logan, K.A.; Martell, D.L.; et al. Large forest fires in Canada, 1959–1997. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2002, 107, FFR-5.
- Tedim, F.; Xanthopoulos, G.; Leone, V. Forest Fires in Europe: Facts and Challenges. *Wildfire Hazards, Risks and Disasters*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015; pp. 77–99.
- Tomašková, M., Pokorný, J., Krajňák, J. ve Balážiková, M. (2025). Assessment of Risk Factors of Critical Points in Forest Firefighting in Difficult-to-Access Sites. *Fire*, 8 (1), 11. <https://doi.org/10.3390/fire8010011>

Mersin Ovacık Kuvarsit Ocağının Jeolojik Özellikleri ve Endüstriyel Süreçlerde Kullanımı

Mehmet ÖZÇELİK¹

1- Prof. Dr.: Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, ozcelikmehmet@sdu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4511-1946

ÖZET

Kuvars kumu önemli bir endüstriyel mineral hammaddesidir. Su arıtma, cam üretimi, mekanik döküm, yapay kuvars taşı, metalurji, seramik, fonksiyonel dolgu maddeleri, süper sert malzemeler, kimyasallar, petrol, fiberglas, kalsiyum silikat levhalar, fotovoltaik, yarı iletkenler, aydınlatma, optik fiberler, havacılık ve optik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın konusunu oluştura Mersin Ovacık ocak sahasından yıllık maksimum 700.000 ton/yıl Kuvarsit üretimi gerçekleştirilmektedir. Mersin Ovacık maden sahasından yıllık maksimum 500.000 ton/yıl Kuvarsit üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, Mersin Ovacık kuvarsit ocağının jeolojik özellikleri ve endüstriyel süreçlerde kullanımı değerlendirilmiştir. Ocaktan çıkarılan kuvars kumları ve kuvarsitler, tüketicilerin taleplerine göre cevher hazırlama tesislerinde eleme, ufalama, yıkama, de-slam, flotasyon ve/veya manyetik ayırma, sınıflandırma ve kurutma işlemlerine tabi tutulmakta olup yüksek silika (SiO_2), düşük oksit ve az miktarda ağır mineral içermektedir. Bölgede cam üretimi yapan fabrikalar için gerekli olan kuvarsit hammaddesinin büyük bir kısmı Mersin Ovacık Kuvarsit maden ocağından temin edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kuvars kumu, kuvarsit, endüstriyel hammadde, endüstriyel kullanım, Mersin

GİRİŞ

Kuvars kumu yüksek oranda silikon dioksit içerdiğinden, cam üretiminde en önemli malzemelerden biridir. Ancak, her yıl çıkarılan 50 milyar ton kumun %1'inden azının gerekli standartları karşıladığı göz önüne alındığında, tüm kum yataklarının cam üretiminde kullanılmak için gerekli saflıkta olmayacağını belirtmek gerekir (ACS, 1991). Kullanılan kuvars kumunun saflık derecesi, üretilen camın dayanıklılığı, mukavemeti ve şeffaflığı gibi özelliklerini doğrudan etkileyecektir. Araç ön camları gibi ürünler için, yalnızca en yüksek kalitede silika kumu kullanmak son derece önemlidir. Çünkü bu cam, araç ön camlarının sahip olduğu optimum görüş gereksinimlerini karşılayacaktır. Aynı şekilde, yalnızca yüksek kaliteli silika kumundan yapılmış bina camı, güvenlik ve dayanıklılığı korurken gerekli termal veya ışık geçirgenliği özelliklerini karşılar. Kuvars hammaddesinin çıkarılması ve toz haline getirilmesi maliyetleri önemli ölçüde artırır ve bu nedenle kum, kristal sert kayalara göre çok daha ucuz ve ilgi çekici bir kaynak oluşturur. Kuvarsitin çıkarılması ve işlenmesi çok maliyetlidir (Götze, 2009; Santos vd., 2015; Suzuki vd., 2012; Haus vd., 2012; Sigue vd. 2020). Kuvars kumu rezervlerinin coğrafi konumu, çıkarma maliyetlerini önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, işleme tesislerine daha yakın konumdaki madencilik operasyonlarının ulaşım maliyetleri daha düşük olma eğilimindedir ve bu da

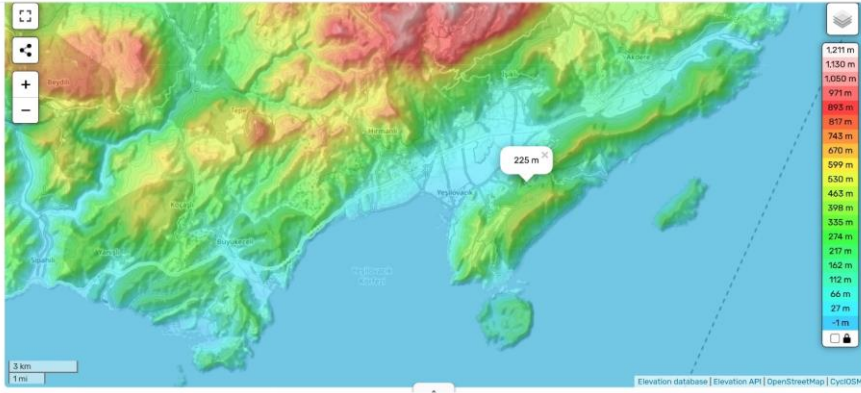


Şekil 2. Maden sahasının Koordinatları

Maden sahası ve yakınında sürekli akış gösteren dereler bulunmamakla beraber, yağışların yoğun olduğu dönemlerde kısa süreli akış gösteren kuru dere yatakları bulunmaktadır (Şekil 3). Yüzey drenajını sağlayan kuru dere niteliğindeki dereler, yılın 5-6 ayı kurudurlar. Bölge engebeli ve yükseklik farklarının fazla olduğu bir arazi yapısına sahiptir. Özellikle bölgede dağ serisini oluşturan morfoloji, tektonik etkilerin ve jeolojik birimlerin dizilimlerine bağlı olarak gelişmiştir. Dayanım ve sertliğe bağlı olarak sarp yamaçlardan oluşan engebeli bir morfolojiye sahiptir. Maden sahası ortalama 225 m kotunda yer almakta (Şekil 4) ve en yakın eve olan mesafesi 1 km dir.



Şekil 3. Maden ocağı yakınındaki kuru dere yatağı



Şekil 4. Bölgenin yükseklik Haritası

BÖLGENİN JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

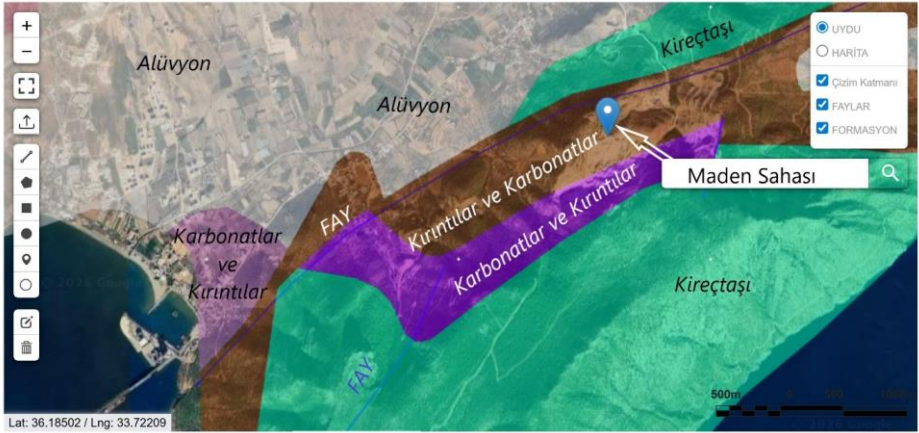
Mersin İli, Silifke İlçesi, Işıklı Mahallesi ve Hacıışaklı Mahallesi Mevkiinde yer alan inceleme alanı ve yakın çevresinde ise Geyik Dağı Birliği' nin Ovacık Tektonik Dilimlerine ait jeolojik birimler yer almaktadır. Ovacık Tektonik Diliminde tabanda silttaşı ve mercekssel konumlu dolomit, şeyl ve kuvarsitlerden oluşan Prekambriyen yaşlı Emirgazi Formasyonu; uyumsuz olarak üzerleyen mor kuvarsitlerden oluşan Erken Kambriyen yaşlı Zabuk Formasyonu; uyumlu olarak üzerleyen kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşından oluşan Orta-Geç Kambriyen yaşlı Çaltepe Formasyonu; alttaki formasyon ile geçişli şeyl, silttaşı ve yumrulu kireçtaşlarından oluşan Geç Kambriyen-Orta Ordovisiyen yaşlı Seydişehir Formasyonu; uyumlu olarak üzerleyen çakıltası ve kumtaşından oluşan Geç Ordovisiyen-Erken Silüriyen yaşlı Halıyayla Formasyonu ile uyumlu olarak üzerleyen şeyllerden oluşan Erken Silüriyen yaşlı Puşçutepe Şeyli; uyumlu olarak üzerleyen yumrulu kireçtaşı, kumlu kireçtaşı ve şeylden oluşan Geç Silüriyen-Erken Devoniyen yaşlı Karayar Formasyonu; uyumlu olarak üzerleyen dolomitik kireçtaşı, kuvars kumtaşı, şeyl ve kireçtaşından oluşan Erken Devoniyen yaşlı Ayıtepesi Formasyonu; uyumsuz olarak üzerleyen *Amphipora*'lı kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, kuvars kumtaşı, kuvarsit ve şeylden oluşan Orta Devoniyen yaşlı Şafaktepe Formasyonu; uyumsuz olarak üzerleyen taban çakıltası, kuvarsit, uyumlu olarak üzerleyen dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşından oluşan Geç Permian yaşlı Yığıltepe Formasyonu; uyumlu olarak üzerleyen marn, şeyl ve killi kireçtaşından oluşan Erken-Orta Triyas yaşlı Katarası Formasyonu; uyumsuz olarak üzerleyen yer yer dolomitik kireçtaşı ve çörtlü kireçtaşından oluşan Orta-Geç Triyas yaşlı Kuşyuvasıtepe Formasyonu; uyumsuz olarak üzerleyen dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşından oluşan Jura-Kretase yaşlı Köroğlutepesi Formasyonunu içermektedir (Alan vd. 2011; 2014)

MADEN SAHASI VE CİVARININ JEOLojİK ÖZELLİKLERİ

Maden ocağının tamamı İmamuşağı Formasyonu kireçtaşı üyesi içerisinde yer alan Kırıntılar ve Karbonatlar olarak tanımlanmışlardır (Şekil 5). Formasyon adını ilk kez Demirtaşlı (1987) vermiştir. Birim taban kesiminde, pembe renkli demirli kuvarsitlerle başlar, üste doğru sarımsı gri renkli, fusulin'ce zengin, kısmen oolitlik biyomikritlere geçmektedir. Formasyonun en üst kesimlerini alaca renkli şeyl, marn, kumlu kireçtaşı ardalanması ile bununda üzerinde pembe-beyaz renkli kuvarsitler oluşturur (Akarsu ve Ateş, 1992). Formasyon altındaki Korucuk Formasyonu ile açısız ve üzerindeki Kırtıldağı Formasyonu ile açısız uyumsuz ilişkilidir. Orta, Üst Karbonifer yaş aralığındadır. Ocak ve civarının Jeoloji Haritası Şekil 6 de verilmiştir.



Şekil 5. Maden ocağının bulunduğu İmamuşağı Formasyonunun görünümü



Şekil 6. Maden sahası ve civarının Jeoloji Haritası

MADEN SAHASI VE CİVARININ HİDROJEOLÖJİK ÖZELLİKLERİ

Maden ocağının bulunduğu bölge genelinde mostra veren jeolojik birimlerin hidrojeolojik özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

Geçirimli Birim: Maden sahanın kuzeybatısında yer alan Işıklı yerleşim yerinden itibaren Yeşilovacık yerleşimine kadar devam eden Kuvaterner alüvyon birimleri görülmektedir. Bu birimler sahip ince taneli gözenekli yapıları ve içerdikleri ince taneli yapıların özelliklerinden dolayı iyi derecede su geçirgenliğine sahiptirler ve Geçirimli Birimler olarak adlandırılmıştır.

Yarı Geçirimli Birim: Çok küçük hidrolik iletkenliğe sahip, kuyu ya da kaynaklardan su çekimlerinde önemli ölçüde su vermeyen, yeraltı suyu kütleleri arasındaki geçirgenliğin sınırlı sayıda olduğu, komşu akiferlerdeki yeraltı suyunu etkileyen az geçirimli olarak ifade edilebilen hidrojeolojik formasyonlara Yarı Geçirimli Birim denilmektedir. Bölgedeki kireçtaşı birimleri sahip oldukları kırıklı çatlaklı yapıları ve kimyasal çözünme potansiyelleri ile Yarı Geçirimli potansiyel akiferler olarak görülmektedir ve Yarı Geçirimli Birim-1 olarak sınıflandırılmıştır. Kumtaşı-çamurtaşı-kireçtaşı birimlerin sahip olduğu içerik özelliklerinin yoğunluk miktarı doğrultusunda yarı geçirimli bir davranış sergilemektedirler. Ancak bölgedeki bu birimlerin birlikte tektonik etkiler ile kesilip ötelendiği bir diğer birim olan ve bu yapıyı çevreleyen kireçtaşları kırık çatlaklar arasını doldurması ve kestiği birimlerin içeriğindeki çamurlu-kumlu kayaların bu kırık ve çatlaklı yapıları doldurması ihtimali ile yarı iletkenli bir yapıya sahip olacağı düşünülmektedir. Bu birimlerin sahip oldukları az geçirimlilik özelliği ile Yarı Geçirimli Birim-2 birimini oluşturmaktadırlar. Tektonizma etkisi ile Tersiyer yapıya sahip olan ve çalışma sahasını da içerdiği görülen Üst Silüriyen-Alt Devoniyen yaşlı ve çalışma bölgesi özelinde, çalışma bölgesi de dahil en çok yüzlek veren birim olan kumtaşı-çamurtaşı ardalanmalı kireçtaşı birimleri Yarı Geçirimli Birim-

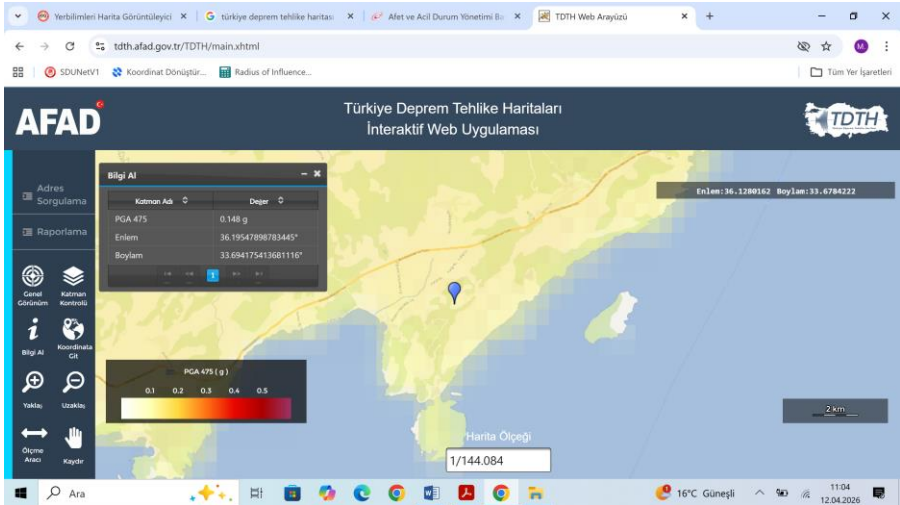
3 olarak adlandırılmıştır. Maden Ocağı ve civarının Hidrojeoloji Haritası Şekil 7 de verilmiştir.



Şekil 7. Maden sahası ve civarının Hidrojeoloji Haritası

MADEN SAHASININ BULUNDUĞU BÖLGENİN DEPREMSELLİĞİ

Maden sahasını içine alan Mersin İli, Silifke İlçesi, AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından yenilenmiş, 18.03.2018 tarihli ve 30364 sayılı (mükerrer) Resmi Gazete’de yayımlanmış ve 01.01.2019 tarihinde yürürlüğe Türkiye Deprem Tehlike Haritası’na göre yer ivmesi değeri 0,148 g’dir. Türkiye Deprem Tehlike Haritası Şekil 8 de verilmiştir.



Şekil 8. Türkiye Deprem Tehlike Haritası

KUVARS KUMUNUN ENDÜSTRİYEL SÜREÇLERDE KULLANIMI

Kuvars kumu önemli bir endüstriyel mineral hammaddedir. Su arıtma, cam ve döküm gibi geleneksel alanlar büyük miktarda kuvars kumu tüketmektedir. Ancak, arz ve talep genellikle dengelidir. Fotovoltaik, yarı iletkenler, aydınlatma, optik fiberler, havacılık ve optik gibi üst düzey uygulamalar, yüksek saflıkta ve ultra yüksek saflıkta kuvars kumu yaygın olarak kullanılmaktadır. Kuvars kumu rezervlerinin coğrafi dağılımı, yalnızca çıkarımı değil, aynı zamanda tedarikle ilgili ulaşım maliyetlerini de etkiler. Yüksek saflıkta kuvars kumu bakımından zengin bölgeler, daha düşük ulaşım maliyetleri sayesinde tedarikçilerin daha uygun fiyatlar sunabilmesi nedeniyle rekabet avantajına sahip olabilir. Tersine, büyük pazarlardan daha uzakta bulunan tedarikçiler daha yüksek maliyetlerle karşılaşabilir ve bu da pazardaki rekabet güçlerini korumak için fiyatlandırma stratejilerinde ayarlamalar yapmalarına yol açabilir. Türkiye'deki kuvarsit rezervleri 6,3 milyar ton ve kuvars kumu potansiyeli yaklaşık 65 milyon tondur. Türkiye'de Mersin, Antalya, Zonguldak, Kastamonu, İstanbul, Aydın, Muğla, Adana, Yozgat ve Denizli'de kuvars rezervleri bulunmaktadır. Kuvars kumu rezervlerinin Fe_2O_3 içeriği % 0,95-0,11 aralığındadır (Aykanış ve Kılıç, 2009). Kuvarsit maden ocaklarından gelen cevher, cevher hazırlama bölümünde boyuta göre sınıflandırma ve demirli minerallerin yüzdürülmesi yöntemiyle cam speklerine uygun hale getirilmektedir. Kamyonlar vasıtasıyla gelen cevher kapalı stokhol alanında depolanmaktadır. Stokholdeki hammadde günlük üretim planlamalarına göre ara silolara alınmaktadır. Ara siloya alınan hammadde cevher öğütme işlemi için değirmenlere beslenmektedir. Değirmenlerde öğütülen malzeme kapalı devre sonrası eleklerle beslenmektedir hidrosiklon gruplarına beslenmektedir. Hidrosiklon grupları alt akımları (iri boyutlu malzeme) flotasyon ünitelerine beslenirken, üst akımlar (ince boyutlu malzeme) ise atık olarak sistemden uzaklaştırılmak üzere çökeltim havuzlarına kapalı boru sistemi ile iletilecektir. Çökeltim havuzları betonarme yapıdadır. Flotasyon işleminden sonra yüzen malzemeler (atık) sistemden uzaklaştırılırken (çökeltim havuzuna), ürün (batan malzeme) susuzlandırma amacıyla susuzlandırma hidrosiklonlarına beslenecektir. Silo üstü hidrosiklon gruplarında susuzlandırılan malzeme (siklon alt akımı) spiral klasifikatörlere beslenecek, ince malzeme (hidrosiklon üst akımı) ise çökeltim havuzuna iletilecektir. Spiral klasifikatörlere beslenen malzeme nem içeriği yaklaşık %20-25 seviyelerine getirilerek spiral klasifikatör üst akımından ürün silolarına (drenaj siloları) alınacaktır. Spiral klasifikatör taşan ince malzeme ise çökeltim havuzuna ünitelerine aktarılacaktır. Drenaj silolarına alınan malzeme sevkiyat için uygun olan nem içeriğine ulaşana kadar (%5-8) silolar içerisinde dinlendirilecektir. Silolarda istenilen nem oranına ulaşan malzeme bant konveyörler vasıtasıyla cam fırını harman silolarına nakledilecektir. Sonrasında cam üretim prosesi başlayacaktır. Silika kumu ile cam üretme süreci oldukça basittir ve temel bileşenlerin karıştırılıp

eritilmesini içerir. Başlıca bileşenler kireçtaşı, soda külü ve silika kumudur. Üretilen camın rengine veya kullanım amacına bağlı olarak, pigment gibi başka bileşenler de eklenebilir. Bu malzemeler, tamamen eriyene kadar 1600 °C'ye kadar ulaşabilen sıcaklıklarda bir fırında birlikte eritilir. Daha sonra bu erimiş cam, kıvamını homojen hale getirmek ve içinde sıkışmış hava kabarcıklarını gidermek için karıştırılır. Bu aşamada, sürece yardımcı olmak için sodyum sülfat gibi kimyasallar eklenebilir. Bir sonraki adım olan erimiş camın kalıplanması da istenen ürüne bağlıdır. İşlem sonucunda, mercek gibi basit bir şekle sahip bir cam eşya ise, erimiş cam gerekli kalıba yerleştirilir ve soğumaya bırakılır. Cam paneller gerekiyorsa, erimiş cam erimiş kalay banyosuna yerleştirilir ve basınçlı azot ile şekillendirilir. Tipik olarak, bu işlem, camı düzgün bir şekilde düzleştirmek için haddeme makinelerinden geçirmeyi içerir. Cam ürün daha sonra tavlama işlemine tabi tutulur; bu işlem, oluşmuş olabilecek gerilim noktalarını gidermek ve camı güçlendirmek için 750 °F ile 1000 °F arasındaki sıcaklıklarda bir fırına veya ocak içine yerleştirilmesini içerir. Bundan sonra, cam nihai uygulamasında kullanılmaya hazırdır. Ocak sahasından yıllık maksimum 700.000 ton/yıl Kuvarsit üretimi gerçekleştirilmektedir. Mersin Ovacık maden sahasından yıllık maksimum 500.000 ton/yıl Kuvarsit üretimi gerçekleştirilmektedir. Elde edilen bu kuvarsit cevherleri zenginleştirme tesislerine sevk edilmektedir. Tesislere beslenen 1.200.000 ton/yıl cevherin %75'i (900.000 ton/yıl) prosese iletilirken geriye kalan %25 'lik kısmı (katı halde 300.000 ton/yıl) maden atığı olarak ayrılmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada, Mersin Ovacık kuvarsit ocağının jeolojik özellikleri ve endüstriyel süreçlerde kullanımı değerlendirilmiştir. İnceleme alanında yer alan jeolojik formasyonlar içindeki dolomit, kuvarslı kumtaşı, kireçtaşı ve kuvarsit birimleri ardalı bir yapı sunmaktadır. Ancak ocak bölgesinde yapılan çalışmalarda bölgesel tektonizmanın etkisi ile yer yer kıvrımlı bir yapı kazandığı görülmektedir. Maden ocağı üretim faaliyetleri ile kırma eleme tesisi işletilmektedir. Üretimde dozerler, yükleyiciler, ekskavatörler, kamyonlar ve konveyörler kullanılmaktadır. Ocaktan çıkarılan kuvars kumları ve kuvarsitler, tüketicilerin taleplerine göre cevher hazırlama tesislerinde eleme, ufalama, yıkama, de-slam, flotasyon ve/veya manyetik ayırma, sınıflandırma ve kurutma işlemlerine tabi tutulmakta olup yüksek silika (SiO₂), düşük oksit ve az miktarda ağır mineral içermektedir. Bölgede cam üretimi yapan fabrikalar için gerekli olan kuvarsit hammaddesinin büyük bir kısmı, Mersin Ovacık Kuvarsit maden ocağından temin edilmektedir.

REFERANSLAR

- ACS (1991). Anadolu Cam Sanayi A.Ş. Ovacık ve Kargıcak Kuvarsitik Kumtaşı Yataklarının Ekonomik Jeolojisi İle Maden İşletme ve Cevher Hazırlaması, Maden Müdürlüğü Raporu, ss 65.
- Akarsu H. ve Ateş MZ. (1992). Doğu Akdeniz Bölgesi Kuvarsit Kumtaşı Yataklarının Ekonomik Jeoloji Etüdü ve Feke Yöresi, Yatakların Maden İşletme ve Cevher Hazırlama Açısından İncelenmesi, ACS Maden Müdürlüğü Raporu, İçel.
- Alan İ, Şahin Ş, Elibol H, Altun İ, Keskin H, Bakırhan B, Balcı V, Böke N, Esirtgen T, Kop A. ve Hanılçı N. (2011). Orta Toroslar' ın jeodinamik evrimi Bozyazı-Aydıncık-Gülnar-Silifke (Mersin) yöresi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 11462, 201 s., Ankara (yayımlanmamış).
- Alan İ, Balcı V. ve Elibol H. (2014). 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Silifke-P 31 ve P 32 Paftaları, No: 222, 32 s. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- Aykamış AŞ. ve Kılıç AM. (2009). Doğu Akdeniz Bölgesinde Bulunan Mersin-Ovacık-Kargıcak Kuvarsit Yataklarının Doğal Radyoaktivite Ölçümleri, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Cilt:20-2
- Demirtaşlı E. (1987). Silifke batısında Hacıışaklı, Büyükeceli, Korucuk ve Akdere Köyleri arasında kalan bölgenin jeolojisi. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No: 8769, Ankara (yayımlanmamış).
- Götze J. (2009). Chemistry, textures and physical properties of quartz—geological interpretation and technical application. *Miner Mag* 73:645–671
- Haus R, Prinz S, Priess C. (2012). Assessment of high purity quartz resources. In: Götze J, Möckel R (eds) *Quartz: deposits, mineralogy and analytics*. Springer, Berlin, pp 29–51
- Santos MFM, Fujiwara E, Schenkel EA, Enzweiler J, Suzuki CK. (2015). Quartz sand resources in the Santa Maria Eterna formation, Bahia, Brazil: a geochemical and morphological study. *J S Am Earth Sci* 62:176–185
- Sigue, C., Moundi, A., Suh, C.E. et al. (2020) Assessment of shear zone-derived quartz from the Etam area, southwest Cameroon as potential high-purity quartz resource: petrography, geochemistry and technological studies. *SN Appl. Sci.* 2, 551. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2301-7>
- Suzuki CK, Santos MFM, Ono E, Fujiwara E. (2012). Strategic high quality quartz supply for fusion into silica glass. In: Varshneya AK, Schaeffer HA, Richardson KA, Wightman M, Pye D (eds) *Processing properties and applications of glass and optical materials: ceramic transactions*. The American Ceramic Society, Baltimore, pp 69–74

İklim Değişikliğinin Turizm Sektörüne Etkilerinin Değerlendirilmesi

Mehmet Sait ERCEK¹
Murat BATAN²

- 1- İnşaat Mühendisliğinde Doktora öğrencisi, Mehmet Sait ERCEK: Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, mehmentsait13@hotmail.com, ORCID No: 0009-0001-4663-3124
- 2- Dr..Öğr.Üyesi Murat BATAN; Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, murat.batan@batman.edu.tr , ORCID No: 0000-0002-9207-4730

Not: Bu çalışmanın özeti 9.Uluslararası Batı Asya Turizm Araştırmaları Kongresi, Bildiri Özetleri Kitabında yayınlanmıştır.

ÖZET

Çağımızın en önemli sorunları arasında gösterilen iklim değişikliği, birçok sektörü etkilediği gibi turizm sektörünü de hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkilemektedir. Özellikle doğa temelli turizm faaliyetleri, iklim değişikliğinden doğrudan etkilenirken iklim değişikliğinin sağlık, ekonomi, ulaştırma, sanayi vb. sektörlerde sebep olduğu olumsuz etkiler, turizm sektörünü dolaylı olarak etkilemektedir. Çalışmada iklim değişikliğinin turizm sektörü üzerindeki etkileri, literatür araştırması yapılarak tespit edilmiş ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini minimize etmek için bireysel, toplumsal, küresel çapta yapılması gereken çalışmalar ve alınması gereken önlemler belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen en önemli bulgulardan biri olan iklim değişikliğinin günümüzde ve gelecekte sebep olduğu küresel ortalama sıcaklık artışı; kıyı bölgelerinde deniz seviyesinin yükselmesine, kıyı erozyonunun artmasına ve bu nedenle yakın gelecekte sahildeki turizm merkezlerinin yer değiştirmek zorunda kalmasına, deniz canlılarının yok olmasına ve turistlerin sıcak bölgeleri terk etmesine sebep olmaktadır. Çalışmada elde edilen diğer önemli bir bulgu olan iklim değişikliğinin meydana getireceği yağışların azalması ise; kış turizminin yoğun olduğu bölgelerde kar yağışının azalmasıyla birlikte turizm faaliyetlerinin azalması veya tamamen ortadan kalkmasına, tarımsal faaliyetlerin olumsuz etkilenmesine sebep olacağı tespit edilmiştir. İklim değişikliğinin bazı kuzey bölgelerinde neden olacağı ısınmayla beraber turizm sektörünü olumlu yönde etkilese de genel itibari ile iklim değişikliğinin turizm sektörüne küresel ve yerel ölçekte olumsuz etkileri olacağı belirlenmiştir. Bu çalışmanın iklim değişikliğinin etkilediği turizm sektörü çalışanlarına ve sektör paydaşlarına yararlı olacağı düşünülmektedir.

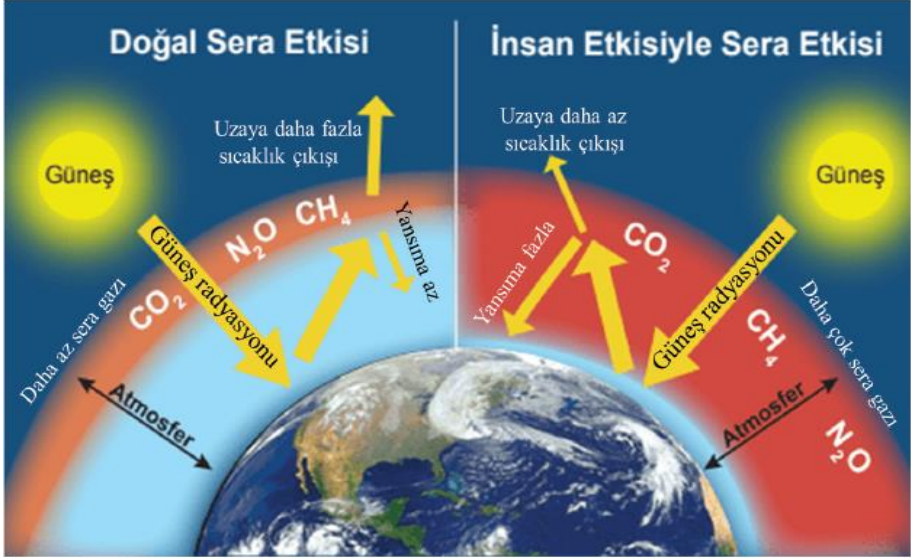
Anahtar Kelimeler – İklim değişikliği, Turizm sektörü, Çözüm Önerileri

GİRİŞ

İklim Değişikliği

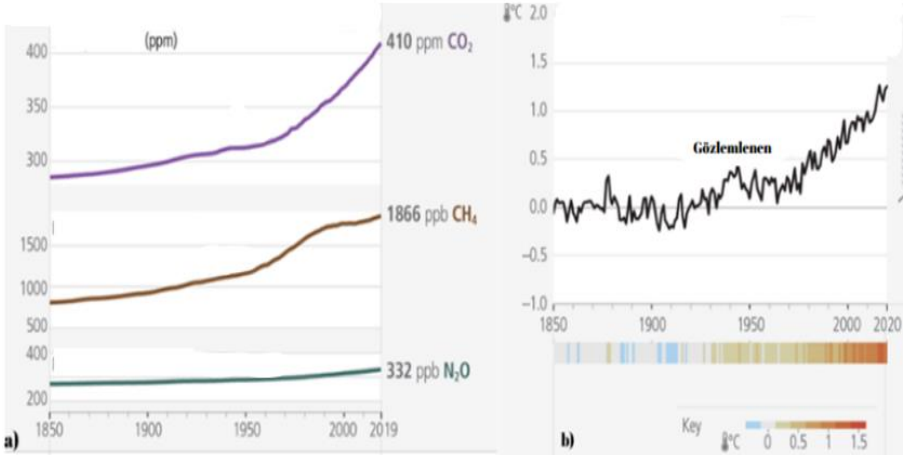
Doğal ve beşeri faktörler etkisi ile iklimde zaman içerisinde değişiklikler meydana gelmektedir. İklim değişikliği, çeşitli etkilerle iklimin ortalama durumunda meydana gelen uzun süreli ve büyük ölçekli değişiklikler olarak tanımlanmaktadır (Akçakaya vd., 2015 s.5). Dünyayı çevreleyen atmosferde çeşitli gazlar bulunmakta ve sera gazı olarak adlandırılan bu gazların varlığı dünya sıcaklığına önemli derecede etki etmektedir. Sanayi devrimi ile birlikte fosil yakıt kullanımı artmış ve atmosfere daha fazla miktarda sera gazı verilmeye başlanmıştır. Atmosferdeki sera gazlarının artması ile atmosfer tabakası kalınlaşmış ve dünyayı battaniye gibi saran bu tabaka, dünyanın daha fazla ısınmasına sebep olmuştur. Şekil

1’de de görüldüğü üzere sera gazların atmosferdeki yoğunluğunun artması ile atmosfer tabakası kalınlaşmakta, dünya yüzeyinden yansıyan güneş radyasyonunu daha fazla oranda tutmaktadır. Ve daha fazla oranda tekrar dünya yüzeyine yansıtmaktadır. Böylece dünya daha fazla ısınmaktadır.



Şekil 1: Doğal ve İnsan Kaynaklı Sera Gazlarının Atmosfere Etkisi (Aksoy ve Atasagun, 2023 s:14)

IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli), iklim değişikliği konusunda en kapsamlı araştırmaları yürüten, yayınladığı değerlendirme raporları dünya genelinde araştırmacılar ve politika yapıcılar tarafından dikkate alınan en önemli kuruluştur. IPCC’nin 6. Değerlendirme Raporu (AR6) kapsamında sunmuş olduğu çalışmalarında, atmosfere verilen sera gazı miktarlarının sanayi devriminden özellikle de 1850’den sonra hızla arttığı (Şekil 2a.) ve bu sera gazların artmasına bağlı olarak dünyanın ortalama sıcaklığındaki değişimi (Şekil 2b.) gösterilmiştir. Şekil 2b’ye göre 1850’den günümüze dünyanın ortalama yüzey sıcaklığının yaklaşık olarak 1,1 °C arttığı ve yüzey sıcaklığı değişim ivmesinin 1970 yıllarından sonra arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2: a) Sera Gazlarının Atmosferdeki Yoğunluğunun Zaman İçerisindeki Değişimi b) Dünyanın Ortalama Yüzey Sıcaklığının Zaman İçerisindeki Değişimi (IPCC, 2023 p:43)

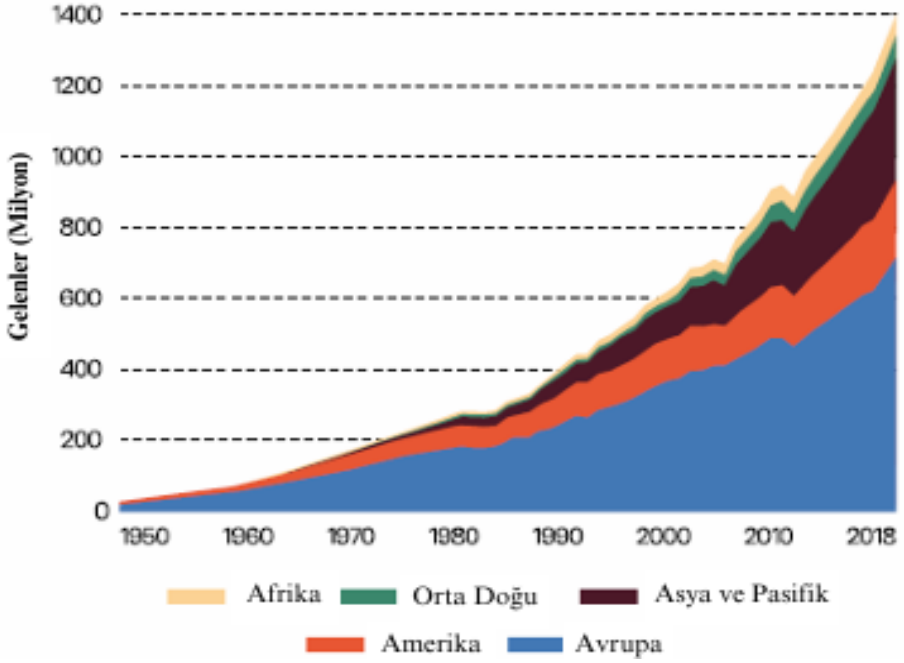
Sera gazlarının etkisi ile meydana gelen bu yüzey sıcaklığındaki artış, iklim değişikliğine ve iklim değişikliğinin yıkıcı etkilerinin birçok sektördeki olumsuz etkisinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Ercek ve Batan 2024, s.223). İklim değişikliği, birçok sektörü etkilediği gibi turizm sektörünü de birçok açıdan etkilemektedir. Bu çalışma ile iklim değişikliğinin turizm sektörüne olan etkisi araştırılmış, elde edilen bulgulara göre turizm sektörünün iklim değişikliğinden en az oranda etkilenmesi için yapılması gerekenler tartışılmış ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı çözüm önerileri sunulmuştur.

Turizm

İnsanların eğlenme, dinlenme, meraklarını giderme vb. nedenler ile yer değiştirerek yaptıkları faaliyetler olarak tanımlanabilen turizm, çok eski zamanlardan beri süregelen bir olgudur. Sanayi devriminden sonra ulaşım imkanlarının gelişmesi ve insanların seyahat etme olanaklarının artması uzun mesafeli turizm faaliyetlerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Sonraki süreçte hem bireysel hem de toplu taşımaya olanak sağlayan ulaşım araçlarının yaygınlaşması, toplumdaki refah seviyesinin ve yaşam standartlarının artması, konaklama imkanlarının gelişmesi, toplumdaki tatil kültürünün gelişmesi ile turizm sektörü zaman içerisinde büyüyerek günümüze kadar gelmiştir.

Turizm sektörünün büyüklüğü ve ülke ekonomilerindeki payı ülkeler bazında farklı olsa da turizm sektörü dünya genelinde büyüyen bir sektör olarak karşımıza çıkmaktadır. İklim Değişikliği Turizm Paneli (TPCC)'den alınan verilere göre farklı kıtalara seyahat edenlerin sayısı (Şekil 3)' de verilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere turizm zaman içerisinde büyümüş ve büyüme ivmesi özellikle de 2000'li yıllardan sonra artarak devam etmiştir.

Ancak 2009 yılında yaşanan küresel ekonomik kriz turist varışlarını ve buna bağlı olarak turizmde elde edilen gelirlerinin azaldığı sonucuna varılabilmektedir.



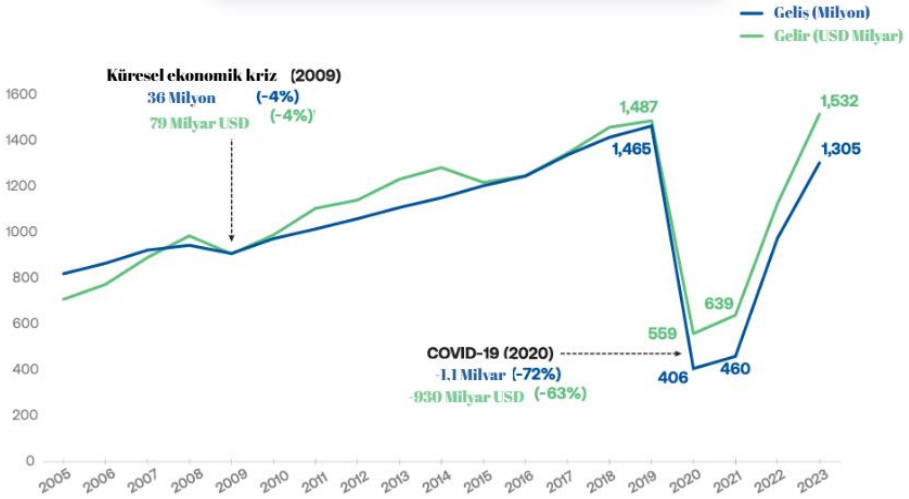
Tablo 1'e göre turizm sektörünün hızlı büyümesi ile gayri safi yurt içi hasıla içerisindeki payı da büyümüş ve bu büyüme oranı bölgesel ekonomik büyüme oranından daha fazla olmuştur (TPCC, 2023, s.8).

Tablo 1. Turizm Sektörünün Ekonominin Geri Kalanına Göre Büyüme Oranı.

Bölge	2019 Turizm GSYİH (Milyar ABD\$)	Seyahat ve Turizm GSYİH'sindeki Büyüme (%)	Bölgesel Ekonomik Büyüme (%)
Amerika	855	3.9	2.0
Afrika	85	6.8	3.3
Asya-Pasifik	965	8.5	4.0
Avrupa	851	3.3	1.5
Orta Doğu	95	7.7	2.5
Küresel	2849	5.8	2.7

Kaynak: (TPCC, 2023, s.8)

Son 20-25 yıllık süreçte genel anlamda pozitif yönde büyüyen turist varışları ve turizmden elde edilen gelirlerde, 2009 küresel ekonomik kriz döneminde sınırlı oranda bir azalma görülürken COVID-19 pandemi döneminde ise büyük çaplı düşüş görülmüştür. Şekil 4.'te verilen grafikte turist varış sayısı ve turizmden elde edilen gelirlerin yıllara (2000-2023) göre değişimi görülmektedir (UNWTO 2024. p:6)



Şekil 4: Uluslararası Turist Varışları ve Turizm Gelirleri (UNWTO 2024. p:6)

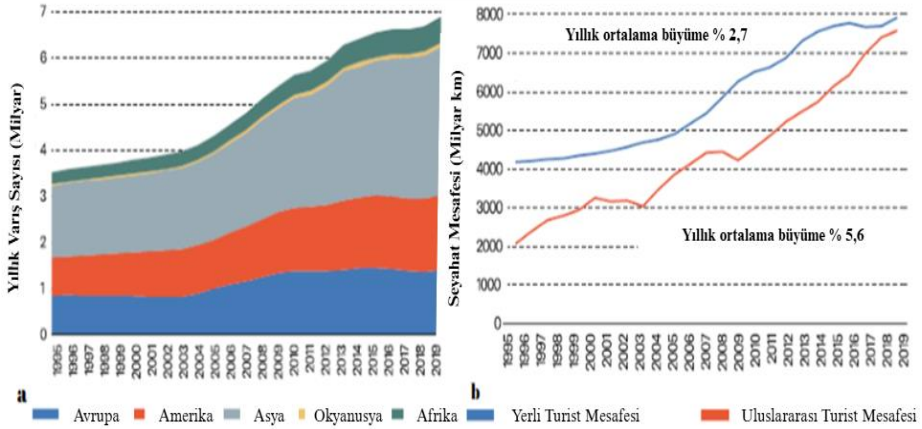
Turizm ve İklim Değişikliği

Turizm sektörü ile iklim değişikliği arasında karşılıklı ve güçlü bir etkileşim bulunmaktadır. Diğer birçok sektörden farklı olarak turizm sektörü hem doğal çevreyi etkileyen hem de kaynak olarak kullandığı doğal çevreden etkilenen bir sektördür. Turizm aktivitelerine bağlı olarak atmosfere salınan sera gazı emisyonları iklim değişikliğini tetiklemekte, iklim değişikliği etkisi ile meydana gelen değişiklikler ise turizm faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Turizm sektörü tüm dünyada, insan kaynaklı faaliyetler sonucu atmosfere yayılan CO2 miktarının %5'inden sorumludur. Turizm sektörünün yapısı mevcut halinde kalması durumunda, yani sera gazı emisyonlarını azaltacak yönde bir değişikliğe gidilmemesi durumunda, CO2 emisyon miktarının önümüzdeki 25 yılda iki katına çıkacağı beklenmektedir (TBMM raporu, 2021, S:293)

Kasım 2012'de yayınlanan Dünya Bankası'nın iklim değişikliği hakkındaki raporuna göre; hava sıcaklığında meydana gelecek 4°C artış ile bütün dünyada 2080 yılında turizm ve tarım sektörlerindeki yıllık gayrisafi milli hasıla kaybı 13,5 milyar ABD dolarına kadar çıkacaktır. Ayrıca aynı

raporda deniz seviyesinde meydana gelecek 0,5-1 metre arasında yükselmelerin kıyı turizmini büyük çapta etki edeceği vurgulanmaktadır (TBMM raporu, 2021, s:293).

Turizm sektörünün iklim değişikliği ile ilişkisi yapılan seyahatler ve seyahat mesafeleri ile doğrudan bağlantılıdır. Yapılan araştırmalar turizm faaliyetleri kapsamında yapılan seyahat ve seyahat mesafeleri hızla artmaktadır. İklim Değişikliği Turizm Paneli verileri (Şekil 5a ve Şekil 5b) turizm kapsamında yapılan seyahatlerin sayısı ve bu seyahatlerin mesafeleri 1995 yılından beri sürekli arttığını ve artış hızının da 2005 yılından sonra daha fazla oranda yükseldiğini, 2009 küresel ekonomik kriz döneminde ise sınırlı oranda düştüğünü gösterse de 2010 yılından sonra bu veriler de tekrar ciddi oranda yükselişin devam ettiğini ortaya koymaktadır. (TPCC, 2023, s.9).



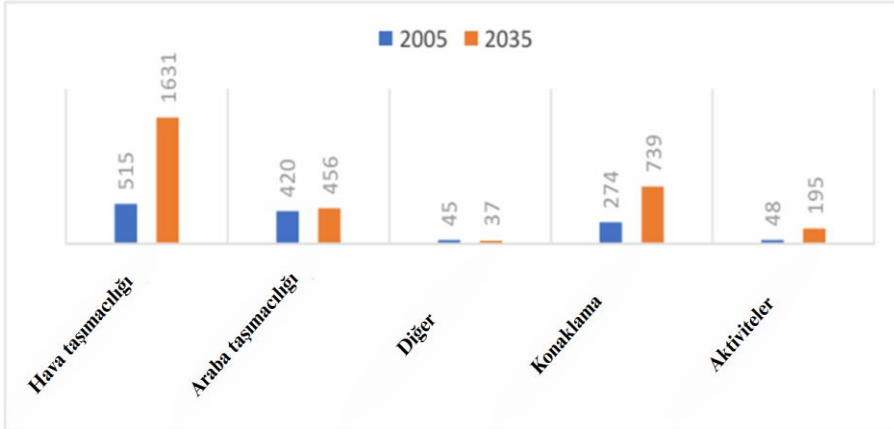
Şekil 5: a) Yurtiçi ve Uluslararası Seyahat Sayıları b) Turistlerin Yaptığı Seyahat Mesafeleri (TPCC, 2023, s.7)

İnsanlar turizm kapsamındaki faaliyetlerini gerçekleştirirken yaptıkları seyahatlerle atmosfere sera gazı verilmesine sebep olmaktadır. Turistik seyahat bazen kısa mesafeli olurken bazen de çok uzun mesafeli olabilmektedir. Seyahat mesafesine göre atmosfere verilen sera gazı miktarı da değişmekte ve atmosfere verilen bu gazlar iklim değişikliğini tetiklemektedir. Turistik faaliyetlerinin etkisi ile de kendisini daha çok hissettiren iklim değişikliği, sebep olduğu sonuçlar ile bu kez turizm faaliyetlerini etkilemektedir. Yani turizm sektörü ile iklim değişikliği arasında iki yönlü bir etkileşim bulunmaktadır. Bu yönü ile bakıldığında turizm sektörü, iklim değişikliğini etkilediği gibi aynı zamanda iklim değişikliğinden de etkilenen bir sektördür.

Turistik aktiviteler ekseriyetle doğa temelli etkinliklere dayalı olarak gerçekleştiğinden bu faaliyetlerin devamının sağlanması iklim koşulları ile doğrudan bağlantılıdır (Hao vd, 2021, s:2-3). İklim değişikliğinin meydana

getirdiği sonuçlar, turizm sektöründe olumsuz gelişmelere sebep olmakta, turizm sektörü ile elde edilen küresel ekonomik gelirin devamının sağlanması ve turizm sektörünün yarattığı istihdamı olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda bu olumsuzlukların meydana gelmesinde turizm sektörünün de önemli bir miktarda etkisi bulunmaktadır (Scott, 2021, s:2-3).

Turizm ve eğlence trafiği, dünya genelinde yapılan seyahat kilometrelerinin yaklaşık olarak yüzde %50'sine ve turizm destinasyonlarına varana kadar seyahatten kaynaklı harcanan enerjinin %90'nına denk gelmektedir. Turistik aktiviteler gerçekleştirilirken seyahatlerde tercih edilen gerek hava yolu gerekse de kara yolu taşımacılığın temel enerji kaynağın fosil yakıtlar olması sera gazları salınımına sebep olmaktadır. Yapılan çalışmalarda turizm sektörüyle ilişkili alt sektörlerin sebep olduğu sera gazı salınım oranı en fazla ulaşım sektörüne ve ulaşım sektörü içerisinde ise hava yolu taşımacılığına aittir. Gelecek yıllar için sera gazları emisyon oranlarına yönelik yapılan tahminlerde ise durum iyileşmemekte aksine emisyon miktarlarında ciddi oranda artış beklenmektedir (Wolf vd, 2021, s:5). Şekil 6'da görüldüğü üzere turizm sektörü ile ilintili ana alt sektörlerin 2005 yılında sebep olduğu emisyon miktarı ile 2035 yılında sebep olması beklenen emisyon miktarları gösterilmiştir.



Şekil 6: Turizmle İlişkili Sektörlerin Gelecekte Önemli Ölçüde Artması Beklenen Emisyonları (Wolf vd, 2021, s:5)

İlgili Literatür

İklim değişikliği küresel çapta etkileri olan bir olay olduğundan iklim değişikliğinin doğrudan veya dolaylı yönden ilişkili olduğu alanlar, araştırmacılar tarafından incelenmeye değer bulunmuş ve özellikle de son yüzyılda iklim değişikliği ve etkileri üzerine hem bölgesel hem de küresel düzeyde önemli araştırmalar yapılmıştır. İklim değişikliği ve etkileri hakkındaki çalışma ve projeler, sadece bireysel araştırmacılar aracılığı ile

değil aynı zamanda ulusal ve uluslararası kurum ve kuruluşlar aracılığı ile de yürütülmektedir. Bu çalışma ve projelerin sonuçları düzenli bir şekilde yayınlanmakta, karar verici merciler tarafından da takip edilmekte ve karar alma süreçlerini de çoğu kez etkilemektedir. Turizm sektörü kapsamında yapılan faaliyetlerin büyük bir kısmı iklim ile doğrudan bağlantılı olduğundan, iklim değişikliğinin etkileri turizm sektörü için daha önemli hale gelmektedir. Turizm sektörü ve iklim değişikliği arasındaki etkileşimin çift yönlü olması bu konuda yapılan çalışmaları daha da önemli hale getirmekte ve bu etkileşimin zararlarının bertaraf edilmesi veya minimum düzeye çekilmesi üzerine sunulan çözüm önerileri, toplumunda birçok kesiminin ilgisini çekmektedir. Çalışmanın bu bölümünde iklim değişikliğinin turizm sektörü üzerindeki etkilerini konu alan çalışmalara yer verilmiştir.

Aras (2022)'de iklim değişikliği etkilerinin turizm ve açık alan rekreasyonlarına yansımalarının irdelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada yöntem olarak literatür incelemesi esas alınmış ve ikincil verilerden faydalanılmıştır. Çalışmanın neticesinde, iklim değişikliği etkilerinin turizm ve açık alan rekreasyonlarına farklı açılardan yansıdığı tespit edilmiştir. Bu etkilerin turist hareket yönünü, gelecek yıllarda başka coğrafyalara doğru kaydırabileceği belirlenmiştir. Küresel ortalama sıcaklık artışı, Rusya, Kuzey Avrupa ve Kanada gibi Kuzey Yarım Küre ülkelerinde meydana gelecek aktivite gün sayısındaki artışı sağlayarak bu bölgelerde turizmin ve açık alan rekreasyonlarının daha yoğun hale gelebileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmada, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinden olan aşırı hava olaylarının, turizm altyapısına zarar vereceği, turistlerin can ve mal güvenliğini tehdit edeceği değerlendirilmiş ve iklim değişikliğinin turizm ve açık alan rekreasyonları üzerindeki muhtemel olumsuz etkilerinin azaltılmasına yönelik sektör paydaşlarına çözüm önerileri sunulmuştur.

Somuncu (2018) çalışması, iklim değişikliğinin Türkiye turizmine etkilerini tespit etmeye yönelik yapılmıştır. Nitel araştırma teknikleri kullanılarak yapılan çalışmada, ikincil sayısal verilerden faydalanılmıştır. Çalışma neticesinde elde edilen bulgulara göre, ağırlıklı olarak doğaya dayalı olan Türkiye turizminin, iklim değişikliğinden ciddi oranda etkileneceği değerlendirilmiştir. Çalışmada iklim değişikliğinin, özellikle de doğa temelli olan kıyı turizmi, kış turizmi gibi turizm faaliyetlerine doğrudan etki edeceği ve sektör geleceği açısından ciddi riskler barındırdığı belirlenmiş ve bu etkilerin gelecek yıllarda daha da artacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmada iklim değişikliğinin turizme etkisini azaltacak uyum çalışmalarına yönelik öneriler sunulmuştur.

Weir (2017)'de turizmin tarihi öncelikle incelenmiş ve turizm sektöründeki gelişmelerin iklim değişikliği ile ilişkisi irdelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre, iklim ve iklim değişikliğinin tarih boyunca seyahat ve turizm sektörü üzerinde önemli etkilerinin olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmada, turizm ve iklim değişikliği etkileri

alanında yapılan mevcut araştırmalardan ve iklim değişikliğine karşı geliştirilen turizm adaptasyonundaki geçmiş deneyimlerden faydalanılması önerilmiştir.

Steiger ve Stotter (2013)'te Tirol'deki (Avusturya, İtalya) kayak alanlarının iklim değişikliğinden etkilenme durumu incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki bölgede bulunan 111 kayak alanındaki kayak sezonunda kar yapma simülasyon modeli (SkiSim2) uygulanarak model sonuçları değerlendirilmiştir. Model sonuçları, %100 kar yapma kapsamı ve son teknoloji kar yapma sistemi kabul ile kayak alanlarının iklim değişikliğinin farklı projeksiyonları altında 2030'lardan 2040'lara kadar 100 günlük bir kayak sezonunu garanti edebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca bölgede 3°C'den fazla bir sıcaklık artışı meydana geldiğinde çoğu kayak alanının kar yapma maliyetleri büyük oranda artacağından çoğu işletmenin kapanma durumunda kalacağı değerlendirilmiştir.

zekici ve Silik (2017), iklim değişikliği dikkate alınarak geliştirilen plan ve politikaların Türkiye turizmindeki yerini belirlemek için yapılmış bir çalışmadır. Çalışmada öncelikle amacı ile 2010-2023 dönemini kapsayan ve iklim değişikliğine yönelik olarak yayınlanan Türkiye'deki önemli kurum ve kuruluşların geliştirdiği plan ve raporlardan 7 tanesi incelenmiştir. Ayrıca çalışmada, iklim değişikliği ile ilgili geliştirilen plan ve politikaların kıyı turizmi (deniz, güneş, kum) ve kış turizmi üzerine etkileri de incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki raporların incelenmesi sonucunda, iklim değişikliğine yönelik geliştirilen plan ve politika faaliyetlerinin 2011 yılı itibariyle bir duraksama dneimine girdiği değerlendirilmiştir.

Aydingn ve Mesci (2023), sanayi devrimi sonrası fosil yakıtı bağlı gerçekleşen iklim değişikliğinin turizm sektörünü nasıl etkidiği belirlemeye yönelik bir çalışmadır. Çalışmada iklim değişikliği etkilerinin turizm sektörünü hem günümüzde etkilediği hem de gelecekte de etkilemeye devam edeceği değerlendirilmiş ve bu durumun ülkelerin turizm gelirlerinde azalmalara sebep belirtilmiştir. İklm değişikliğinin olumsuz sonuçları, turizm sektörünün rekabet edebilirliğini ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. İklm değişikliği etkisi ile artacak işletme maaliyetleri, gelecekte turizm sektörünü zor durumda bırakacağı belirtilmiştir. Ayrıca turizm faaliyetleri kapsamında yapılan etkinliklerin iklim değişikliğine etken oluşturduğu değerlendirilmiştir. Çalışmada turizm sektörünün iklim değişikliği etkilerinden korunmak için yapılması ve dikkat edilmesi gereken hususlar hakkında öneriler sunulmuştur.

METOT

İklm değişikliğin birçok sektöre etkisi olduğu gibi turizm sektörüne de etkisinin ciddi boyutlarda olacağı hem kurum ve kuruluşlar hem de bağımsız araştırmacılar tarafından ciddi oranda önemsenmiş ve bu alanda önemli

alışmalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında iklim değişikliğinin turizm sektörüne etkilerini belirlemek için ulusal ve uluslararası makaleler ve tezlerin yanında kurum ve kuruluşlarca yayınlanan raporlar incelenmiştir. Elde edilen bulgular değerlendirilerek iklim değişikliğinin turizm sektörü üzerindeki etkilerinin ne gibi sonuçlar doğurduğu belirlenmiş ve iklim değişikliğinin turizm sektörüne etkisini hafifletecek çözüm nerileri geliştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIşMA

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle literatürdeki iklim değişikliğinin başlıca etkilerine yönelik bulgulara yer verilmiş daha sonra iklim değişikliğin sebep olduğu bu etkilerin turizm sektörünü günümüzde nasıl etkilediği belirlenmiş ve gelecek yıllarda nasıl etkileyeceği üzerine yapılan projeksiyonlar değerlendirilmiştir.

İklim Değişikliğinin Başlıca Etkileri

Çalışma kapsamında öncelikle iklim değişikliğinin küresel etkileri ile ilgili çalışma yapan en önemli yapı olan IPCC'nin düzenli olarak yayınlamış olduğu raporlar incelenmiştir. IPCC'nin 2023 yılında yayınlamış olduğu iklim değişikliği sentez raporunda elde ettiği tespitler aşağıda özetlenmiştir (IPCC, 2023. p:4,5,14).

İklim değişikliğinin insani faaliyetlerden kaynaklandığı, iklim değişikliğine sera gazı emisyonlarının neden olduğu, sera gazı emisyon miktarlarının giderek artmaya devam ettiği, bu durumun ortalama küresel yüzey sıcaklığında ciddi miktarda (1,1 0C) artışlara sebep olduğu ve iklim değişikliği boyutunun daha önce görülmemiş düzeylere ulaştığı vurgulanmıştır.

İklim değişikliğinin etkisi ile görülecek ekstrem hava olaylarının (şiddetli yağışlar, aşırı sıcak ve aşırı soğuk hava dalgaları, dolu, fırtına, kuraklık vb.) sebep olabileceği sel, yangın ve taşkın gibi olayların grlme sıklığının artacağı, bu olayların insan ve çevreye vereceği zararların boyutunun büyüyeceği belirtilmiştir.

İklim değişikliğinin bazı kuzey bölgeleri hariç, özellikle Akdeniz Havzası'nda yer alan bölgelerde yağış miktarlarını düşüreceği ve başta tarım olmak üzere birçok sektörün bu durumdan olumsuz yönde etkileneceği değerlendirilmiştir.

Ortalama yüzey sıcaklığında meydana gelen artışın buzulların erimesine sebep olacağı ve bu durumunda başta deniz seviyesinin yükselmesine, yeraltına nüfuz eden tuzlu deniz suyu nedeniyle tatlı su kaynaklarının azalmasına ve kuraklığın artmasına sebep olacağı belirtilmiştir.

İklim değışikliğinin etkileri ile görölmesi muhtemel olaylara birçok çalışmada değinilmiş ve literatürde iklim değışikliğinin başlıca etkileri konusunda büyük oranda bir görüş birliğinin olduğu görölmüşür.

İklim Değışikliğinin Turizm Sektörüne Etkileri

Yukarıda verilen iklim değışikliğin meydana getirdiği etkilerin her birinin ayrı ayrı turizm sektörüne olan ve olması beklenen etkisi Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: İklim Değışikliğinin Turizm Sektörüne Etkileri

İklim Değışikliğinin Etkileri	Turizm Sektörüne Etkisi
Ortalama yüzey sıcaklık artışı	-Turistlerin aşırı sıcak bölgelerden uzak durması, bazı turistik bölgelerin eski cazibesini kaybetmesi, -Soğutma maliyetlerinin artması nedeniyle işletmelere maddi yük binmesi -Deniz, kara ekosistemlerindeki biyolojik çeşitliliğinin azalması, -Bulaşıcı hastalıkların yaygınlaşması, -Deniz suyunun sıcaklığının yükselmesi ile deniz turizminin cazibesinin ve canlı çeşitliliğinin azalması -Kış turizminin yapıldığı bölgelerde turizm sezon süresinde azalmaların yaşanması, -Sıcaklık artışı nedeniyle kar yapımı için yapılan çalışmaların maliyetlerinde artışların olması, -Sıcak hava dalgalarının artması ile turizm konforunun düşmesi ve bazı turistik faaliyetlerin gerçekleştirilmesinin güçleşmesi,
Yağış miktarlarındaki azalmalar	-Kar yağışının olmaması veya azalması ile kış turizminin olumsuz etkilenmesi -Sezon süresinin kısalması ile kayak merkezlerinin olumsuz etkilenmesi -Kuraklığın yaşanması ile su temininin güçleşmesi ve suya ulaşım maliyetlerinin artması,
Ekstrem hava olaylarının görölme sıklığındaki artışlar	-Sel felaketlerinin yaşanması ile turizm altyapısının bozulması ve turistik bölgelerdeki eserlerin hasar görmesi, -Orman yangınlarının yaşanması ile turistik bölgelerin cazibelerini kaybetmesi, -Fırtına, dolu gibi aşırı hava olaylarının kitle turizmini olumsuz yönde etkilemesi, -Hava olayları nedeniyle turizm faaliyetlerinde kesintilerin yaşanması,

	-Fırtına vb. olayların turistik tesisleri için risk teşkil etmesi ve bu durumun sigorta maliyetlerini artırması,
Deniz seviyesinde meydana gelen yükselmeler	-Kıyı alanlarında su seviyesinin yükselmesi ile kıyı erozyonunun artmaya başlaması ve sonraki aşamalarda kıyıların tamamen sular altında kalması, -Kıyı turizmi yapılan alanların azalması, -Kıyı bölgelerindeki kültürel mirasın ve doğal güzelliklerin zarar görmesi, -Kıyıları korumak için yapılan faaliyetlerin maliyetlerinin artması, -Kıyı turizminin altyapısını zarar görmesi, -Deniz suyunun yükselmesi ile tuzlu suyun yeraltı sularına karışma ihtimalinin artması, tatlı su kaynaklarının zarar görmesi ve tatlı suya ulaşım maliyetlerinin artması, -Günümüzde turizm yapılabilen bazı küçük adaların tamamen su altında kalması.

Kaynak: (TBMM Raporu, 2023 s:293-294 UNWTO ve UNEP, 2008. s.61)

SONUÇLAR

Turizm sektörü birçok ülke için hem istihdam sağlama hem de ekonomik gelir elde etme bakımından önemli bir sektördür. Turizm sektörünün GSYİH içerisindeki payı, ülkelere göre değişmekle birlikte genellikle önemsenecek düzeydedir. Bu nedenle turizm sektörünün korunması, geliştirilmesi ve gelecek planlanmasının yapılması gerekmektedir. Ayrıca turizm sektörünün iklim ile doğrudan etkileşim içinde olması, iklim değişikliği etkilerine doğrudan maruz kalması konunun önemini daha da artırmaktadır.

Çalışmada iklim değişikliğine sebep olan insan kaynaklı etkilerin günümüzde ve gelecekte iklimde nasıl bir değişime sebep olacağı belirlenmiştir. İklim değişikliği ile ortaya çıkan yeni durumun her birinin ayrı ayrı turizm sektörüne etkisi değerlendirilmiştir. İklim değişikliği ile turizm sektörü arasında iki yönlü bir etkileşim olduğu, iklim değişikliğinin turizmi etkilediği gibi turizm sektörü kapsamında yapılan aktivitelerin de iklim değişikliğini tetiklediği sonucuna varılmıştır.

Nerede ise tüm bilimsel çalışmalarda insan kaynaklı iklim değişikliğinin ana kaynağını sera gazlarının oluşturduğu, sera gazlarının atmosfere verilme oranının giderek arttığı değerlendirilmektedir. İklim değişikliği etkisi her geçen gün şiddetlenmekte ve birçok sektörü etkilediği gibi turizm sektörünü de ekseriyetle olumsuz yönde etkilemektedir. Turizm sektörü kapsamındaki aktiviteler özellikle de doğa temelli aktiviteler iklim

değişikliğinden doğrudan etkilenmektedir. İklim değişikliğinin başlıca etkilerinden olan sıcaklık artışı, deniz seviyelerindeki yükselmeler, yağış azalışı, aşırı hava olayları turizm sektörü üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde kalmamakta maalesef çoğu kez bu etki yıkıcı düzeye çıkmaktadır. Özellikle bunlardan deniz seviyesinin yükselmesi ve kar yağışının azalması kıyı ve kış turizmini büyük ölçüde etkileyeceği değerlendirilmektedir.

İklim değişikliğinin turizm sektörü üzerindeki yıkıcı etkisini hafifletmek için bireysel, toplumsal ve küresel çapta çalışmalar yapılması gerekmektedir. Özellikle sera gazı azaltımına yönelik bireysel, toplumsal ve küresel çapta yapılabilecek faaliyetler belirlenip bu faaliyetler kapsamında yapılması gereken çalışmalar toplumun her kesimi ile paylaşılmalıdır. Bireysel ve toplumsal bilinçlendirme faaliyetleri hızlandırılmalıdır. Fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmelidir. Çevre dostu ürün kullanımı özendirilmeli, geri dönüşüm ve geri kazanım yaygınlaştırılmalıdır. Doğal kaynaklar dikkatli kullanılmalı, israfın önüne geçilmelidir. Bütün bu yapılması gerekenlerden olumlu sonuç alabilmek için bireysel ve toplumsal düzeyden öte küresel ölçekte bir çabanın sarf edilmesi gerekmektedir.

İklim değişikliği etkisinin hafifletilmesi için ve iklim değişikliğine uyum kapsamında turizm sektörünün de yapması gereken faaliyetler ve alması gereken önlemler bulunmaktadır. Bu kapsamda öncelikle iklim değişikliğinin turizm sektörü için teşkil ettiği riskler her bölge için ayrı ayrı tespit edilmeli ve bunlara yönelik alınması gereken önlemler veya bu yeni duruma uyum için yapılması gereken çalışmalar belirlenmelidir. İklim değişikliğine uyum kapsamında turizm yatırımları çeşitlenmeli, iklim değişikliği ile turizme uygun hale gelen yerler değerlendirilerek bu alanlar turizme kazandırılmalıdır. Turizm sektörü maruz kalacağı iklim değişikliği risklerine karşı desteklenmeli ve buna yönelik teşvikler verilmelidir. Sürdürülebilir turizm ön plana çıkarılmalı, turizm yatırımı yapılırken ve teşvikler verilirken sürdürülebilir turizm ilkesi esas alınmalıdır.

REFERANSLAR

- Akçakaya A., ve diğ., (2015). Yeni senaryolarla Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği,” TR2015-CC. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Yayını, 149 s, Ankara.
- Aksoy, A. & Atasagun, B. (2023). Arazi Kullanımı ve İklim Değişikliğinin Biyoçeşitlilik Kaybı Üzerine Etkisi. In M. E. Aydın & N. Sivri (Eds.), Biyoçeşitlilik ve ekosistemler (TÜBA Raporları No: 50). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. <https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-58-0>
- Aras, S. (2022). İklim Değişikliğinin Turizm ve Açık Alan Rekreasyonuna Etkisinin İncelenmesi (Reviewing the Impact of Climate Change on Tourism and Outdoor Recreation). *Journal of Tourism & Gastronomy Studies*, 10(4), 3645-3661.
- Aydın, G., & Mesci, M. (2023). İklim Değişikliği ve Turizme Etkisi. Gökçe, A. (ed), Coşkun, G. (ed), Eker, N. (ed), Dilmaç, E. (ed), Çolak, O. (ed) (2023).

- Turizmde Yeni Trendler. *Özgür Publications*. DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub407>. License: CC-BY-NC 4.0
- Ercek, M. S., & Batan, M. (2024). Gelecek İklim Projeksiyonlarına Göre Türkiye'nin Sektörel Bazda İklim Değişikliğinden Etkilenebilirliği ve Çözüm Önerileri. *Innovative Studies in Engineering*, All Science Academy, 199.
- Hao, Y., Niu, X., & Wang, J. (2021). Impacts of haze pollution on China's tourism industry: a system of economic loss analysis. *Journal of Environmental Management*, 295, 113051
- IPCC, (2023): Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- IPCC, (2023): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Özekici, Y. K., & Silik, C. E. (2017). Türkiye'deki İklim Değişikliği Plan ve Politikalarında Turizm Sektörünün Yeri. *Gazi Üniversitesi Turizm Fakültesi Dergisi*, (2), 58-79.
- Scott, D. (2021). Sustainable tourism and the grand challenge of climate change. *Sustainability*, 13(4), 1966.
- Somuncu, M. (2018). İklim değişikliği Türkiye turizmi için bir tehdit mi, bir fırsat mı? *Tücaum*, 30, 3-6.
- Steiger, R., & Stötter, J. (2013). Climate change impact assessment of ski tourism in Tyrol. *Tourism Geographies*, 15(4), 577-600.
- TBMM (Türkiye Büyük Millet Meclisi), (2021). Küresel İklim Değişikliğinin Etkilerinin En Aza İndirilmesi, Kuraklıkla Mücadele ve Su Kaynaklarının Verimli Kullanılması İçin Alınması Gereken Tedbirlerin Belirlenmesi. Meclis Araştırması Komisyonu Raporu.
- Tourism Panel on Climate Change (2023). Tourism and Climate Change Stocktake 2023. [Eds. Becken, S. & Scott, D.]. Available <https://tpcc.info/>
- UNWTO, U., & Change, W. C. (2008). Tourism: Responding to Global Challenges. Madrid, United Nations World Tourism Organization; United Nations Environment Program: Paris, France.p.61
- Weir, B. (2017). Climate change and tourism—Are we forgetting lessons from the past?. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 32, 108-114.
- Wolf, F., Filho, W. L., Singh, P., Scherle, N., Reiser, D., Telesford, J., ... & Kovaleva, M. (2021). Influences of climate change on tourism development in small pacific island states. *Sustainability*, 13(8), 4223.
- World Tourism Organization (2024), International Tourism Highlights, 2024 Edition, November 2024, UN Tourism, Madrid, DOI: <https://doi.org/10.18111/9789284425808>.

Makran Dalma-Batma Zonu'nun (İran) Manyetik ve Sismolojik Verilerle Değerlendirilmesi

Sercan KAYIN¹
M. Nuri DOLMAZ²

- 1- Dr. Öğr. Üyesi; Gümüşhane Üniversitesi Gümüşhane Meslek Yüksekokulu Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü sercankayin@gumushane.edu.tr ORCID No: 0000-0003-2279-0579
- 2- Prof. Dr.; Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü. nuridolmaz@sdu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-9185-9835

ÖZET

Bu çalışmada, Makran Dalma-Batma Zonu'nun İran kesimindeki yapısal ve tektonik özellikler, manyetik ve sismolojik veriler birlikte kullanılarak değerlendirilmiştir. Manyetik analizler kapsamında NOAA tarafından geliştirilen EMAG2-v3 küresel aeromanyetik veri seti kullanılmış; Toplam Manyetik Alan (TMI), Analitik Sinyal (AS), Birinci Düşey Türev (FVD) ve Manyetik Taban Derinliği (DTB) haritaları oluşturulmuştur. Depremsellik değerlendirmesi ise 1976–2026 yılları arasındaki $M > 3.0$ depremleri içeren EarthScope Consortium Wilber 3 kataloğu üzerinden yapılmıştır. TMI haritasında manyetik anomali değerleri -150.5 nT ile $+108.8$ nT arasında değişmekte olup pozitif anomaliler temel kayaç yükselimlerini, negatif anomaliler ise kalın sedimanter örtüyü temsil etmektedir. Analitik Sinyal ve Birinci Düşey Türev haritaları, havzanın tektonik evriminde rol oynayan fay sistemlerini ve litolojik sınırları belirgin biçimde ortaya koymuştur. DTB haritasına göre manyetik taban derinliği yaklaşık 16.0 km'ye kadar ulaşmaktadır. Deprem episantr dağılımı, özellikle 57° – 58° D boylamları arasında ve çalışma alanının doğusunda belirgin kümelenmeler göstermektedir. Bu alanlar, manyetik verilerde belirlenen yüksek gradyan zonları ve fay kontrollü blok sınırları ile mekânsal olarak örtüşmektedir. Odak derinlikleri büyük ölçüde sık kabukta yoğunlaşmakla birlikte, dalma-batma zonunun kuzeyinde ve volkanik merkezlerin altında 40 – 80 km arasında değişen derin odaklı depremler de gözlenmektedir. Elde edilen bulgular, Makran Dalma-Batma Zonu'nun derin yeraltı yapısına ilişkin jeolojik yorumlara katkı sağlamakta ve bölgedeki sismik tehlike değerlendirmeleri için bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Manyetik Anomali, Makran Dalma-Batma Zonu, Analitik Sinyal, Derinlik, İran

GİRİŞ

Makran Dalma-Batma Zonu, güneydoğu İran ile güneybatı Pakistan boyunca uzanan ve Arap levhasının okyanusal litosferinin Avrasya levhasının altına dalmasıyla oluşan önemli bir yakınsak levha sınırıdır. Bölge, geniş yığılma kaması, düşük eğimli dalan levha, yüksek sediman birikimi ve görece düşük sismisite gibi özellikleri nedeniyle diğer dalma-batma zonlarından ayrılmaktadır. Bununla birlikte Makran, Hint Okyanusu için önemli bir tsunami potansiyeline sahip olması nedeniyle jeodinamik ve sismolojik açıdan dikkat çekici bir bölgedir (Mokhtarzadeh vd., 2025).

Makran Dalma-Batma Zonu'nda volkanizma Geç Kretase'de başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bölgedeki başlıca volkanik merkezler Bazman, Taftan ve Pakistan'daki Kuh-i Sultan'dır. Bu volkanlar, Makran-Çagai volkanik yayını oluşturur ve Arap levhasının okyanusal

litosferinin Avrasya levhası altına dalmasıyla ilişkilidir (Richards vd., 2018; Zelenski vd., 2020). Taftan volkanı, bu yayın İran'daki en önemli ve günümüzde de fumarolik aktivite gösteren aktif volkanlarından biridir (Biabangard ve Moradian, 2008; Richards vd., 2018). Volkanın jeokimyasal özellikleri, dalma-batma zonu magmatizmasının tipik izlerini taşımakta ve bölgenin tektonik evrimi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır (Biabangard ve Moradian, 2008; Richards vd., 2018; Zelenski vd., 2020).

Makran'ın tektonik yapısının ve dalan levhanın geometrisinin belirlenmesi, bölgedeki deformasyon süreçlerinin ve sismik tehlikenin anlaşılması açısından önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan sismolojik çalışmalar, özellikle batı Makran'da dalan Arap levhasının kıyı kesiminde yaklaşık 3° gibi oldukça düşük bir açıyla kuzeye doğru ilerlediğini ve levha geometrisinin kuzeye doğru değiştiğini ortaya koymuştur (Mokhtarzadeh vd., 2025). Bölgedeki aktif tektonik yapılar ve genç volkanik faaliyet, Taftan volkanı çevresinde de morfotektonik özellikleri belirgin biçimde etkilemektedir (Jami vd., 2019).

Bu çalışmada, Makran Dalma-Batma Zonu'nun İran kesimindeki yapısal ve tektonik özelliklerin manyetik ve sismolojik veriler birlikte kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Manyetik anomalilerin bölgesel dağılımı ile sismik olayların konum ve derinliklerinin birlikte incelenmesi; kabuksal yapı, tektonik sınırlar, magmatik oluşumlar ve dalan levhanın geometrisi arasındaki ilişkilerin daha iyi ortaya konulmasına katkı sağlayabilir.

Bölgenin manyetik özelliklerinin incelenmesi derin kabuk yapısı hakkında önemli bilgiler sunar. Bu çalışmada, EMAG2-v3 küresel aeromanyetik veri seti kullanılarak Makran Dalma-Batma Zonu ve çevresinin manyetik anomalileri jeofiziksel yöntemlerle değerlendirilmiş; Toplam Manyetik Alan (TMI), Analitik Sinyal (AS), Birinci Düşey Türev (FVD) ve Manyetik Taban Derinliği (DTB) haritaları oluşturularak bölgenin yeraltı yapılarının ortaya konması hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular, Makran Dalma-Batma Zonu'nun derin yeraltı yapısına ilişkin jeolojik yorumlara katkı sağlamaktadır.

BÖLGENİN JEO-TEKTONİK DURUMU

Makran Dalma-Batma Zonu, güneydoğu İran ve güneybatı Pakistan boyunca yaklaşık 800 km uzunluğunda bir yakınsak levha sınırıdır. Bu zonda Arap levhasına ait okyanusal litosfer, Avrasya levhasının altına yaklaşık 23–27 mm/yıl hızla dalmaktadır (Richards vd., 2018; Mokhtarzadeh vd., 2025). Dalma-batma sürecinin Geç Kretase'de başladığı ve Senozoyik boyunca akresyon kompleksinin gelişmeye devam ettiği belirtilmektedir (Mokhtarzadeh vd., 2025). Bölgede yaklaşık 350 km genişliğe ulaşan kalın bir yığılma kaması bulunmaktadır. Yüksek sediman girdisi nedeniyle belirgin bir batimetrik hendek gelişmemiştir. Bu durum, bölgenin diğer

dalma-batma zonlarından ayrılmasına neden olan önemli bir özelliktir (Zelenski vd., 2020; Mokhtarzadeh vd., 2025).

Makran Zonu'nun kuzey kesimi, Jazmurları ve Hamun-i-Mashkel çöküntüleri gibi ön yay havzalarıyla temsil edilir. Daha kuzeyde ise Bazman, Taftan ve Pakistan'daki Kuh-i Sultan volkanik merkezleri yer alır. Bu merkezler birlikte Makran-Çagai volkanik yayını oluşturur (Richards vd., 2018; Mokhtarzadeh vd., 2025). Makran-Çagai yayı, İran'ın batı ve güneybatısındaki Urumieh-Dokhtar magmatik yayının doğudaki devamı niteliğindedir. Ghalamghash vd. (2019), Makran-Çagai yayı altında dalma açısının batıdan doğuya doğru yaklaşık 30°'den 20°'ye azaldığını ve yay boyunca kıtasal kabuk kalınlığının yaklaşık 40 km'den 60 km'ye kadar arttığını belirtmiştir (Mokhtarzadeh vd., 2025).

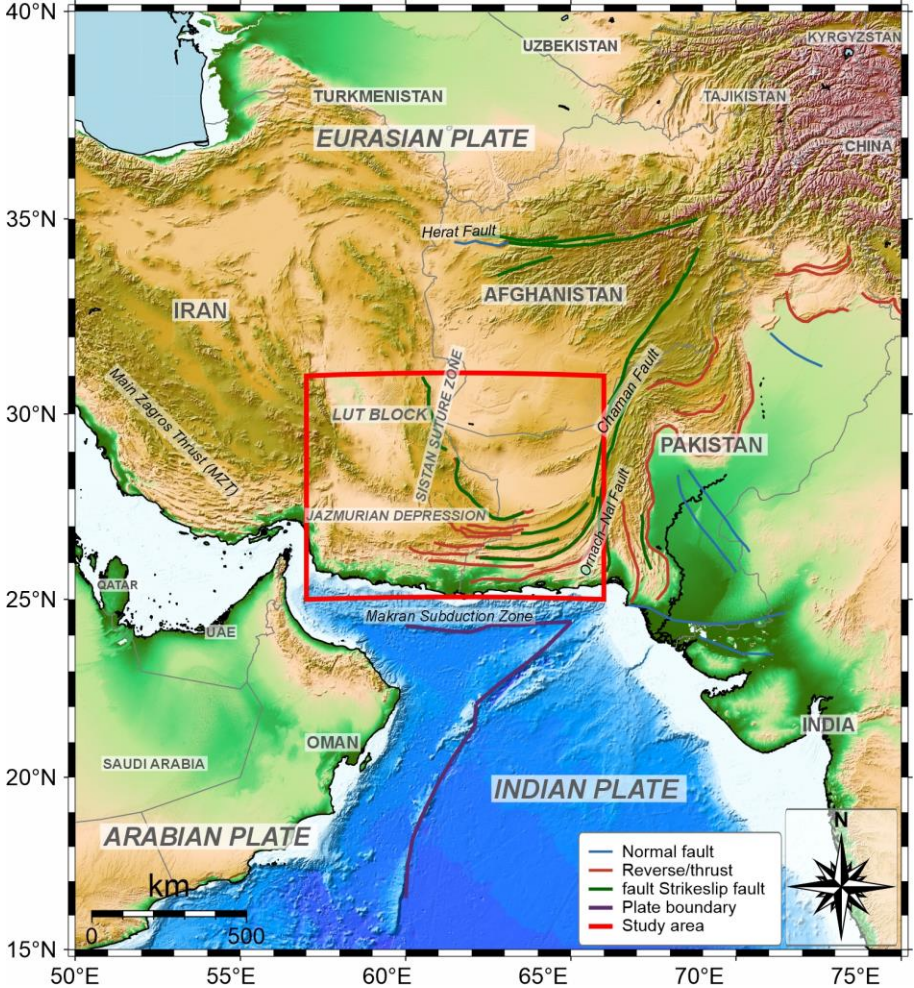
Taftan volkanı, Makran volkanik yayının İran'daki en önemli aktif volkanik merkezlerinden biridir. Volkan, Sistan ve Baluchestan eyaletinde, Khash kentinin yaklaşık 50 km kuzeydoğusunda yer almakta olup yüksekliği 4050 m'dir (Biabangard ve Moradian, 2008; Jami vd., 2019). Taftan, Pliyosen-Kuvaterner yaşlı genç ve yarı aktif bir volkanik sisteme sahiptir. Volkanik aktivite Geç Miyosen'de (~8 Ma) başlamış ve Pliyosen-Kuvaterner boyunca devam etmiştir (Richards vd., 2018). Volkanın ana konisi başlıca andezitik ve dasitik lav akıntıları, piroklastik malzemeler, tüfler, ignimbritler ve lahar birikimlerinden oluşmaktadır (Biabangard ve Moradian, 2008; Richards vd., 2018).

Sismolojik veriler, batı Makran'da okyanusal Moho derinliğinin kıyı kesiminde yaklaşık 30 km iken Jazmurları çöküntüsü altında yaklaşık 60 km'ye, Bazman ve Taftan volkanlarının altında ise yaklaşık 80 km'ye ulaştığını göstermektedir. Kıtasal Moho ise yaklaşık 40–56 km arasında değişmektedir. Ayrıca, bölgedeki kalın sediman örtüsü ve düşük kayma dalgası hızları, üst manto kamasında önemli ölçüde serpantinleşme olabileceğine işaret etmektedir (Mokhtarzadeh vd., 2025).

Makran-Çagai yayındaki volkanizma, dalma-batma sisteminin evrimini anlamada önemlidir. Bazman ve Taftan volkanlarına ait jeokronolojik ve jeokimyasal veriler, volkanik etkinliğin Neojen'den Kuvaterner'e kadar sürdüğünü ve magmaların dalan okyanusal levha üzerindeki zenginleşmiş manto kaynağıyla ilişkili olduğunu göstermektedir (Richards vd., 2018; Ghalamghash vd., 2019). Taftan volkanik kayaçlarının jeokimyasal özellikleri, tipik bir dalma-batma zonu magmatizmasını yansıtmakta olup kalk-alkalin ve yüksek-K kalk-alkalin karakterdedir. Bu özellikler, magmanın dalma-batma sürecinden etkilenmiş bir manto kaynağından türediğini ve kabuksal kirlenmeye uğradığını göstermektedir (Biabangard ve Moradian, 2008; Richards vd., 2018).

Bölgedeki aktif tektonik yapılar da volkanizma kadar önemlidir. Taftan volkanı çevresinde Saravan, Mirjaveh, Khan Mohammad Chah, Sa'ad Abad ve Dargiyaban gibi önemli fay sistemleri bulunmaktadır. Bu fayların aktivitesi, bölgedeki morfotektonik özellikleri ve drenaj ağlarını doğrudan

etkilemektedir (Jami vd., 2019). Jami vd. (2019) tarafından yapılan morfometrik analizler, Taftan volkanı ve çevresinde göreceli tektonik aktivitenin orta ile yüksek seviyede değiştiğini ortaya koymuştur.



Şekil 1: Çalışma alanını ve civarının güncel tektonik durumu ve ana fayları. Kırmızı dörtgen çalışma alanını göstermektedir. Harita Generic Mapping Tools programı, versiyon 6.0 kullanılarak elde edilmiştir (Wessel vd., 2019). Aktif faylar GEM Global Active Faults GeoJSON veri setinden uyarlanmıştır (Styron ve Pagani, 2020)

Bu karmaşık jeo-tektonik yapı, Makran'ın manyetik ve sismolojik veriler açısından birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Özellikle manyetik anomalilerin dağılımının sismik aktivite, kabuksal sınırlar ve volkanik merkezlerle karşılaştırılması, bölgenin derin yapısının ve güncel tektonik süreçlerinin daha bütüncül biçimde yorumlanmasına olanak sağlayabilir.

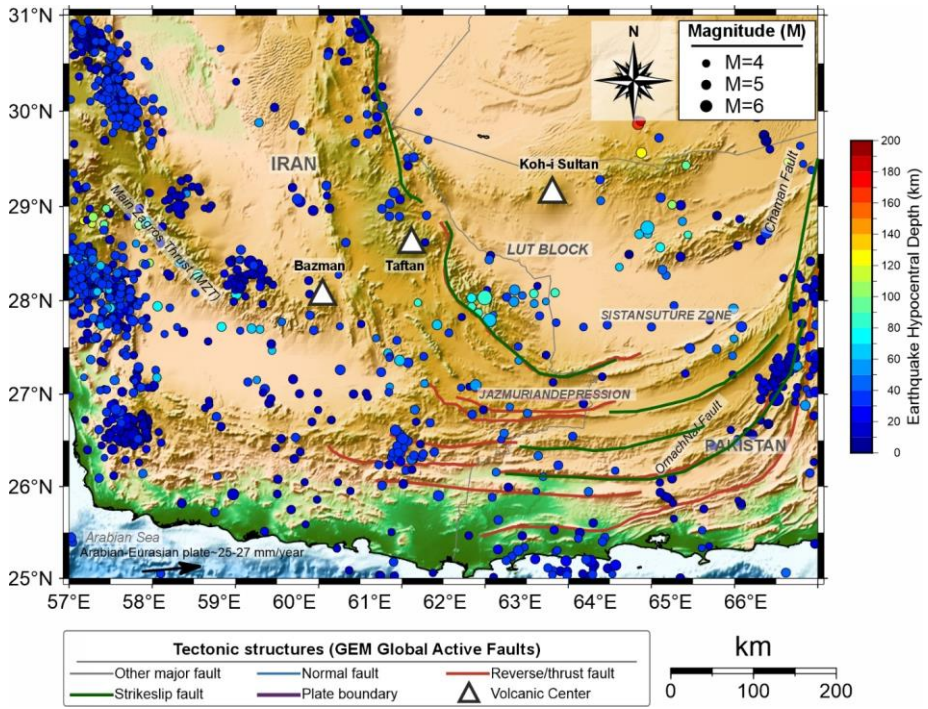
DEPREMSELLİK

Makran Dalma-Batma Zonu'nda depremsellik, bölgenin tektonik yapısını ve sismik tehlike düzeyini anlamak açısından önemli bir araçtır. Bu çalışmada, çalışma alanına ait 1976 ile 2026 yılları arasındaki depremlerin dağılımı ve derinliğe bağlı değişimi incelenmiştir. Deprem episantır verileri, "EarthScope Consortium Wilber 3 system" (<https://ds.iris.edu/wilber3>) üzerinden alınmış olup bu katalog, Global CMT veri tabanından derlenen ve büyüklüğü $M > 3.0$ olan tüm depremleri içermektedir. Şekil 2, depremlerin büyüklük, episantır ve odak derinliklerinin mekânsal dağılımını göstermektedir.

Şekil 2'deki episantır dağılımı incelendiğinde, depremlerin çalışma alanı boyunca homojen olmayan bir dağılım sergilediği görülmektedir. Özellikle 57° – 58° D boylamları arasında belirgin bir yoğunlaşma dikkati çekmektedir. Bu yoğunlaşma, bölgedeki yüksek gerilim birikimi ve kabuk heterojenliği ile ilişkilendirilmektedir. Benzer şekilde, çalışma alanında 27° K enleminin güney kesiminde ve onun doğu ucunda da yerel bir kümelenme gözlenmektedir. Bu iki yoğunlaşma alanı, bölgedeki aktif fay sistemlerinin ve tektonik sınırların denetiminde gelişmiş görünmektedir.

Makran Dalma-Batma Zonu bölgesinde deprem dağılımında özellikle 57° – 58° D boylamları arasında yoğun bir kümelenme gözlenmektedir; bu durum, yüksek gerilim birikimi ve kabuk heterojenliği ile ilişkilendirilmektedir. Havzadaki aktif faylar, hem yapısal denetimde hem de sismik aktivitenin dağılımında belirleyici rol oynamaktadır.

Deprem odak derinlikleri incelendiğinde, sismisitenin büyük ölçüde sığ kabukta (0–40 km) yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, özellikle Makran dalma-batma zonunun kuzey kesimlerinde ve volkanik merkezlerin altında daha derin odaklı depremler de (40–80 km) gözlenmektedir. Bu derinlik dağılımı, dalan Arap levhasının geometrisi ve üst manto kamasındaki deformasyon süreçleriyle uyumludur (Mokhtarzadeh vd., 2025). Sismolojik çalışmalar, batı Makran'da dalan levhanın kıyı kesiminde yaklaşık 3° gibi oldukça düşük bir açıyla kuzeye doğru ilerlediğini ve levha geometrisinin kuzeye doğru değiştiğini ortaya koymuştur (Mokhtarzadeh vd., 2025). Bu durum, bölgedeki deprem derinlik dağılımının da bu geometriye bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.



Şekil 2. Çalışma alanındaki depremlerin dağılımı ve derinliğe bağlı değişimi. 1976 ile 2026 arasındaki $M > 4.0$ depremler (deprem episantr verileri “EarthScope Consortium Wilber 3 system” (<https://ds.iris.edu/wilber3/>)) sisteminden alınmıştır. Harita Generic Mapping Tools programı, versiyon 6.0 kullanılarak elde edilmiştir.

Büyüklik dağılımı açısından, çalışma alanında $M = 4.0$ ile $M = 6.0$ arasında değişen depremler kaydedilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü üzere, büyüklüğü $M = 5.0$ ve üzeri olan depremler daha çok 57° – 58° D boylamları arasında ve çalışma alanının doğu kesiminde yoğunlaşmaktadır. Bu depremlerin odak mekanizmaları, bölgedeki baskın tektonik rejimin doğrultu atımlı ve ters faylanma bileşenleri içerdiğini göstermektedir. Nitekim bölgedeki aktif faylar (Saravan, Mirjaveh, Khan Mohammad Chah, Sa’ad Abad ve Dargiyaban gibi) hem yapısal denetimde hem de sismik aktivitenin dağılımında belirleyici rol oynamaktadır (Jami vd., 2019).

Makran Dalma-Batma Zonu’nun görece düşük sismisite göstermesi, bölgenin karakteristik özelliklerinden biridir. Bu durum, yüksek sediman girdisi, geniş akresyon kaması ve düşük eğimli dalma geometrisi ile ilişkilendirilmektedir (Mokhtarzadeh vd., 2025). Bununla birlikte, tarihsel dönemde Makran’da büyük tsunamiler üretebilecek güçlü depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Bu nedenle, bölgedeki sismik tehlike değerlendirmeleri, yalnızca aletsel dönem verilerine değil, aynı zamanda tarihsel ve jeolojik kayıtlara da dayandırılmalıdır.

Çalışma alanındaki deprem dağılımı ile manyetik anomaliler arasında da dikkat çekici bir ilişki gözlenmektedir. Özellikle 57°–58°D boylamları arasındaki deprem yoğunlaşması, manyetik verilerde belirlenen yüksek gradyan zonları ve fay kontrollü blok sınırları ile mekânsal olarak örtüşmektedir. Bu örtüşme, bölgedeki sismik aktivitenin kabuksal yapı ve tektonik sınırlarla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Taftan ve Bazman volkanik merkezlerinin çevresinde gözlenen sığ depremler, volkanik ve hidrotermal süreçlerle ilişkili olabileceği gibi, bölgedeki aktif fay sistemlerinin denetiminde de gelişmiş olabilir (Jami vd., 2019; Zelenski vd., 2020).

Sonuç olarak, Makran Dalma-Batma Zonu'nun İran kesimindeki depremsellik, bölgenin karmaşık tektonik yapısını yansıtmaktadır. Deprem dağılımı, dalma-batma geometrisi, aktif fay sistemleri ve kabuksal heterojenlik tarafından denetlenmektedir. Bu nedenle, bölgedeki sismik tehlike değerlendirmelerinde manyetik, sismolojik ve jeolojik verilerin birlikte kullanılması büyük önem taşımaktadır.

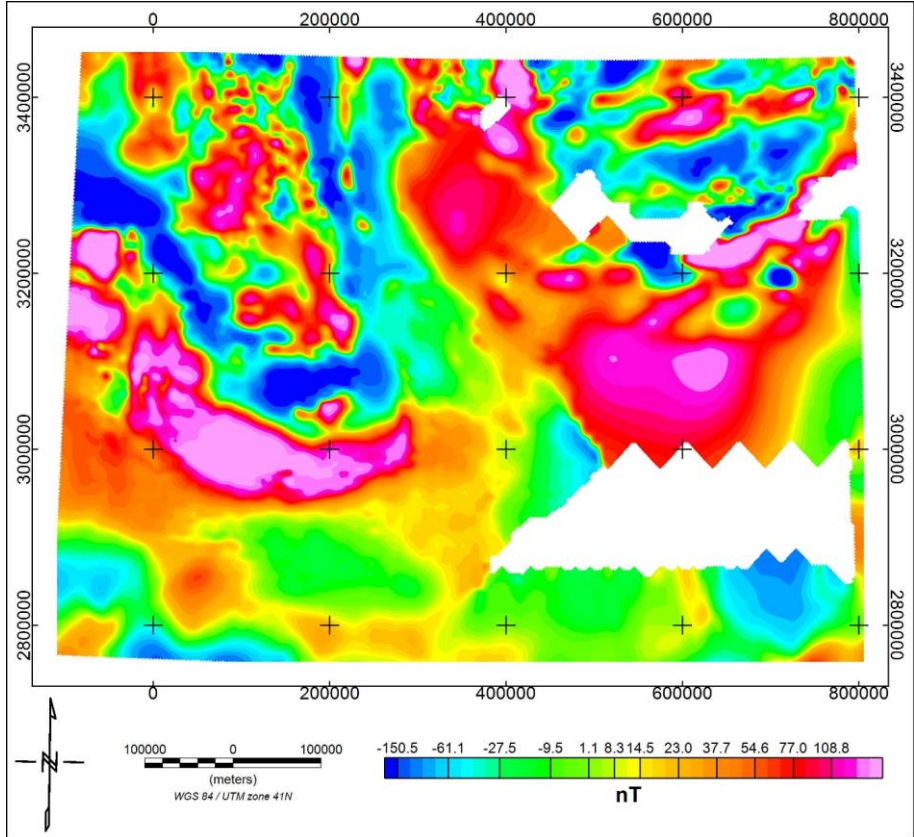
MANYETİK PROSES

Çalışma alanı, İran'ın güneydoğusunda yer alan Makran Dalma-Batma Zonu ve çevresini kapsamakta olup yaklaşık 57°–67° doğu boylamları ile 25°–31° kuzey enlemleri arasında uzanmaktadır. Bu çalışmada, ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından geliştirilen EMAG2-v3 (Earth Magnetic Anomaly Grid) küresel aeromanyetik veri seti kullanılmıştır (Meyer vd., 2017). EMAG2-v3, 2 ark-dakika (~3.7 km) mekânsal çözünürlüğe sahip olup uydu, hava ve deniz manyetik ölçümlerinden bütünleşik olarak oluşturulmuştur. Manyetik anomaliler, EMAG2-v3 veri setinde deniz seviyesinden 4 km yükseklikte sürekli bir yüzeye analitik yukarı uzanım uygulanarak elde edilen manyetik anomali değerleri esas alınarak yorumlanmıştır.

Bölgenin Toplam Manyetik Alan (TMI) haritası, belirgin pozitif ve negatif manyetik anomalilerin varlığını göstermektedir (Şekil 3). Manyetik anomali değerleri -150.5 nT ile +108.8 nT arasında değişim göstermektedir. Haritada özellikle havzanın orta ve batı-doğu kesimlerinde yüksek genlikli pozitif anomaliler gözlenirken, kuzeybatı ve kuzeydoğu kesimlerinde ve ayrıca tüm güney alanında belirgin negatif anomaliler dikkati çekmektedir.

Gözlenen manyetik anomaliler, manyetik duyarlılıkları birbirinden farklı litolojik birimlerin ve temel kayaç morfolojisindeki değişimlerin varlığına işaret etmektedir. Yüksek genlikli pozitif anomaliler, manyetik mineraller açısından zengin magmatik veya metamorfik temel kayaçların yüzeye daha yakın konumlandığı alanlarla ilişkilendirilirken; negatif anomaliler ise daha kalın sedimanter örtünün bulunduğu ya da düşük manyetik duyarlılığa sahip kayaçların egemen olduğu bölgeleri temsil etmektedir. TMI haritası, havza genelinde yay biçiminde doğu-batı

doğrultulu yapısal eğilmeleri ortaya koymakta ve bu eğilmelerin Makran Dalma-Batma Zonu içerisindeki yay-hendek sisteminin bölgesel tektonik yapısıyla uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 3: Çalışma alanının toplam manyetik alan (TMI) anomali haritası. Haritadaki beyaz alanlar, EMAG2-v3 veri setinde veri bulunmayan bölgeleri göstermektedir.

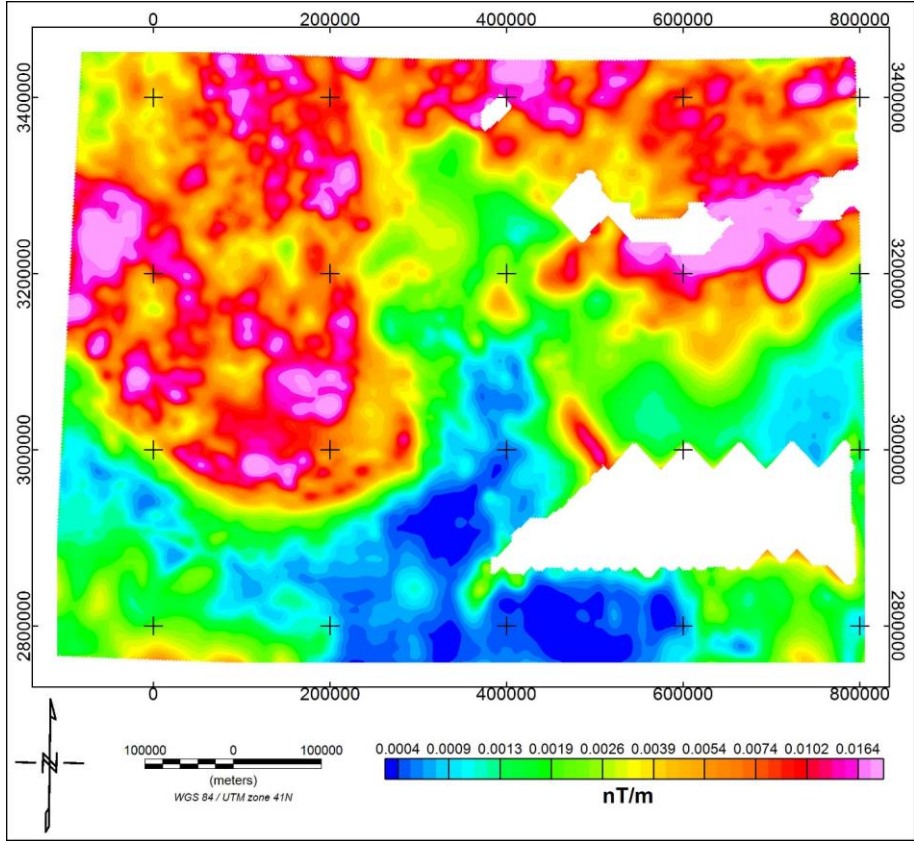
Analitik Sinyal (AS) Yöntemi: Manyetik anomalilere neden olan kaynakların sınırlarının, yapısal süreksizliklerin ve temel kaya sınırlarının saptanmasında yaygın olarak kullanılan bir filtreleme tekniği olan Analitik Sinyal (AS) yöntemi uygulanmıştır. Yöntemin en önemli avantajı, yer manyetik alanının eğim ve sapma açıları ile kayaçların mıknatıslanma yönünden bağımsız olarak uygulanabilmesidir. Bu sayede, manyetik kaynakların tam üzerinde maksimum genlik değerleri elde edilerek yapısal sınırların doğru biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Roest vd., 1992; Blakely, 1995). Analitik sinyal genliği, matematiksel olarak manyetik alanın yatay ve düşey türevlerinin karelerinin toplamının karekökü olarak hesaplanmaktadır (Roest vd., 1992; Roest ve Pilkington, 1993; Salem vd., 2002).

Bu çalışma kapsamında, Makran Dalma-Batma Zonu'ndaki manyetik kaynakların kenarlarını ve yapısal sınırlarını belirlemek amacıyla Analitik Sinyal (AS) yöntemi uygulanmıştır. Şekil 4'te çalışma alanının Analitik Sinyal (AS) anomali haritası görülmektedir. Elde edilen analitik sinyal haritasında yüksek genlikli anomaliler özellikle havzanın orta ve kuzey kesimlerinde yoğunlaştığı gözlenmektedir. Bu yüksek genlikli alanlar, fay kontrollü blok sınırları, temel kayaç yükselimleri ve olası magmatik sokulumlarla ilişkili olarak değerlendirilmektedir. Analitik sinyal sonuçları, geniş perspektiften bakıldığında Makran Dalma-Batma Zonu'nun yapısal gelişiminde etkili olan fay sistemlerinin dağılımını ve havzayı kontrol eden yapısal unsurların tanımlanmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

Birinci Düşey Türev (FVD): Sığ manyetik anomalileri ve yapısal süreksizlikleri daha belirgin hale getirmek amacıyla Birinci Düşey Türev (FVD) filtresi uygulanmıştır (Reeves, 2005). Bu yöntem, kısa dalga boyulu anomalileri kuvvetlendirirken derin etkilerden kaynaklanan uzun dalga boyulu etmenleri zayıflatır. Böylece sığ derinliklerde bulunan jeolojik yapıların daha belirgin biçimde ortaya çıkarılmasını sağlar.

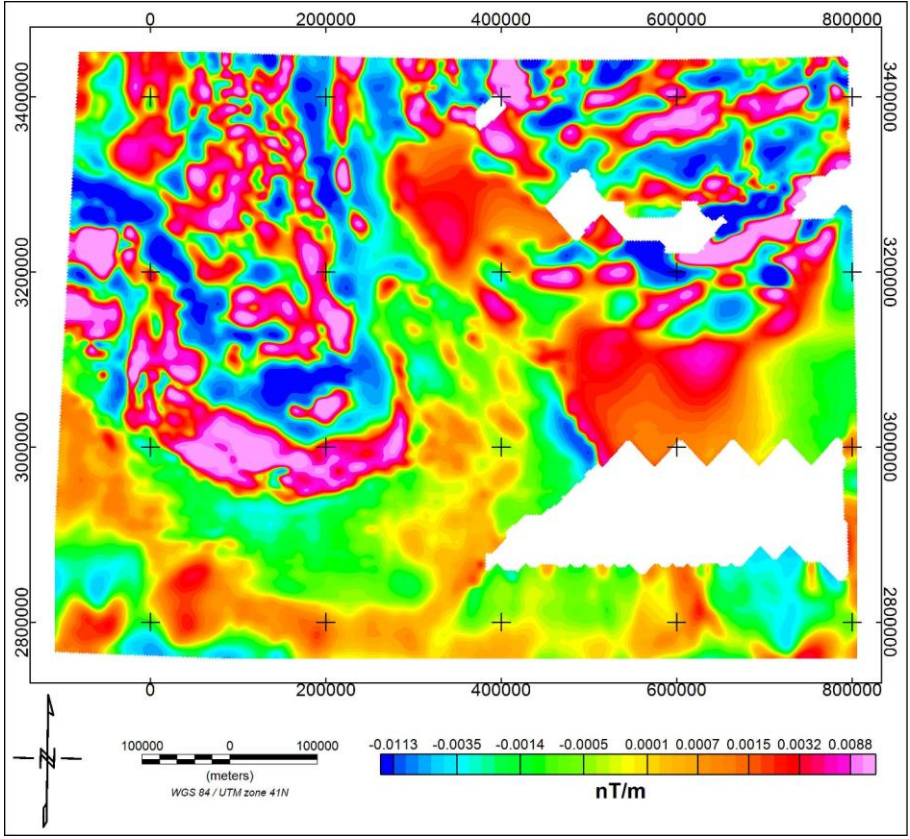
Çalışma alanının FVD anomali haritası Şekil 5'te verilmiştir. Makran Dalma-Batma Zonu yapısal sistemine uygulanan FVD filtresi sonucunda, başta çalışma alanının batısındaki sığ etkiler ortaya çıkarken; çalışma alanının doğusundaki doğu-batı doğrultuda uzanan doğrusal anomaliler belirlenmiştir. Hem batıda hem de doğuda saptanan bu anomalilerin, havzanın tektonik evriminde önemli rol oynayan fay sistemleriyle uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, yüksek gradyan değerleri temel kayaç ile sedimanter örtü arasındaki belirgin litolojik sınırları yansıtarak, havzanın yapısal özelliklerinin daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlamıştır.

Manyetik Kaynak Derinliği (DTB): Manyetik taban derinliği (Depth to Basement, DTB) hesaplamaları, manyetik anomalilerin güç spektrumu ile kaynak derinliği arasındaki oransal ilişkiden yararlanılarak (Reid vd., 1990) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar manyetik taban derinliği haritası üzerinde değerlendirilmiştir. Bu sayede, bölgenin üç boyutlu bir manyetik temel kayaç modeli haritası oluşturulmuştur (Şekil 6).



Şekil 4: Çalışma alanının Analitik Sinyal (AS) anomali haritası

Elde edilen sonuçlara göre manyetik taban derinliği yaklaşık 16.0 km derinliğine kadar ulaşmaktadır (Şekil 6). En yüksek derinlik değerleri çalışma alanının güneyi boyunca ve çalışma alanının doğusunda geniş kapanımlı biçimde gözlenirken; alanın batı-kuzeybatısı ile kuzeydoğusunda daha düşük derinlikler olarak temel kayaların yüzeye yaklaştığı alanlarda gözlenmektedir. Derin manyetik kaynaklar, dalma-batma sürecinde gelişen hendek yapıları ve kalın sedimanter istiflerle ilişkilendirilirken; sık manyetik kaynaklar ise yay havzası ile horst blokları ve temel kayaç yükselimlerini temsil etmektedir. Özellikle Taftan ve Bazman volkanik merkezlerinin çevresinde gözlenen sık manyetik kaynaklar, bu volkanik merkezlerin altındaki magmatik sokulumlar ve hidrotermal alterasyon zonlarıyla ilişkili olabilir (Richards vd., 2018).



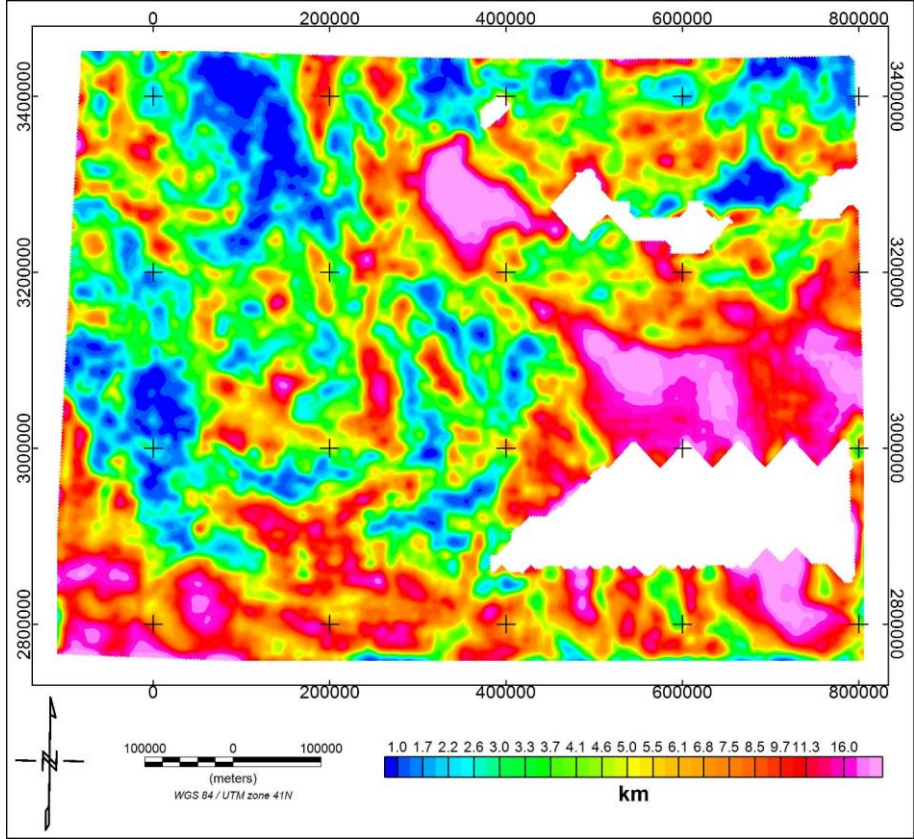
Şekil 5: Çalışma alanının birinci düşey türev (FVD) anomali haritası

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, Makran Dalma-Batma Zonu'nun İran kesimindeki yapısal ve tektonik özellikler, EMAG2-v3 aeromanyetik veri seti ile 1976–2026 dönemi deprem kataloğu birlikte kullanılarak değerlendirilmiştir. Manyetik verilere TMI, AS, FVD ve DTB işlemleri uygulanmış; bulgular depremsellik verileriyle karşılaştırılmıştır.

TMI haritasında manyetik anomali değerleri -150.5 nT ile +108.8 nT arasında değişmektedir (Şekil 3). Pozitif anomaliler manyetik mineralce zengin temel kayaların yüzeye yakın olduğu alanları, negatif anomaliler ise kalın sedimanter örtüyü veya düşük duyarlılıklı kayaları temsil etmektedir. Doğu-batı doğrultulu yay biçimli yapısal eğilmeler, Makran yay-hendek sisteminin bölgesel tektonik yapısıyla uyumludur. AS haritasında (Şekil 4) yüksek genlikli alanlar havzanın orta ve kuzey kesimlerinde fay kontrollü blok sınırları, temel kayaç yükselimleri ve olası magmatik sokulumlarla ilişkilendirilmiştir. FVD haritası (Şekil 5), batıdaki sığ etkileri ve doğudaki doğu-batı doğrultulu doğrusal anomalileri belirginleştirmiş; bu anomaliler havzanın tektonik evriminde rol oynayan fay sistemleriyle uyumlu

bulunmuştur. DTB haritasına göre (Şekil 6) manyetik taban derinliği yaklaşık 16.0 km'ye ulaşmakta olup en derin değerler güney ve doğuda, en sıg değerler ise batı-kuzeybatı ve kuzeydoğuda gözlenmektedir.



Şekil 6: Çalışma alanının manyetik kaynak derinliği (DTB) haritası

Deprem episantr dağılımı (Şekil 2), 57°–58°D boylamları arasında ve alanın doğusunda 27°K enleminin güneyinde belirgin kümelenmeler göstermektedir. Bu alanlar, manyetik verilerde belirlenen yüksek gradyan zonları ve fay kontrollü blok sınırları ile mekânsal olarak örtüşmektedir. Bu örtüşme, sismik aktivitenin kabuksal yapı ve tektonik sınırlarla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Odak derinlikleri büyük ölçüde sıg kabukta (0–40 km) yoğunlaşmakla birlikte, dalma-batma zonunun kuzeyinde ve volkanik merkezlerin altında 40–80 km arasında değişen derin odaklı depremler de gözlenmektedir. Bu dağılım, dalan Arap levhasının düşük eğimli geometrisi ve üst manto kamasındaki deformasyonla uyumludur (Mokhtarzadeh vd., 2025). $M \geq 5.0$ depremlerin odak mekanizmaları, bölgedeki baskın rejimin doğrultu atımlı ve ters faylanma bileşenleri içerdiğini göstermektedir. Saravan, Mirjaveh, Khan Mohammad Chah, Sa'ad

Abad ve Dargiyaban gibi aktif fay sistemleri hem yapısal denetimde hem de sismik aktivitenin dağılımında belirleyici rol oynamaktadır (Jami vd., 2019).

Taftan volkanı çevresindeki sığ manyetik kaynaklar, volkan altındaki magmatik sokulumlar ve hidrotermal alterasyon zonlarıyla ilişkili olup (Richards vd., 2018) volkanın güncel fumarolik aktivitesiyle tutarlıdır (Zelenski vd., 2020). Volkanik kayaçların kalk-alkalin ve yüksek-K kalk-alkalin jeokimyasal karakteri, magmanın dalma-batma sürecinden etkilenmiş bir manto kaynağından türediğini göstermektedir (Biabangard ve Moradian, 2008; Richards vd., 2018).

Sonuç olarak, manyetik ve sismolojik verilerin birlikte yorumlanması, Makran Dalma-Batma Zonu'nun yapısal ve tektonik özelliklerinin daha bütüncül biçimde ortaya konulmasını sağlamaktadır. Manyetik anomaliler temel kayaç morfolojisini, fay kontrollü blok sınırlarını ve sedimanter örtü kalınlığındaki değişimleri yansıtmakta; depremsellik verileri ise bu yapısal unsurların güncel deformasyon süreçleriyle ilişkisini göstermektedir. Bölgedeki sismik tehlike değerlendirmeleri, aletsel dönem verilerinin yanı sıra tarihsel ve jeolojik kayıtları da kapsayacak şekilde yapılmalıdır.

REFERANSLAR

- Biabangard, H., and Moradian, A., 2008. Geology and geochemical evaluation of Taftan Volcano, Sistan and Baluchestan Province, southeast of Iran. *Chin. J. Geochem.*, 27, 356–369.
- Blakely, R.J., 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, pp 441.
- Ghahamghash, J., Schmitt, A.K., Shaiian, K., Jamal, R., Chung, S.-L., (2019). Magma origins and geodynamic implications for the Makran-Chagai arc from geochronology and geochemistry of Bazman volcano, southeastern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171, 289-304.
- Jami, M., Solgi, A., Pourkermani, M., Moridi Farimani, A.A., 2019. GIS-based Analysis of Relative Tectonic Activity in Southeast of Iran with a focus on Taftan volcano. *Acta Montanistica Slovaca*, 24(4), 351-365.
- Meyer, B., Chulliat, A., Saltus, R., 2017. Derivation and error analysis of the Earth magnetic anomaly grid at 2 arc min resolution version 3 (EMAG2v3). *Geochem Geophys Geosyst*, 18, 4522-4537.
- Mokhtarzadeh, R., Sobouti, F., Priestley, K., (2025). Imaging the seismic structure of the western Makran Subduction Zone. *Geophys. J. Int.*, 242, 1-16.
- Reeves C., 2005. Aeromagnetic Surveys; Principles, Practice and Interpretation. GEOSOFT, 155pp.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J., Somerton, I.W., 1990. Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.
- Richards, J.P., Razavi, A.M., Spell, T.L., Locock, A., Sholeh, A., Aghazadeh, M., 2018. Magmatic evolution and porphyry-epithermal mineralization in the Taftan volcanic complex, southeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 95, 258-279.

- Roest, W.R., Verhoef, J., Pilkington, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116–125.
- Roest, W. R., and Pilkington, M., 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58(5), 653–659.
- Salem, A., Ravat, D., Gamey, T. J., Ushijima, K., 2002. Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 231–244.
- Styron, R. and Pagani, M. (2020), The GEM Global Active Faults Database. *Earthquake Spectra*, 36: 160-180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>
- Wessel, P., Luis, J., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D. 2019. The Generic Mapping Tools Version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556-5564.
- Zelenski, M., Chaplygin, I., Farhadian Babadi, M., Taran, Y., Campion, R., Mehrabi, B., Shakeri, A., Delavari, M., Nekrylov, N., Pokrovsky, B., Sevastyanov, V., Kuznetsova, O., 2020. Volcanic gas emissions from Taftan and Damavand, the Iranian volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 397, 106880.

Yüksek Katlı Konutlarda Enerji Etkin Tasarım Stratejileri ve İyileştirme Yaklaşımları

Aisha SHUQAIDEF¹
Özlem AYDIN²

- 1- YL Öğr.; Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü. Trabzon, Türkiye.
aishasaif.2023@gmail.com ORCID No: 0009-0001-2343-1191
- 2- Doç. Dr.; Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü. Trabzon, Türkiye.
ozlem.aydin@ktu.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3666-3557

ÖZET

Yüksek katlı konut binaları, inşaat teknolojilerindeki ilerlemeler ve artan arazi maliyetleri nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır. Bu yüksek yapılar aydınlatma, iklimlendirme ve elektrikli cihazların çalıştırılması için önemli miktarda enerji tüketmekte, dolayısıyla sera gazı emisyonlarına ve küresel ısınmaya önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, yüksek katlı binalarda enerji verimliliğinin teşvik edilmesi, sürdürülebilir kentsel büyümenin sağlanması ve çevresel etkinin azaltılması için büyük önem taşımaktadır.

Yüksek sıcaklıklar ve yoğun güneş ısısı ile karakterize edilen sıcak çöl iklimleri, enerji tüketimini azaltma konusunda daha büyük zorluklar ortaya koymakta ve enerji verimliliği hedeflerine ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bu tür bölgelerdeki yüksek katlı konut binalarında enerji verimliliğini artırmak için, tasarımın en erken aşamalarından itibaren bölgesel iklim koşullarını dikkate almak önemlidir. Bu çalışma, yüksek katlı binalarda enerji verimliliği kavramlarını araştırmakta ve bu yapılarda enerji tüketimini etkileyen faktörleri incelemektedir.

Bu çalışmanın amacı, aşırı iklim koşullarında yer alan yüksek katlı konut binalarında enerji verimliliğini artırmak için en etkili stratejileri ve önlemleri belirlemektir. Mevcut literatürün analizi ve sıcak-çöl iklimlerinde enerji verimli üç yüksek katlı bina örneğinin değerlendirilmesi yoluyla, yüksek katlı konut binalarda kullanılan en etkili enerji verimliliği stratejileri belirlenmiştir. Bu stratejiler arasında gölgeleme cihazlarının kullanımı, doğrudan güneş ışığına maruz kalmayı en aza indirecek şekilde binanın geometrisinin şekillendirilmesi ve yönlendirilmesi, yenilikçi teknolojilerin ve yerel kaynaklı sürdürülebilir malzemelerin etkin kullanımı ile enerji tüketimini ve çevresel etkiyi toplu olarak azaltan yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanması yer almaktadır. Elde edilen bulgular, enerji verimli yüksek katlı konut binalarının tasarımında mühendislere ve mimarlara değerli bilgiler sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler – Yüksek Katlı Konut Binaları, Enerji Verimliliği, Enerji Tüketimi, Sürdürülebilirlik, Sıcak-Çöl İklimi.

GİRİŞ

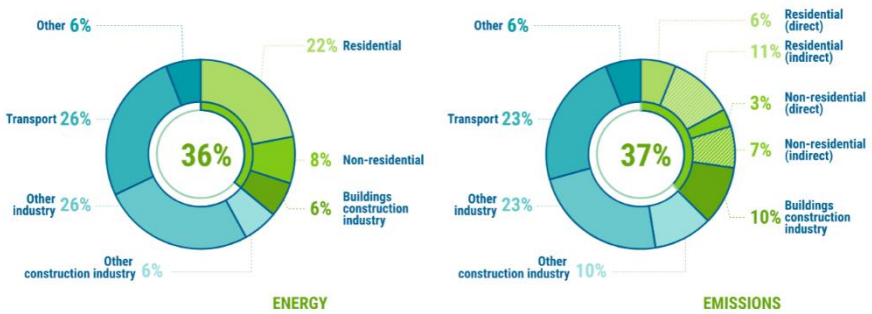
Enerji verimliliği, yaşam standartlarından veya çıktıların kalite ve miktarından ödün vermeden enerji girdisini azaltırken üretkenlik seviyelerini sürdürme yeteneği olarak tanımlanır. Hizmet veya ürün birimi başına enerji kullanımında azalma ile karakterize edilmektedir. Enerji, modern yaşamın birçok yönünü etkileyen yaygın bir faktördür. İnsanlar, elektrikli ekipmanların işleyişinde küçük değişiklikler yaparak, termal konfor, aydınlatma ve ulaşım ihtiyaçlarını karşılamada verimliliği artırarak enerji tüketim modellerini

iyileştirebilirler. Enerji verimliliğinin artırılması, insanların iklim değişikliğiyle mücadeleye yardımcı olmalarını ve aynı zamanda enerji faturalarından tasarruf etmelerini sağlayabilir. Binalar, özellikle yalıtım tekniklerinin kullanımı yoluyla enerji verimliliğinde önemli bir rol oynamaktadır (Konak, 2019:34).

Enerji verimliliği 1973 enerji krizinin bir sonucu olarak dikkat çekmiştir. O dönemde fosil yakıtların arzının sınırlı olduğu ve bunların çıkarılması ve dağıtımının zorluklar yaratabileceği görülmüştür. İklim değişikliği ve küresel ısınmanın ortaya çıkmasıyla birlikte, bu dönemde başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin önemi artmıştır. Basitçe söylemek gerekirse, enerji verimliliği “aynı görevi yerine getirmek için daha az enerji kullanmak” anlamına gelir. Enerjinin mümkün olan en iyi şekilde kullanılmasını ifade etmektedir (Berberoğlu, 2009:8; Firoozi vd., 2025:1). Enerji tüketimini ve buna bağlı maliyetleri azaltmak, fosil yakıtlara olan bağımlılığı en aza indirmek, karbon emisyonlarını ve çevresel etkileri düşürmek amacıyla birçok sektör enerji verimliliği stratejileri benimsemiştir. Sanayi, ulaştırma ve en önemlisi inşaat sektörleri bu stratejilerin uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Binalarda Enerji Verimliliği

Bina sektöründeki enerji, evlerin ve işyerlerinin inşası, ısıtılması, soğutulması ve aydınlatılması için kullanılan enerjinin yanı sıra bu binalara kurulmuş olan aletleri ve ekipmanları da kapsamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) son raporuna göre, küresel enerji emisyonlarının ve tüketiminin neredeyse üçte biri bina sektöründen kaynaklanmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, özellikle binalar ve inşaat sektörü, küresel enerjiyle ilgili emisyonların %37'sine ve küresel nihai enerji tüketiminin %36'ına neden olmaktadır (Verma vd., 2023:5).

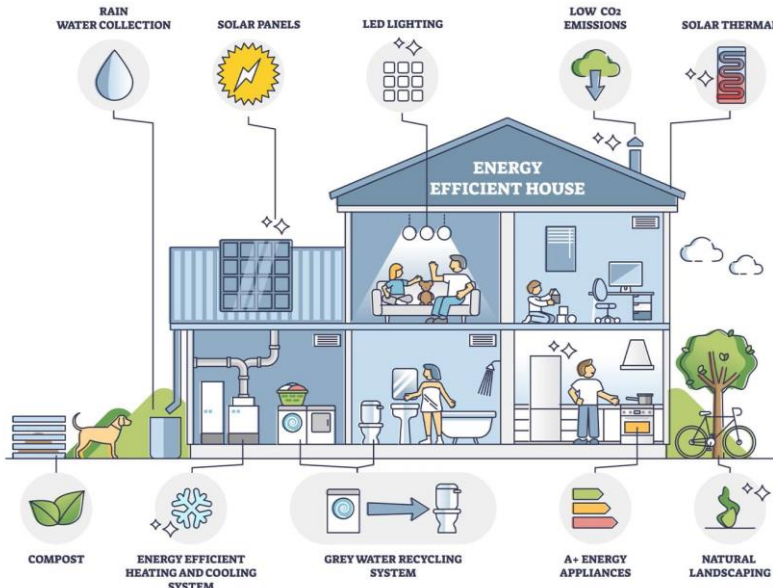


Şekil 1: Binalar ve İnşaat Sektörünün Küresel Nihai Enerji Tüketimi ve İlgili Karbondioksit Emisyonlarındaki Oranı (Verma vd., 2023:5).

Binalar dünyadaki enerji tüketiminden ve karbon emisyonlarından büyük ölçüde sorumludur. Bu sektörlerdeki enerji talebi, gelişmekte olan ülkelerdeki enerji erişilebilirliğinin artması, artan iklimlendirme ihtiyaçları,

enerji yoğun cihazların kullanımının artması ve dünyadaki kullanım alanının hızla genişlemesi gibi faktörlerin etkisiyle artmaya devam etmektedir. Özel politika önlemleri uygulanmadığı takdirde, binalardaki enerji tüketiminin 2050 yılına kadar potansiyel olarak %70 artacağı tahmin edilmektedir (Camarasa, 2023:1).

Enerji verimliliğinin artırılması yoluyla sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğinin etkilerinin ortadan kaldırılmasına katkıda bulunulması amaçlanmaktadır. Binalarda enerji verimliliğinin artırılması yeni bir yaklaşım olmayıp, geleneksel olarak çeşitli şekillerde uygulanmaktadır. Örneğin, geleneksel evlerdeki avlular gibi mimari pasif tasarımların benimsenmesi yaz aylarında iç konforu artırmak için kullanılmıştır. Binalarda enerji verimliliği, özellikle 1973 yılındaki enerji krizinin ardından ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte daha fazla ilgi görmeye başlamıştır. Geliştirilen standartlar ve yönetmeliklerle birlikte daha fazla sayıda bilimsel çalışma yapılmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra, enerji etkin tasarım gibi yeni tasarım yaklaşımları geliştirilmeye başlanmıştır (Soğukoğlu, 2015:14).



Şekil 2: Enerji Verimli Binanın Tasarım Örneği (Solar, 2024:1).

Binalarda Enerji Verimliliğinin Önemi

Daha dayanıklı ve sürdürülebilir bir geleceğe ulaşmak için binalarda enerji verimliliğine öncelik vermek önemlidir. Binalarda enerji verimliliğinin önemi, sağladığı birçok avantajdan kaynaklanmaktadır. Örneğin, binalar küresel enerji tüketiminin önemli bir oranını oluşturduğundan, enerji verimliliğinin artırılması iklim değişikliğinin üstesinden gelmek için sera gazı

emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Ayrıca, ithal yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini artırır ve enerji tüketimini azaltarak toplam enerji talebinde azalma sağlarken yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve çevresel etkileri en aza indirmek yoluyla sürdürülebilir kalkınma hedeflerini desteklemektedir. Bunun yanı sıra, enerji verimli binalar, genellikle bina kullanıcıları için daha iyi iç mekân sıcaklığı ve konforu sağladığından sağlık ve refah düzeyini iyileştirebilmektedir. Ayrıca, Enerji verimli binalar enerji faturalarını azaltarak ev sahipleri ve işletmeler için önemli maliyet tasarrufları sağlamaktadır (Konak, 2019:44).

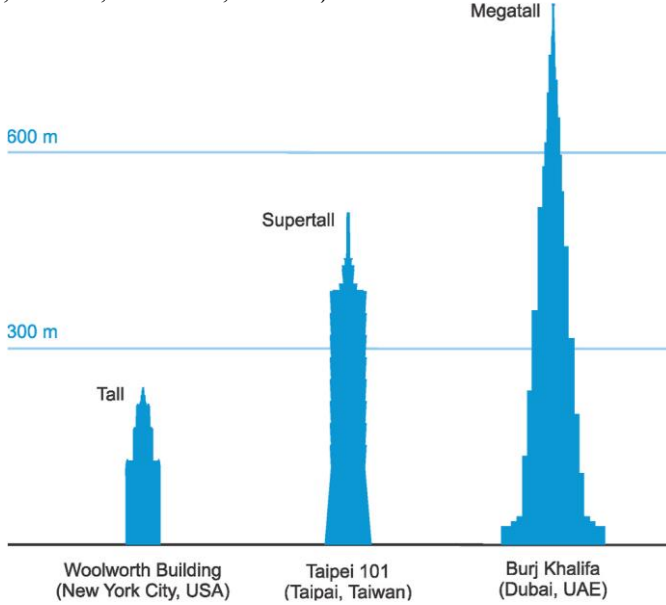
Binalarda enerji verimliliğini optimize etmek, enerji tüketimini azaltırken konforlu ortamlar yaratmayı, çevresel etkiyi en aza indirmeyi ve giderleri azaltmayı kapsamaktadır (Çibik, 2014:45). Bunu başarmak için, bir binanın enerji verimliliğini etkileyen çeşitli faktörleri incelemek çok önemlidir. Bu faktörler, binanın bulunduğu yere özgü kontrol edilemeyen çevresel faktörlerin yanı sıra planlama ve inşaat aşamalarında alınan kararlarla belirlenen yapısal faktörleri de içermektedir (Çibik, 2014:46; Türkmen, 2017:6). Ayrıca, bir binanın enerji tüketimi, bina işletimi ve bakım yöntemleri, bina sakinlerinin davranış kalıpları ve iç ortamdaki koşullar gibi bina kullanıcılarıyla ilgili faktörlerden de etkilenmektedir (Olu-Ajayi vd., 2024:2).

Çevresel faktörler topografik, iklimsel ve yeşil bitki örtüsü etkileri olarak sınıflandırılabilir. İklimsel faktörler güneş ışınımı, dış hava sıcaklığı ve nemi, rüzgâr ve yağış seviyelerini kapsamaktadır (Çibik, 2014:46; Türkmen, 2017:10). Binalara ilişkin faktörler şu şekilde özetlenebilir: bina konumu, bina yönelmesi, bina aralıkları, bina formu, bina kabuğunun özellikleri, doğal havalandırma ve güneş kontrol sistemleri, mekân organizasyonu, malzeme seçimi ve kullanımıdır (Çibik, 2014:53; Türkmen, 2017:14; Yağlıca, 2022:75). Bina ile ilgili söz konusu faktörler ise enerji verimli inşaat için pasif tasarım sistemleri olarak kabul edilir. Binalarda enerji verimliliğini önemli ölçüde etkileyen aktif tasarım sistemleri de vardır. Aktif sistemler iki tipe ayrılabilir: HVAC sistemleri ile elektrik ve aydınlatma sistemleri (Yüksel, 2019:22). Aktif tasarım sistemleri, çevresel koşulları aktif bir şekilde yöneterek ve kontrol ederek binalarda enerji verimliliğinin optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. HVAC sistemleri sıcaklığı, nemi ve hava kalitesini düzenlerken, elektrik sistemleri ve aydınlatma güç dağıtımı yoluyla enerji tüketimine katkıda bulunur. Bu aktif sistemler, enerji verimliliğini ve bina kullanıcılarının konforunu daha da artırmak için akıllı bina teknolojileriyle entegre edilebilmektedir (Yüksel, 2019:23). İklimsel etmenler hem konutlarda hem de ticari binalarda bina enerji verimliliğini etkileyen en önemli faktörler olarak tanımlanmıştır (Olu-Ajayi vd., 2024:20).

Yüksek Katlı Binalarda Enerji Verimliliği

Yüksek Binalar ve Kentsel Habitat Konseyi'ne (CTBUH) göre, “yüksek bina” kavramının tek ve mutlak bir tanımı yoktur. Bunun yerine, tanım öznel ve çeşitli kriterlere göre değerlendirilebilir. Genel olarak, 14 ya da

daha fazla katlı veya 50 metreden daha yüksek bir bina yüksek bina olarak kabul edilebilir. Ayrıca, önemli yüksekliklere ulaşan binalar alt gruplara ayrılır: Süper yüksek: 300 metre veya daha yüksek binalar. Mega yüksek: 600 metre veya daha yüksek binalardır (Aydın, 2017:15; Council on Vertical Urbanism, 2026:1; Helal vd., 2024:4).

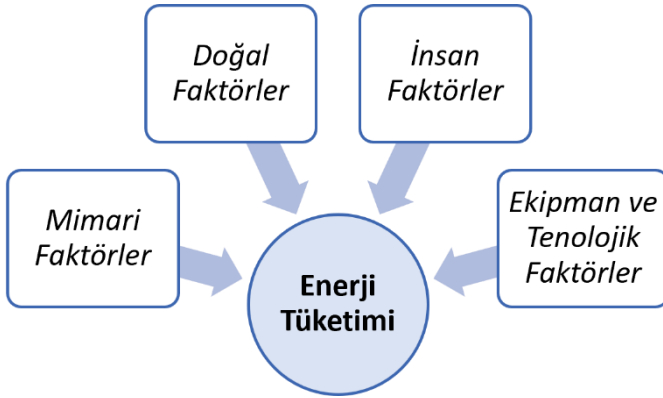


Şekil 3: CTBUH'a (2017) Göre: Yüksek, Süper Yüksek ve Mega Yüksek Binalar (Helal vd., 2024:4).

Yüksek katlı binaların inşası dünya çapında yaygınlaşmıştır. Ancak bu binalar, alçak binalara göre yaklaşık iki buçuk kat daha fazla enerji tüketmektedir. Karbon emisyonları ise neredeyse iki katına çıkmaktadır. Ayrıca, bina yüksekliği arttıkça gaz tüketimi de yaklaşık %40 oranında artmaktadır (Mostafavi vd., 2021:1; Steadman, 2017:1). Yüksek katlı binalar, diğer bina türlerinden özellikle yükseklikleriyle ayırt edilmektedir. Yüksek katlı binalarda artan yükseklik hem enerji tüketimi hem de bina kullanıcıların konforu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Örneğin, bina yüksekliği arttıkça rüzgâr hızı ona paralel olarak artar; bu nedenle yüksek binalar daha şiddetli rüzgarlara maruz kalır ve enerji kaybı artar, havalandırma sorunları ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, hava sıcaklığı yükseklik arttıkça düşer; dolayısıyla üst katlar, zemin katlara göre daha fazla ısıtma enerjisi tüketmektedir. Bunların yanı sıra, binalar yükseldikçe komşu binaların gölgesinden daha az etkilendikleri için doğrudan güneş ışığına daha fazla maruz kalırlar; bu da güneş ısı kazanımını ve soğutma ihtiyacını artırmaktadır (Kamal vd., 2023:13; Mostafavi vd., 2021:15; Steadman, 2017:1).

Bu günlerde, insanların zamanlarının ortalama %90'ını iç mekanlarda geçirdiği düşünüldüğünde (Camarasa, 2023:1), binaların sakinleri için konforlu ve sağlıklı olmasını sağlamak, daha fazla enerji tüketimi anlamına gelir ve bu da çevreye olumsuz etkileri olan karbon dioksit emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerle, sürdürülebilirliği sağlamak için diğer binalara göre daha fazla enerji tüketen yüksek binalarda enerji verimliliği önlemlerinin alınması çok önemlidir (Mostafavi vd., 2021:1). Birçok yeni yapılmış yüksek katlı bina enerji verimliliği sağlama konusunda başarılı kabul edilmektedir. Bu binalar genellikle enerji tüketimini en aza indirmek için gelişmiş teknolojiler ve tasarım stratejileri içermektedir. Örnekler arasında verimli HVAC sistemleri, akıllı aydınlatma kontrolleri, akıllı cepheler ve yüksek performanslı bina kabukları yer almaktadır. Ayrıca, yüksek binaların dikey yapısı, yatay alan yerine dikey alanı kullanarak -yukarı doğru inşa edilerek, yüksek binalar daha az yer kaplar- ve doğal aydınlatma ve havalandırma kullanımını en üst düzeye çıkararak enerji verimliliğine katkıda bulunabilmektedir.

Yüksek katlı binalarda enerji verimliliği sağlamak için, bu yapıların enerji tüketimini etkileyen faktörleri belirlemek çok önemlidir. Şekil 4'te görüldüğü gibi, bu faktörler dört kategoriye sınıflandırılabilir: mimari faktörler, doğal faktörler, insan faktörleri, ekipman ve teknolojik faktörler (Elotefy vd., 2015:1360).



Şekil 4: Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörleri

Mimari faktörler, bina tasarımı ve özelliklerini kapsamaktadır. Örneğin, bina formu, bina yönelimi, bina yüksekliği, bina kabuğu tasarımı, yapı malzemesi seçimi, doğal aydınlatma, doğal havalandırma ve gölgelendirme sistemleri, yüksek katlı binaların enerji tüketimini etkileyen mimari faktörlerdir. Doğal faktörler ise insan müdahalesinden bağımsız olarak ortaya çıkan unsurları kapsamaktadır. Bina bölgesinin yapısı, bina konumu ve iklim koşulları doğal faktörlere örneklerdir. İnsan faktörleri, bina kullanıcılarının davranışları ve faaliyetlerinin yanı sıra yasalar ve yönetmelikleri de

kapsamaktadır. Son olarak, ekipman ve teknolojik faktörler, HVAC sistemleri, aydınlatma ve bina yönetim sistemleri gibi bina içinde kullanılan teknolojileri kapsamaktadır (Elotefy vd., 2015:1363). Bu faktörleri anlamak, enerji verimliliğini artırmaya ve yüksek binaların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik stratejiler geliştirmek için büyük önem taşımaktadır.

Yüksek katlı binalarda enerji verimliliği, pasif tasarım stratejilerinin ve yüksek performanslı bina kabuğu sistemlerinin benimsenmesiyle tasarımın erken aşamalarında başlayan sistematik bir hiyerarşi aracılığıyla sağlanabilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu ile inşaat aşamasına, enerji verimli bina sistemlerinin kullanımı ile işletme aşamasına kadar devam etmektedir. Enerji modelleme ve simülasyonundaki teknolojik gelişmeler, enerji yüklerini tahmin ederek ve gerektiğinde yenileme önlemlerine yol göstererek bu süreci daha da desteklemektedir. Son olarak, enerji verimliliğinin sağlanmasına katkıda bulunan bina kullanıcılarının davranışlarının analiz edilmesi ve katılımlarının sağlanması açısından, bina kullanım sonrası aşama da önemlidir. Tüm bu aşamalar, enerji verimliliğinin elde edilmesinde önemli bir rol oynayan politikalar, yönetmelikler ve düzenlemeler tarafından yönlendirilmektedir (Jørgensen & Ma, 2025:39).



Şekil 5: Enerji Verimliliği Stratejilerinin Hiyerarşisi (Jørgensen & Ma, 2025:6)

Sıcak İklimlerde Enerji Verimli Binalara Yönelik Stratejiler

Sıcak iklimlerde, yüksek katlı binalarda enerji verimliliği sağlamak daha fazla zorluk yaratmaktadır. Aşırı dış ortam sıcaklıkları ve yüksek güneş ışıınımı, enerji verimli yüksek katlı binaların tasarımını ve inşasını daha fazla zorlaştırmaktadır. Sıcak iklim bölgelerinde, özellikle uzun yaz aylarında, iç mekân konforunu sağlamak için soğutma ve HVAC sistemlerine yönelik enerji tüketimi önemli ölçüde artar; bu da daha yüksek karbon emisyonlarına ve artan enerji talebine yol açabilmektedir (Ghabra vd., 2017:411; Abu Hilal, 2023:7; Elnabawi vd., 2024:1; Friess & Rakhshan, 2017:486; Hilal vd., 2023:2; Mirrahimi vd., 2016:1509). Bu koşullar, mekanik soğutma sistemlerine olan yoğun bağımlılığı azaltmak, enerji tüketimini en aza indirmek ve ulusal enerji sistemleri ile kaynaklar üzerindeki yükü azaltmak için enerji verimliliği stratejilerinin özenle benimsenmesini gerektirmektedir.

Sıcak iklimlerde yapılan araştırmalar, çevresel etkileri en aza indirmek ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla, binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik pasif tasarım stratejilerine yoğunlaşmıştır. Bu stratejiler temel olarak mimari faktörlere odaklanmaktadır. Örneğin, BAE’de yapılan bir çalışma, Abu Dabi’deki yüksek katlı konut binalarında Çift Cidarlı Cephelerin (DSF) uygulanmasının enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini, iklimlendirme enerjisi tüketimini %25’in üzerinde azaltabileceğini ve Arap Körfezi’nin sıcak ikliminin ortaya çıkardığı benzersiz enerji zorluklarını ele alabileceğini vurgulamaktadır (Hilal vd., 2023:17). Benzer bir çalışmada, Suudi Arabistan’daki yüksek konut binalarının bina kabuğu için enerji verimli stratejileri incelenmiştir. Duvar tipinin termal özellikleri soğutma yüklerini %10’a kadar azaltabilirken, dış gölgeleme cihazlarının uygulanmasının güneş kazançlarında %30’a kadar azalma sağlayabileceğini vurgulamıştır. Ayrıca, bina yöneliminin etkili bir şekilde dikkate alınması, çevre bölgeleri için soğutma yüklerini %25 ve güneş kazançlarını %60 oranında önemli ölçüde azaltabilmektedir (Ghabra, 2017:244).

Buna ek olarak, İran’da yapılan bir çalışma, pasif tasarım stratejilerini dikkate alarak, sıcak ve nemli bir iklime sahip olan İran’ın Buşehr kentinde çeşitli faktörlerin bir binanın enerji tüketimini nasıl etkilediğini incelemiştir. Bina şekli ve yönü, pencere-duvar oranı, gölgeleme teknikleri, güney cephesi ve teraslarda farklı tuğla örme desenleri kullanılarak açıklıkların oluşturulması, merkezi bir avlunun dahil edilmesi, iklime uygun malzemelerin seçimi ve farklı mevsimlerde ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri için sıcaklık temelli bir programın geliştirilmesi gibi çeşitli mimari faktörler incelenmiştir. Bu faktörlerin optimize edilmesinin, binanın genel enerji tüketimini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur (Mohebianfar vd., 2024:7).

Katar’ın aşırı sıcak ve nemli ikliminde yapılan bir çalışmada, örnek bir yüksek konut binasının soğutma gereksinimlerine odaklanarak, çeşitli bina özelliklerinin enerji tüketimini nasıl etkilediği incelenmiştir. Pencere-Duvar oranının (WWR) kritik bir faktör olduğunu ortaya koymuştur ve enerji verimli binalarda dikkatli mimari tasarım ihtiyacını vurgulamıştır. Ayrıca çalışma,

farklı katlar arasında soğutma tüketiminde kayda değer bir farklılık olduğunu, en üst katların birinci kata göre yaklaşık %140 daha fazla enerji tükettiğini ortaya koymakta, bu da yüksek binalarda kullanılan tasarım ve işletme stratejileri hakkında soru işaretleri yaratmaktadır (Kamal vd., 2023:13).

Bu çalışmalara göre, sıcak iklimlerde enerji tüketimini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak için bina yönü, bina kabuğu ve yapı malzemeleri gibi mimari faktörlerin optimize edilmesi en önemli rol oynamaktadır. Yüksek katlı binaların tasarımının ilk aşamalarında mimari faktörlerin dikkate alınması gerektiği halde, esas olarak inşaatın sonrasında ele alınan insanla ilgili faktörler, ekipman ve teknolojik sistemler gibi diğer faktörlerin de binaların toplam enerji tüketiminde önemli bir rol oynadığı belirtilmelidir.

Enerji Verimli Binalar: Sıcak İklimlerden Uygulama Örnekleri

Enerji verimli binalara başarılı örnekler sıcak iklimlerde görülebilmektedir. Özellikle yüksek katlı konut binaları, enerji verimliliği stratejileri uygulayarak aşırı iklim koşullarına karşı dayanıklılık sergilemiştir. Bu enerji verimli yüksek katlı konut binalarının incelenmesi doğrultusunda, uygulanan stratejiler mimarlara ve mühendislere sıcak iklimler için en uygun yaklaşımları benimsemeleri konusunda değerli bilgiler sağlayabilmektedir.

Birleşik Arap Emirlikleri'nin Dubai kentinde bulunan üç yüksek katlı konut binası, enerji verimliliği stratejilerinin uygulanmasını incelemek amacıyla seçilmiştir. Bu binaların seçilme kriterleri, aşırı sıcak iklimlerde konumlanmaları, yüksek katlı konut yapıları olmaları ve enerji verimli binalar olarak tanınmalarıdır.

Index Tower

Birleşik Arap Emirlikleri'nin, Dubai'de bulunan Foster+Partners tarafından tasarlanmış “Index Tower”, daireler, ofisler ve mağazalardan oluşan yüksek bir binadır. Dubai'nin en tanınmış yapılarından biri olan bu devasa bina 80 katlıdır ve 328 metre (1,076 ft.) yüksekliğindedir (Tablo 1). Aslında Index Tower, 2011 yılında Yüksek Binalar ve Kentsel Habitat Konseyi tarafından “Orta Doğu ve Afrika'nın En İyi Yüksek Binası” ödülüne layık görülmüştür (URL-1, 2026; URL-2, 2026).

Tasarım, yapay soğutma ve aydınlatma sistemlerine olan ihtiyacı en aza indiren verimli bir düzene sahip kompakt, yüksek katlı bir yapı aracılığıyla çevresel faydaları optimize ederek sürdürülebilir konseptten yararlanmaktadır. Kule doğu-batı eksenini boyunca yönlendirilmiş, bina manzarayı en üst düzeye çıkarmak ve sert çöl güneşine maruz kalmayı en aza indirerek güneş ısısı kazanımını azaltmak için şehrin ekseninden uzaklaşmıştır (URL-3, 2026; URL-4, 2026).

Tablo 1: Index Tower Genel Bilgileri

Bina tipi	<i>Karma kullanımı (ofis + Konut)</i>	
Tamamlanmış yılı	2010	
Kat sayısı	80	
Yükseklik	328 m	
Mimari/Gayrimenkul	Foster+Partners	
Ödül	Orta Doğu ve Afrika'nın En İyi Yüksek Binası	

Kaynak: (URL-1, 2026; URL-2, 2026; URL-3, 2026; URL-4, 2026; URL-8, 2026)

Binanın doğu ve batısındaki beton çekirdek kütleler ısıyı emerek katları düşük açılı sabah ve akşam güneşinden koruyor ve mekanik havalandırmaya olan bağımlılığı azaltırken, güneye bakan cephede güneş kazancını azaltmak ve iç mekanları korumak için büyük güneş kırıcılar kullanılmaktadır. Binanın çevresel stratejisi, klima ihtiyacını önemli ölçüde azaltarak kiracılar için enerji maliyetlerini düşürmektedir. Yaz aylarında, iç sıcaklık klima olmadan 28 dereceyi geçmemektedir (URL-3, 2026; URL-4, 2026).

Damac Ghalia Tower

DAMAC tarafından Dubai, BAE'de 39 katlı geliştirilen bir konut kompleksi olan Damac Ghalia Tower, enerji tasarrufu, en aza indirilmiş işletme maliyetleri ve gelişmiş iç mekân çevre kalitesine odaklanarak sürdürülebilirliğe olan bağlılığını göstermektedir (Tablo 2). Bu proje, çeşitli sürdürülebilir tasarım özelliklerini uygulayarak Trakhees In-House Certified derecesi ile tanınmıştır. Projeye dahil edilen önemli enerji verimliliği stratejileri arasında yalıtımlı duvar ve çatı bileşenleri, yüksek performanslı cam sistemleri, enerji tasarruflu Fan Coil Üniteleri ve Taze Hava İşleme Üniteleri ile LED ve CFL aydınlatma teknolojilerinin yaygın kullanımı yer almaktadır (URL-5, 2026).

Bu uygulamaların sonucunda Damac Ghalia Tower, ASHRAE standartlarına kıyasla enerji verimliliğinde %29'luk bir artış göstermiştir. Su tasarrufu projenin önemli bir yönünü oluşturmuştur. Düşük debili banyo bataryaları, mutfak lavaboları ve çift sifonlu su dolapları dahil olmak üzere su tasarruflu armatürlerin uygulanması, toplam temiz su tüketiminde %33'lük bir azalma sağlamıştır. Ayrıca, damla sulama teknolojilerinin kullanılması ve

yerli/adaptif bitkilerin dahil edilmesiyle sulamada %65'i aşan bir içme suyu tasarrufu sağlanmıştır. Projede iç ortamın iyileştirilmesine öncelik verilerek düşük VOC içerikli boyalar, kaplamalar, yapıştırıcılar ve sızdırmazlık malzemeleri kullanılmış ve havalandırma sistemlerinin ASHRAE 62.1 standartlarına uygun olması sağlanmıştır (URL-5, 2026).

Tablo 2: Damac Ghalia Tower Genel Bilgileri

Bina tipi	Konut	
Tamamlanmış yılı	2019	
Kat sayısı	39	
Yükseklik	150 m	
Mimari/Gayrimenkul	DAMAC	
Ödül	Trakhees In-House	

Kaynak: (URL-5, 2026; URL-9, 2026)

Projede sürdürülebilir yapı malzemeleri ve inşaat uygulamaları kullanılmıştır. Buna, 21% geri dönüştürülmüş içeriğe ve 41% bölgesel kaynaklı malzemelere sahip malzemelerin kullanımının yanı sıra üretilen inşaat atıklarının %50'sinden fazlası, verimli atık yönetimi stratejileri benimsenerek yeniden kullanılmıştır. Isı adası etkilerini azaltmak için çatıda ve kapalı otopark alanlarında SRI değeri yüksek malzemeler kullanılmış ve operasyonel atıklardan kaynaklanan çevresel etkileri en aza indirmek için geri dönüştürülebilir malzemelerin depolanması ve toplanması için ayrı alanlar sağlanmıştır (URL-5, 2026).

Wasl Tower

Wasl Tower, Dubai'de bulunan ve UNStudio tarafından tasarlanan 64 katlı karma kullanımlı bir yüksek katlı binadır (Tablo 3). Bina, enerji verimliliği sağlamak için yenilenebilir bir araç olarak seramik kanatların kullanıldığı dünyanın en yüksek binalarından biri olmak için tasarlanmıştır (Blandini, 2022:1; Hammoud vd., 2018:51; URL-6, 2026; URL-7, 2023; Vuure vd., 2023:48).

Tablo 3: Wasl Tower Genel Bilgileri

Bina tipi	Karma kullanımı (ofis + Konut)	
Tamamlanmış yılı	2024	
Kat sayısı	64	
Yükseklik	302 m	
Mimari/Gayrimenkul	UNStudio	
Ödül	CTBUH Facade Award, 2025 Award of Excellence	

Kaynak: (Blandini, 2022; Hammoud vd., 2018; URL-6, 2026; URL-7, 2023; URL-10, 2026; Vuure vd., 2023)

Wasl Tower'ın tasarımı hem estetik çekiciliğin hem de işlevsel yeniliğin bir karışımıdır. Kıvrımlı formu, Dubai'nin çöl ikliminde ısı kazanımını en aza indirirken doğal ışığı optimize eden rüzgâr ve güneşe maruz kalma gibi çevresel faktörlere hesaplanmış bir yanıttır. Seramik kaplama ile kaplanan dış cephe, parlamayı ve ısı emilimini azaltarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Kulenin geometrisi, yenilikçi parametrik tasarım ve yüksek teknoloji mühendisliği sayesinde elde edilmiştir. Tasarım, sürdürülebilirliği artırmayı ve enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan çeşitli yenilikçi özellikler içermektedir (Blandini, 2022:1; Hammoud vd., 2018:51; URL-6, 2026; URL-7, 2023; Vuure vd., 2023:48).

Wasl Tower'daki temel enerji verimliliği önlemleri arasında gölge sağlayan, rüzgâr kaynaklı soğutmayı artıran ve gün ışığını binanın içine derinlemesine yansıtan seramik kanatçıkların kullanımı yer almaktadır.

Kanatçıkların yönü (12,8 derece) ile boyutları ve materyalizasyonu, tasarım modelinden elde edilen parametrik veriler kullanılarak geliştirilmiştir. Bu bütünsel cephe, şehrin ritmiyle nefes alan, otonom olarak üretilen ışık desenleriyle süslenmiştir. Bu cephe için temel malzeme olarak kil seçilmiş, böylece cephe kanatları düşük teknolojili camlı seramik elemanlar olarak üretilmiştir. Gün boyunca cephenin seramik elemanları, ısı kaybı ve gölgeleme teknikleriyle doğal bir soğutma sistemi oluşturmaktadır (Hammoud vd., 2018:51; Sobek, 2026; URL-6, 2026; URL-7, 2023; Vuure vd., 2023:48).

Wasl Kulesi'nin cephesinin yaratıcı ve sürdürülebilir tasarımının yanı sıra, bu kulede birçok enerji verimliliği stratejisi uygulanmıştır. Örneğin, sıcak

su erişimini kolaylaştıran güneş termal panellerinin kullanılmasıdır; bronz kaplamalı yansıtıcı camlar ise soğutma yüklerini azaltarak verimli termal performans sunmaktadır. Pasif cephe tasarımı ve aydınlatma kontrol önlemleri bir araya gelerek çevre bölgesi aydınlatma enerjisini %40 oranında azaltmaktadır. Ayrıca, bir ısı pompası sistemi enerji tüketimini ve kulenin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltmaktadır. Kulede karbon emisyonlarını azaltmak için dikey bahçeler bulunmaktadır. Wasl kulesinde değişken soğutucu akışkan teknolojisine sahip (soğutma seviyelerini doluluk ve kullanım modellerine göre ayarlayan) son teknoloji ürünü bir HVAC sistemi gibi yenilikçi enerji tasarruflu teknolojilerin kullanılmaktadır. Akıllı teknoloji, iç mekanları aydınlatma, sıcaklık ve güvenliğin sorunsuz kontrolü için sistemlerle donatılmıştır. Ayrıca, Wasl Tower'ın iç mekanlarında geri dönüştürülmüş ahşap, düşük VOC'li boyalar ve sürdürülebilir tekstiller gibi çevre dostu malzemeler ve kaplamalar kullanılmıştır. Bu malzemeler daha sağlıklı bir iç mekân ortamına katkıda bulunmaktadır. Bu önlemler toplu olarak kulenin sürdürülebilirliğine ve enerji verimliliğine katkıda bulunmaktadır (Hammoud vd., 2018:51; Sobek, 2026:1; URL-6, 2026; URL-7, 2023).

SONUÇ

Sıcak iklimlerde enerji verimliliği açısından başarılı üç yüksek katlı bina örneği analiz edilerek ve literatür taramasında toplanan bilgilerden yararlanılarak en etkili enerji verimliliği önlemleri belirlenmiştir; bu önlemler, aynı düzeyde hizmet veya kalite sağlamak için gereken enerji miktarını azaltmayı amaçlayan stratejileri ve eylemleri ifade etmektedir. Binalar için enerji verimliliği önlemleri, binadaki konfor seviyesini korurken veya iyileştirirken bir binanın enerji tüketiminin azaltılabileceği yaklaşımlardır. Binalarda enerji verimliliği uygulaması şu şekilde kategorize edilebilir: ısıtma talebinin azaltılması; soğutma talebinin azaltılması, havalandırma için enerji gereksinimlerinin azaltılması; aydınlatma için enerji kullanımının azaltılması, su ısıtmak için kullanılan enerjinin azaltılması; ekipman ve cihazların elektrik tüketiminin azaltılmasıdır (Nematchoua vd., 2019:5).

Teknolojideki gelişmeler, mimarların ve tasarımcıların parametrik modelleme ve 3D görselleştirme araçlarını kullanarak yenilikçi fikirleri uygulamalarını kolaylaştırmıştır. Örnek çalışmaların analizi, 2024 yılında tamamlanması planlanan Wasl Tower'ın enerji verimliliği önlemlerinden yararlanma olasılığının Index Tower'a göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Yüksek yapılarda enerji verimliliğini artırmak için en etkili stratejiler iklime bağlı olarak değişmektedir. Tasarım sürecinin başından itibaren, aşırı iklim koşullarında enerji verimliliğini artırmak için en iyi yaklaşımlardan biri bina yönelimini belirlemektir. Tasarımcılar, soğutma için enerji tüketimini azaltmak amacıyla sıcak bölgelerde güneş radyasyonundan kaçınmaya çalışmaktadır. Index Tower'ın yönelimi, güneş ısısı kazanımının

en aza indirilmesinde önemli bir rol oynamış ve güneş kırıcı teknolojilerin benimsenmesi binanın enerji verimliliğini artırmıştır. Güneş kırıcılar güneşten kaçınmak için yeni bir yaklaşım olmamakla birlikte, Wasl Kulesi'nde de seramik paneller olarak kullanılmış ve enerji verimliliğini artırmak için etkili bir strateji olarak kabul edilmiştir. Yüksek binanın şeklini ve geometrisini tasarlamak, doğal aydınlatma, doğal havalandırma, pasif soğutma potansiyelini en üst düzeye çıkarabileceği ve mekaniklere olan bağımlılığı azaltabileceği için bu binalarda enerji verimliliğini artırmak için bir başka önemli stratejidir. Örneğin, Wasl Kulesi'nin kıvrımlı şekli, hâkim rüzgarlara maruz kalan yüzey alanını en üst düzeye çıkararak doğal havalandırmayı iyileştirmiş ve klima ihtiyacını azaltıp Dubai'nin çöl ikliminde ısı kazancını en aza indirmiştir.

Yapı malzemelerinin seçimi enerji verimliliği açısından etkili bir stratejidir; bu strateji, Ghalia Kulesi'ndeki bölgesel kaynaklı malzeme ve Wasl Kulesi'ndeki seramik malzeme olduğu gibi, seçilen malzemenin sürdürülebilir, dayanıklı ve geri dönüştürülebilir olması halinde, geniş dış yüzeyleri nedeniyle özellikle yüksek binalarda enerji verimliliğini artırabilmektedir. Ayrıca, Ghalia Kulesi'ndeki yalıtımlı duvar ve çatı elemanlarında görüldüğü gibi, bina kabuğundaki yalıtım malzemesinin doğru seçimi enerji verimliliğinde kilit bir stratejidir. Buna ek olarak, Ghalia ve Wasl Tower'ın iç mekanlarında düşük VOC'li boyalar gibi çevre dostu malzemelerin tercih edilmesi de daha sağlıklı bir iç mekân ortamına katkıda bulunmaktadır.

Yüksek binalarda enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir diğer başarılı strateji de Ghalia Kulesi'nde enerji tasarruflu fan coil üniteleri ve taze hava işleme ünitelerinin yanı sıra LED ve CFL ampullerin kullanılması ve Wasl Kulesi'nde değişken soğutucu akışkan teknolojisine sahip (soğutma seviyelerini doluluk ve kullanım modellerine göre ayarlayan) son teknoloji ürünü bir HVAC sistemi gibi yenilikçi enerji tasarruflu teknolojilerin kullanılmasıdır.

Yüksek performanslı cam sistemlerinin kullanımı, özellikle geniş cam yüzey alanlarına sahip yüksek binalarda enerji verimliliği açısından en etkili stratejilerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu tür cam seçimlerine örnek olarak, Index Tower'da yüksek performanslı, enerji verimli camın (Super E2 Neutral Grey), Ghalia Tower'da ısı verimliliği yüksek cam ünitelerinin ve Wasl Tower'da bronz kaplamalı yansıtıcı camın kullanımı gösterilebilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmak, enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir diğer önemli stratejidir. Örneğin, Wasl Kulesi'nde sıcak su erişimi sağlamak için güneş termal panellerinin kullanılması enerji tüketimini azaltmaktadır. Wasl ve Ghalia kulelerinde gri su ve atık geri dönüşümü de dahil olmak üzere su tasarrufu ve atık yönetimi, enerji verimliliği için kilit stratejilerdir.

Sıcak ve çöl iklimlerinde yüksek katlı konut binalarını enerji verimli olacak şekilde tasarılmanın zorluğuna rağmen, incelenen örnek yapılar, bütünleşmiş tasarım stratejilerinin ve yenilikçi teknolojilerin enerji kullanımında ve çevresel etkiye önemli azalmalar elde etmek için etkili bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir. Bu stratejiler genellikle bina yöneliminin optimize edilmesini, gölgeleme sistemlerinin kullanılmasını ve güneş ısı kazanımını en aza indirmek için yüksek performanslı cam sistemlerinin kullanılmasını kapsamaktadır (Tablo 4). Bölgesel soğutma veya jeotermal ısı pompaları gibi gelişmiş soğutma sistemleri, bu zorlu ortamlarda enerji verimliliğini daha da artırabilmektedir.

Tablo 4: Örnek Binaların Tasarımında Uygulanan Enerji Verimli Stratejileri

Stratejiler	Index	Ghalia	Wasl
Yenilikçi enerji verimli teknolojiler		✓	✓
İklim duyarlı bina tasarımı	✓		✓
Gölgeleme sistemleri	✓	✓	✓
Bina yönelimi optimizasyonu	✓		✓
Akıllı kontrol sistemleri			✓
Yerel sürdürülebilir malzemeler		✓	✓
Yalıtım malzemesi optimizasyonu		✓	
Yüksek performanslı cam	✓	✓	✓
Yenilenebilir enerji entegrasyonu			✓
Su tasarrufu stratejileri		✓	✓
Atık geri dönüşümü		✓	✓
Yeşil çatı ve dikey bahçeler			✓

Ayrıca, çatı üstü güneş panelleri veya binaya bütünleşmiş fotovoltaikler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji taleplerinin karşılanmasına yardımcı olabilir ve genel sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunabilir. Akıllı bina yönetim sistemlerinin uygulanması, aydınlatma, sıcaklık ve havalandırmayı doluluk düzenine ve dış koşullara göre dinamik olarak ayarlayarak enerji kullanımını daha da optimize edebilmektedir.

Yeşil çatılar ve dikey bahçeler, ek yalıtım sağlarken ve hava kalitesini iyileştirirken kentsel ısı adası etkisini azaltmada da önemli bir rol oynayabilmektedir. Ayrıca, inşaatta yerel kaynaklı ve sürdürülebilir malzemelerin kullanılması, bu yüksek katlı konut binalarının genel karbon ayak izini azaltarak daha geniş sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirebilecektir.

Sonuç olarak, yüksek katlı konut binalarında enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler şu şekilde özetlenebilir;

- Bina yöneliminin optimize edilmesi,
- Yenilikçi ve iklime duyarlı bina formu ve geometrisinin tasarlanması,
- Gölgeleme sistemlerinin ve güneş kontrol teknolojilerin benimsenmesi,

- İnşaatatta yerel kaynaklı ve sürdürülebilir malzemelerin kullanılması ve optimum yalıtım malzemesi seçilmesi,
- Yenilikçi enerji verimli teknolojilerin ve akıllı kontrol sistemlerin kullanılması,
- Yüksek performanslı cam seçilmesi. Örneğin, termal açıdan verimli cam üniteleri ve yansıtıcı camları,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması. Örneğin, çatı üstü güneş panelleri veya binaya bütünleşmiş fotovoltaikler,
- Su tasarrufu ve atık yönetimi stratejilerinin uygulanması,
- Yeşil çatıların ve dikey bahçelerin uygulanması, bu da ek yalıtım sağlarken ve hava kalitesini iyileştirirken kentsel ısı adası etkisini azaltabilmektedir.

REFERANSLAR

Abu Hilal, N. (2023, 1 Mart). *Energy Performance Of Double Skin Façade For High-Rise Residential Building In Abu Dhabi*. (Yüksek Lisans Tezi).

Aydın, D. (2017). *Yüksek konut yapılarında iç ortam kalitesinin enerji verimliliği ve kullanıcı konforuna etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi).

Berberoğlu, U. (2009). *Sürdürülebilir mimarlık anlayışı çerçevesinde enerji verimliliği kavramının güncel konumu ve yeni yaklaşımlar*. (Yüksek Lisans Tezi).

Blandini, L. (2022, 11 Ekim). Innovative Façades for a Sustainable Architecture: Best Practices Projects and Research Work. *Facade Tectonics Institute*. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://www.facadetectonics.org/papers/innovative-façades-for-a-sustainable-architecture> adresinden erişildi.

Camarasa. (2023, 6 Eylül). The energy efficiency policy package: Key catalyst for building decarbonisation and climate action – Analysis. *IEA*. 2 Haziran 2026 tarihinde <https://www.iea.org/commentaries/the-energy-efficiency-policy-package-key-catalyst-for-building-decarbonisation-and-climate-action> adresinden erişildi.

Council on Vertical Urbanism. (2026). Tall Building Criteria—The Skyscraper Center. *Skyscraper Center by Council on Vertical Urbanism*. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://www.skyscrapercenter.com/criteria> adresinden erişildi.

Çibik, T. (2014). *Balkanlarda Bektaşi Tekkelerinin enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi -Harabâti Baba Dergâhı örneği*. (Yüksek Lisans Tezi).

Elnabawi, M. H., Saber, E. ve Bande, L. (2024). Passive Building Energy Saving: Building Envelope Retrofitting Measures to Reduce Cooling Requirements for a Residential Building in an Arid Climate. *Sustainability*, 16(2), 626. doi:10.3390/su16020626

Elotefy, H., Abdelmagid, K. S. S., Morghany, E. ve Ahmed, T. M. F. (2015). Energy-efficient Tall Buildings Design Strategies: A Holistic Approach. *Energy Procedia*, The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability –TMREES15, 74, 1358-1369. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.782

Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O. ve Firoozi, A. A. (2025). Innovations in energy-efficient construction: Pioneering sustainable building practices. *Cleaner Engineering and Technology*, 26, 100957. doi:10.1016/j.clet.2025.100957

- Friess, W. A. ve Rakhshan, K. (2017). A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 485-496. doi:10.1016/j.rser.2017.01.026
- Ghabra, N. (2017). *Energy Efficient Strategies for the Building Envelope of Residential Tall Buildings in Saudi Arabia*. (Doktora Tezi).
- Ghabra, N., Rodrigues, L. ve Oldfield, P. (2017). The impact of the building envelope on the energy efficiency of residential tall buildings in Saudi Arabia. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12(4). doi:10.1093/ijlct/ctx005
- Hammoud, M., Baker, W., Scheeren, O., Parakh, J., Hean, C. K., Lochhead, H., ... Parry, E. (2018). CTBUH 2018 Conference Special: Polycentric Cities: The Future of Vertical Urbanism. *CTBUH Journal*, (4), 44-51.
- Helal, J., Trabucco, D. ve Savovic, D. (2024). Embodied carbon premium for vanity height: A case for the exclusion of decorative spires in the design of tall buildings. *Journal of Cleaner Production*, 456, 142334. doi:10.1016/j.jclepro.2024.142334
- Hilal, N. A., Haggag, M. ve Saleh, A. D. (2023). Optimizing Energy Efficiency in High-Rise Residential Buildings in Abu Dhabi's Hot Climate: Exploring the Potential of Double Skin Façades. *Buildings*, 13(9). doi:10.3390/buildings13092148
- Jørgensen, B. N. ve Ma, Z. G. (2025). Energy Efficiency and Decarbonization Strategies in Buildings: A Review of Technologies, Policies, and Future Directions. *Applied Sciences*, 15(21). doi:10.3390/app15211660
- Kamal, A., Kadam, S. T., Hou, D., Hassan, I. G., Wang, L. (Leon), Sezer, N. ve Rahman, M. A. (2023). Detailed profiling of high-rise building energy consumption in extremely hot and humid climate. *Cleaner Energy Systems*, 4, 100060. doi:10.1016/j.cles.2023.100060
- Konak, D. (2019). *Deprem riski nedeniyle yenilenen konut türü yapıların kentsel ve çevresel sürdürülebilirlik bağlamında enerji verimliliği açısından irdelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi).
- Mirrahimi, S., Mohamed, M. F., Haw, L. C., Ibrahim, N. L. N., Yusoff, W. F. M. ve Aflaki, A. (2016). The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1508-1519. doi:10.1016/j.rser.2015.09.055
- Mohebianfar, M., Nazifard, M. ve Hatamian, M. R. (2024). Maximizing Energy Performance in Hot and Humid Climates: Passive Cooling Techniques for Gulf Area Buildings. *2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM)* içinde (ss. 1-8). 2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM), sunulmuş bildiri. doi:10.1109/ICTEM60690.2024.10631873
- Mostafavi, F., Tahsildoost, M. ve Zomorodian, Z. (2021). Energy efficiency and carbon emission in high-rise buildings: A review (2005-2020). *Building and Environment*, 206, 108329. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108329
- Nematchoua, M. K., Yvon, A., Roy, S. E. J., Ralijaona, C. G., Mamiharijaona, R., Razafinjaka, J. N. ve Tefy, R. (2019). A review on energy consumption in the residential and commercial buildings located in tropical regions of Indian Ocean: A case of Madagascar island. *Journal of Energy Storage*, 24, 100748. doi:10.1016/j.est.2019.04.022
- Olu-Ajayi, R., Alaka, H., Egwim, C. ve Grishikashvili, K. (2024). Comprehensive Analysis of Influencing Factors on Building Energy Performance and

Strategic Insights for Sustainable Development: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(12). doi:10.3390/su16125170

Sobek, W. (2026). Al Wasl Tower – Vertical structure & highly complex structural system. *Werner Sobek AG*. <https://www.wernersobek.com/projects/al-wasl-tower/> adresinden erişildi.

Soğukoğlu, M. (2015). *Mevcut BA Konut Binalarında Enerji Verimliliğinin Artırılması İçin Mimari Çözüm Önerileri*. (Yüksek Lisans Tezi).

Solar, Nat. (2024, 21 Mayıs). Maximizing Energy Efficiency. *NATiVE Solar*. <https://nativesolar.com/maximizing-energy-efficiency/> adresinden erişildi.

Steadman, P. (2017). UCL-Energy “High-Rise Buildings: Energy and Density” research project results | UCL Bartlett Faculty of the Built Environment. 26 Mayıs 2026 tarihinde <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/news/2017/jun/ucl-energy-high-rise-buildings-energy-and-density-research-project-results> adresinden erişildi.

Türkmen, E. (2017). *Yapılarda enerji etkinliği sağlayan tasarım kriterlerinin geleneksel mimari bağlamında (Ayvalık) Küçükköy örneğinde incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi).

URL-1. (2026). Index Tower Guide | Bayut. *Building Guides for Dubai, Abu Dhabi & Entire UAE | Bayut*. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://www.bayut.com/buildings/index-tower/> adresinden erişildi.

URL-2. (2026). The Index—The Skyscraper Center. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://www.skyscrapercenter.com/building/the-index/387> adresinden erişildi.

URL-3. (2026, 25 Mart). The Index (Dubai). *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Index_\(Dubai\)&oldid=1345319199](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=The_Index_(Dubai)&oldid=1345319199) adresinden erişildi.

URL-4. (2026). Index Tower | Projects. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://www.fosterandpartners.com/projects/index-tower> adresinden erişildi.

URL-5. (2026). Trakhees-EHS In-House Certification Fact Sheet DAMAC GHALIA TOWER, Plot JVC18TCP011, DUBAI, UAE. [https://pcf.ac/en/Rules%20and%20Regulations/Trakhees/Civil%20Engineering%20Department/Permits%20\(Green%20Buildings\)/Fact%20Sheets/DAMAC-Damac%20Ghalia-%20JVC18TCP011.pdf](https://pcf.ac/en/Rules%20and%20Regulations/Trakhees/Civil%20Engineering%20Department/Permits%20(Green%20Buildings)/Fact%20Sheets/DAMAC-Damac%20Ghalia-%20JVC18TCP011.pdf) adresinden erişildi.

URL-6. (2026). Wasl Tower | A Sustainable Mixed-Use Icon by UNS in Dubai. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://www.unstudio.com/projects/wasl-tower/> adresinden erişildi.

URL-7. (2023). Wasl Tower set to be one of the most sustainable towers in Dubai. *Government of Dubai Media Office*. 3 Haziran 2026 tarihinde <https://mediaoffice.ae/en/news/2023/november/08-11/wasl-tower-set> adresinden erişildi.

URL-8. (2026). Propsearch.ae—Dubai Real Estate Research Platform. 25 Eylül 2026 tarihinde <https://propsearch.ae/dubai/al-barsha-city-tower> adresinden erişildi.

URL-9. (2026). DAMAC Hands Over Its First Sharia-compliant Development Ghalia In JVC - MEP Middle East. <https://www.mepmiddleeast.com/projects/project-news/72515-damac-hands-over-its-first-sharia-compliant-development-ghalia-in-jvc> adresinden erişildi.

URL-10. (2026). Propsearch.ae—Dubai Real Estate Research Platform. 25 Eylül 2026 tarihinde <https://propsearch.ae/dubai-construction-companies/china-ties-ju-civil-engineering-group-co> adresinden erişildi.

Verma, A., Gupta, V., Nihar, K., Jana, A., Jain, R. K. ve Deb, C. (2023). Tropical climates and the interplay between IEQ and energy consumption in buildings: A review. *Building and Environment*, 242, 110551. doi:10.1016/j.buildenv.2023.110551

Vuure, F., Lodi, F., Kristesiashvili, R., Marks, N. ve Miller, H. (2023). Glazed Terracotta-Based Ceramic Façades. *Technology|Architecture + Design*, 7(1), 46-50. doi:10.1080/24751448.2023.2176138

Yağlıca, A. Ö. (2022). *Enerji verimliliği bağlamında yapı tasarım kriterleri ve yeşil bina sertifikalandırılması*. (Yüksek Lisans Tezi).

Yüksel, T. (2019). *Mevcut bir binanın yenilenmesinde pasif ve aktif seçeneklerin enerji verimliliği ve maliyet açısından değerlendirilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi).

