

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL GELİŞMELER VE TEMATİK İNCELEMELER

Editör
Doç. Dr. Altan Yılmaz

İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Gelişmeler ve Tematik İncelemeler

Editör

Doç. Dr. Altan Yılmaz

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör

Doç. Dr. Altan Yılmaz

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım

Ekim, 2026

Yayımcı Sertifika No

45813

ISBN

978-625-91206-8-3

©copyright

Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118

web: www.platanuspublishing.com

e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1.....	5
İklim Değişikliği ve İklim Kaynaklı Doğal Afetler Arasındaki İlişki Cengiz Koç	
BÖLÜM 2.....	31
Gümüşhane İlinde Taşkın Riskinin Mühendislik Yaklaşımlarıyla Değerlendirilmesi <i>Ahmet Emir Köse</i> Salim Serkan Nas Evin Nas	
BÖLÜM 3.....	45
Sepiyolitın Geoteknik Mühendisliğindeki Rolü: Mineralojiden Mühendislik Uygulamalarına Bütüncül Bir Değerlendirme <i>Ebru Civelekler</i> Kamil Bekir Afacan	
BÖLÜM 4.....	63
Çocukların ve Gençlerin İklim Eyleminde Güçlendirilmesi: Su Bilinci, Türkiye Uygulamaları ve COP31 Perspektifi Hüseyin Yıldırım Dalkılıç	
BÖLÜM 5.....	<i>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</i>
Çocukların ve Gençlerin İklim Eyleminde Güçlendirilmesi: Su Bilinci, Türkiye Uygulamaları ve COP31 Perspektifi Hüseyin Yıldırım Dalkılıç	

BÖLÜM 1

İklim Değişikliği ve İklim Kaynaklı Doğal Afetler Arasındaki İlişki

Cengiz Koç¹

¹ Prof. Dr., Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi,
Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Muğla/Türkiye. ORCID: 0000 0001 7310 073X

1. GİRİŞ

İklim değişikliğine ilişkin toplumsal algılar sıklıkla fotoğraflar, videolar, görgü tanığı ifadeleri ve medya tarafından şekillendirilmektedir (Wilson, 2000). Oluşan algılar arasında iklim değişikliğinin meydana gelip gelmediği, iklim değişikliğinin doğal güçlerden mi yoksa antropojenik zorlamalardan mı kaynaklandığı ve bu değişikliklerin çeşitli doğal afetlerin sıklığını, yoğunluğunu ve/veya süresini etkileyip etkilemediği hakkındaki görüşler yer almaktadır. Toplumun bu bakış açılarına ilişkin tutumları oldukça değişkendir. Bu farklılıklar, iklim değişikliğini hiç duymamış olanlardan, iklim değişikliğinin sadece politik olduğunu düşünenlere ve son olarak iklim değişikliğini hafifletmek için davranışlarını değiştiren bireylere kadar uzanmaktadır (Semenza vd., 2008; Koç, 2025). Bu yelpazede, iklim değişikliğiyle doğal afetler arasındaki ilişkinin görüşlerini etkilediği farklı seviyelerde iklim değişikliği bilgisine sahip bireyler de yer almaktadır.

Doğal afet dünyanın bir veya daha fazla sisteminde doğal olarak meydana gelen aşırı bir olaydır. Dünya'nın başlangıcından bu yana meydana gelen bu olaylar insan varlığının oluşturduğu sosyal yapılardan bağımsız hareket etmektedir (Burton vd., 1993). Ancak, bu bağımsızlık doğal afetlerin insanları etkilemesini veya etkilememesini engellememektedir. Doğal afetler, risk, maruz kalma, savunmasızlık ve müdahalenin bir fonksiyonu olarak görülmektedir (Tobin ve Montz, 1997). Doğal afet ve tehlike ilişkisi, savunmasızlık tartışılırken özellikle belirgin hale gelmektedir. Doğal olarak meydana gelen tehlikeler, özellikle savunmasız nüfus ve altyapıya insan sosyal yapılarının katılımıyla afetlere dönüşmektedir (Cannon, 1994; Chapman, 1994; Mileti, 1999). Doğa ve insan arasındaki bu etkileşim birçok şekilde meydana gelmektedir. Savunmasız nüfuslar toplumlar içinde ve çeşitli toplumlar arasında farklı şekilde etkilenebilir (Cannon, 1994). Buna karşılık, insan sosyal yapılarının doğal afetler üzerine olası etkileri sadece tek bir şekilde meydana gelmekte, doğal çevreyi düzenlenme sonucunda ortaya çıkmaktadır. Savunmasız nüfusların kesiştiği noktada doğal olarak meydana gelen bu afetler, sıklıkla geçmiş afetlerin yıldönümlerini vurgulayan, yakın gelecekte bir sonraki potansiyel tehdit konusunda uyarıda bulunan veya küresel ısınmanın iklim değişikliğini, endüstri, kamu politikası ve günlük yaşamlarımızı etkileyen diğer yönleriyle rapor eden çeşitli medya kuruluşları tarafından sıklıkla tartışılmaktadır.

Doğal afetlerin ölçümleri büyüklük, sıklık, süre, alan yayılımı, başlangıç hızı, mekânsal dağılım ve zamansal aralık bileşenlerinden oluşmaktadır. Büyüklük, doğal bir afet için şiddet ölçüsünü; sıklık, olayın önemli bir büyüklükte ne sıklıkla beklenebileceğini; süre, olayın devam ettiği zaman ölçüsünü; başlangıç hızı, koşulların bir olay için ortalamadan önemli büyüklükteki bir olaya geçtiği zamanı; alan yayılımı, mekânsal dağılım ve zamansal aralık ise bir olayın mekânsal referanslarını ifade etmektedir (Burton vd., 1993). İklim değişikliği

etkileri kademeli ve birleşerek iklim riskini artırmakta ve acil eylem ihtiyacını vurgulamaktadır. Afrika Boynuzunda, 2020-2022 yıllarında meydana gelen kuraklıklar 2016-2017 yıllarında oluşan yıkıcı kuraklıkları geride bırakmış ve yaklaşık 26 milyon insan şiddetli gıda güvensizliğiyle karşı karşıya kalmıştır (IOM, 2023). 2020 yılında Avustralya, 24 milyon hektar araziye yok eden en kötü orman yangını sezonunu yaşamıştır (Binskin vd., 2020). 2021 yılında Bangladeş'in üçte biri siklon yağışları nedeniyle su altında kalmıştır. Sadece 2023'te Amerika Birleşik Devletleri 25 iklim felaketi yaşamış ve 1 milyar ABD doları tutarında hasara neden olmuştur (Jay vd., 2023). Ancak, iklim uyumu bu ve diğer birçok risk ve ihtiyaçla baş edememiştir (EEA 2019, UNEP, 2023). İklim uyumu çalışmaları yeterli miktarda fon alamadığı için (UNEP 2023) iklim politikası hedeflerine ulaşmada olması gerekenden çok yavaş bir hızda yürütülmekte (GCA, 2019; IPCC 2022) ve fonlar eşit olmayan bir şekilde dağıtılmaktadır (IPCC 2018). Bu nedenle, en çok ihtiyaç duyulan yerlerde iklime uyum eylemlerini desteklemek sınırlı kaynakların stratejik olarak kullanılmasını sağlamaktır. Küresel, ulusal, bölgesel ve yerel düzeylerde iklime uyum eylemlerine öncelik vermek, değişikliklerin gelecekteki yansımaları anlamak ve iklimle ilgili felaketlerden kaynaklanan tarihsel etkilerin mekânsal kalıplarını değerlendirmeye yapılabilir (Alice, 2021).

İklim değişikliğinden etkilenen kişilerin sayısına ilişkin tahminler yapılmakta (CRED, 2020) ve iklim değişikliğinin insanlar üzerindeki etkilerinin büyüklüğünü ortaya koymak için çalışmalar yürütülmektedir. Ancak, bu tahminler ülke bazında yapılmakta ve insanların yerel düzeylerde en çok etkilendiği alanları belirtmemektedir. Tarihsel verilere dayalı sentezlenmiş mekânsal bilgilere erişim, karar vericilerin iklim uyumunun ihtiyaç duyulduğu yerde harekete geçmesi (Coninck vd., 2018), insanların ve ekosistemlerin belirli iklim değişikliği etkilerine uyum sağlaması için hedeflenen stratejileri belirlemesi ve sınırlı fonların stratejik tahsisini yönlendirmesi açısından önemlidir.

Bu çalışma, 1995-2005 yılları arasında Küresel Su İzleme veri tabanından derlenen iklim verileri ve 2004-2023 ve 2024 yıllarında gerçekleşen afetlere ilişkin EM-DAT verileri kullanılarak iklim göstergelerindeki değişim ve iklim değişikliğine olan etkileri, ülkeler ve kıtalar arasında iklimle ilgili afet etkilerindeki farklılıkları anlamayı, insanların bu tür afetlerden en fazla etkilendiği idari alanları ve meydana gelen kayıpları belirlemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, iklim değişikliğinden kaynaklanan afetleri azaltmak için neler yapılması ve hangi önlemlerin alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

2. Veri ve Yöntem

Bu çalışmada, 1995-2005 dönemine ilişkin iklim göstergeleri (yağış, hava sıcaklığı, hava nemi, toprak suyu, bitki örtüsü, nehir akışları, yüzey suyu oluşumu, göl hacmi, karasal su depolama) 2024 yılı iklim verileriyle

karşılaştırılarak iklim değişikliğinden kaynaklanan karasal su döngüsünün değişimi ve iklim kaynaklı doğal afetler üzerine etkileri araştırılmıştır. Küresel Su İzleme veri tabanından 1995-2005 dönemi ve 2024 yılı için derlenen iklim verileri, EM-DAT (Emergency Events Database) veri tabanından 2004-2023 dönemi ve 2024 yılında gerçekleşen doğal afetlerin çeşitleri, sayısı, insanlar üzerine etkilerine ilişkin verileri kullanılmıştır. EM-DAT kayıtlarından doğal afetler, iklim kaynaklı doğal afetler, afet çeşitlerinin kıtalar, ülkeler ve havzalara göre mekânsal dağılımı, afetlerden etkilenen ve yaşamını kaybeden insanların sayısı 2004-2023 ve 2024 yılları için alınmıştır (EM-DAT, 2004-2023; 2024). Önemli iklim göstergelerinin doğal afetler üzerinde etkisinin olup olmadığı ilgili veri tabanı ve raporlardan incelenmiş bazı çıkarımlar yapılmış ve sonuçlara ulaşılmıştır. Çalışmada, 2004-2023 yılları arasındaki 20 yıllık sürecin ortalama (baz) değerleri 2024 yılıyla karşılaştırılmıştır. EM-DAT 10 ve 20 yıllık aralıklar ile oluşan afetlere ilişkin ortalama verileri içeren raporlar yayınlamaktadır. EM-DAT 'ın olaylar ve etki değişkenleri hakkında eksik veriler gibi sınırlamalarına karşın (Jones vd., 2022; Green vd., 2019), veri tabanı yönetim ekibi, bilgi toplamak için çeşitli kaynaklara güvenme ve denetimde (Delforge vd., 2024) veri kontrolü ve doğrulama önlemlerini uygulamaktadır. EM-DAT afet tipolojisi, tehlike sınıflandırması ve tehlike sözlüğüne (IRDR, 2014) dayanmaktadır. Öncelikle iklim değişikliğinin etkilerini anlamakla ilgilenildiği için çalışma meteorolojik, hidrolojik ve iklimsel afet grupları veya alt grupları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu afetler, veri setinde kaydedilen diğer afet türlerine göre iklimdeki değişikliklerle daha güçlü ilişkiye sahip olduğu için çalışmanın odak noktasını sadece iklimle ilgili afetler oluşturmaktadır.

2.1.Küresel Su İzleme Veri Araştırması

Küresel Su İzleme (Global Water Monitor)'nin temel amacı, güncel, küresel, doğru iklim ve su bilgilerini serbest ve kolaylıkla erişilebilir hale getirmektir. Küresel Su İzleme, iklim ve su kaynakları hakkında ücretsiz, hızlı ve küresel bilgi sağlama amacını paylaşan çeşitli kuruluşlar ve bireylerden oluşan bir konsorsiyumdur. Yıllar boyunca ortaklar yer istasyonlarında ve dünya yörüngesindeki uydular tarafından yapılan su ölçümlerini birleştirmek için yöntemler geliştirmişlerdir. Bunları kullanarak yağış, hava sıcaklığı ve nem, toprak suyu, nehir akışları ve su kütlesi hacmi hakkında güncel bilgiler üretmektedir. Küresel Su İzleme tarafından hazırlanan rapor, 2024 yılında yağış, hava sıcaklığı, nem, toprak ve yeraltı suyu koşulları, bitki örtüsü durumu, nehir akışları, taşkınlar ve göl hacimleri hakkında bilgi içermektedir. Su döngüsünde 1995-2005 yılları arasında oluşan eğilimler ve 2024 yılının en önemli hidrolojik olaylarından bazıları yorumlanmakta ve tartışılmaktadır. Bu raporda gösterilen tüm veriler doğrudan (www.globalwater.online) sitesinden türetilmiş, bu nedenle daha ayrıntılı olarak yeniden üretilebilir veya incelenebilir. Kullanıcılar herhangi bir konum, idari hidrolojik bölge veya elle çizilmiş bir alan için haritaları veya zaman serilerini alabilir ve görselleştirebilir (Van Dijk vd., 2025).

2.2. İklim ve Su İzleme Verilerinin Üretilme ve Hesaplanma Yöntemleri

Yağış ve hava durumu verileri, en son uydu gözlemlerinin küresel olarak mevcut tüm hava istasyonu verileri ve hava durumu tahmin modellerinden gelen bilgilerle birleştirilmesiyle tahmin edilmiştir (Beck vd., 2019; 2022). Toprak suyu, pasif ve aktif (radar) uydu mikrodalga aletleri tarafından yapılan ölçümlerden yorumlanmış ve AB Copernicus İklim Veri Deposu tarafından kullanıma sunulmuştur (CCDS, 2024). Göller, nehirler ve diğer (geçici) su baskını biçimleri de dâhil olmak üzere yüzey suyu oluşumu, NASA'nın MODIS uydu görüntüleri kullanılarak haritalanmıştır (NASA, 2024). Nehir akışları, uydu görüntülerinde nehir genişliğinin otomatik olarak ölçülmesiyle tahmin edilmiştir (Hou vd., 2022). Göl ve rezervuar hacmi, yüzey suyu seviyesi ve yayılımının uydu ölçümlerinin topografya ile birleştirilmesiyle tahmin edilmiştir (Hou vd., 2022). Bitki örtüsü durumu (NDVI), mevcut suya yanıt vermesi ve NASA'nın MODIS uyduları tarafından gözlemlenmiştir (NASA, 2024). Yeraltı suyu, toprak suyu, yüzey suyu, kar ve kara buzu dâhil olmak üzere karasal su depolaması, GRACE Follow-On uyduları tarafından yapılan yerçekimi ölçümlerinden türetilmiştir (Boergens vd. 2020). Eksik veriler, derin öğrenme yaklaşımı kullanılarak yüklenmiştir (Boergens vd. 2020; Mo vd., 2016) (Van Dijk vd., 2025).

2.3. Acil Durum Olayları Veri Tabanı

EM-DAT ülkelere göre ayrıştırılmış afetlerin etkileri hakkında bilgi içeren ve etkilenen idari alanları belirleyen uluslararası bir afet veri tabanıdır. EM-DAT, Universit'e Catholique de Louvain'deki (UCLouvain, Belçika) Afet Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi (CRED) tarafından İnsani Yardım Bürosu (BHA), Amerika Birleşik Devletleri Uluslararası Kalkınma Ajansı (USAID), Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Belçika Hükümeti'nin desteğiyle 1988 yılında kurulmuştur. EM-DAT 1900 yılından bu yana meydana gelen afetlerle ilgili veri toplanmaktadır. Veri tabanında yer alan veriler, Birleşmiş Milletler, ulusal ve uluslararası kuruluşlar, sigorta şirketleri, araştırma enstitüleri ve basın ajanslarını kapsayan çeşitli kaynaklardan derlenmiştir. EM-DAT, önemli etkinin ne anlama geldiğini belirten bir dizi giriş kriterine sahiptir. EM-DAT tarafından listelenen afetler; a) en az 10 ölüm (ölüler ve kayıplar dâhil), b) en az 100 kişinin etkilenmesi, c) uluslararası yardım çağrısı veya acil durum ilanı ölçütlerinden en az birini karşılamaktadır (Donatti vd., 2024).

Bu çalışma için 2 Haziran 2025 tarihinde indirilen veri tabanı, bir kıtayı veya ülkeyi etkileyen afet olayı başına "toplam etkilenen" kişi ve "toplam ölüm" verilerine erişmek için kullanıldı. Bu veriler çalışmada "toplam etkilenen kişi" değişkenini oluşturmak amacıyla birleştirildi. EM-DAT 'ta "toplam etkilenen", belirli bir olay nedeniyle "yaralanan", "etkilenen" ve "evsiz" kişilerin toplamını temsil etmektedir. "Yaralılar", bir afetin doğrudan sonucu olarak fiziksel yaralanmalar, travma veya hastaneye kaldırılan kişiler de dahil olmak üzere acil

tıbbi yardım gerektiren bir hastalık geçirenler, "etkilenenler", bir acil durum sırasında acil yardıma ihtiyaç duyan kişiler ve "evsizler", evleri yıkılan veya ağır hasar gören ve bu nedenle bir olaydan sonra barınağa ihtiyaç duyan kişiler olarak kabul edilmektedir. "Toplam ölümler", ölen veya kayıp olduğu düşünülen, afetten bu yana nerede olduğu bilinmeyen ve resmi rakamlara göre öldüğü varsayılan kişileri kapsamaktadır.

2.4. Ele Alınan Afet Türleri

EM-DAT afet tipolojisi, tehlike sınıflandırması ve tehlike sözlüğüne (IRDR, 2014) dayanmaktadır. Öncelikle iklim değişikliğinin etkilerini anlamakla ilgilenildiği için çalışma meteorolojik, hidrolojik ve iklimsel afet grupları veya alt grupları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu afetler, veri setinde kaydedilen diğer afet türlerine göre iklimdeki değişikliklerle daha güçlü ilişkiye sahip olduğu için çalışmanın odak noktasını sadece iklimle ilgili afetler oluşturmaktadır. EM-DAT 'ta göre "meteorolojik afet alt grubu", "dakikalardan günlere kadar süren kısa ömürlü, mikro ve bölgesel aşırı hava ve atmosfer koşullarının" neden olduğu bir tehliktir. "Hidrolojik afet alt grubu", tatlı ve tuzlu yüzey suyunun oluşumu, hareketi ve dağılımının neden olduğu tehlikeler, "İklimsel afet grubu", mevsim içi iklim değişiminden onlarca yıla yayılan iklim değişimine kadar uzanan uzun ömürlü, orta ve makro ölçekli atmosferik süreçlerin neden olduğu tehlikeler anlamına gelmektedir. Bu çalışmaya, kuraklık, tropikal siklonlar, ani taşkın, nehir taşkını, orman yangını, kara yangını, sıcak hava dalgası, heyelan ve toprak kayması da dâhil edilmiştir. Veri tabanında sadece 2013 yılına kadar kayıtların bulunması nedeniyle kıyı taşkınlarıyla ilgili veriler dâhil edilmemiştir. EM-DAT 'ta sunulan afet alt türleri olan heyelan ve çamur kaymasıyla ilgili veriler analiz için tek bir iklimle ilgili afet (kara ve toprak kaymaları) olarak birleştirilmiştir. Benzer şekilde, afet alt türleri olan orman yangını ve kara yangını hakkındaki veriler iklimle ilgili tek bir afet (orman yangını) olarak birleştirilmiştir. Bu afet türleri ve afet alt türleri, EM-DAT veri tabanında meteorolojik, klimatolojik veya hidrolojik afetler olarak sınıflandırıldıkları ve iklim değişiklikleriyle ilişkilendirildikleri için seçilmiştir (WMO, 2021). Bu çalışmada seçilen afet türleri ve alt türleri "iklimle ilgili afetler" olarak tanımlanmıştır. Analizlerde kullanılmak üzere 2004-2023 yılları arasında meydana gelen (IPCC, 2018) iklimle ilgili afetlere ilişkin tüm veriler belirlenmiştir (Gall vd., 2009) (Donatti vd., 2024).

2.5. Etkilenen Kişiler ve Ülke Başına İklimle İlgili Afet Olaylarının Sayısı

İncelenen 2004-2023 yılları arasında meydana gelen iklimle ilgili afetlerin etkilerindeki farklılıklar 2023 yılında yayınlanan Birleşmiş Milletler Ekonomik ve Sosyal İşler Bakanlığı'nın (UNDESA) dünya nüfus veri setini kullanarak hesaplanan "ülke başına ve iklimle ilgili afet başına" etkilenen kişi yüzdeleri kullanılarak değerlendirilmiştir. EM-DAT 'ta iklimle ilgili afet olaylarının kaydedildiği 172 ülkenin tamamı analizlere dâhil edilmiştir. Afetlerden etkilenen

kişilerin yüzdeleri, diğer bir söylemle, ülkenin her türlü iklim kaynaklı afetten her yıl etkilenen kişi yüzdesinin toplamı 2004-2023 yılları arasında en çok etkilenen ülkeleri (etkilenen nüfus açısından) belirlemek için kullanılmıştır. Her ülke için 2004-2023 yılları arasında bildirilen iklim kaynaklı afet olaylarının sayısı doğrudan EM-DAT 'tan elde edilmiştir. Zaman içinde etkilenen küresel nüfusun yüzdelerindeki eğilimler ve iklimle ilgili afetler birleştirilerek iklim kaynaklı afetlerin toplam sayısındaki eğilimler EM-DAT verileri kullanılarak belirlenmiştir. Etkilenen küresel nüfusun yüzdeleri, 2004-2023 arasında her yıl meydana gelen tüm iklimle ilgili afetlerden etkilenen toplam kişi sayısının o yılki küresel nüfusa bölünmesiyle hesaplanmıştır. Tüm iklimle ilgili afetlerden kaynaklanan olay sayısı 2004-2023 yılları arasında her yıl meydana gelen toplam iklimle ilgili afet olaylarının sayısının toplanmasıyla belirlenmiştir.

2.6. Kullanılan Veri Setinin Sınırlamaları

Bazı çalışmalar EM-DAT veri seti kullanımının sınırlamalarını vurgulamış olsa da (Panwar ve Sen, 2020; Mazhin vd., 2021) bugüne kadar derlenen en kapsamlı küresel ve ücretsiz afet veri tabanıdır. Sınırlamalardan ilki, 10'dan az ölüme neden olan veya 100'den az kişiyi etkileyen olaylar için raporlamanın olmamasıdır. Bu tür kriterler, bu eşikleri karşılamayan, ancak yine de anlamlı etkileri olan önemli olayları hariç tutabilir. Bu nedenle, sonuçlarımız belirli bir nüfus yoğunluğuna sahip bölgeler için önyargılı, ölüm ve etkilenen kişi sayısını hafife alıyor olabilir (Osuteye vd., 2017). Bu nedenle, haritalarımızda ve en çok etkilenen ülkeleri gösteren tablolarda vurgulanan alanlara ek olarak, düşük yoğunluklu alanlarda ve acilen uyum sağlaması gereken düşük nüfuslu ülkelerde nüfuslar olabilir. EM-DAT'ın ikinci sınırlaması, belirli ülkelerin ve bölgelerin eksik veri sorununa yol açan etkileri bildirme kapasitelerinin sınırlı olmasıdır (Jones vd., 2022). Düşük insani gelişime sahip ülkelerin diğer ülkelere göre daha az bildirim kapasitesine sahip olduğu düşünülmektedir. Bu durum, söz konusu ülkelerin ve bölgelerin veri tabanında dengesiz bir şekilde temsil edilmesine neden olabilir. Üçüncü sınırlama, siyasi kaygılar nedeniyle belirli felaketlerin eksik veya fazla raporlanmasına yol açabilecek resmi kayıtlara bağımlılıktır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Küresel Kara Alanı Üzerindeki Su Döngüsünün Değişimi

Küresel Su İzleme Konsorsiyumu (Global Water Monitor Consortium, GWMC) tarafından hazırlanan 2024 yılı Küresel Su İzleme Raporu, yağış, hava sıcaklığı ve nem, toprak ve yeraltı suyu koşulları, bitki örtüsü durumu, nehir akışları, taşkınlar ve göl hacimleri hakkında bilgi içermektedir. Raporda 1995-2005 dönemine ilişkin iklim göstergeleri 2024 yılı aynı iklim verileriyle karşılaştırılarak iklim değişikliğinden kaynaklanan karasal su döngüsü hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca, hangi iklim göstergelerinin iklim değişikliğini etkilediği, hangilerinin etkilemediğini ortaya koymaktadır. Su döngüsündeki

eğilimler ve 2024 yılının en önemli hidrolojik olaylarından bazıları aşağıda yorumlanmakta ve tartışılmaktadır (Van Dijk vd., 2025).

Yağışlar: Küresel kara alanları üzerinde 1995-2005 yılları arasında gerçekleşen ortalama küresel yağış miktarı 2024 yılı yağış ortalamasına yakın olarak gerçekleşmiştir. Aşırı kurak ayların daha sık gerçekleşmesi yönünde bir eğilim görülürken rekor kurak aylar 2024 yılına göre %38 daha yaygındır. Küresel kara alanı yıllık ortalama yağış miktarı 798 mm olup, 2024 yılı ortalama yağış miktarından (786,4 mm) 11,6 mm daha fazladır. Küresel yağış miktarında yıllık 0,65 mm'lik (başlangıca göre yıllık % -0,08) bir düşüş gözlenmiştir. Rekor seviyedeki aylık yağış değerleri 2024 yılına göre %27 oranında daha yüksek gerçekleşmiştir. Ancak, önemli bir eğilim görülmemektedir. Dünya genelinde 4.687 havzada rekor seviyedeki düşük aylık yağış değerlerinin sıklığı 1995-2005 yılları ortalamasından %38 daha yüksektir. Rekor seviyedeki düşük aylık yağış değerleri her on yılda %3,8'lik bir artış eğilimi göstermiştir.

Maksimum Günlük Yağış; İncelenen 2024 yılında gerçekleşen aşırı yağış olayları 1995-2005 dönemine göre %52 oranında daha yaygın gerçekleşmiştir. Batı Afrika, Avrupa ve Asya'da rekor kıran günlük yağış olayları yaşanmıştır. Her on yılda %4'lük önemli bir artış gerçekleşmiştir. Dünya genelinde ortalama 4.687 havzada 2024 yılında meydana gelen en yüksek maksimum günlük yağış miktarı 1995-2005 döneminden %7,8 oranında fazladır. Maksimum günlük yağış için rekor seviyedeki aylık değerlerin sıklığı 1995-2005 ortalamasının %52 üzerindedir. On yılda rekor seviyedeki maksimum yağışların sayısında %4,1'lik önemli bir artış eğilimi göstermiştir. Araştırmalar, daha kısa dönemlerde (beş veya daha az gün) aşırı yağışta artan eğilimlerin azalan eğilimlerden daha yaygın hale geldiğini göstermektedir (Seneviratne ve Zhang, 2021). Bu durumun yerel ani taşkın risklerini artırması beklenmektedir. Toplam 23 ülkede 2024 yılında en yüksek yıllık maksimum günlük yağış miktarı kaydedilmiştir. Dünya genelinde 35 nehir havzasında rekor kıran maksimum günlük yağış toplamaları gerçekleşmiştir. Batı Afrika Nijer havzasında, günümüze kadar gözlemlenen en yüksek tek günlük yağış olaylarından bazılarını yaşanmıştır. Güney Asya'nın Ganj-Brahmaputra ve Sumatra havzaları, Endonezya'daki havzalar gibi benzeri görülmemiş günlük yağış toplamalarına ulaşmıştır. Avrupa'da, Batı Baltık Kıyısı, İngiltere ve Galler'de aşırı yağış olayları görülmüştür. Kuzey kutbu bölgesinde önemli günlük yağış zirveleri kaydedilmiştir. Batı Afrika'da Nijer ve Mali 1979 yılından bu yana rekorları çok aşan değerler bildirilmiştir. Avrupa'da Birleşik Krallık, Slovakya, Norveç ve Lüksemburg rekor seviyelere ulaşırken, Belçika ve Fransa'da rekor seviyede yüksek değerler görülmüştür. Asya'da Hindistan ve Myanmar'da önemli rekorlar bildirilmiş, Çin, Kore ve Moğolistan'da en yüksek tek günlük yağış toplamaları yaşanmıştır. Afrika'da, Doğu Afrika'daki Tanzanya ve Orta Afrika'daki Çad yeni rekorlara sahip ülkeler arasında yer almaktadır.

Hava sıcaklığı: Küresel olarak 2024 yılı karada kaydedilen en sıcak yıl olmuştur. Karada ölçülen hava sıcaklığı 1995-2005 dönemi ortalamasının 1,2°C üzerinde gerçekleşmiştir. Her on yılda 0,35°C'lik bir artış olmuştur. Dünya genelinde 4.687 nehir havzasında rekor seviyedeki aylık ortalama sıcaklık sayısı 45 yıllık kayıttaki en yüksek değeri göstermiş olup, 1995-2005 yılları ortalamasının 9,3 katıdır. On yılda rekor seviyedeki yüksek aylık sıcaklık değerlerinde %97 oranında hızlı bir artış olmuştur. Rekor seviyedeki düşük aylık ortalama sıcaklık sayısı 2024 yılı ortalamasından %85 daha az sıklıkta gerçekleşmiştir. On yılda rekor seviyedeki düşük aylık ortalama sıcaklıklar daha az olup -%66 oranında önemli bir azalma eğilimi göstermiştir. Hiçbir ülke 2024 yılında alışılmadık derecede düşük yıllık hava sıcaklıkları kaydetmezken, 111 ülke rekor seviyede yüksek sıcaklıklar kaydetmiştir. Bunlar arasında Afrika'daki 54 ülkeden 30'u, Avrupa'daki 44 ülkeden 24'ü, Asya'daki 49 ülkeden 22'si, Güney Amerika'daki 35 ülkeden 26'sı ve Okyanusya'daki 14 ülkeden 9'u yer almaktadır. Kanada dâhil olmak üzere 13 ülke oldukça yüksek, ancak rekor olmayan sıcaklıklar kaydetmiştir. Hiçbir nehir havzasında 2024 yılında rekor seviyede düşük yıllık hava sıcaklıkları yaşanmazken küresel olarak 292 nehir havzasının 111'inde rekor yüksek sıcaklıklar gözlenmiştir. Bunlara Güney Amerika'daki Amazon ve Orinoco havzaları, Afrika'daki Kongo, Nijer, Nil ve Zambezi havzaları, Asya'daki Yangtze ve Mekong ve Avrupa'daki Tuna havzası da dâhildir. Afrika'daki Orange ve Okavango havzaları da dâhil olmak üzere otuz dört havzada oldukça yüksek, ancak rekor seviyelerde yıllık sıcaklıklar kaydedilmemiştir.

Yüksek Sıcaklıklar; Dünya çapındaki tüm havzalarda 2024 yılında ölçülen ortalama yıllık maksimum sıcaklık 1995-2005 dönemine göre 1,2°C daha yüksek gerçekleşmiştir. On yılda bir 0,33°C'lik bir artış eğilimi olmuştur. Küresel ortalama sıcak gün sayısı (35°C'ye ulaşan günler) baz dönemden %33 daha yüksek olup, on yılda %8,4'lük bir artış göstermiştir. Hiçbir ülke 2024 yılında alışılmadık derecede düşük maksimum sıcaklıklar veya sıcak günler yaşamamıştır. 34 ülkede rekor seviyede yıllık maksimum sıcaklıklar ve 40 ülkede rekor seviyede sıcak günler gözlenmiştir. On altı ülkede rekor seviyede maksimum sıcaklıklar ve sıcak gün sayısı yaşanmıştır. Bunlar arasında Afrika'da dokuz ülke, Orta Amerika'da iki ülke ve Okyanusya'da üç ülke yer almaktadır. Hiçbir nehir havzasında rekor seviyede düşük maksimum sıcaklık veya sıcak gün sayısı kaydedilmemiştir. Ancak, birçok nehir havzası her ikisi için rekor seviyede yüksek değerler yaşamıştır. On beş nehir havzası her ikisini de yaşamıştır.

Düşük Sıcaklıklar; Kara üzerindeki küresel ortalama yıllık minimum hava sıcaklığı 2024 yılında 1995-2005 dönem değerinden 0,81°C daha yüksek gerçekleşmiştir. On yılda 0,34°C'lik bir artış olmuştur. Kara üzerindeki küresel don olaylı gün sayısı (sıcaklıkların 0°C'nin altına düşmesi) 1995-2005 dönemi değerine göre %7,2 oranında daha az gerçekleşmiş, on yılda -% 2,2'lik düşüş göstermiştir. Dünya genelinde 4.687 su toplama havzasında rekor seviyedeki

aylık minimum sıcaklıklar, 1995-2005 dönemine göre 7,1 kat daha sık görülmüş ve her on yılda %72'lik önemli bir artış eğilimi göstermiştir. Rekor seviyede düşük don olaylı gün sayısının görüldüğü aylar 1995-2005 dönemine göre %22 daha sık görülmüş ve her on yılda %10'luk önemli bir artış göstermiştir. Buna karşılık, rekor seviyede düşük aylık minimum sıcaklıklar 1995-2005 dönemine göre %66 daha az sıklıkta gerçekleşmiş ve her on yılda -%43'lük bir azalma göstermiştir. Rekor seviyede yüksek don olaylı gün sayısının görüldüğü aylar %1,5 daha az sıklıkta görülürken her on yılda -%1,1 oranında önemli bir azalma eğilimi göstermiştir. Yirmi sekiz ülkede rekor seviyede yıllık minimum sıcaklıklar yaşanmıştır. Bunlar arasında Afrika'da 11 ülke, Batı Asya'da 8 ülke, Karayipler'de 4 ülke, Mikronezya'da 2 ülke, Güney Amerika'da Surinam, Güneydoğu Asya'da Brunei Darussalam ve Güney Avrupa'da Malta yer almaktadır.

Hava nemi: Kara üzerindeki küresel ortalama bağıl hava nemi 2024 yılında %64 olup, bu oran 1995-2005 ortalama bağıl nem değeri olan %65'ten düşüktür. Ancak, bu değer 2018 yılından bu yana en yüksek seviyedir. On yılda yaklaşık %0,5 oranında (baz alınan dönem ortalamasına göre -%0,8) bir düşüş görülmüştür. Daha kuru havaya doğru olan bu eğilim, karadaki hava sıcaklığının denizdekinden daha hızlı artmasına bağlanmaktadır (Seneviratne vd., 2021). Dünya genelinde 4.687 nehir havzasında görülen rekor seviyedeki düşük aylık değerleri 2024 yılında baz değerden 2,2 kat daha fazla bir sıklıkta meydana gelmiştir. Rekor seviyede düşük değerlerin yıllık görülme sıklığı on yılda %25 oranında artmıştır. Düşük hava nemi, ekosistem ve insanlar üzerindeki kuraklık etkilerini, orman yangını risk ve şiddetini artırmaktadır. Rekor seviyedeki yüksek aylık değerler baz dönem değerinden %4,3 oranında daha düşük gerçekleşmiştir. On yılda -%15'lik bir azalma meydana gelmiştir. On üç ülkede rekor düzeyde düşük yıllık bağıl nem değerleri kaydedilmiştir. Afrika'da, Demokratik Kongo Cumhuriyeti, Kongo Cumhuriyeti, Gabon, Ekvator Ginesi, Orta Afrika Cumhuriyeti ve Botswana'da; Doğu Avrupa'da, Ukrayna, Romanya ve Bulgaristan'da; Güney Amerika'da Brezilya, Peru, Ekvator ve Guyana'da rekor seviyede düşük bağıl nem değerleri gerçekleşmiştir. Beş ülke daha rekor seviyede düşük yıllık değerler yaşamıştır. Bunlar arasında Güney Amerika'da Bolivya, Kolombiya ve Venezuela ile Doğu Afrika'da Madagaskar ve Güney Sudan yer almıştır. Analiz edilen 292 nehir havzası arasında dokuzu rekor seviyede düşük yıllık değerler kaydetmiştir. Güney Amerika'da Amazon, Guyana Kıyısı, Marajo ve Ekvador-Kolombiya Pasifik Kıyısı havzalarında rekor düşük bağıl nem değerleri gözlenmiştir.

Toprak suyu: İncelenen 2024 yılı için küresel yıllık yüzeye yakın ortalama toprak nemi %21 hacim miktarına sahiptir. Bu değer 1995-2005 yılları ortalamasından %1, göreceli olarak %2,4 daha fazladır. Küresel ortalama toprak suyu koşulları zamanla dalgalanmaktadır. Uydu cihazları sadece yüzeye yakın toprak suyunu ölçmekte, bu durum toplam miktardan daha çok yağış sıklığına

yanıt verebilmekte, ayrıca tarım ve bitki örtüsü değişikliklerinden etkilenmektedir. Dünya genelindeki havzalarda rekor seviyede düşük aylık değerler, baz çizgisine göre %31 daha fazla görülürken, rekor seviyede yüksek aylık değerler %54 daha sık meydana gelmektedir. Sekiz nehir havzasında yıllık toprak nem seviyeleri rekor düzeyde düşük, yirmi bir nehir havzasında yıllık toprak nem değerleri rekor seviyede yüksek kaydedilmiştir.

Vejetasyon (Bitki örtüsü): Kara alanı üzerindeki bitki örtüsünün 2024 yılındaki durumu (NDVI veya normalleştirilmiş bitki örtüsü farkı endeksi) 2001-2005 ortalamasının %6,4 üzerinde ve kaydedilen en yüksek seviyededir. Bitki örtüsünde on yılda %2,3 oranında önemli bir artış eğilimi olmuştur. Bu eğilim, soğuk bölgelerde artan sıcaklıklar, tarımsal genişleme, artan CO₂ ve diğer antropojenik kaynaklardan gelen gübrelerin birleşimine bağlanmıştır. Rekor seviyede düşük aylık NDVI değerleri, başlangıç dönemine göre %26 daha az sıklıkta gözlenmiş ve her on yılda -%26 oranında önemli bir azalma eğilimi görülmüştür. Rekor düzeyde yüksek aylık değerler, her on yılda %74 oranında önemli bir artış eğilimiyle 3,7 kat daha sık gerçekleşmiştir. Sekiz ülke (Doğu Afrika'da Zimbabve, Zambiya ve Malavi; Güneydoğu Asya'da Kamboçya ve Lao; Kuzey Afrika'da Fas; Orta Amerika'da Belize; Kuzey Avrupa'da İzlanda) rekor düzeyde düşük yıllık NDVI değerleri yaşamıştır.

Yüzey suyu oluşumu: Yüzey suyu oluşumundaki yıllık değişimler, büyük sulak alanlar ve göllerin kapsamı ve büyük nehirlerin mevsimsel taşkınları tarafından belirlenmektedir. Ortalama küresel yüzey suyu kapsamı 2024 yılında, 2003-2005 ortalamasının %2,8 altında gerçekleşmiştir. Yüzey suyu oluşumu, yüksek enlemlerde yüzey suyunun daralması nedeniyle 2008 yılından 2011 yılına kadar azalmış ve sabit kalmıştır. Yüzey suyunun her on yılda %3,0 oranında arttığına ilişkin önemli bir eğilim bulunmaktadır. Rekor seviyedeki aylık değerler, başlangıç dönemine göre %16 daha sık görülmekte ve her on yılda %3,2 oranında önemli bir artış eğilimi görülmektedir. Rekor seviyedeki düşük aylık değerler, başlangıç dönemine göre %3,0 oranında daha az sıklıkta görülmüştür. Rekor seviyede su oluşumundaki bazı değişiklikler, özellikle Çin, Hindistan ve Brezilya'da yeni barajların inşasına bağlanabilir. Geri kalanı doğal taşkın yatakları, su kütleleri ve sulak alanlarla ilişkilidir. On beş ülke 2024 yılında rekor düzeyde düşük yıllık yüzey suyu kapsamı kaydetmiştir. Bunlar arasında, Orta Afrika'da Demokratik Kongo Cumhuriyeti, Kuzey Afrika'da Fas, Doğu Afrika'da Mozambik ve Burundi yer almaktadır. Güney Amerika'da Brezilya ve Bolivya, Orta Amerika'da Guatemala, Meksika ve Nikaragua'da rekor düzeyde azalmalar yaşanmıştır. Kuzey Avrupa'da İrlanda, İzlanda, Rusya ve Ukrayna en düşük su kapsamını, Orta Asya'daki Türkmenistan ve Özbekistan ise aynı yüzey suyu miktarlarını yaşamıştır. Yirmi nehir havzasında rekor seviyede düşük yıllık yüzey suyu, otuz dokuz nehir havzasında ise rekor seviyede yüzey suyu kapsamı kaydedilmiştir.

Nehir akışları: Küresel ortalama nehir akışları, dünyanın en yağışlı tropikal ve ılıman bölgelerindeki nehirler tarafından yönlendirilmektedir. Küresel ortalama nehir akışları 2024 yılında, 2003-2005 yılı baz değerinden %5,5 daha düşük gerçekleşmiştir. Ancak, küresel nehir akış hacimlerinde zaman içinde istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim gözlenmemiştir. Rekor seviyedeki aylık deşarj değerleri %46 oranında daha sık ve on yılda %21'lik bir artış eğilimi ortaya koymuştur. Buna karşılık, rekor seviyede düşük aylık deşarj değerleri, başlangıç dönemine göre %8,1 daha az sıklıkta kaydedilmiş ve on yılda -%3,2'lik bir azalma göstermiştir (Gudmonsson vd., 2021). Beş ülkede (Avrupa'da Çekya ve İzlanda, Amerika'da Brezilya, Batı Asya'da Gürcistan ve Doğu Afrika'da Malavi) rekor seviyede düşük yıllık nehir akış değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca, Batı Afrika, Liberya'da rekor seviyede düşük nehir akış değerleri gözlenmiştir. On bir ülkede rekor seviyede yüksek yıllık nehir akışları kaydedilmiştir. Bunlar arasında, Orta Amerika'da Guatemala, Panama, El Salvador; Batı Afrika'da Mali ve Nijer; Orta Afrika'da Orta Afrika Cumhuriyeti ve Kamerun; Avustralya; Avrupa'da İspanya ve Danimarka ve Asya'da Moğolistan yer almaktadır. Üç ülke (Afrika'da Demokratik Kongo Cumhuriyeti ve Nijerya, Orta Amerika'da Nikaragua) rekor seviyede yüksek nehir akışları yaşamıştır. Altı nehir havzasında (Güney Amerika'da Amazon havzası, Kuzey Amerika'da Colorado havzası, Afrika'nın Güneybatı Akdeniz Kıyısı ve Avrupa'da Dinyester ve Bug havzaları ve İzlanda) 2024 yılında rekor seviyede düşük yıllık deşarj değerleri bildirilmiştir. Yirmi bir nehir havzasında çok yüksek yıllık akış değerleri kaydedilmiştir.

Göl hacmi: İncelenen 2024 yılında, su kütlelerinde depolanan küresel ortalama su hacmi 1995-2005 dönem değerinden %0,3 oranında fazladır. Her on yılda %0,18 oranında yukarı yönlü eğilim olmuştur. Dünya genelinde doğal ve yapay göllerdeki tüm suyun yaklaşık üçte ikisi (%64) sadece altı ülkede (Kanada, ABD, Çin, Rusya, Brezilya ve Hindistan) yer almaktadır. En fazla sayıda göl (nispeten küçük) yüksek enlemlerde yer almaktadır. Rekor seviyedeki aylık değerler, 2024 yılında baz alınan dönem değerine göre 9,1 kat daha sık ve on yılda %64 oranında bir artış eğilimi, rekor seviyedeki düşük aylık değerler ise baz alınan döneme göre 2,2 kat daha sık ve on yılda -%28 oranında önemli bir azalma göstermiştir. Dokuz ülkede rekor seviyede düşük göl hacimleri kaydedilmiştir. Bunlar arasında Güney Amerika'da Bolivya ve Surinam, Doğu Afrika'da Mozambik ve Zambiya, Orta Asya'da Türkmenistan ve Özbekistan, Japonya, Batı Asya'da Ürdün ve Ukrayna yer almaktadır. Avrupa'da Bulgaristan ve Kuzey Makedonya'da, rekor seviyede düşük değerler kaydedilmiştir. Yirmi sekiz ülke rekor seviyede göl hacmi azalmaları göstermiştir. Otuz bir nehir havzasında yıllık göl hacimleri rekor seviyede artmıştır.

Karasal su depolaması: Karasal Su Depolaması (KSD) toprak suyu, yeraltı suyu, yüzey suyu, kar ve buz (Grönland ve Antarktika hesaplamalara dâhil edilmemiştir) dâhil olmak üzere kıtalardaki tüm suyun toplamıdır. Küresel ortalama karasal su depolaması 2002-2005 baz değerinin ortalama 31 mm altında

bir deęerle uzun vadeli belirgin dūřuřunu sūrdūrmūřtır. Bu deęer, on yılda 19 mm'lik önemli bir dūřuř eęilimini temsil etmektedir. On bir ūlke rekor seviyede dūřuk yıllık KSD deęerleri, otuz altı ūlke rekor seviyede yıllık KSD deęerleri göstermiřtir. On dokuz nehir havzası, özellikle Gūney Amerika ve Asya'da rekor dūzeyde dūřuk yıllık KSD deęerleri kaydedilmiřtir. Bunlar arasında, Amazon ve Paraguay havzaları ve Gūney Amerika'daki Patagonya ve Gūney řili-Arjantin Pasifik Kıyısı ile Asya'daki Ganj-Brahmaputra, İndus, Ūrdūn, Tarım ve Aral-Amu Darya havzaları yer almaktadır. Afrika'da Nil, Kongo, řebelli-Juba ve ad Glū havzaları; Asya'da Honshu, Qinghai ve Hindistan Arap Denizi kıyıları ve Gūney Amerika'da Kuzey řili Pasifik Kıyı havzası da dāhil olmak ūzere 42 nehir havzasında yıllık KSD deęerleri rekor seviyelerde kaydedilmiřtir.

3.2. İklim Değişikliğinden Etkilenen Afetler

Suyla ilgili afetler 2024 yılında 8.700'den fazla lūme, 40 milyon insanın yerinden edilmesine ve kūresel olarak 550 milyar ABD dolarını ařan ekonomik kayıplara neden olmuřtur. Bu deęer, gerçek rakamlar, eksik veriler ve listelenmeyen olaylar nedeniyle muhtemelen daha yūksektir. EM-DAT oluřan afetleri tetikleyen tehlike tūrūne göre sınıflandırmaktadır. Gūnūmūzde iklim deęiřiklięinden etkilenen afetler hidrolojik (tařkınlr, heyelan, dalga hareketi-tsunami), meteorolojik (fırtına, ařırı sıcaklıklar-sıcak hava dalgaları, sis) ve iklimsel (kuraklık, buzul glū patlaması, orman yangını) olarak sınıflandırılmaktadır (UNDRR, 2020). Bu afetler insanlar ūzerinde insanlık trajedisi, yer deęiřtirme, gıda gūvenlięi, ekonomik zarar ve ekolojik etki olarak kendini göstermektedir.

Tařkınlr: Tařkınlr 2000-2019 yılları arasında tūm afet olaylarının %44'ūnū oluřturmuř ve dūnya genelinde 1.6 milyar insanı etkilemiřtir. Bu deęer, bir afet tūrū için en yūsek rakamdır. Ayrıca, tařkınlr yılda ortalama 163 olayla en yaygın afet tūrūnū oluřturmaktadır. Son yirmi yılda tařkınlardan en çok etkilenen ūlke, yılda ortalama 20 tařkın yařayan Çin'dir. Çin'deki tařkınlr yirmi yıl boyunca toplam 900 milyon insanı etkilemiř ve dūnya genelinde tařkınlardan etkilenen insanların yaklařık %55'ini oluřturmuřtur. Hindistan tařkınlardan en çok etkilenen ikinci ūlkedir. Yılda ortalama 17 tařkın olayı yařanmıř ve toplamda yaklařık 345 milyon insanı etkilemiřtir. 2000-2019 yılları arasında meydana gelen en lūmcūl afetler, Haziran- 2013'te Hindistan'da meydana gelen tařkın (6.054 lūm), Mayıs-2004'te Haiti'de meydana gelen tařkın (2.665 lūm) ve Temmuz-2010'da Pakistan'da meydana gelen tařkın (1.985 lūm) olaylarıdır.

Asya kıtasının tařkın olaylarının %41'ini yařaması ve toplamda 1,5 milyar kiřinin etkilenmesi nedeniyle tařkınlr en yūsek etkiye sahiptir. Dūnya genelinde tařkından etkilenen insanların %93'ūnū oluřturmaktadır. Afrika (763 tařkın olayı) ve Amerika (680 tařkın olayı) da önemli tařkın etkileri yařamaktadır. Tařkın, çoęu afet tūrūnden farklı olarak, inřa edilen barajlar, seddeler ve drenaj sistemleri gibi uygun maliyetli birincil nleme

mekanizmalarına sahip olduğu için taşkın etkilerinin çoğu önlenabilir (UNDRR, 2020; Koç, 2025a).

Fırtınalar (Tropikal siklonlar): Fırtınalar (kasırgalar, siklonlar ve fırtına dalgaları) 2000-2019 yılları arasında yaklaşık 200.000 kişinin ölümüne neden olmuştur. Fırtınalar dünyada ikinci en ölümcül afet türü olup son 20 yılda en ölümcül hava kaynaklı afet türü haline gelmiştir. EM-DAT tarafından bu dönemde kaydedilen 2.043 fırtına bu olayları taşkından sonra ikinci en sık görülen afet türü haline getirmektedir. Fırtınaların birçoğu fırtına yolları üzerinde yer alan yoğun nüfuslu bölgelerin geniş yerleşim şeritlerini kesmekte, özellikle ada devletleri savunmasız kalmaktadır. Maria Kasırgası, 2017 yılında ABD'nin Porto Riko topraklarına çarparak doğrudan 64 ölüme ve yaklaşık 3.000 fazladan ölüme neden olmuştur (Kishore vd., 2018). Dorian kasırgası 2019 yılında Bahamalar'ı vurarak en az 370 ölüm/kayıpla sonuçlanmış olup, bu rakam 400.000'den az nüfusa sahip bir ülke için oldukça yüksektir. Nispeten küçük kara parçasına ve toplam nüfusa karşın Karayipler son yirmi yılda toplam 25,8 milyon insanı etkilemiş ve 5.000'den fazla ölüme yol açan 163 fırtına olayı yaşamıştır. Ayrıca, Karayipler'deki fırtına olayları 121 milyar ABD doları tutarında doğrudan ekonomik kayba yol açmıştır. Bu miktar, küçük bir bölge için oldukça yıkıcı bir etkidir. Taşkın etkilerinin dağılımında olduğu gibi Asya fırtınalardan en çok etkilenen kıtadır. Asya fırtınalardan etkilenen insanların %79'unu oluştururken, en çok etkilenen bölge Doğu Asya'dır. Kıta ayrıca, fırtına ölümlerinin %90'ını oluştururken, Güney Doğu Asya en yüksek ölüm oranlarına sahiptir. Fırtına ölümlerinde en yüksek pay tek bir olaya ait olup, 2008 yılında Myanmar'daki Nargis Siklonu Güney Myanmar'ı vurmuş ve yaklaşık 138.000 ölüme neden olmuştur. Amerika fırtınalar nedeniyle dünyanın toplam ekonomik etkilerinin %72'sini yaşamış ve çoğu fırtına ABD'de meydana gelmiştir. Bilimsel kanıtlar, iklim değişikliğinin bir sonucu olarak dünyanın belirli bölgelerinde taşkın ve fırtına olaylarında artış yaşanacağını göstermektedir (IPPC, 2000; UNDRR, 2020). Afetlere eğilimli bölgelerde toplam dünya nüfusu arttıkça bu tür tehlikelerden korunmaya ihtiyaç duyan nüfusun da artması beklenmektedir. Fırtına drenaj sistemleri, iklim değişikliğinden kaynaklanan artan yağış yoğunluğuna uyum sağlayacak şekilde düzenlenmelidir. Siyasi liderlik, sürdürülebilir finansman, zamanında, ilgili, birlikte çalışabilir ve erişilebilir doğru verilerle desteklenen risk odaklı politikalar en savunmasız olanların geride kalmamasını sağlamanın anahtarıdır. Dayanıklılıkta cesaret verici gelişme ve ilerlemelerin olması günümüzde insan etkilerinin azalmasına neden olmaktadır. Hava durumu tahminlerinin son yıllarda olağanüstü ilerleme göstermesi cep telefonları aracılığıyla güvenilir fırtına tahminlerine erişimi kolaylaştırmaktadır. Bu şekilde yetkililer uyarılar yayınlatabilir ve tahliyeleri organize edebilir ve binlerce hayat kurtarılabilir.

Kuraklıklar: Kuraklık Afrika'yı diğer kıtalardan daha fazla etkilemektedir. EMDAT, 2000-2019 yılları arasında kıtada 134 olay (küresel toplamın yaklaşık

%40'ı) kaydetmiş ve bunların arasında sadece Doğu Afrika'da 70 kuraklık olayı yaşanmıştır. Kuraklıklar açlık, yoksulluk ve az gelişmişliğin devam etmesi açısından yüksek bir insani bedel ödetmektedir (Below vd., 2007). Yaygın tarımsal başarısızlıklar, hayvan kaybı, su kıtlığı ve bulaşıcı hastalık salgınlarıyla ilişkilendirilir. Bazı kuraklıklar yıllarca sürmekte, kapsamlı ve uzun vadeli ekonomik etkilere neden olmakta ve nüfusun büyük kesimlerini yerinden etmektedir (Koç, 2024). Doğu Afrika'da 2005 yılında ardışık mevsimsel yağmurların olmaması 10 ülkeyi ve 16,7 milyon insanı etkilemiştir. 2016 ve 2017 yıllarında El Niño olayından kaynaklanan koşullar Doğu Afrika'da başka bir kuraklığa neden olmuş ve 10,2 milyonu Etiyopyalı olmak üzere 20 milyondan fazla insanı etkilemiştir. EM-DAT, 2000-2019 döneminde toplam 1,4 milyar insanın kuraklıktan etkilendiğini, kuraklığın tüm afet olaylarının sadece %5'ini oluşturmasına karşın ikinci en etkili afet türü haline geldiğini belirtmiştir. EM-DAT verileri afet ölümlerinin sadece %2'sinin kuraklıktan kaynaklandığını göstermesine karşın kuraklığın temel sonucu olan yetersiz beslenme, hastalık ve yerinden edilmeden kaynaklanan dolaylı ölümlerin sıklıkla dikkate alınmaması bu rakamın etkilerini hafife almaktadır (UNDRR, 2020). Bu tür dolaylı ölümler büyük ölçüde acil durum aşamasından sonra gerçekleşmekte ve genellikle yeterince belgelenmemekte veya hiç sayılmamaktadır. Kuraklıktan etkilenen insanların orantısız sayısı, ölümlerle ilgili verilerin eksikliği, kuraklık için etkili erken uyarı sistemlerinin uzun süredir kurulamaması sıkıntı vermektedir. İklim değişikliğinin, özellikle nüfus artışının, kırılğan nüfusların ve gıda güvenliğiyle ilgili zorlukların yaşandığı dünyanın birçok savunmasız bölgesinde kuraklık riskini artırması beklenmektedir (IPPC, 2000).

Aşırı sıcaklıklar ve orman yangınları: 2000-2019 yılları arasındaki aşırı sıcaklıklar dünyadaki tüm afet ölümlerinin %13'ünü oluşturmuş ve bunların çoğunluğu (%91) sıcak hava dalgalarından kaynaklanmıştır. Aşırı sıcaklık ölümlerinin neredeyse tamamı kuzey kürede kaydedilmiş ve tüm ölümlerin %88'i Avrupa'da meydana gelmiştir. 15 Avrupa ülkesinde 2003 yılında meydana gelen büyük bir Avrupa sıcak hava dalgası 72.000'den fazla kişinin ölümüne neden olmuş, en büyük etkiler İtalya (20.089 ölüm) ve Fransa'da (19.490 ölüm) görülmüştür. 2010 yılında meydana gelen bir yaz sıcak hava dalgası Rusya'da 55.000'den fazla ölüme yol açmış, 2019 yazında meydana gelen iki sıcak hava dalgası Fransa'da 1.400'den fazla ölüme neden olmuştur. Avrupa dışında, kaydedilen sıcak hava dalgaları 2000-2019 döneminde daha az yükselmiştir. En dikkat çeken 2015 yılında Hindistan ve Pakistan'da (sırasıyla 2.248 ve 1.229 ölüm) yaşanan Mayıs ve Haziran aylarındaki sıcak hava dalgalarıdır. Genel olarak, Avrupa'da kaydedilen yüksek sıcak hava dalgası ölüm oranının daha iyi bir raporlama sisteminin sonucu olduğuna inanılmaktadır. Sıcak hava dalgaları, dünyanın dört bir yanında savunmasız nüfus ve zayıf altyapıya sahip bölgelerde sıklıkla meydana gelmekte, ancak sıcak hava dalgasıyla ilişkili ölümleri belirlemedeki zorluklar eksik sayıma neden olmaktadır. Sıcak hava dalgalarının

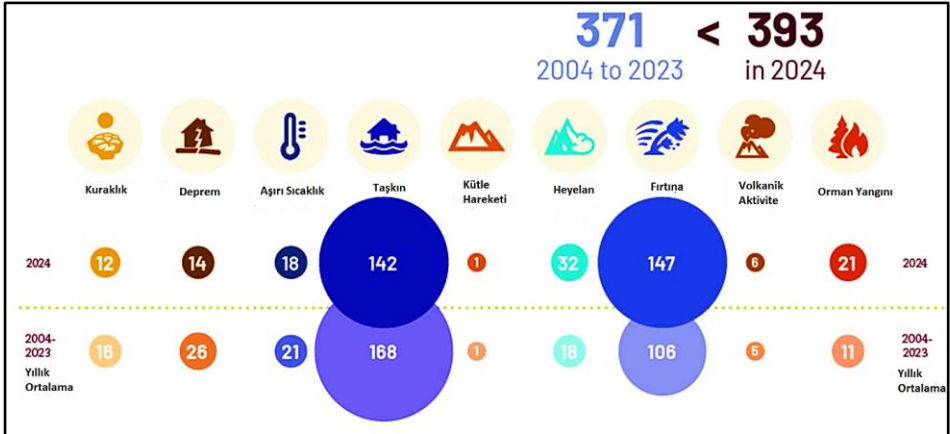
iklim değışikliğı nedeniyle dünyanın büyük bir bölümünde önemli ölçüde artacağı tahmin edilmektedir (IPPC, 2000). Önümüzdeki on yıllarda daha uzun ve daha yoğun sıcak hava dalgaları, üretim ve elektrik şebekeleri üzerinde artan baskıya neden olacak ve düzgün bir şekilde yönetilmediğı takdirde etkileri giderek kötüleşen koşullara neden olabilecektir. Orman yangınları diğerlerine göre daha az sıklıkta görülen ve daha az etkili afet çeşididir. Ancak, son üç yılda, birkaç büyük olay bunlara daha fazla dikkat çekmiştir. Son yirmi yılda orman yangını olaylarının %26'sı ve orman yangınlarından kaynaklanan ekonomik kayıpların %69'u ABD'de, özellikle Kaliforniya eyaletinde meydana gelmiştir. Orman yangınlarının doğrudan etkilerine ilave olarak, orman yangınları uzun mesafelere kirletici maddeler salarak hassas bireyler için sağlık tehlikeleri yaratır. Uzak bölgelerde artan ölüm oranları büyük ölçekli orman yangınlarının neden olduğu dumana maruz kalmaya bağlanmıştır (CRED, 2019; UNDRR, 2020). Orman yangınlarının karmaşık zorluğu, dayanıklılığı artırmak için çeşitli politik araçlardan yararlanan çok yönlü bir yaklaşımı gerektirir. Temel stratejiler arasında bozulmuş ormanların ve turbalıkların restore edilmesi, yaban hayatı-kentsel ara yüzlerdeki bitki örtüsünün yönetilmesi, kırsal ve tarımsal alanların terk edilmesiyle ilişkili risklerin azaltılması yer almaktadır. Ayrıca, orman yangınının erken tespit edilmesi ve söndürülmesi için izleme yeteneklerinin iyileştirilmesi zamanında bir müdahale için kritik öneme sahiptir. Bu çeşitli girişimleri etkili bir şekilde koordine etmek için hükümet çapında bir çaba gereklidir. Kırsal, çevre ve tarım politikalarından sorumlu bakanlıklar ve kurumlar, mekânsal planlama kurumları, meteoroloji hizmetleri, yerel yönetimler ve özel mülk sahipleriyle birlikte kritik bir rol oynamaktadır. Portekiz'de Kırsal Yangınların Entegre Yönetimi Ajansı gibi merkezi koordinasyon organlarının oluşturulması, sektörler ve hükümet düzeyleri arasında koordinasyonu ve bilgi alışverişini artırmada etkili olmaktadır.

3.3. 2024 Yılında Gerçekleşen İklim Kaynaklı Afetler

Acil Durum Olayları Veri tabanına (EM-DAT) göre 2024 yılında 393 adet doğal afet kaydedilmiştir (Şekil. 1). Bu afetler 16.753 ölüme neden olmuş ve 167,2 milyon insanı etkilemiştir. Toplam ekonomik kayıp 241,95 milyar ABD doları olmuştur. 2024 yılı, Asya'da binlerce ölüme neden olan aşırı sıcaklık olayları, Afrika'da 25 milyondan fazla insanı etkileyen şiddetli kuraklıklar ve Amerika Birleşik Devletleri'nde toplam 100 milyar ABD dolarını aşan yıkıcı tropikal fırtınalarla damgasını vurmuştur.

EM-DAT verilerine göre 2004-2023 döneminde yıllık ortalama gerçekleşen iklim kaynaklı afet sayısı 340 olarak kaydedilmiştir. Bu afetler 161,5 milyondan fazla insanı doğrudan etkilemiştir. Bu olaylar nedeniyle 28.575 insan hayatını kaybetmiştir. İncelenen yıllarda en fazla insanı etkileyen iklim kaynaklı afetler, kuraklıklar, taşkınlar, tropikal siklonlar (fırtınalar) ve sıcak hava dalgaları olarak belirlenmiştir. Olay başına etkilenen toplam insan sayısı 475.000, olay başına

ölen insan sayısı ise 84,04 olarak hesaplanmıştır. 2024 yılında iklim kaynaklı 372 afet meydana gelmiştir. Afetlerden 166,3 milyon kişi etkilenmiş ve 16125 kişi hayatını kaybetmiştir. En fazla meydana gelen afet taşkın ve tropikal siklonlar (fırtınalar) olarak gerçekleşmiştir. Olay başına etkilenen insan sayısı 2024 yılında 447.000, olay başına ölen insan sayısı 43,35 olup, 2004-2023 yılları ortalamasının yarısı kadar gerçekleşmiştir. İncelenen 2004-2023 ve 2024 yıllarında afetlerin sayısı çok artmamasına karşın, ölen insanların sayısı azalmıştır (Tablo 1; Şekil 2, 3). Bildirilen 16.753 ölüm incelenen 2004-2023 ortalaması olan 28.575 ölümün altında kalmaktadır. Bunun başlıca nedenleri, olay başına ölüm sayısı 10.000'i aşan önemli depremler, tsunamiler, fırtınalar veya sıcak hava dalgaları gibi kitlesel felaketlerin olmamasıdır. Asya'daki aşırı sıcaklıkla ilgili birkaç olay, yılın en ölümcül 10 olayı arasında yer almaktadır. Haziran 2024'de, Mekke'ye yapılan hac ziyareti sırasında Suudi Arabistan'da meydana gelen aşırı sıcak hava olayı, sıcaklıkların 50°C'yi aşmasıyla 1.300'den fazla can kaybına neden olmuştur. Hindistan, Bangladeş, Pakistan, Kamboçya, Laos, Tayland, Myanmar, Vietnam ve Filipinler de dâhil olmak üzere diğer Asya ülkeleri de 2024 yılında şiddetli sıcak hava dalgaları ve rekor kıran sıcaklıklar yaşamıştır. Ancak, gerçek insan etkisi yeterince bildirilmemiş ve EM-DAT verilerine tam olarak yansıtılmamıştır (EM-DAT, 2024). Mevcut verilere göre 2024 Mart ve Haziran ayları arasında yaşanan sıcak hava dalgaları nedeniyle Hindistan'da 733, Pakistan'da 568 kişi yaşamını kaybetmiştir. Bangladeş'te yaklaşık 33 milyon çocuk aşırı sıcaklardan etkilenmiştir. Ön tahminler, ABD'de 1.006 ölüm olduğunu göstermekte, ancak bu yalnızca Arizona ve Las Vegas (Nevada) şehirlerinden gelen verileri kapsamaktadır. Avrupa'da, İtalya ve Yunanistan gibi Akdeniz ülkelerinde aşırı sıcaklık olaylarından kaynaklanan aşırı ölüm oranları bildirilmiş, ancak raporlama sırasında kesin rakamlar henüz mevcut değildir.



Şekil 1. Meydana Gelen Afetlerin Sayısı, 2024 Yılıının 2004-2023 Yılları Arasındaki Yıllık Ortalamasıyla Karşılaştırılması (EM-DAT, 2024)

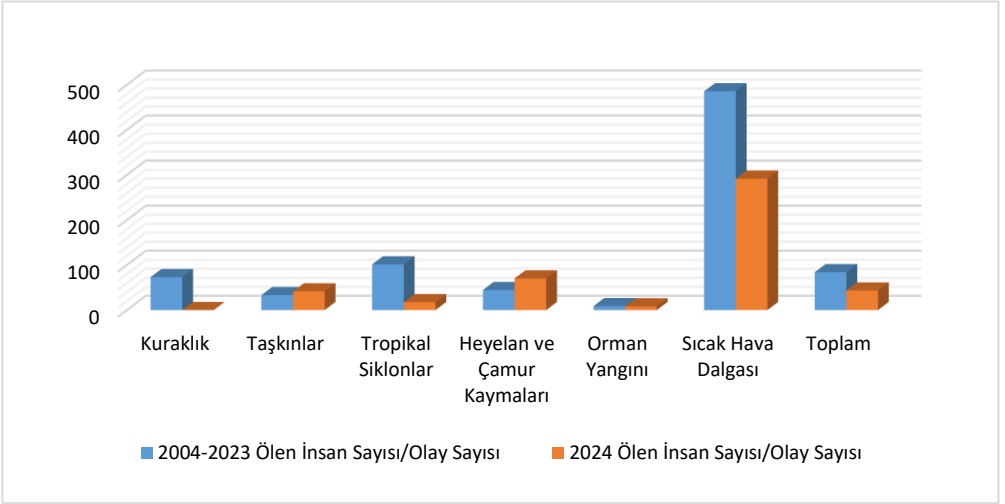
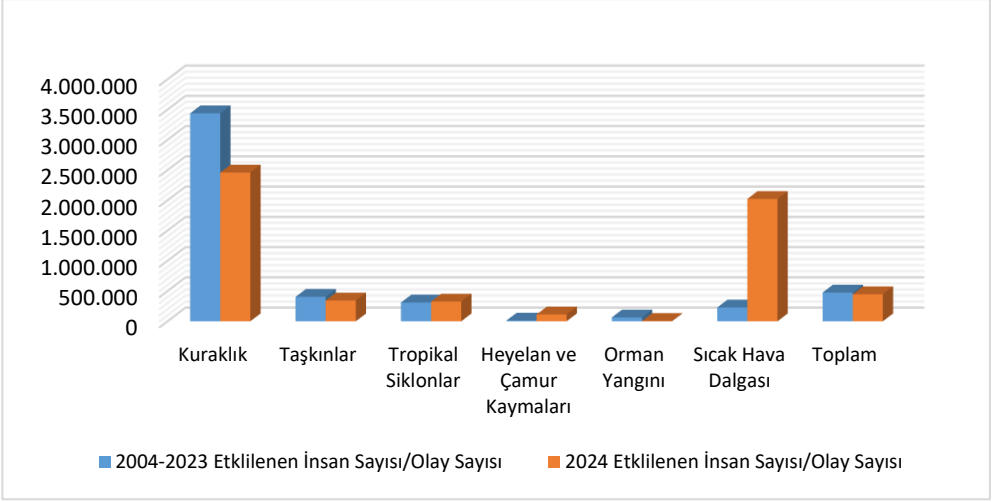
Afganistan Kızılay Derneği ve Afganistan Ulusal Afet Yönetim Kurumu'na göre 2024 Mart ve Haziran aylarında, Afganistan'da, soğuk hava dalgaları, kar yağışları, tipi, heyelan ve taşkınlar gibi şiddetli kış koşulları yaklaşık 1.200 can kaybına neden olmuştur. Papua Yeni Gine'nin Enga ilinde 24 Mayıs' da büyük bir heyelan meydana gelmiş ve ülkenin yakın tarihindeki en ciddi felaketlerinden birine yol açmıştır. Birleşmiş Milletler kurumları yaklaşık 670 ölümün olduğunu tahmin etmiş, ancak çoğu kişi enkaz altında kalmış ve bu durum son rakamları belirsiz hale getirmiştir.

Afrika'da taşkınlar en fazla can kaybına neden olmuştur. Temmuz-Eylül-2024 arasında Çad'da meydana gelen taşkınlarda 576 kişi, Haziran-Ekim-2024 arasında Nijer'de ise 396 kişi hayatını kaybetmiştir. Hindistan ve Bangladeş'te sırasıyla 8 milyon ve 5,8 milyon kişi Ağustos ayı sonlarındaki yoğun muson yağmurları, ani taşkınlar ve gök gürültülü fırtınalardan etkilenirken, Bangladeş'te Haziran ve Temmuz aylarının başlarında 5,1 milyon kişi daha etkilenmiştir. İspanya'nın Valensiya bölgesinde 2024 yılının Ekim sonu ve Kasım başında meydana gelen taşkınlar, küresel olarak en maliyetli 10 taşkın arasında yer almış ve toplam hasar 11 milyar ABD doları olmuştur. Brezilya'da Mayıs ayı başında Rio Grande do Sul bölgesinde meydana gelen taşkınlar, toprak ve çamur kaymaları tahmini 7 milyar ABD doları hasara neden olmuştur.

Tablo 1. 2004-2023 Yılları Arasında Yıllık Ortalama Gerçekleşen İklimle İlgili Her Afet İçin Etkilenen Toplam Kişi Sayısı ve Ölüm Sayısı, Toplam Olay Sayısı, Olay Başına Etkilenen Kişi Sayısı ve Olay Başına Ölüm Sayısı. Etkilenen Kişi Sayısı, Ölen, Evsiz Kalan, Acil Yardıma İhtiyaç Duyan ve Yaralanan Kişi Sayısını İçerir.

İklimle İlgili Afetler	Etkilenen İnsan Sayısı	Ölümleri n Sayısı	Olayları n Sayısı	Etkilenen İnsan Sayısı/Olay Sayısı	Ölen İnsan Sayısı/Olay Sayısı
Kuraklık	55.000.000	1169	16	3.437.500	73,06
Taşkınlar	67.900.000	5570	168	404.167	33,15
Tropikal Siklonlar	32.900.000	10742	106	310.377	101,34
Heyelan ve Çamur Kaymaları	200.000	800	18	11.111	44,44
Orman Yangını	700.000	96	11	63.636	8,72
Sıcak Hava Dalgası	4.800.000	10198	21	228.571	485,62
Toplam	161.500.000	28575	340	475.000	84,04

Şekil 2. İklim Kaynaklı Afetlerden Etkilenen İnsan Sayısı/Olay Sayısı



Şekil 3. İklim Kaynaklı Afetlerden Ölen İnsan Sayısı/Olay Sayısı

Tropikal fırtınalar küresel çapta önemli etkiye sahiptir. Eylül ayının başlarında Yagi Tayfun'u Myanmar'da 460 kişinin, Vietnam'da 345 kişinin ölümüne ve büyük hasara neden olmuştur. Güneydoğu Asya'da Temmuz ayında Tayfun Gaemi (Carina) ve Prapiroon (Butchoy) ve Ekim ayında Trami (Kristine) yıkıcı siklonlarından en az 29 milyon kişi etkilenmiştir. Yılın başlarında, Bangladeş'teki Siklon Remal yaklaşık 4,6 milyon kişiyi etkilemiştir. Amerika Birleşik Devletleri 2024 yılında fırtınalardan önemli ölçüde etkilenmiş, en maliyetli olanlar arasında Helene, Milton ve Beryl gibi büyük fırtınalar yer almaktadır. Kuraklık birçok Afrika ülkesini ciddi şekilde etkilemiştir. 2024 yılında aşırı kuraklık koşulları Zambiya'da yaklaşık 9,8 milyon, Zimbabwe'de 7,6 milyon ve Malavi'de 6,1

milyon kişiyi etkileyerek gıda ve su kıtlığını daha da kötüleştirmiştir. Brezilya, Amazon bölgesinde yüzyıllardır benzeri görülmemiş en şiddetli bir kuraklık yaklaşık 6 milyar ABD doları hasara neden olmuştur. ABD'nin, güney, doğu ve kuzeybatı bölgelerinde tahmini 5,4 milyar ABD doları kayba yol açan kuraklıklar yaşanmıştır. EM-DAT verileri, genel olarak 2024 yılının afet kaynaklı hasar açısından son yirmi yılın ortalama yılından daha maliyetli olduğunu göstermektedir (EM-DAT, 2024).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada 1995-2005 dönemine ilişkin iklim göstergeleri (yağışlar, hava sıcaklığı, hava nemi, toprak suyu, bitki örtüsü, yüzey suyu oluşumu, nehir akışları, göl hacmi ve karasal su depolaması) 2024 yılı verileriyle karşılaştırılarak iklim değişikliğinden kaynaklanan su döngüsü incelenmiştir. İklim değişikliğini en çok etkileyen iklim göstergeleri maksimum günlük yağışlar ve yüksek hava sıcaklıkları olmuştur. Küresel kara alanlarına 1995-2005 döneminde gerçekleşen ortalama yağış miktarı temel alınan 2024 yılı yağış ortalamasına yakın değerde gerçekleşmiştir. Kentlerde ve kırsal alanlarda taşkınlara neden olan maksimum günlük yağış miktarı 2024 yılında 1995-2005 dönemine göre %52 oranında daha yaygın ve %7,8 oranında daha fazla miktarda gerçekleşmiştir. Maksimum günlük yağışların sayısında önemli bir artış eğilimi görülmektedir. Avrupa, Batı Afrika ve Asya'da çok yüksek günlük yağış olayları yaşanmıştır. Küresel olarak 2024 yılında ölçülen hava sıcaklığı 1995-2005 dönemi ortalamasından 1.2 °C daha fazla gerçekleşmiştir. On yılda rekor seviyedeki yüksek aylık sıcaklık değerlerinde %97 oranında artış olmuştur. Küresel ortalama sıcak gün sayısı (35 °C'ye ulaşan günler) 1995-2005 döneminden %33 daha fazla gerçekleşmiştir. Ortalama bağıl nem incelenen on yıllık dönemde -%1 oranında değişim göstermiştir. Düşük hava nemi ekosistem ve insanlar üzerinde kuraklığın etkilerini ve orman yangın risklerini artırmaktadır. Son yıllarda aşırı kurak aylar giderek yaygınlaşmış ve 2024 yılında aşırı kurak ay sayısı %38 oranında artmıştır. Küresel ortalama nehir akışları 2024 yılında incelenen on yıllık ortalamadan %5,5 daha az gerçekleşmiştir. Toprak suyu, bitki örtüsü, yüzey suyu, göl hacmi ve karasal su depolama göstergelerinde çok fazla değişimler olmamıştır.

Farklı gelişme seviyesine sahip ülkeler ile farklı kıtalarda bulunan ülkeler arasında iklimle ilgili doğal afetlerin toplam sayısında anlamlı bir fark bulunamamıştır. Ancak, insani gelişme seviyesi çok yüksek olan ülkeler (gelişmiş ülkeler), insani gelişme seviyesi düşük olan ülkelerle karşılaştırıldığında afetlerden etkilenen insanların yüzdelerinde önemli farklılıklar bulunmaktadır. Kıtalarla göre 2024 yılında afetlerin sayısı ve afetlerden etkilenen insanların oranı Amerika'da 118-%7,3, Afrika'da 75-%24,6, Asya'da 167-%67,7, Avrupa'da 24-%0,3 ve Okyanusya'da 9-%0,1 olarak gerçekleşmiştir (EM-DAT, 2024). Çok yüksek insani gelişmişlik seviyesine sahip ülkelerde iklimle ilgili afetlerden etkilenen nüfusun toplam yüzdeleri,

yüksek, orta ve düşük insani gelişme seviyesine sahip ülkelere göre önemli ölçüde düşüktür. Avrupa ülkelerinde iklimle ilgili afetlerden etkilenen nüfusun toplam yüzdeleri, Avustralya, Afrika, Kuzey Amerika, Asya ve Güney Amerika'daki ülkelerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha düşüktür. İklimle ilgili afetlerden etkilenen insanların yüzdesinin en düşük olduğu ülkeler, insani gelişmenin yüksek olduğu ülkeler ve Avrupa ülkeleridir (Donatti vd., 2024). Bu durum, bu ülkelerde yaşayan insanların iklim değişikliğine uyum stratejilerini uygulama kapasitelerinin yüksek olmasıyla açıklanabilir. Bu stratejiler arasında erken uyarı sistemlerine ve tahliye planlarına erişim, insani gelişmenin yüksek olduğu ülkelerde gerekli değişiklikleri desteklemek için yeterli finansmana ulaşım yer almaktadır. Ayrıca, insani gelişmenin daha yüksek olduğu ülkelerde yaşayan insanların iklim değişikliği etkilerinin yüksek olduğu yerleşimlerden uzaklaşmayla ilgili düzenlemelerle karşılaşma ve bilgiye erişim olanakları daha yüksektir. Afrika ve diğer bölgelerde düşük gelişme seviyelerine sahip birçok ülke yüksek oranda nüfusun en fazla zarar gördüğü yerlerdir. Bu ülkeler, genellikle iklim değişikliğiyle ilgili etkileri planlamak, tahmin etmek, önlemek ve bunlardan kurtulmak için daha az kaynağa sahiptir.

Aşırı hava olayları iklim değişikliği nedeniyle giderek daha şiddetli ve sık hale gelmektedir. Ancak, neden olabileceği felaketler sadece iklim göstergelerinin (yağış, sıcaklık, rüzgâr vb.) aşırı değerine değil, etkilenen alanın jeomorfolojisi, nüfus dağılımı, arazi kullanımı, bölgedeki yetersiz uygulamalar ve insan müdahaleleri, su yolları ve taşkın yataklarının işgali gibi diğer faktörlere de bağlıdır. Çoğunlukla ekonomik veya sosyal nedenlerle ortaya çıkan bu faktörlerin çoğu belirli sıklıktaki aşırı bir olgunun afete dönüşmesine neden olabilir.

Çok sayıda taşkın koruma altyapısına ev sahipliği yapan havzalar çoğu durumda nehirler ve taşkın yatakları arasındaki bağlantıyı kaybetmiştir. Doğal su tutma önlemleri, doğayı ve işlevlerini eski haline getirerek su yönetimi hedeflerine ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu tür altyapılar, taşkınlara karşı koruma, biyolojik çeşitliliğin artması, sera gazlarının azaltılması gibi birçok fayda sağlamaktadır. Taşkın kontrolü için kullanılan önlemler arasında tampon şeritlerin oluşturulması, koruma ve yeniden ağaçlandırma yoluyla arazi örtüsünün iyileştirilmesi, enine setlerle erozyon kontrolü, taşkın akışına karşı enine bariyerlerin ortadan kaldırılması ve sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri yer almaktadır. Ayrıca, su tutma alanı işlevi gören küçük seddelerin veya sulak alanların oluşturulması da önemlidir.

Planlama ve mühendislik çalışmaları, topluma ve çevreye suyla ilgili değişikliklere uyum sağlamak için farklı önlemler sunmaktadır. Bunlar, yeni politikaların oluşturulması ve daha iyi karar alma süreçlerine olanak tanıyan yeni bilgi kaynakları sağlamaktan, su kaynaklarının korunmasını ve güvence altına alınmasını sağlayan altyapıların uygulanmasına ve arz güvenliğinin sağlanmasına kadar uzanmaktadır. Ayrıca, uygun çevre koşulları altında kaynağın yeniden

kullanımı veya suyun çevreye geri verilmesi için arıtma önlemlerinin yanı sıra aşırı meteorolojik olaylara ve deniz seviyesinin yükselmesine karşı planlar, erken uyarı sistemleri veya koruma önlemleri de bulunmaktadır.

Doğa Temelli Çözümler (DtÇ), insanların iklim değişikliğine uyum sağlamasına yardımcı olmak için doğayı restore etmeyi, korumayı ve yönetmeyi amaçlayan eylemlerdir. İklimle uyum için DtÇ'ler maliyet açısından etkili ve kolayca bulunabilir. DtÇ'ler, iklim etkilerini azaltma, biyolojik çeşitlilik ve insan refahı sağlamaları nedeniyle iklim değişikliği etkilerini ele almada genellikle pişmanlık duyulmayacak seçenekler olarak kabul edilmektedir. DtÇ'ler, iklimle ilgili birden fazla felaketin etkilerini ele alma ve önlemede etkili olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alice, C. (2021). From COVID's lessons for climate research: go local, *Nature* 595: 9.
- Beck, H. E., and Coauthors. (2019). Daily evaluation of 26 precipitation datasets using stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 207–224, <https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019>.
- Beck, H.E., Albert I. J. M. van Dark, Pablo R. Larraondo, Tim R. McVicar, Ming Pan, Emanuel Dutra, and Diego G. Miralles. (2022). MSWX: Global 3-Hourly 0.1° Bias-Corrected Meteorological Data Including Near-Real-Time Updates and Forecast Ensembles. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Volume 103: Issue 3. E710–E732.
- Below, R., Grover-Kopec, E. and Dilley, M. (2007). Documenting Drought-Related Disasters: A Global Reassessment. *The Journal of Environment Development*, 16 (3): 328-344.
- Binskin, M., A. Bennett, A. Macintosh. (2020). Royal Commission into National Disaster Arrangements. Report, Commonwealth of Australia, Australia, p. 549.
- Boergens, Eva., Dobslaw, Henryk., Dill, Robert. (2020): COST-G GravIS RL01 Continental Water Storage Anomalies. V. 0005. GFZ Data Services.
- Burton, I., R. W. Kates, and G. F. White. (1993). *The Environment as Hazard*. 2nd ed. Guilford Press, 290 pp.
- Cannon, T. (1994). Vulnerability analysis and the explanation of 'natural' disasters. *Disasters, Development and Environment*, A. Varley, Eds., John Wiley and Sons, 13–30.
- CCDS (Copernicus Climate Data Store). (2024). Soil moisture gridded data from 1978 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/satellite-soil-moisture?tab=overview>
- Chapman, D. (1994). *Natural Hazards*. Oxford University Press, 174 pp.
- Coninck, H.A. de., M. Revi, P. Babiker, M. Bertoldi, A. Buckridge, W. Cartwright, J. Dong, S. Ford, J.-C. Fuss, D. Hourcade, R. Ley, P. Mechler, A. Newman, S. Revokatova, L. Schultz, T. Sugiyama Steg. (2018). Strengthening and implementing the global response, in: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. P'ean, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development,*

- and Efforts to Eradicate Poverty, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 313–444. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.006>.
- CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters). (2019). Volcanic activity & Wildfires: CRED Crunch 55.
- CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters). (2020). Human Cost of Disasters. An Overview of the Last 20 Years (2010–2019).
- Delforge, D., V. Wathelet, R. Below, C.L. Sofia, M. Tonnelier, J.V. Loenhout, N. Speybroeck. (2024). EM-DAT: the emergency events database, Research Square, (2024), <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3807553/v1>
- Donatti, C.I., Kristina Nicholas, K., Giacomo Fedele, G., Delforge, D., Speybroeck, N., Moraga, P., Blatter, J., Below, R., and Zvoleff, A. (2024). Global hotspots of climate-related disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 108; 104488
- EEA (European Environment Agency). (2019). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- EM-DAT (2024). 2024 Disasters in Numbers. A Hot and Stormy Year. CRED/UCLouvain, USAID, Brussels, Belgium – www.emdat.be. p.8.
- Gall, M., K.A. Borden, S.L. Cutter. (2009). When do losses count? Six fallacies of natural hazards loss data, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90: 799–810.
- GCA (Global Commission on Adaptation). (2019). Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience.
- Green, H.K., et al. (2019). Challenges with disaster mortality data and measuring progress towards the implementation of the 333 Sendai framework, *Int. J. Disaster Risk Sci.* 10. 449–461, <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00237-x>.
- Hou, J., Albert I.J.M. van Dijk., Hylke E. Beck. (2020). Global satellite-based river gauging and the influence of river morphology on its application. Volume 239, 111629.
- IOM. (2023). East and Horn of Africa Drought Response Overview.
- IPCC. (2000). Chapter 3: Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_chapter3.pdf
- IPCC. (2018). Summary for policymakers, in: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global*

Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–24, <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.

- IPCC. (2022). in: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3056, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IRDR (Integrated Research on Disaster Risk). (2014). *Peril Classification and Hazard Glossary (IRDR DATA Publication No. 1)*. Beijing: Integrated Research on Disaster Risk.
- Jay, A.K., Crimmins, A.R., C.W. Avery, T.A. Dahl, R.S. Dodder, B.D. Hamlington, A. Lustig, K. Marvel, P.A. Méndez-Lazaro, M.S. Osler, A. Terando, E.S. Weeks, A. Zycheran. (2023). Ch. 1. Overview: understanding risks, impacts, and responses, in: A.R. Crimmins, C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, B.C. Stewart, T. K. Maycock (Eds.), *Fifth National Climate Assessment*, U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, <https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1>.
- Jones, R.L., D. Guha-Sapir, S. Tubeuf. (2022). Human and economic impacts of natural disasters: can we trust the global data? *Sci. Data* 9. 572.
- Kishore N, Marqués D, Mahmud A, Kiang M V., Rodriguez I, Fuller A, et al. (2018). Mortality in Puerto Rico after Hurricane Maria. *N Engl J Med*. 379 (2):162–70.
- Koç, C. (2024). Su Kaynakları Yönetiminin Geleceği, Su Güvenliği ve Ortaya Çıkan Sorunlar. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*. 10 (1): 211 - 223
- Koç, C. (2025). Su Kaynaklarında ve Su Hizmetlerinde İklim Değişikliğine Uyum. *Mühendislik Alanında Uluslararası Çalışmalar*. Serüven Yayınevi. Bölüm 5: s.95-121 Çankaya-Ankara.
- Koç, C. (2025a). Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Giden Yolda Hidrolik Yapılar ve Hidrolik Yapı Mühendisliği. *Mühendislik Alanında Akademik Araştırmalar*. Platanus Yayınevi. Bölüm 10: s. 125-171. Mamak-Ankara.
- Mazhin, S.A., M. Farrokhi, M. Noroozi, J. Roudini, S.A. Hosseini, M.E. Motlagh, P. Kolivand, H. Khankeh. (2021). Worldwide disaster loss and damage databases: a systematic review, *J. Educ. Health Promot*. 10: 329.

- Mileti, D. (1999). *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. Joseph Henry Press, 351 pp.
- Mo, X., Wu, J. J., Wang, Q., and Zhou, H. (2016). Variations in Water Storage in China over Recent Decades from GRACE Observations and GLDAS. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16 (2), 469–482.
- NASA and USGS Earth Data. (2024). MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Nadir BRDF-Adjusted Ref Daily L3 Global - 500m V061. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mcd43a4-061>
- Osuteye, E., C. Johnson, D. Brown. (2017). The data gap: an analysis of data availability on disaster losses in sub-Saharan African cities, *Int. J. Disaster Risk Reduc.* 26: 24–33.
- Panwar, V., S. Sen. (2020). Disaster damage records of EM-DAT and DesInventar: a systematic comparison, *EconDisCliCha* 4: 295–317.
- Semenza, J.C., D. E. Hall, D. J. Wilson, B. D. Bontempo, D. J. Sailor, and L. A. George. (2008). Public perception of climate change: Voluntary mitigation and barriers to behavior change. *Amer. J. Prev. Med.*, 35, 479–487.
- Seneviratne, I.S., and Zhang, X. (2021) Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*, pp. 1513-1766.
- Tobin, G. A., and B. E. Montz. (1997). *Natural Hazards: Explanation and Integration*. Guilford Press, 389 pp.
- UNDRR (United Nations Disaster Risk Reduction). (2020). *Human Cost of Disasters. An Overview of the last 20 years 2000-2019*. Chapter 2. Human Cost of Disasters, p.13-19.
- UNEP. (2023). *Adaptation Gap Report 2023: Underfinanced. Underprepared. Inadequate investment and planning on climate adaptation leaves world exposed*. Nairobi <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43796>. Nairobi, Kenya.
- Van Dijk, A.I.J.M., H.E. Beck, E. Boergens, R.A.M. de Jeu, W.A. Dorigo, C. Edirisinghe, E. Forootan, E. Guo, A. Güntner, J. Hou, N. Mehrnegar, S. Mo, W. Preimesberger, J. Rahman, P. Rozas Larraondo. (2025). *Global Water Monitor 2024, Summary Report*. Published by Global Water Monitor Consortium, p. 57. available at www.globalwater.online
- Wilson, K. M. (2000). Communicating climate change through the media: Predictions, politics, and perceptions of risks. *Environmental Risks and the Media*, S. Allen, B. Adam, and C. Carter, Eds., Routledge, 201–217.
- WMO (World meteorological organization). (2021). *Atlas of mortality and economic losses from weather, Climate and Water Extremes (2021) 1970–2019*. Geneva, Switzerland.

BÖLÜM 2

Gümüşhane İlinde Taşkın Riskinin Mühendislik Yaklaşımlarıyla Değerlendirilmesi

Ahmet Emir Köse¹

Salim Serkan Nas²

Evin Nas³

¹ Phd. Student, Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye. ORCID:0000-0003-3890-5721

² Prof. Dr. Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100 Gümüşhane, Türkiye. ORCID:0000-0001-9054-4674

³ Dr. Öğr. Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 61080, Trabzon Türkiye. ORCID: 0000-0001-9609-4897

GİRİŞ

Taşkınlar, can ve mal kayıplarının yanı sıra tarım alanları, altyapı tesisleri ve ekonomik faaliyetler üzerinde oluşturduğu zararlar nedeniyle önemli bir mühendislik ve planlama problemidir. Taşkın oluşumu yalnızca yağış miktarına bağlı olmayıp havzanın eğimi, yükseltisi, drenaj yapısı, zemin doygunluğu, bitki örtüsü, jeolojik özellikleri ve arazi kullanımı gibi birçok faktörün ortak etkisiyle gerçekleşmektedir. Özellikle eğimli alanlar, yetersiz bitki örtüsü ve yüksek zemin doygunluğu yüzeyssel akışı artırarak taşkın potansiyelini yükseltmektedir. Bunun yanında plansız kentleşme, akarsu yataklarına yapılan müdahaleler, geçirimsiz yüzeylerin artması ve yanlış arazi kullanımı da taşkın riskini büyötmektedir. Bu nedenle taşkın riskinin değerlendirilmesinde yalnızca hidrometeorolojik veriler değil, havza özellikleri, arazi kullanımı, yerleşim düzeni ve altyapı koşulları da birlikte ele alınmalıdır (Girayhan, 2015; Ertoğral ve Çiçek, 2024; Temizer, 2025).

Gümüşhane, hidrolojik ve morfolojik yapısı nedeniyle taşkın riski açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken illerden biridir. İlin akarsu sistemi başta Harşit Çayı ve Kelkit Çayı olmak üzere bu akarsuların yan kolları ile çok sayıda küçük dere ve kuru dere yatağından oluşmaktadır. Taşkın riski yalnızca ana akarsularla sınırlı olmayıp yan dereler, düşük eğimli alanlar ve dere yataklarına yakın yerleşimler de riski artırmaktadır. Geçmişte Pirahmet Deresi, Kelkit Çayı, Harşit Çayı ve yan derelerde meydana gelen taşkınlar; tarım alanları, konutlar ve hayvan varlığı üzerinde zarara yol açmış, bazı kesimlerde taşkın sonrası kum ve çakıl birikimleri oluşmuştur. Bu olaylar, Gümüşhane’de taşkın riskinin doğal havza koşulları ile yerleşim ve arazi kullanım kararlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Nas ve Nas, 2015; AFAD, 2021; Muslu, 2025).

Bu çalışmanın amacı, Gümüşhane ilinde taşkın riskini Harşit havzası bağlamında, mevcut resmi raporlar, havza taşkın yönetim planları ve literatürdeki mühendislik temelli çalışmalar doğrultusunda değerlendirmektir.

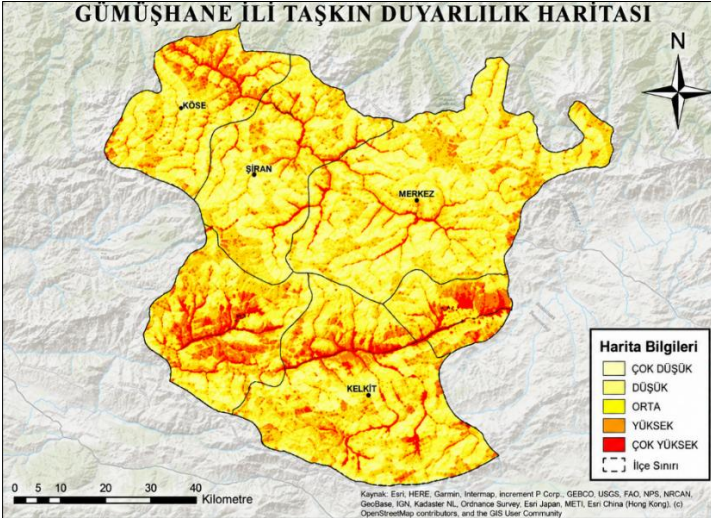
Kavramsal ve Yöntemsel Çerçeve

Taşkın riskinin değerlendirilmesinde, suyun hangi alanlara yayılabileceğini gösteren tehlike ile bu alanlarda bulunan insan, yapı, altyapı ve ekonomik faaliyetlerin etkilenme durumunu ifade eden risk birlikte ele alınmalıdır. Gümüşhane’de bu değerlendirme için öncelikle yağış, eğim, yükselti, jeoloji, arazi kullanımı, drenaj yapısı ve akarsuya yakınlık gibi özellikler CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) ortamında incelenebilir. Daha sonra yan dereler ve küçük alt havzalar morfometrik analizlerle önceliklendirilebilir, farklı tekerrür sürelerine ait taşkın debileri hidrolojik yöntemlerle belirlenebilir ve riskli kesimler HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) gibi hidrolik modellerle ayrıntılı olarak değerlendirilebilir. Köprü ve menfezlerin yeterliliği ile yapısal ve doğa tabanlı önlemler de bu sürecin bir parçasıdır. Bu çalışmada yeni bir taşkın modeli oluşturulmamış, mevcut resmi raporlar, havza planları ve akademik çalışmalar kullanılarak Gümüşhane için kaynaklara dayalı bir

oluşturabilen küçük ve mevsimsel dereler olmak üzere üç temel mekânsal bileşen üzerinden ele alınabilir. Bu sınıflandırma, geçmiş taşkınların, duyarlılık alanlarının, maruziyetin ve mühendislik önlemlerinin Harşit-Kelkit ekseninde değerlendirilmesine temel oluşturmaktadır (Nas ve Nas, 2015; SYGM, 2015; SYGM, 2020; AFAD, 2021).

Gümüşhane’de Geçmiş Taşkın Olayları ve Mevcut Risk Görünümü

Gümüşhane’de geçmiş taşkın kayıtları, farklı akarsu sistemlerinde ortaya çıkan risklerin karşılaştırılması açısından önemli bir veri kaynağıdır. 1972 yılında Kelkit çevresinde meydana gelen taşkında Kelkit Çayı ve çok sayıda yan dere taşmış; arazi, konut ve hayvan varlığı zarar görmüştür. Bu olay, Kelkit sisteminde ana akarsu ile yan derelerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. 1974 yılında Harşit Çayı ve yan derelerinde gerçekleşen taşkında ise çok sayıda köy ve tarım alanı etkilenmiş, taşkın sonrasında iri kum ve çakıl birikimleri oluşmuştur. Bu olay, Harşit sisteminde su baskınının yanı sıra rusubat taşınımının da önemli bir risk unsuru olduğunu ortaya koymaktadır. 2017 yılında Pirahmet Deresi’nde meydana gelen taşkında tarım arazileri ve bazı konutlar zarar görmüş; bu durum küçük ve yan derelerde yerleşim konumu, drenaj koşulları ve dere kapasitesinin taşkın riskini belirleyebildiğini göstermiştir. Bu üç olay birlikte değerlendirildiğinde, Gümüşhane’de taşkınların ana akarsular, yan dereler ve yerel drenaj sistemleri üzerinde farklı biçimlerde etkili olduğu anlaşılmaktadır. İRAP (İl Afet Risk Azaltma Planı) verilerine göre ilde 282,791 km² çok yüksek, 1044,631 km² yüksek ve 1861,130 km² orta taşkın duyarlılığına sahip alan bulunmaktadır. Bu dağılım, taşkın riskinin yalnızca belirli akarsu koridorlarında değil, il genelinde farklı duyarlılık düzeyleriyle geniş bir alana yayıldığını göstermektedir (Şekil 2) (AFAD, 2021).



Şekil 2. Gümüşhane ili taşkın duyarlılık haritası (AFAD, 2021).

Gümüşhane’de taşkın duyarlılık sınıflarının ilçelere göre alansal dağılımı Tablo 1’de, taşkın duyarlılık sınıflarına göre yapı dağılımı ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Gümüşhane ilçelerine göre taşkın duyarlılık sınıflarının alansal dağılımı (AFAD, 2021).

İlçe	Çok yüksek (km ²)	Yüksek (km ²)	Orta (km ²)	Düşük (km ²)	Çok düşük (km ²)
Kelkit	76,869	268,400	434,160	523,800	212,600
Köse	40,739	96,441	101,360	97,924	27,716
Kürtün	36,037	152,130	242,910	251,010	110,010
Merkez	29,351	197,160	504,570	729,470	519,970
Şiran	73,613	198,460	276,060	220,540	89,082
Torul	26,182	132,040	302,070	366,110	219,660
Toplam	282,791	1044,631	1861,130	2188,854	1179,038

Tablo 2. Gümüşhane’de taşkın duyarlılık sınıflarına göre bina maruziyeti (AFAD, 2021).

Taşkın duyarlılık sınıfı	Mesken	Kamu yapısı	İşyeri
Çok yüksek	10.699	567	615
Yüksek	26.952	1.267	830
Orta-düşük	28.341	1.146	511
Düşük	19.488	683	220
Çok düşük	4.133	89	17

Gümüşhane’de bodrum katlı yapılar, taşkın maruziyeti açısından ayrı değerlendirilmesi gereken önemli bir yapı grubudur. Yüzeysel akışın yoğunlaştığı ve su seviyesinin hızla yükseldiği alanlarda bodrum katların doğrudan su baskınına açık olması, taşkın risk azaltma çalışmalarında yapı ölçeğinde özel önlemler geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu yapıların ilçelere göre dağılımı Tablo 3’te verilmiştir (AFAD, 2021).

Tablo 3. Çok yüksek ve yüksek taşkın sınıflarında kalan bodrum katlı meskenler (AFAD, 2021).

İlçe	Çok yüksek sınıfta bodrum katlı mesken	Yüksek sınıfta bodrum katlı mesken
Kelkit	478	1.162
Köse	49	129
Kürtün	1.055	2.684
Merkez	729	2.319
Şiran	400	718
Torul	634	1.055
Toplam	3.345	8.067

Geçmiş olaylar, duyarlılık sınıfları, yapı ve bodrum kat maruziyeti, dere yataklarına yakın yerleşimler, tarım alanları, sanat yapıları ve mevcut taşkın

koruma tesisleri birlikte değerlendirilerek havza ve dere ölçeğine uygun mühendislik önlemleri geliştirilmelidir (Nas ve Nas, 2015; AFAD, 2021).

Gümüşhane’de Taşkın Riskini Artıran Mühendislik Parametreleri

Gümüşhane’de taşkın riskini artıran temel mühendislik parametreleri arasında havza eğimi, topoğrafik yapı, yan dereler, arazi kullanımı ve rusubat taşınımı öne çıkmaktadır. Harşit Çayı ve yan derelerinde yüksek eğim ve dar vadi koşulları yüzeysel akışı ve akım hızını artırırken, dönemsel olarak kuru görünen küçük dere yatakları ani yağışlarda kısa sürede yüksek debi oluşturarak yerleşim ve tarım alanları için risk yaratabilmektedir. Özellikle Kelkit Çayı ve güney kesimlerinde yapılaşma ve tarım alanlarının dere yataklarına yakınlığı taşkın maruziyetini artırmaktadır. Bunun yanında sediment ve iri malzeme taşınımı dere kesitlerini daraltarak köprü ve menfezlerde tıkanmaya ve mansapta birikmelere neden olabilmektedir. Bu nedenle taşkın değerlendirmelerinde topoğrafik özellikler, yan dere davranışı, arazi kullanımı, su yayılımı ve rusubat taşınımı birlikte ele alınmalıdır (Nas ve Nas, 2015; SYGM, 2020; AFAD, 2021; Kaynar, 2025; Uymaz, 2026).

Taşkın riskinin azaltılmasında köprü ve menfezlerin hidrolik yeterliliği, dere ıslahlarının sürekliliği, yapı maruziyeti ve imar kararları da önemli mühendislik bileşenleridir. Köprü ve menfezler yalnızca açıklık boyutuna göre değil; akım hızı, Froude sayısı, mansap oyulması, taban-şev stabilitesi ve bakım koşulları açısından incelenmeli, dere ıslahlarında ise memba-mansap sürekliliği, yan kol birleşimleri ve karayolu geçişleri birlikte değerlendirilmelidir. Gümüşhane’de çok yüksek ve yüksek taşkın sınıflarında önemli sayıda mesken, kamu yapısı ve işyerinin bulunması, yapı ve altyapı maruziyetinin taşkın riskinin temel unsurlarından biri olduğunu göstermektedir. Bodrum katlı yapıların su baskınına karşı daha hassas olması da yapı ölçeğinde ayrı bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle taşkın risk haritaları imar ve arazi kullanım kararlarına aktarılmalı; riskli alanlarda yapılaşma sınırlandırılmalı, tampon bölgeler korunmalı ve geçirgen yüzeyler ile yeşil alanlar artırılmalıdır (Nas ve Nas, 2015; AFAD, 2021; Alshoaep, 2025; Kaynar, 2025; Yıldız, 2026).

Mevcut Taşkın Koruma Tesisleri, Dere Islahı ve Sanat Yapılarının Değerlendirilmesi

Gümüşhane’de taşkın riskinin azaltılmasında mevcut taşkın koruma tesisleri, dere ıslahları, köprü-menfez geçişleri ile bakım ve onarım uygulamaları birlikte ele alınmalıdır. DSİ 223. Şube Müdürlüğü tarafından farklı ilçe, belde, köy ve mahallelerde taşkın koruma tesisleri, tersip bentleri ve ıslah sekilerinin yapılmış olması, taşkın riskinin il ölçeğinde önemli bir mühendislik problemi olarak değerlendirildiğini göstermektedir (AFAD, 2021).

Mevcut taşkın koruma yapılarının bulunması, taşkın riskinin ortadan kalktığı anlamına gelmez. Dere ıslahı, sedde, taş tahkimat, tersip bendi, köprü ve

menfezlerin güvenilirliği; tasarım debisi, kesit kapasitesi, mansap koşulları, rusubat taşınımı ve bakım durumu birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir. Özellikle köprü ve menfezlerde yalnızca açıklık veya kesit alanı yeterli olmayıp akım rejimi, Froude sayısı, giriş-çıkış koşulları, hidrolik sıçrama, oyulma ve taban-şev stabilitesi de incelenmelidir. Yüksek debilerde enerji kırıncılar, beton apron ve taş tahkimat gibi yapısal önlemler gerekebilir. Gümüşhane’de bu değerlendirme özellikle Harşit ve Kelkit’e bağlanan yan derelerde önem taşımaktadır. Harşit çevresindeki yüksek eğim ve fazla sürüntü maddesi, geçiş yapılarında tıkanma, kesit daralması ve mansap oyulması riskini artırabileceğinden, taşkın koruma yapıları hidrolik kapasitenin yanı sıra rusubat yönetimi ve bakım gereksinimi açısından da ele alınmalıdır (Nas ve Nas, 2015; Alshoaep, 2025). Harşit Çayı çevresinde taşkın etkisine ilişkin örnek Şekil 3’te gösterilmiştir



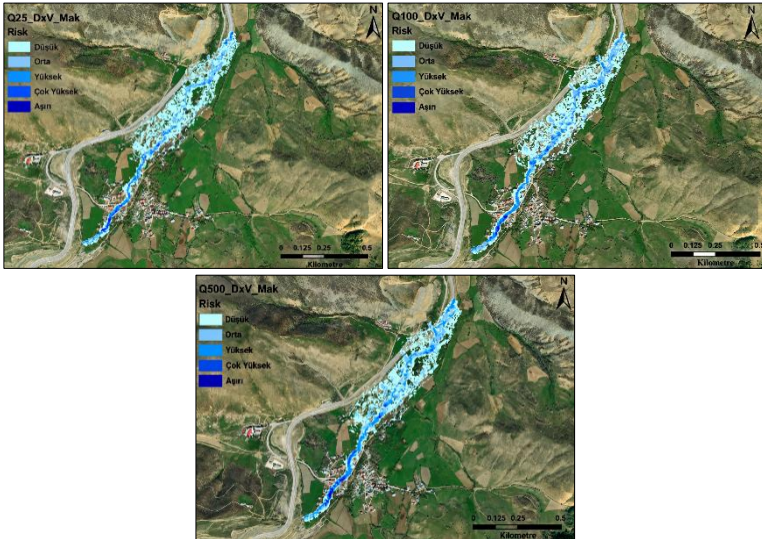
Şekil 3. Harşit Çayı çevresinde taşkın etkisine ilişkin yerel örnek: Bağlarbaşı Mevkii (Nas ve Nas, 2015).

Gümüşhane’de dere ıslahı ve taşkın koruma uygulamaları, yalnızca belirli kesitlerde yapılan yapısal müdahaleler olarak değil, membadan mansaba kadar süreklilik gösteren bir sistem içinde değerlendirilmelidir. Islah çalışmalarında dere kesitleri, yan kol birleşimleri, karayolu geçişleri ve taşkın yatağı sınırları birlikte ele alınmalı; doğal taşkın yatağına uygun kesit düzenlemeleriyle akım sürekliliği korunmalıdır. Özellikle kırsal yerleşimler ve tarım alanları, küçük havzalarda ani gelişen taşkınlara karşı değerlendirmeye dâhil edilmelidir. Harşit ve yan derelerinde rusubat taşınımının yüksek olması nedeniyle tersip bentleri, sediment kontrolü ve enerji kırılması açısından önemli bir mühendislik seçeneği olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanında köprü, menfez ve diğer taşkın koruma yapılarının etkinliği düzenli bakım, temizlik ve kontrol çalışmalarına bağlıdır. Dere yataklarının çevresinde yapılaşmanın sınırlandırılması, uygun alanların yeşil alan veya taşkın tampon bölgesi olarak korunması da yapısal önlemleri desteklemelidir. Bu nedenle Gümüşhane’de her dere kesimi; tasarım debisi, kesit

kapasitesi, köprü-menfez yeterliliği, mansap oyulması, rusubat birikimi, bakım ihtiyacı ile yerleşim ve tarım alanı maruziyeti birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır. Böylece taşkın yönetimi yalnızca tesis yapımına dayalı olmaktan çıkarılarak havza ölçekli, sürekliliği esas alan ve mühendislik temelli bir yaklaşıma dönüştürülebilir (Nas ve Nas, 2015; AFAD, 2021; Alshoaep, 2025; Özoğlu, 2026; Yıldız, 2026).

CBS, HEC-RAS ve Morfometrik Analizlerin Gümüşhane İçin Kullanılabilirliği

Gümüşhane’de taşkın riskinin değerlendirilmesinde CBS tabanlı analiz, morfometrik analiz ve hidrolik modelleme birbirini tamamlayan yöntemler olarak kullanılabilir. İlk aşamada CBS ile eğim, yükselti, yağış, jeoloji, arazi örtüsü, akarsuya yakınlık, yapı yoğunluğu ve tarım alanları birlikte değerlendirilerek Harşit ve Kelkit havzalarındaki taşkın duyarlılığı yüksek bölgeler belirlenebilir. İkinci aşamada morfometrik analizle Harşit ve Kelkit’e bağlanan küçük ve mevsimsel dereler, havza şekli, drenaj yoğunluğu ve engebelilik gibi özelliklere göre önceliklendirilebilir. Son aşamada ise riskli olduğu belirlenen dere kesimleri HEC-RAS gibi hidrolik modellerle incelenerek taşkın yayılımı, su yüzü kotu, akım hızı ve kesit kapasitesi belirlenebilir. Bu yaklaşım özellikle Gümüşhane şehir merkezindeki Harşit Çayı ve yan dereleri, Kelkit çevresindeki riskli kesimler ile köprü ve menfezlerin bulunduğu noktalar için uygulanabilir. Bahçecik Deresi’nde Q25, Q100 ve Q500 debileriyle yapılan analizler de hidrolik modellemenin Gümüşhane koşullarında uygulanabilirliğini göstermektedir (Şekil 4) (Nas ve Nas, 2015; AFAD, 2021; Ertoğral ve Çiçek, 2024; Köse vd., 2024; Muslu, 2025).



Şekil 4. Bahçecik Deresi’nde Q25, Q100 ve Q500 debilerine göre taşkın risk dağılımları (Muslu, 2025).

Bahçecik Deresi’nde farklı tekerrür debilerine göre hesaplanan taşkın alanları ve risk sınıfları Tablo 4’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4. Bahçecik Deresi’nde farklı tekerrür debilerine göre taşkın risk alanları (Muslu, 2025).

Tekerrür debisi	Toplam taşkın alanı (m ²)	Düşük risk (%)	Orta risk (%)	Yüksek risk (%)	Çok yüksek risk (%)	Aşırı risk (%)
Q25	126.116,6	73,5	18,4	7,2	0,64	0,28
Q100	137.970,7	65,9	21,9	11,0	0,8	0,5
Q500	146.364,2	59,0	23,9	14,6	1,7	0,7

Doğa Tabanlı Çözümler ve Yeşil-Mavi Altyapı Yaklaşımları

Gümüşhane’de taşkın riskinin azaltılması yalnızca dere ıslahı, sedde, tersip bendi ve köprü-menfez düzenlemeleri gibi yapısal önlemlerle sınırlandırılmamalıdır. Özellikle Harşit ve Kelkit’e bağlanan yan derelerde yüzeysel akışın yavaşlatılması, rusubat taşınımının azaltılması ve taşkın suyunun kontrollü tutulması için doğa tabanlı çözümler tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilmelidir. Uygun alanlar; eğim, yükselti, toprak, drenaj ağı, arazi kullanımı ve taşkın tehlike sınırlarının CBS ortamında birlikte incelenmesiyle belirlenebilir. Yan dere birleşimleri, dere yatağına yakın açık ve tarımsal alanlar ile yapılaşma baskısı altındaki koridorlarda yağmur suyu hasadı, taşkın depolama alanları, sulak alan restorasyonu, yeşil koridorlar ve infiltrasyonu artıran uygulamalar değerlendirilebilir (AFAD, 2021; Karaduman, 2025; Kaynar 2025; Özoğlu, 2026; Pashaei, 2026).

Bu kapsamda, Gümüşhane’de taşkın riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilecek doğa temelli ve sürdürülebilir çözüm yaklaşımları, uygulanabilecek alanlar ve temel mühendislik amaçları açısından aşağıda sıralanmıştır (AFAD, 2021; Karaduman, 2025; Kaynar 2025; Özoğlu, 2026; Pashaei, 2026):

-Riparyan tampon bölge: Harşit ve Kelkit ana akarsu koridorları ile yan dere kenarlarında değerlendirilebilir. Bu yaklaşımın mühendislik amacı, dere yatağı çevresinde yapılaşma baskısını azaltmak, yüzeysel akışı yavaşlatmak ve taşkın tamponu oluşturmaktır.

-Yeşil koridor: Şehir içi dereler, açık alanlar ve dere kenarı park alanlarında uygulanabilir. Taşkın yatağı çevresinde geçirgen ve gerektiğinde boşalabilir alan sürekliliğinin sağlanması amaçlanmaktadır.

-Geçirgen yüzey uygulamaları: Yerleşim alanları, otoparklar, meydanlar ve dereye yakın kentsel yüzeylerde değerlendirilebilir. Bu uygulamalarla infiltrasyonun artırılması ve yüzeysel akış hacminin azaltılması amaçlanmaktadır.

-Yağmur suyu hasadı: Kamu yapıları, geniş çatı alanları ile kırsal ve kentsel yerleşimlerde uygulanabilir. Temel amaç, yağış suyunun doğrudan yüzeysel akışa geçmesini sınırlamaktır.

-Taşkın suyu depolama/geciktirme alanları: Düşük eğimli açık alanlar, tarım alanı kenarları ve yan dere birleşim bölgelerinde değerlendirilebilir. Bu alanlar, pik debinin geciktirilmesi ve mansap kesimlerindeki taşkın yükünün azaltılması amacıyla kullanılabilir.

-Sulak alan restorasyonu: Uygun düşük kotlu ve açık alan karakterindeki sahalarda uygulanabilir. Bu yaklaşım, taşkın suyunun geçici olarak depolanmasını ve ekolojik tampon etkisinin desteklenmesini amaçlamaktadır.

-Üst havza bitkilendirme ve erozyon kontrolü: Harşit yan dereleri, eğimli çıplak yamaçlar ve rusubat üretiminin yüksek olduğu alanlarda değerlendirilebilir. Amaç, sediment ve rusubat taşınımını azaltmak ve dere kesitlerinin malzemeye dolmasını önlemektir.

-Taşkın yatağının açık alan olarak korunması: Harşit ve Kelkit koridorlarında taşkın duyarlılığının yüksek olduğu alanlarda değerlendirilebilir. Bu yaklaşım ile riskli alanlarda kalıcı yapılaşmanın sınırlandırılması ve taşkın sularının kontrollü olarak yayılabileceği alanların oluşturulması amaçlanmaktadır (AFAD, 2021; Karaduman, 2025; Kaynar 2025; Özoğlu, 2026; Pashaei, 2026).

Gümüşhane’de yeşil-mavi altyapı ve doğa tabanlı çözümler, imar planları ve mevcut mühendislik uygulamalarıyla birlikte ele alınmalıdır. Harşit ve Kelkit koridorlarında taşkın risk haritalarının planlama kararlarına yansıtılması, yüksek riskli alanlarda yapılaşmanın sınırlandırılması, açık ve yeşil alan sürekliliğinin korunması, geçirgen yüzeylerin artırılması ve taşkın tampon alanlarının oluşturulması önem taşımaktadır. Çok yüksek ve yüksek taşkın duyarlılığına sahip alanlarda bulunan mesken, kamu yapısı, işyeri ve bodrum katlı yapıların varlığı, yapılaşma kararlarının taşkın riskiyle doğrudan ilişkilendirilmesini gerekli kılmaktadır. Doğa tabanlı çözümler, klasik taşkın koruma yapılarının yerine geçen tek başına bir yöntem değil; DSİ taşkın koruma tesisleri, dere ıslahları, köprü-menfez kapasite kontrolleri ve rusubat yönetimini destekleyen tamamlayıcı uygulamalar olarak değerlendirilmelidir. Böylece Harşit ve Kelkit havzalarında yapısal önlemler, arazi kullanım kararları ve doğa tabanlı çözümler arasında bütünleşik bir taşkın risk azaltma yaklaşımı kurulabilir (AFAD, 2021; Karaduman, 2025; Kaynar 2025; Özoğlu, 2026; Pashaei, 2026).

Sonuç ve Mühendislik Önerileri

Gümüşhane’de taşkın riski; Harşit ve Kelkit ana akarsu sistemleri, bunlara bağlanan yan dereler, yerleşim alanları, tarım arazileri ve altyapı tesislerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok bileşenli bir mühendislik problemidir. Harşit sisteminde yüksek eğim, dar vadi yapısı,

hızlı yüzeysel akış ve rusubat taşınımı öne çıkarken; Kelkit ve güney kesimlerinde düşük eğimli alanlar, dere yatağına yakın yapılaşma ve tarımsal kullanım daha belirgin risk unsurlarıdır. Geçmiş taşkınlar ile mevcut maruziyet verileri, riskin yalnızca taşkın debisi ve yatak kapasitesiyle açıklanamayacağını, yapı ve altyapı ölçeğinde de ele alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, Gümüşhane'nin farklı hidrolojik ve morfolojik özelliklerini dikkate alan bütünleşik bir taşkın yönetimi yaklaşımı kapsamında aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir.

- ✓ Harşit ve Kelkit sistemleri ayrı hidrolojik alt birimler olarak değerlendirilmelidir. Taşkın önlemleri, her iki sistemin farklı topoğrafik, hidrolik ve arazi kullanım özelliklerine göre belirlenmelidir.
- ✓ Yan dereler ve mevsimsel akışlı küçük dere yatakları taşkın yönetimine dâhil edilmelidir. Düşük akışlı veya kuru görünen dereler ani yağışlarda önemli taşkın debileri üretebildiğinden öncelikli yan dereler ayrıca incelenmelidir.
- ✓ Köprü ve menfezlerin hidrolik yeterliliği ayrıntılı olarak kontrol edilmelidir. Değerlendirmelerde açıklık boyutunun yanında akım hızı, Froude sayısı, giriş-çıkış koşulları, mansap oyulması, taban-şev stabilitesi ve bakım durumu dikkate alınmalıdır.
- ✓ Dere ıslahlarının, yan kol birleşimleri, karayolu geçişleri, mansap koşulları ve taşkın yatağı sınırları dikkate alınarak memba-mansap sürekliliği içerisinde değerlendirilmelidir.
- ✓ Rusubat ve sediment kontrolü taşkın yönetiminin temel bileşenlerinden biri olmalıdır. Özellikle Harşit sisteminde kesit daralması, menfez tıkanması ve mansap oyulması risklerine karşı üst havza önlemleri ve tersip bentleri değerlendirilmelidir.
- ✓ Taşkın risk haritaları imar ve arazi kullanım kararlarına aktarılmalıdır. Riskli alanlarda yapılaşmanın sınırlandırılması, tampon bölgelerin korunması ve geçirgen yüzey, yeşil alan ve yağmur suyu yönetimine yönelik planlama kararlarının geliştirilmesi gerekmektedir.
- ✓ Bodrum katlı yapılar ayrı bir risk grubu olarak ele alınmalıdır. Bu yapılarda tahliye güvenliği, drenaj bağlantıları, kullanım biçimi ve su baskınına karşı yapı ölçeğinde alınabilecek önlemler değerlendirilmelidir.
- ✓ CBS, morfometrik analiz ve hidrolik modelleme kademeli biçimde kullanılmalıdır. Öncelikle CBS ile duyarlılık alanları belirlenmeli,

morfometrik analizle kritik yan dereler önceliklendirilmeli ve yüksek riskli kesimlerde HEC-RAS veya benzeri modellerle ayrıntılı hidrolik analiz yapılmalıdır.

- ✓ Doğa tabanlı çözümler yapısal önlemleri tamamlayacak şekilde değerlendirilmelidir. Yağmur suyu hasadı, taşkın depolama alanları, yeşil koridorlar, sulak alan restorasyonu ve infiltrasyonu artıran uygulamalar; CBS uygunluk analizi, mülkiyet, imar ve hidrolik koşullarla birlikte ele alınmalıdır.
- ✓ Taşkın yönetimi kurumlar arası koordinasyon, bakım, izleme ve güncelleme süreçleriyle desteklenmelidir. SYGM, DSİ, MGM, AFAD, yerel yönetimler ve ilgili diğer kurumlar arasında veri paylaşımı ve uygulama sürekliliği sağlanmalıdır.

Sonuç olarak Gümüşhane’de taşkın riskinin azaltılması yalnızca tekil dere ıslahlarına dayandırılmamalıdır. Harşit ve Kelkit havzalarının özellikleri, yan dereler, sanat yapıları, rusubat taşınımı, yapı maruziyeti, imar kararları, doğa tabanlı çözümler ve bakım-izleme süreçleri birlikte ele alınarak havza, yerleşim ve yapı ölçeğini bütünleştiren bir mühendislik yaklaşımı benimsenmelidir.

KAYNAKÇA

- Alshoaep, M. (2025). *Eskipazar Çayı (Karabük)'nın taşkın analizi sonuçlarının değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi].
- Ertoğral, O. ve Çiçek, İ. (2024). Morfometrik analiz yönteminin taşkın riski ön değerlendirme çalışmalarında kullanılabilirliği: Yomra örneği. *The Journal of Academic Social Sciences*, 156, 266-288.
- Girayhan, T. F. (2015). *Taşkın yönetimi çalışmaları* [Sunum]. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Gümüşhane İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü (AFAD). (2021). *Gümüşhane İl Afet Risk Azaltma Planı (İRAP-Gümüşhane)*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Karaduman, S. G. (2025). *Alt havzalar düzeyinde tatlı su sağlama ve taşkın riskinin doğa tabanlı çözümler ile değerlendirilmesi* [Yüksek lisans tezi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi].
- Kaynar, M. D. (2025). *Türkiye'de afet dirençliliği ve planlama: Bartın taşkın riski üzerinden değerlendirme* [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi].
- Köse, Y., Şahin, Ş. ve Müftüoğlu, V. (2024). Ankara Çayı Havzası'nın kentsel planlama kapsamında taşkın duyarlılığı açısından değerlendirilmesi. *İdealkent*, 16(43), 512-543.
- Muslu, Ş. (2025). *HEC-RAS ile 1 ve 2 boyutlu taşkın analizi: Gümüşhane Bahçecik Deresi örneği* [Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi].
- Nas, S. S. ve Nas, E. (2015). Olası taşkınların altyapı tesislerine etkileri: Harşit Çayı-Gümüşhane. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31(1), 440-451.
- Özoğlu, H. İ. (2026). *Taşkın risk haritaları ile Karaman Ayrancı Barajı menbasının incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi].
- Pashaei, M. H. (2026). *Doğa tabanlı çözümler kapsamında yeşil altyapı planlaması: Gediz Havzası taşkın riski değerlendirme* [Doktora tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi].
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM). (2015). *Yeşilirmak Havzası Taşkın Yönetim Planı: Yönetici özeti*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı.
- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM). (2020). *Doğu Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planı: Yönetici özeti*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Temizer, B. (2025). *Doğu Karadeniz Bölgesinde üç farklı alt havzanın taşkın risk analizi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Okan Üniversitesi].
- Uymaz, M. (2026). *Munzur Nehri yan dereleri için HEC-RAS ve ArcGIS tabanlı taşkın analizi* [Yüksek lisans tezi, Munzur Üniversitesi].
- Yıldız, Y. (2026). *Akarsularda taşkın riskinin incelenmesi: İstanbul ili Beylikdüzü ilçesi Kavaklı Deresi örneği* [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi].

BÖLÜM 3

**Sepiyolitın Geoteknik Mühendisliğindeki
Rolü: Mineralojiden Mühendislik
Uygulamalarına
Bütüncül Bir Değerlendirme**

Ebru Civelekler¹
Kamil Bekir Afacan²

¹ Dr. Öğr. Üyesi; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-5528-3453,

² Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-3667-4432

1. GİRİŞ

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi, güvenli, ekonomik ve sürdürülebilir yapıların inşası açısından kritik öneme sahiptir. Doğal zeminlerin düşük kayma dayanımı, yüksek sıkışabilirlik ve kontrol edilemeyen geçirgenlik gibi olumsuz özellikler sergilemesi, zemin iyileştirme tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu kapsamda zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kimyasal katkı maddeleri kullanımı en önemli yöntemlerden biridir (Ardakani ve Rajabi, 2021). Son yıllarda çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik gereksinimleri doğrultusunda alternatif doğal malzemelere yönelik ilgi belirgin biçimde artmakta, özellikle çevre koruma ile ilgili yeni ürün ve uygulamalar araştırılmaktadır.

Sürdürülebilir zemin iyileştirme uygulamalarında kil mineralleri önemli bir malzeme grubunu oluşturmakta; bu grupta lifsi yapıya sahip fillosilikatlar ayrı bir kategori olarak değerlendirilmektedir. Sepiyolit, paligorskit ile birlikte "lifli fillosilikat" olarak tanımlanan; sahip olduğu çok sayıdaki endüstriyel uygulamayla öne çıkan magnezyum silikat bir kil mineralini oluşturmaktadır (García-Romero & Suárez, 2013). Kimyasal açıdan sepiyolitın ideal formülü $\text{Si}_{12}\text{O}_{30}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ olup, Mg'in ana oktahedral katyon olduğu saf trioktahedral bir mineraldir (Suárez & García-Romero, 2011). Bu yapısal bileşim, sepiyolitın Mg bakımından zengin ve trioktahedral karakter göstermesini sağlamaktadır (García-Romero & Suárez, 2010).

Sepiyolitın kristal yapısı, 2:1 tipi fillosilikat şeritlerinin karakteristik olarak düzenlenmesiyle oluşmakta ve bu yapısal düzen kristal boyunca uzanan kanal ve tünellerin meydana gelmesine neden olmaktadır. (Suárez & García-Romero, 2011). Sepiyolitın kanal ve tünel yapısında koordineli su ile zeolitik su bulunmakta ve bu yapısal boşluklar moleküler ve iyonik türlerin kristal içerisine erişiminde önemli rol oynamaktadır (Galán, 1996; Ruiz-Hitzky, 2001).

Sepiyolitın lifsi morfolojisi, küçük partikül boyutu ve yapısındaki kanal ve tüneller, mineralin yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasına katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, farklı yataklardan elde edilen sepiyolitlerde liflerin boyutu, morfolojisi ve düzenlenme biçimi değişebilmekte ve bu farklılıklar yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. García-Romero ve Suárez (2013), sepiyolitın en küçük yapısal birimleri olan lathların yaklaşık 10–30 nm genişliğinde olduğunu ve liflerin boyut, kıvrımlılık ve agregasyon biçimleri bakımından farklılık gösterebildiğini bildirmiştir. Bu nedenle sepiyolitın fizikokimyasal özelliklerinin değerlendirilmesinde yalnızca mineralojik bileşimin değil, aynı zamanda tekstürel ve mikrotekstürel özelliklerin de dikkate alınması gerekmektedir (García-Romero & Suárez, 2013).

Yapı malzemeleri üzerine yapılan deneysel çalışmalar, sepiyolit liflerinin agrega-çimento pastası ara yüzeyinde homojen biçimde dağılarak mekanik davranışı şekillendirebildiği ve özellikle %3 lif içeren karışımda darbe

dayanımının referans betona göre yaklaşık %29 oranında artabildiği raporlanmıştır. SEM incelemeleri de sepiyolit liflerinin beton içerisinde homojen biçimde dağıldığını ve özellikle agrega-çimento pastası ara yüzeyinde takviye etkisi oluşturduğunu ortaya koymuştur (Koltka vd., 2017). Bu davranış, liflerin kompozit içerisindeki dağılımı ve agrega-matris ara yüzeyindeki mekanik etkileşimleri ile ilişkilendirilebilir; ancak sepiyolit liflerinin çatlak ilerlemesi ve gerilme transferi üzerindeki etkilerinin doğrudan ortaya konulabilmesi için daha ayrıntılı mikroyapısal ve kırılma mekaniği çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Sepiyolitin lifsi kristal morfolojisi, gözenekli yapısı, yüksek yüzey alanı ve karakteristik fizikokimyasal özellikleri, mineralin çeşitli mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Galán, 1996). Bu özellikler, sepiyolitin özellikle çimento esaslı kompozitlerde alternatif bir lifsi takviye malzemesi olarak araştırılmasının da temelini oluşturmaktadır (Galán, 1996). Bununla birlikte, sepiyolitin “çevre dostu” veya “sürdürülebilir” bir malzeme olarak nitelendirilebilmesi yalnızca doğal kökenine veya lifsi yapısına dayandırılmamalı; üretim, işleme, taşıma ve kullanım süreçlerini kapsayan çevresel değerlendirmelerle desteklenmelidir. Sürdürülebilir zemin stabilizasyonuna ilişkin genel literatür de alternatif malzemelerin çevresel ve mühendislik performanslarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Bununla birlikte, mevcut literatürde sepiyolitin geoteknik mühendisliğindeki kullanımı genellikle belirli uygulamalarla sınırlı kalmakta ve bütüncül bir değerlendirme eksikliği dikkat çekmektedir. Bu bölümde sepiyolitin mineralojik özellikleri, fiziksel ve mekanik davranışı ile geoteknik mühendisliğindeki kullanım alanları kapsamlı bir şekilde ele alınmaktadır.

2. SEPIYOLİTİN MİNERALojİK, KİMYASAL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Jeolojik Oluşum ve Köken

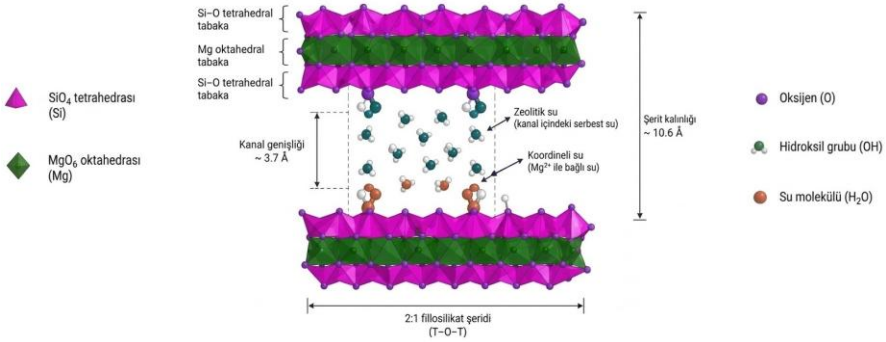
Sepiyolit, Neojen'den Kuvaterner'e uzanan geniş bir zamansal aralıkta ve başlıca yarı-kurak ile kurak iklim kuşaklarında oluşabilir. Bu koşullarda magnezyumca zengin ana kayaların ayrışması veya göl-evaporitik ortamlarında Mg-Si jellerinin çökmesi başlıca iki oluşum yolu olarak kabul edilir. Birinci yol serpantin, ultrabazik ve dolomitik karbonat kayaların kimyasal bozunmasını, ikinci yol ise kapalı-havza göllerinde jelin kristalleşmesini içerir; bu iki köken tipik olarak farklı kristaliniteler ve safsızlık profilleri üretir (Pozo ve Calvo, 2018). Kurak ve yarı-kurak bölgelerdeki Aridisol topraklar, Pleistosen paleoklimasının kaydı niteliğinde sepiyolit oluşumları barındırır ve bu nedenle sepiyolit, toprak evrimi için pedojenetik bir gösterge olarak da değerlendirilir (Bouza vd., 2007).

Yataktan yatağa değişen safsızlık bileşimi ve lif morfolojisi, sepiyolitin geoteknik uygulamalardan önce sistematik biçimde karakterize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Ayrıca aynı kökensel çeşitlilik, mineralin endüstriyel

kullanımı için avantaj olduğu kadar tutarsız performans riskini de beraberinde getirebilir (Galán, 1996).

2.2. Kimyasal Bileşim ve Mineralojik Sınıflandırma

Sepiyolitın ideal birim-hücre formülü $\text{Si}_{12}\text{O}_{30}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ olarak ifade edilmekte olup, mineral "saf trioktahedral" bir yapıya sahiptir (García-Romero & Suárez, 2010; Suárez & García-Romero Romero, 2011). Bu formülde Mg, ana oktahedral katyon konumunda yer almakta ve yarım birim hücre başına yaklaşık 4,88–7,92 atom arasında değişen Mg içerikleri rapor edilmektedir (Suárez & Romero, 2011). Oktahedral katyonun ağırlıklı olarak Mg olması, sepiyoliti fillosilikat grubundaki diğer yaygın killerden (kaolinit, montmorillonit, illit) belirgin biçimde ayırmaktadır (Romero & Suárez, 2010). Magnezyumun yanı sıra yapıda sınırlı düzeyde Fe, Al ve Mn gibi katyonlar da bulunabilmekte; bu katyonların oranı ve dağılımı sepiyolitın fizikokimyasal davranışını etkilediği düşünülmektedir (García-Romero & Suárez, 2010). Şekil 1’de sepiyolitın 2:1 tipi fillosilikat şerit yapısı ve kanallarının şematik gösterimi yer almaktadır. Şekilde silis ve magnezyum içeren bu tabakalar, tabakalar arasındaki kanallar ve kanallarda bulunan zeolitik ve koordineli su moleküllerinin konumları da gösterilmiştir.



Şekil 1. Sepiyolitın 2:1 tipi fillosilikat şerit yapısı ve kanallarının şematik gösterimi. Şematik gösterim, sepiyolitın kristal yapısına ilişkin literatür bilgileri temel alınarak yazarlar tarafından hazırlanmıştır (Brauner and Preisinger, 1956; Ockwig et al., 2009).

Sepiyolit ve paligorskit, 2:1 şeritlerinin periyodik terslenmesiyle kurulan modüle yapıllı lifli fillosilikatlardır. Diğer tabakalı fillosilikatlardan (örneğin smektit ve kaolinit) yapısal olarak farklı olması, sepiyolitın su tutma, adsorpsiyon ve iyon değişimi gibi önemli fizikokimyasal özellikler göstermesinin temel nedenlerinden biridir (Galán, 1996; Ruiz-Hitzky, 2001). Sepiyolit, Mg bakımından zengin ve trioktahedral karakterli bir fillosilikat olup, yüksek özgül yüzey alanı lifsi morfolojisi, ince partikül boyutu ve yapısında bulunan mikrogözenek ve kanallarla ilişkilidir (Galán, 1996). Sepiyolitın ideal yapısal formülü $\text{Si}_{12}\text{O}_{30}\text{Mg}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_8$ şeklinde ifade edilmekte olup, yapısal

formüldeki Si_{12} birimi tetrahedral bileşeni temsil etmektedir (Suárez & García-Romero, 2011).

Doğal örneklerin kimyasal bileşimleri arasında önemli farklılıklar bulunabilmekte; paligorskit ve sepiyolit örnekleri kimyasal düzlemde keskin bir “bileşim boşluğu” yerine geçişli bir süreklilik göstermektedir (García-Romero & Suárez, 2010). Özellikle Al-sepiyolit ve Mg-paligorskit gibi ara bileşimlerin bulunması, bu iki mineral arasındaki kimyasal sınırların her zaman keskin olmadığını göstermektedir (García-Romero & Suárez, 2010). Kimyasal kompozisyondaki bu çeşitlilik, sepiyolit mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesinde mineralojik ve kimyasal bileşimin yanı sıra temel fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerinin de ayrıca belirlenmesini gerekli kılmaktadır (Galán, 1996).

2.3. Özgül Yüzey Alanı ve Adsorpsiyon Kapasitesi

Sepiyolit, yüksek özgül yüzey alanı ve belirgin özellikleriyle öne çıkan lifsi bir fillosilikattır. Bu özellikler; mineralin lifsi morfolojisi, ince partikül boyutu, porozitesi ve yapısında bulunan kanal ve mikrogözeneklerle yakından ilişkilidir (Galán, 1996). Kristal yapıdaki intrakristal tüneller, mineralin dış yüzeyinin yanı sıra iç yüzeyler aracılığıyla da moleküllerin ve iyonların yapıya erişimini mümkün kılmakta; bu durum sepiyolit adsorpsiyon davranışına önemli katkı sağlamaktadır (Ruiz-Hitzky, 2001).

Sepiyolit katyon değişim kapasitesi diğer birçok kil mineraline kıyasla görece düşük olmakla birlikte, adsorpsiyon davranışı yalnızca katyon değişimiyle sınırlı değildir. Dış yüzeylerin yanı sıra intrakristal tüneller ve iç yüzeyler de moleküler ve iyonik türlerin tutulmasında rol oynamaktadır (Galán, 1996; Ruiz-Hitzky, 2001). Bu nedenle sepiyolit adsorpsiyon kapasitesinin değerlendirilmesinde yüzey alanı, porozite, kanal ve tünel yapısı ile yüzey kimyasının birlikte ele alınması gerekmektedir.

Bu özellikler, sepiyolit çevresel ve geo-çevresel mühendislik uygulamalarındaki kullanım potansiyelini de desteklemektedir. Özellikle düşük geçirgenlik, uygun dayanım ve adsorpsiyon kapasitesinin birlikte bulunması, sepiyolit kil sızdırmazlık katmanları ve diğer geo-çevresel yapılarda değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Abbaslou vd., 2024).

2.4. Organosilan Esaslı Yüzey Modifikasyonları ve Kimyasal Bağ Mekanizmaları

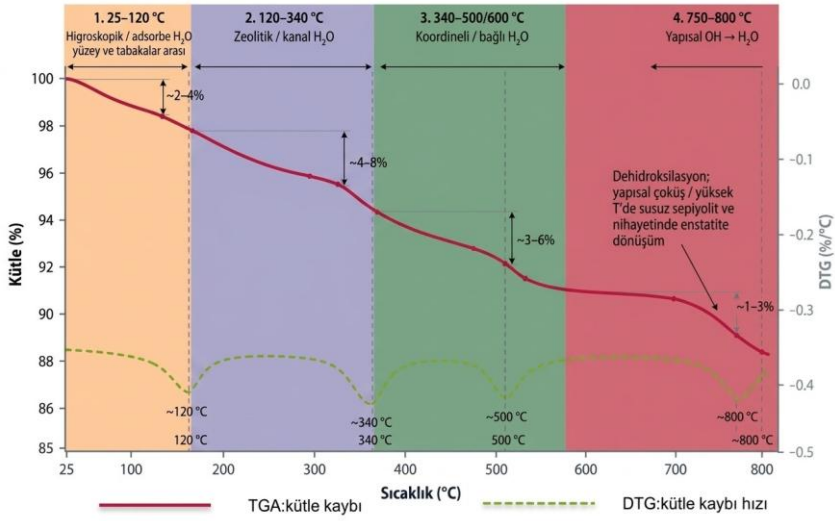
Sepiyolit doğal haldeki lifsi yapısı ve yüksek su emme kapasitesi, özellikle silisli kum veya organik matrisler ile oluşturulan kompozit sistemlerde arayüzey aderansının sınırlı kalmasına neden olabilmektedir. Sepiyolit lifleri ile etrafındaki matris (özellikle kuvars esaslı silisli kum taneleri veya polimerik bağlayıcılar) arasındaki mekanik ve kimyasal kenetlenmeyi artırmak amacıyla organosilan esaslı yüzey ajanları (coupling agents) ile modifikasyon uygulanmaktadır. Organosilanlar, genel formülü $\text{R-Si}(\text{OR}')_3$ olan çift fonksiyonlu hibrit moleküllerdir; burada OR' hidroliz olabilen alkoksi gruplarını (örneğin metoksi

veya etoksi), R ise matris ile reaksiyona girebilen reaktif organik/fonksiyonel grubu (örneğin amino, epoksi veya vinil) temsil eder.

Neme veya su ortamına maruz kalan organosilan moleküllerinde öncelikle alkoksi grupları hidroliz olarak reaktif silanol (Si–OH) yapılarına dönüşür. Bu silanol grupları, sepiyolit liflerinin dış yüzeyinde yer alan silanol (Si–OH) uçları ve zeolitik kanalların çeperlerindeki serbest hydroxyl grupları ile yoğunlaşma tepkimesine girer. Bu tepkime sonucunda, sepiyolit yüzeyi ile silan molekülü arasında yüksek basma ve kayma dayanımına sahip kovalent siloksan (Si–O–Si) bağları kurulur. Silanın moleküler zincirinin diğer ucunda yer alan fonksiyonel R grubu ise etrafındaki silisli kum tanelerinin yüzey silanolarıyla benzer kovalent bağlar tesis eder veya matris fazı ile kovalent/hidrojen bağları kurarak güçlü bir ara faz oluşturur. Organosilan modifikasyonu sayesinde, sepiyolit liflerinin matris içerisindeki dispersiyonu (dağılımı) ve ıslanabilirliği gelişmekte, yük aktarım verimliliği artmakta ve sistemin nem/su etkisi altındaki uzun dönemli durabilitesi ile kayma mukavemeti önemli ölçüde yükselmektedir.

2.5. Su Tutma Davranışı

Sepiyolit su tutma davranışı, farklı bağlanma enerjilerine sahip su türlerinin sıcaklıkla kademeli olarak yapıdan uzaklaşması ile karakterize edilmektedir. Yapıda bulunan higroskopik/adsorbe su, zeolitik su ve oktahedral Mg^{2+} iyonlarına koordineli su farklı sıcaklık aralıklarında uzaklaşmaktadır. Ruiz-Hitzky (2001), zeolitik suyun yaklaşık 100 °C'de uzaklaştırılabildiğini, koordineli suyun ise daha yüksek sıcaklıklarda, özellikle 350 °C'nin üzerindeki koşullarda giderildiğini ve koordineli suyun kaybının sepiyolit yapısında katlanmaya ve intrakristalin tünellerin ortadan kalkmasına neden olduğunu göstermiştir. Bu yapısal değişim, mineralin mikrogözenek hacmi ve özgül yüzey alanında da belirgin bir azalmaya yol açmaktadır (Ruiz-Hitzky, 2001). Sepiyolit su sıcaklıkla gerçekleşen kütle kaybı ve bozunma mekanizması Şekil 2'de verilmiştir. Sepiyolit termal davranışı (TGA/DTG) genel olarak dört ana sıcaklık bölgesinde gerçekleşen kütle kayıpları ile karakterize edilmektedir:



Şekil 2. Sepiyolit'in sıcaklığa bağlı tipik termal bozunma aşamaları ve kütle kaybı eğrileri (TGA/DTG, 25–800 °C) Şematik gösterim, sepiyolit'in su tutma davranışına ilişkin literatür bilgileri temel alınarak yazarlar tarafından hazırlanmıştır [Ruiz et al., (2017); Frost and Ding., (2003)].

1. bölge (25–120 °C) göz önüne alınırsa yapının yüzeyinde ve tabakalar arasında fiziksel olarak tutulan higroskopik / adsorbe suyun uzaklaşmasıyla yaklaşık %2–4 oranında bir kütle kaybı gerçekleşir. 2. bölgeye (120–340 °C) geçerken kristal yapıdaki kanalların içinde yer alan zeolitik suyun (kanal suyu) bünyeden ayrılmasıyla yaklaşık %4–8'lik kütle kaybı gözlenir. 3. Bölge oktahedral Mg²⁺ katyonlarına koordineli olan bağlı su moleküllerinin kademeli olarak yapıyı terk etmesi sonucu kütlede %3–6 civarında ek bir azalma meydana gelir. 800 °C'ye yaklaşırken 4. Bölgede yapısal hidroksil gruplarının bozunarak suya dönüşmesi (dehidroksilasyon) gerçekleşir (%1–3 kütle kaybı). Bu aşamada sepiyolit kristal yapısı çökerek önce susuz (anhidr) sepiyolite, ardından daha yüksek sıcaklıklarda enstatit fazına dönüşmektedir.

Bu sıralı dehidratasyon, mineralin termo-hidrolik davranışı üzerinde belirleyicidir. Pratikte, özellikle hidratasyon ısısı yüksek olan çimento ve kireçli sistemlerde sepiyolit'in kontrollü bir su tamponu işlevi üstlenmesi ve hidratasyon kinetiğini düzenlemesi mümkün olur. Bu özellik lifli dolgu olarak mikro-çatlak köprüleme davranışı ile birleştiğinde, sepiyolit'in yapı malzemelerinde "su tutma + mekanik takviye" ikili işlevinin temelini oluşturur (Galán, 1996; Koltka vd., 2017). Geoteknik bağlamda ise bu kontrollü su tutma, kil bariyerlerin inşası sırasında kararlı bir nem rejiminin sağlanmasına katkı sağlar (Güney & Özdemir, 2005).

2.6. Geoteknik Endeks Verileri ve Mühendislik Profili

Sepiyolit içeren zeminler, özgün mineralojik yapıları nedeniyle klasik ince daneli zeminlerden belirgin şekilde ayrılan geoteknik özellikler sergilemektedir. Bu zeminler genel olarak düşük birim hacim ağırlığı, yüksek boşluk oranı ve

belirgin kohezyon değerleri ile karakterize edilir. Lifsi kristal yapıya sahip sepiyolit minerali, yüksek porozite ve özgül yüzey alanı sayesinde su ile güçlü etkileşimler geliştirmekte ve bu durum zemin davranışını doğrudan etkilemektedir.

Sepiyolit zeminlerin mühendislik performansına ilişkin deneysel bulgular, bu malzemelerin her zaman yüksek şişme potansiyeline sahip olmadığını ortaya koymaktadır. Nitekim Abbaslou ve arkadaşları (2024) tarafından İran kökenli sepiyolit zeminler üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı bir çalışmada, bu zeminlerin belirgin bir şişme–büzülme davranışı göstermediği, buna karşın tek eksenli basınç dayanımı açısından görece yüksek değerler sergilediği rapor edilmiştir. Bu durum, sepiyolit her koşulda problemli bir şişen zemin olarak değerlendirilmemesi gerektiğini, aksine belirli mühendislik avantajları da sunabileceğini göstermektedir.

Aynı çalışmada rapor edilen endeks özellikleri incelendiğinde, likit limit değerlerinin yüksek, plastisite indisinin ise orta ile yüksek aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu durumun temellerde yukarı-aşağı yönlü hareketler gibi sorunlara yol açabileceği vurgulanmıştır. Bu sonuç, saf sepiyolit yüksek LL değerlerinin silt ve ince kumla harmanlanarak optimum su içeriği ve kıvam açısından dengelenebileceğini ortaya koyar (Abbaslou vd., 2024). Bu nedenle, bu tür zeminlerin granüler malzemelerle (örneğin silt ve ince kum fraksiyonları ile) harmanlanması, optimum su içeriğinin düzenlenmesi ve kıvam özelliklerinin dengelenmesi açısından etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sepiyolit zeminler yüksek su tutma kapasitesi, gözenekli yapı ve lifsi mikro-morfoloji gibi özellikleri nedeniyle klasik kil zeminlerden farklı bir mühendislik profiline sahiptir. Bu nedenle bu zeminlerin davranışı, yalnızca Atterberg limitleri gibi geleneksel endeks parametreleri ile değil; aynı zamanda mikro-yapısal analizler, su–mineral etkileşimi ve ortam koşulları dikkate alınarak bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım, sepiyolit hem avantajlarının etkin kullanımını hem de potansiyel risklerinin kontrol altına alınmasını mümkün kılacaktır.

Sepiyolit mikro-ölçekteki bu özgün mineralojik ve endeks karakteristiği, onun makro-ölçekli mühendislik uygulamalarındaki performansının da faydalı olacağını göstermektedir. Mineralin sahip olduğu lifsi morfoloji, yüksek özgül yüzey alanı ve kademeli su tutma kapasitesi, farklı zemin matrisleri veya yapı malzemeleri ile temas ettiğinde temel davranış mekanizmalarını şekillendirmektedir. Bu doğrultuda sepiyolit, klasik kil minerallerinden farklı olarak, mühendislik sistemlerinde hem bir hidrolik/fiziksel düzenleyici hem de mikro-donatılı bir matris bileşeni olarak işlev görme potansiyeline sahiptir. İlerleyen bölümlerde, sepiyolit bu temel fizikokimyasal ve mikroyapısal özelliklerinin zemin mekaniği, yapı malzemeleri ve çevre geotekniği uygulamalarındaki pratik yansımaları, literatürdeki deneysel ve saha bulguları ışığında detaylandırılmaktadır.

3. GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİNDE UYGULAMA ALANLARI

3.1. Zemin İyileştirme ve Stabilizasyonu

Sepiyolitın zemin iyileştirmedeki işlevi; karışımın hidrolik, mekanik ve deformasyon özelliklerini değiştirmeye dayanır. Ancak sepiyolit her zemin türünde aynı sonucu veren genel bir bağlayıcı değildir. Mineralojik saflık, katkı oranı, başlangıç zemini, su içeriği, sıkıştırma enerjisi, kür koşulları ve kimyasal çevre deneysel performansı belirler.

Sepiyolit ve doğal zemin karışımları üzerine yapılan çalışmada, %25 ve %50 doğal zemin içeren karışımlar farklı su içeriklerinde sıkıştırılmış; hidrolik iletkenlik, sızıntı suyu, tek eksenli basınç dayanımı, konsolidasyon, hacimsel büzülme ve şişme deneyleri uygulanmıştır. Doğal zemin içeren karışımların saf sepiyolite kıyasla daha düşük geçirgenlik ve şişme, daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği raporlanmıştır. Bu sonuç, sepiyolitın uygun bir doğal zeminle karıştırılmasının bazı mühendislik hedefleri bakımından avantaj sağlayabileceğini göstermektedir; ancak sonuçlar test edilen malzemeler ve su içerikleriyle sınırlıdır (Güney & Özdemir, 2005).

Yüksek şişme potansiyeline sahip zeminlerin mühendislik davranışının iyileştirilmesinde mineral katkıların kullanımı, geoteknik mühendisliğinde yaygın ve etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu tür zeminlerde meydana gelen hacimsel değişimler; yapı temellerinde oturma, kabarma ve taşıma gücü kaybı gibi ciddi mühendislik problemlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle, şişme potansiyelinin kontrol altına alınması, zemin stabilizasyonu uygulamalarının temel hedeflerinden birini oluşturmaktadır.

Geleneksel stabilizasyon katkıları arasında yer alan kireç, çimento ve silis dumanı gibi bağlayıcı malzemelerin, zeminlerin genleşme davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği literatürde geniş biçimde rapor edilmiştir. Bu katkılar, zemin–katkı etkileşimi sonucu gerçekleşen iyon değişimi, flokülasyon–agregasyon ve puzolanik reaksiyonlar sayesinde plastisite indeksini düşürmekte ve buna bağlı olarak şişme potansiyelini azaltmaktadır. Nitekim Al-Gharbawi ve arkadaşları (2023), %5–9 oranında kireç, çimento ve silis dumanı içeren karışımların serbest şişme yüzdesini yaklaşık %65, şişme basıncını ise yaklaşık %76 oranında azaltabildiğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, klasik bağlayıcıların şişen zeminlerin kontrolünde yüksek etkinliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Son yıllarda ise, lifsi yapıya sahip magnezyum silikat mineralleri—özellikle sepiyolit ve talk—alternatif stabilizasyon katkıları olarak araştırılmaya başlanmıştır. Bu minerallerin yüksek özgül yüzey alanı, gözenekli yapısı ve su tutma kapasitesi, zeminlerin su–mineral etkileşimini değiştirerek hacimsel deformasyon davranışını etkileyebilmektedir. Sakr ve arkadaşları (2025) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, %25 oranında talk pudrası ilavesinin kür koşulları altında şişme basıncını %37,5 oranında azaltabildiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, lifsi magnezyum silikatların şişme kontrolünde belirli bir iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, sepiyolit ve benzeri minerallerin stabilizasyon performansı, klasik bağlayıcılara kıyasla daha karmaşık bir etkileşim mekanizmasına dayanmaktadır. Bu katkılar çoğunlukla kimyasal bağlayıcılıktan ziyade fiziksel adsorpsiyon, su tutma kapasitesi ve mikro-yapısal düzenlemeler yoluyla etki göstermektedir. Dolayısıyla, elde edilen iyileşme düzeyi; katkı oranı, zemin mineralojisi, başlangıç su içeriği ve kür koşulları gibi parametrelere yüksek derecede bağlıdır.

Sepiyolit mineralinin saf hali, doğal kil/zeminlerle (özellikle yüksek plastisiteli kil, bentonit veya şişen zeminlerle) oluşturduğu karışımlar ve geleneksel bağlayıcıların (kireç ve çimento) zeminlerin mühendislik parametreleri üzerindeki etkilerini karşılaştıran özet Tablo 1’de aşağıda sunulmuştur:

Sepiyolit, 2:1 phyllosilicate grubunda yer alsa da bentonit/montmorillonit gibi katmanlı değil, iğnemsilifli (fibrous) bir kristal yapıya sahiptir. Bu nedenle bünyesine yüksek miktarda su emmesine rağmen tabakalar arası genleşme yapmaz. Yüksek şişme gösteren kil zeminlere %25–50 oranında sepiyolit eklendiğinde, ortamdaki genleşen kil hacmi seyreltildiği ve sepiyolit lifleri matris içerisinde mekanik bir kilitlenme sağladığı için şişme basıncı belirgin şekilde düşer.

Kireç ve çimento gibi bağlayıcılar kimyasal puzolanik reaksiyonlar (C-S-H jelleri) oluşturarak yüksek eksenli basınç dayanımı kazanırken; sepiyolit esaslı iyileştirme büyük oranda fiziksel dolgu (micro-filler) ve mikro-lif köprüleme (micro-fiber reinforcement) mekanizmasına dayanır.

Literatürde sepiyolit genellikle kireç veya çimento ile birlikte kullanıldığında synerjic (ortak) etki gösterir: Sepiyolit lifleri matriste süneklik ve çatlak köprüleme sağlarken, az miktarda eklenen kireç/çimento ise kimyasal bağları (puzolanik reaksiyonu) güçlendirir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sepiyolit ve benzeri lifsi mineraller, çevresel açıdan daha sürdürülebilir alternatifler sunmakla birlikte, optimum performansın sağlanabilmesi için genellikle diğer bağlayıcılarla birlikte veya dikkatle tasarlanmış karışım oranlarında kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, bu tür katkıların mühendislik uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabilmesi için kapsamlı laboratuvar deneyleri ve saha doğrulamalarına dayalı bir tasarım yaklaşımı benimsenmelidir.

Tablo 1. Saf sepiyolit, zemin-sepiyolit karışımları ve kireç/çimento katkılarının geoteknik ve indeks parametreleri üzerindeki etkileri

Malzeme / Katkı Tipi	Geçirgenlik (Hidrolik İletkenlik, k)	Açıklama
Saf Sepiyolit	Orta - Düşük (10^{-6} - 10^{-8} cm/s)	Kanal yapısı nedeniyle bentonit kadar geçirimsiz değildir.
Doğal Zemin + %25 Sepiyolit	Hafif Azalır / Dengelenir	Lifli yapı gözenekleri doldurarak mikrokanaalları tıkar.
Doğal Zemin + %50 Sepiyolit	Düşer / Sabit Kalır	Daha yoğun dolgu etkisi oluşturur.
Geleneksel Katkı: Kireç (%3-%8)	Kısa vadede artabilir, uzun vadede azalır	Flokülasyon ile önce gözenek artar, puzolanik reaksiyonla tıkanır.
Geleneksel Katkı: Çimento (%5-%12)	Önemli Ölçüde Azalır	Hidratasyon ürünleri gözenek hacmini hızla doldurur.
Malzeme / Katkı Tipi	Şişme Basıncı (Ps) / Şişme Potansiyeli	Açıklama
Saf Sepiyolit	Çok Düşük - Yok	Montmorillonit gibi tabakalar arası genişleme yapmaz, iğnemesi/lifi yapıya sahiptir.
Doğal Zemin + %25 Sepiyolit	Belirgin Şekilde Azalır	Şişen kil oranını seyretilir ve suyu kanallarda hapseder.
Doğal Zemin + %50 Sepiyolit	Önemli Ölçüde Azalır (%60-80 düşüş)	Şişme potansiyelini büyük oranda baskılar
Geleneksel Katkı: Kireç (%3-%8)	Tamamen Baskılanır / Yok Olur	Katyon değişimi ve kristalleşme ile şişme sıfırlanır.
Geleneksel Katkı: Çimento (%5-%12)	Tamamen Baskılanır	(Rijit çimento matrisi şişmeyi engeller.)
Malzeme / Katkı Tipi	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (UCS, q_u)	Açıklama
Saf Sepiyolit	Düşük (Doygun halde)	Tek başına bağlayıcı değildir
Doğal Zemin + %25 Sepiyolit	q_u Artar: orta derecede artar	Lif köprüleme etkisi ile kohezyon ve sürtünme açısına katkı sağlar
Doğal Zemin + %50 Sepiyolit	Artar (Kuru/Düşük nemde)	İğnemesi lif matrisi mekanik kilitlenme sağlar
Geleneksel Katkı: Kireç (%3-%8)	Yüksek Artış (Zamana bağlı)	Puzolanik reaksiyonlar ve C-S-H / C-A-H bağları oluşur
Geleneksel Katkı: Çimento (%5-%12)	Çok Yüksek ve Hızlı Artış	Hızlı hidratasyon ve sertleşme
Malzeme / Katkı Tipi	Plastisite İndeksi (PI) / Kıvrım Limitleri	Açıklama
Saf Sepiyolit	Çok Yüksek LL, Düşük/Kırılgan PI	Yüksek iç yüzey alanı nedeniyle su emme kapasitesi çok yüksektir
Doğal Zemin + %25 Sepiyolit	LL Artar, PI Azalır / İyileşir	Plastik sınırı yükseltir, işlenebilirliği artırır
Doğal Zemin + %50 Sepiyolit	PI Belirgin Düşer	Zemini daha az plastik / daha gevrekli kıvrıma getirir
Geleneksel Katkı: Kireç (%3-%8)	PI Keskin Şekilde Düşer	Plastik sınır (PL) belirgin şekilde yükseltir
Geleneksel Katkı: Çimento (%5-%12)	PI Düşer / Plastik Özellik Kaybolur	Zemin rijit, gevrekli bir kompozite dönüşür

* Tablodaki eğilimler ve parametrik değişimler literatürdeki deneysel çalışma bulgularından (Sabah ve Çelik, 2002 ve Kavas vd., 2004) derlenerek sentezlenmiştir.

3.2. Geosentetik Uygulamalar

Sepiyolit, doğrudan bir geosentetik malzeme olmamakla birlikte, geosentetik sistemlerle birlikte veya bu sistemlerin performansını artırıcı bir dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Lifli yapısı, yüksek özgül yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi, sepiyoliti özellikle geoçevresel mühendislik

uygulamalarında geosentetiklerle entegre kullanıma uygun hale getirmektedir. Bu bağlamda sepiyolit, geosentetik kil örtüler (GCL), geomembran destek sistemleri ve reaktif bariyer uygulamalarında değerlendirilmektedir.

Geosentetik kil örtüler (GCL'ler), düşük geçirgenlik ve hızlı uygulama avantajları nedeniyle sıkıştırılmış kil tabakalarına alternatif olarak kullanılan, iki geotekstil tabaka arasına yerleştirilmiş bentonit içeren kompozit bariyer sistemlerdir (Chen vd., 2024). Bentonitin su varlığında yüksek şişme ve kapatma kapasitesi, GCL'lerin temel geçirimsizlik mekanizmasını oluşturur (Di Emidio vd., 2015). Bu kısıtlamalar, bentonite alternatif veya tamamlayıcı özellik gösterebilecek farklı kil minerallerinin geoçevresel bariyer uygulamalarında değerlendirilmesine yönelik araştırmaları teşvik etmiştir. Bu kapsamda sepiyolit, düşük hidrolik iletkenlik, şişme davranışı ve kirleticileri adsorplama kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle atık depolama sahalarının taban geçirimsizlik sistemlerinde alternatif bir malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır (Güney vd., 2013).

Sepiyolit–zeolit karışımlarında sepiyolit içeriğinin artırılması, karışımların dayanımını, şişme potansiyelini ve metal adsorpsiyon kapasitesini artırırken hidrolik iletkenliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sepiyolit–zeolit esaslı malzemelerin taban geçirimsizlik malzemesi olarak kullanılması, kaolinitçe zengin killere kıyasla daha ince geçirimsizlik tabakalarının oluşturulmasına ve yapım maliyetlerinin azaltılmasına olanak sağlayabilmektedir (Wang vd., 2022).

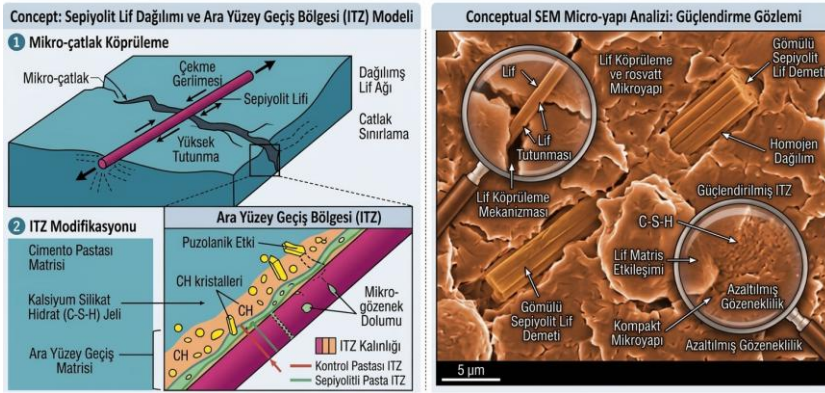
3.3. Beton ve Çimento Sistemleri

Sepiyolit, beton ve çimento esaslı kompozitlerde lifsi takviye ve mineral katkı olarak araştırılan doğal bir malzemedir. Düşük ve orta katkı oranlarında mekanik performans üzerinde olumlu etkiler sağlayabildiği gösterilmiştir. Kavas et al. (2004), harçta %10 sepiyolit kullanımının 2, 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarını referans karışıma göre artırdığını ve bu iyileşmeyi sepiyolit liflerinin çimento matrisi içerisinde oluşturduğu ağ yapısıyla ilişkilendirmiştir. Benzer şekilde, yüksek kalsiyumlu sepiyolit çimentonun %7.5'i oranında ikame edilmesi durumunda basınç ve eğilme dayanımlarının en yüksek değerlerine ulaşıldığı bildirilmiştir (Wu & Kou, 2019). Bununla birlikte, yüksek kalsiyumlu sepiyolit ilavesinin taze karışımın reolojik özellikleri ve kuruma büzülmesi üzerinde de etkili olduğu belirtilmiştir.

MgO–SiO₂ esaslı lifli çimento sistemlerinde ise Mármol et al. (2019), %1 ve %2 oranlarında sepiyolit ikamesinin elastisite modülünü artırabildiğini ve kompozitin homojenliğini iyileştirdiğini göstermiştir. Bu bulgular, sepiyolit yalnızca Portland çimentosu esaslı sistemlerde değil, farklı bağlayıcı sistemlerde de mikroyapı ve mekanik performans üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, sepiyolit etkisi bağlayıcı türüne, katkı oranına, partikül/lif özelliklerine ve karışımın işlenebilirliğine bağlı olarak değişmektedir.

Sepiyolit liflerinin çimento matrisi içerisindeki dağılımı, mikro-çatlak ilerlemesini sınırlama mekanizması ve Ara Yüzey Geçiş Bölgesi (ITZ)

üzerindeki modifikasyon etkisi Şekil 3'te şematik olarak gösterilmiştir. Çimento hamuruna eklenen sepiyolit lifleri, yüksek en/boy oranları ve lifli (iğnems) morfolojileri sayesinde matris içerisinde homojen bir ağ yapısı oluşturmaktadır. Sertleşmiş çimento matrisinde mikro-çatlakların oluşması durumunda, çatlak ucuna rastlayan sepiyolit lifleri "çatlak köprüleme" mekanizmasını devreye sokmaktadır. Bu mekanizma, çekme gerilmelerini lif boyunca transfer ederek çatlak ağzının açılmasını ve ilerlemesini sınırlandırmaktadır. Diğer taraftan, liflerin Ara Yüzey Geçiş Bölgesi'ndeki (ITZ) puzolanik reaksiyon kabiliyeti ve mikro-doldurucu etkisi sayesinde, matristeki serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandit) kristalleri tüketilmekte ve ek kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri ile etrijit oluşumu teşvik edilmektedir. Bunun sonucunda, normal çimento pastasındaki zayıf ve gözenekli ITZ yapısı, sepiyolit takviyesi ile daha yoğun ve kompakt bir mikroyapıya dönüşmektedir.



Şekil 3. Sepiyolit lif takviyeli çimento hamurunun mikroyapısal şeması, mikro-çatlak köprüleme mekanizması ve Ara Yüzey Geçiş Bölgesi (ITZ) iyileşme modeli. Şematik gösterim, mikroyapıya ilişkin literatür bilgileri temel alınarak yazarlar tarafından hazırlanmıştır (Kavas, T., Sabah, E., & Çelik, M. S. (2004); Ruiz-Hitzky, E. (2001))

Sepiyolit liflerinin çimento kompozitlerine entegrasyonu hem mekanik hem de fiziksel açıdan çifte güçlendirme sağlamaktadır. Fiziksel düzeyde iğnems lif yapısı mikro-çatlak köprülemesi ile matrisin gevrek kırılma direncini artırırken; kimyasal/mikroyapısal düzeyde ise ITZ bölgesini sıkılaştırarak gözenekliliği azaltmakta ve matris-lif tutunmasını maksimuma çıkarmaktadır.

Sonuç olarak, sepiyolit beton ve çimento esaslı sistemlerdeki en etkili kullanımı, genellikle düşük ve orta dozaj aralıklarında ve homojen bir şekilde dağıldığı koşullarda sağlanmaktadır. Bu koşullar altında sepiyolit, karışımın malzeme özelliklerini iyileştirerek işlenebilirliği düzenlemekte, lifsi yapısı sayesinde mikroçatlakların gelişimini sınırlandırmakta ve bazı bağlayıcı sistemlerde mekanik dayanımın artmasına katkı sunmaktadır. Ayrıca sepiyolit, yalnızca geleneksel mekanik iyileştirmelerle sınırlı kalmayıp, çok işlevli kompozitlerin geliştirilmesinde de önemli bir rol üstlenmektedir. Özellikle farklı bağlayıcı sistemlerle birlikte kullanıldığında, hem mikro-yapısal düzenlemelere katkı sağlamakta hem de malzemenin performansını çok yönlü olarak

geliştirebilmektedir. Bu nedenle sepiyolit, uygun karışım tasarımı ve uygulama koşulları sağlandığında, çimento esaslı sistemlerde çok amaçlı ve yenilikçi bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebilir.

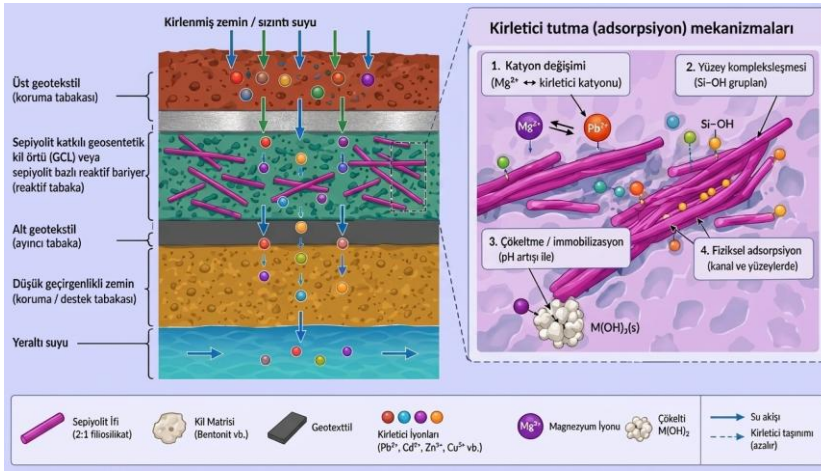
3.4. Çevresel Uygulamalar

Sepiyolit, özellikle toprak ve atık su ortamlarında bulunan potansiyel olarak toksik elementlerin giderilmesinde etkin bir şekilde kullanılabilir. Bu kapsamda, Song ve arkadaşları (2020) tarafından sunulan kapsamlı derleme çalışmasında, sepiyolit bazlı malzemelerin kirletici giderimindeki performansı ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Song vd., sepiyolit bazlı malzemelerin çevresel kirleticilerin arıtımında kullanımına ilişkin kapsamlı bir çalışma yapmış; potansiyel olarak toksik elementlerin toprakta ve atık suda giderimi için kireç, bentonit ve uçucu kül ile yapılan kombinasyonların yaygın biçimde tercih edildiğini bildirmiştir (Song vd., 2020).

Bununla birlikte, sepiyolitın mühendislik açısından cazibesini artıran bir diğer unsur, farklı formlarda (granül, kompozit vb.) işlenebilme ve hazır ürünler hâline getirilebilme potansiyelidir. Bu özellik, malzemenin saha uygulamalarına doğrudan entegre edilmesini kolaylaştırmakta ve özellikle geçirimsiz bariyerler, reaktif dolgu malzemeleri ve kirletici tutucu sistemler gibi uygulamalarda kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Sepiyolitın çevresel uygulamalardaki en önemli avantajlarından biri, uzun dönem stabilite sağlamasıdır. Lifsi yapısı ve kimyasal kararlılığı sayesinde, adsorbe edilen kirleticilerin yeniden ortama geçişi sınırlanmakta ve bu durum uzun süreli performans açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca sepiyolitın doğal ve nispeten düşük maliyetli bir kaynak olması, geniş ölçekli uygulamalarda ekonomik açıdan uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Sepiyolit modifiye geosentetik kil örtülerin (GCL) veya sepiyolit bazlı geçirgen reaktif bariyerlerin (PRB) katman yapısı ile sızıntı suyundaki kirleticileri tutma performansı Şekil 4'te şematik olarak sunulmuştur. Klasik bentonit esaslı GCL sistemlerinde hidrolik iletkenlik ana parametre iken, matris sepiyolit liflerinin dahil edilmesi bariyer tabakasına hem yüksek tutma (adsorpsiyon) kapasitesi hem de mikroyapısal kararlılık kazandırmaktadır.



Şekil 4. Sepiyolit katkılı geosentetik kil örtü (GCL) / reaktif bariyer sisteminin 2B kesiti ve sızıntı suundaki ağır metallerin tutulmasına (adsorpsiyon/immobilizasyon) ait temel mikromekanizmalar.

Şekil 4'ten görülebileceği üzere, üst geotekstil tabakasından süzülen kirlenmiş sızıntı suyu aktif çekirdek tabakasına ulaştığında, sepiyolit yüksek spesifik yüzey alanı ve lifli/kanallı kristal morfolojisi kirletici taşınımını (özellikle Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} gibi ağır metal iyonlarını) önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Kirleticilerin sepiyolit yüzeyinde tutulması temel olarak dört ana mekanizma ile gerçekleşmektedir: (i) Oktahedral tabakadaki magnezyum iyonları ile kirletici katyonları arasındaki katyon değişimi, (ii) Yüzeydeki silanol ($Si-OH$) grupları vasıtasıyla gerçekleşen yüzey kompleksleşmesi, (iii) Mikrogözenekler ve lif kanallarında meydana gelen fiziksel adsorpsiyon ve (iv) Lokal pH değişimlerine bağlı olarak metal hidroksitlerin $M(OH)_2$ çökmesi ile sağlanan immobilizasyon.

Bu çoklu tutma mekanizmaları sayesinde sepiyolit katkılı bariyer tabakası, kirlenmiş süzüntünün alt gruptaki düşük geçirgenlikli zemin tabakasına ve nihayetinde yeraltı suyuna geçişini kritik düzeyde engellemektedir. Bentonit matrisinin sağladığı düşük hidrolik iletkenlik ile sepiyolit liflerinin sunduğu yüksek katyon değişim ve adsorpsiyon kapasitesi sinerjik bir etki yaratarak, katı atık depolama sahaları ve maden atık barajları için yüksek performanslı ve çevre dostu bir sızdırmazlık/reaktif bariyer çözümü oluşturmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, sepiyolit bazlı sistemler, çevresel kirleticilerin kontrolü ve giderimi açısından hem teknik hem de ekonomik açıdan güçlü bir alternatif sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin performansı; kirletici türü, ortam kimyası, pH koşulları ve karışım tasarımı gibi parametrelere bağlı olarak değişebileceğinden, saha uygulamalarında detaylı laboratuvar testleri ve uzun dönem performans analizleri ile desteklenmesi gerekmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu bölümde sepiyolitın geoteknik mühendisliği kapsamındaki kullanım potansiyeli, mineralojik özelliklerinden başlayarak farklı mühendislik uygulamalarındaki davranışları üzerinden bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. Elde edilen değerlendirmeler, sepiyolitın klasik tabakalı kil minerallerinden farklı olarak lifsi morfolojisi, mikro gözenekli yapısı ve yüksek özgül yüzey alanı sayesinde hem fiziksel hem de kimyasal etkileşim mekanizmalarında kendine özgü bir performans sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Bölüm kapsamında ulaşılan temel sonuçlar ve gelecek araştırmalar için öneriler şu şekilde özetlenebilir:

- Zemin İyileştirme ve Şişme Kontrolü: Sepiyolit, yüksek su tutma kapasitesi ve tabakalar arası genleşme yapmayan kristal yapısı sayesinde şişen zeminlerde hacimsel değişimleri sınırlama potansiyeline sahiptir. Ancak yüksek likit limit ve su talebi nedeniyle saf halde kullanımından ziyade kireç, çimento veya granüler malzemelerle entegre edildiği hibrit stabilizasyon tasarımlarında çok daha etkin sonuçlar vermektedir.
- Mikro-Donatı ve Matris Modifikasyonu: Beton ve çimento esaslı sistemlerde sepiyolit lifleri, matris içerisinde mikro-çatlak köprüleme mekanizması oluşturarak sünekliği ve yarmada çekme dayanımını artırmaktadır. Aynı zamanda Ara Yüzey Geçiş Bölgesini (ITZ) sıkılaştırarak mikroyapısal kompozit kalitesini geliştirmektedir.
- Çevresel Bariyer Sistemleri: Yüksek adsorpsiyon ve katyon değişim kapasitesi, sepiyoliti katı atık sahaları ve reaktif bariyerlerde (GCL/PRB) ağır metal ve kirletici tutulumu için sürdürülebilir ve ekonomik bir alternatif haline getirmektedir.
- Standartlaştırma İhtiyacı: Sepiyolitın jeolojik kökenine (yatak bazlı safsızlıklar, Mg/Si oranı ve lif boyutları) bağlı performans değişkenliği göz önüne alınarak, mühendislik uygulamalarından önce standart bir karakterizasyon protokolünün uygulanması kritik önem taşımaktadır.
- Gelecek Araştırma İhtiyaçları: Mevcut literatür büyük ölçüde statik laboratuvar deneyleri ile sınırlıdır. Gelecek çalışmaların; sepiyolit katkılı zeminlerin dinamik ve sismik davranışlarına (sıvılaşma potansiyeli, sönüm oranı, kayma modülü), organosilan esaslı yüzey modifikasyonlarının zemin-lif arayüz bağlarına etkisine ve uzun dönemli saha/arazi uygulamalarına odaklanması mineralin geoteknik pratikteki güvenilir kullanımını yaygınlaştıracaktır.

5. KAYNAKLAR

- Abbaslou, H., Martin Peinado, F. J., Ghanizadeh, A. R., & Shahrashoub, M. (2024). Properties of sepiolite clay soil as a natural material (Iran's sources clay). *Geomechanics and Geoengineering*, 19(3), 335–346. <https://doi.org/10.1080/17486025.2023.2258833>
- Al-Gharbawi, A. S. A., Najemalden, A. M., & Fattah, M. Y. (2023). Expansive Soil Stabilization with Lime, Cement, and Silica Fume. *Applied Sciences*, 13(1), 436. <https://doi.org/10.3390/app13010436>
- Ardakani, S. B., & Rajabi, A. (2021). Laboratory investigation of clayey soils improvement using sepiolite as an additive; Engineering performances and micro-scale analysis. *Engineering Geology*, 293, 106308. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106328>
- Bouza, P.J., Simón, M., Aguilar J., Del Valle, H., Rostagno, M. (2007). Fibrous-clay mineral formation and soil evolution in Aridisols of northeastern Patagonia, Argentina, *Geoderma*, 139, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.001>
- Brauner, K., Preisinger, A. (1956). Struktur und Entstehung des Sepioliths. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 6, 120–140. <https://doi.org/10.1007/BF01128033>
- Chen, X., Tan, Y., Chen, J., Peng, D., Huang, T., & Meng, C. (2024). Hydraulic conductivity and multi-scale pore structure of polymer-enhanced geosynthetic clay liners permeated with bauxite liquors. *Geotextiles and Geomembranes*, 52(1), 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.09.004>
- Di Emidio G, Mazziere F, Verastegui-Flores R, Van Impe W, Bezuijen A (2015), Polymer-treated bentonite clay for chemical-resistant geosynthetic clay liners. *Geosynthetics International*, Vol. 22 No. 1 pp. 125–137, doi: <https://doi.org/10.1680/gein.14.00036>
- Frost, R. L., & Ding, Z. (2003). Controlled rate thermal analysis and differential scanning calorimetry of sepiolites and palygorskites. *Thermochimica Acta*, 397(1–2), 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00228-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00228-9)
- Galán E (1996) Properties and applications of Palygorskite-Sepiolite clays. *Clay Minerals* 31(4): 443–453.
- García-Romero, E. ve Suárez, M. (2010). On the Chemical Composition of Sepiolite and Palygorskite. *Clays and Clay Minerals*, 58 (1): 1-20. doi:10.1346/CCMN.2010.0580101
- García-Romero, E., & Suárez, M. (2013). Sepiolite–palygorskite: Textural study and genetic considerations. *Applied Clay Science*, 86, 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.09.013>
- Güney, Y., & Özdemir, H. V. (2005). The Utilization of Sepiolite in Landfill Liners. *Environmental Technology*, 26(5), 561–570. <https://doi.org/10.1080/09593332608618538>

- Güney, Y., Cetin, B., Aydilek, A., Tanyu, B., & Koparal, S. (2013). Utilization of sepiolite materials as a bottom liner material in solid waste landfills. *Waste Management*, 34, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.008>
- Kavas, T., Sabah, E., & Çelik, M. (2004). Structural properties of sepiolite-reinforced cement composite. *Cement and Concrete Research*, 34 (11), 2135-2139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.015>
- Koltka, S., Uygunoglu, T., Sabah, E., Can, M. F. (2017). The use of natural sepiolite fiber in concrete, *Mater. Tehnol.* 51, 65–74. doi:10.17222/mit.2015.210
- Mármol, G., Savastano, H., De la Fuente, E., Miranda, R., Blanco, Á., & Negro, C. (2019). Effect of sepiolite addition on fibre-cement based on MgO-SiO₂ systems. *Cement and Concrete Research*, 124, 105816. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105816>
- Ockwig, N. W., Greathouse, J. A., Durkin, J. S., Cygan, R. T., Daemen, L. L., & Nenoff, T. M. (2009). Nanoconfined Water in Magnesium-Rich 2:1 Phyllosilicates. *Journal of the American Chemical Society*, 131, 8155–8162.
- Pozo, M., & Calvo, J. P. (2018). An Overview of Authigenic Magnesian Clays. *Minerals*, 8(11), 520. <https://doi.org/10.3390/min8110520>
- Ruiz-Hitzky, E. (2001). Molecular access to intracrystalline tunnels of sepiolite. *J. Mater. Chem.*; 11 (1): 86–91. <https://doi.org/10.1039/b003197f>
- Sabah, E., & Çelik, M. S. (2002). Adsorption mechanism of quaternary amines by sepiolite. *Separation Science and Technology*, 37(13), 3081–3097. <https://doi.org/10.1081/SS-120005658>
- Sakr, M., Nazir, A., Azzam, W., & Eleraky, H. (2025). Sustainable Talcum Powder: A Developing Solution for Reduction the Swelling Potential of Expansive Soil. *Geosciences*, 15(9), 352. <https://doi.org/10.3390/geosciences15090352>
- Suárez, M. ve García-Romero, E. (2011). Advances in the Crystal Chemistry of Sepiolite and Palygorskite. *Developments in Clay Science*, Cilt 3, Bölüm 2, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53607-5.00002-5>
- Song, N., Hursthouse, A., McLellan, I. et al. (2021). Treatment of environmental contamination using sepiolite: current approaches and future potential. *Environ Geochem Health*, 43, 2679–2697. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00705-0>
- Wang, H., Jiang, L., Zhang, C., Wang, K., Li, Y., Pu, H., & Zhao, Q. (2022). Ca-bentonite/polymer nanocomposite geosynthetic clay liners for effective containment of hazardous landfill leachate, *Journal of Cleaner Production*, 365, 132825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132825>.
- Wu, C., & Kou, S. (2019). Effects of high-calcium sepiolite on the rheological behaviour and mechanical strength of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 196, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.130>

BÖLÜM 4

**Çocukların ve Gençlerin İklim Eyleminde
Güçlendirilmesi: Su Bilinci, Türkiye
Uygulamaları ve COP31 Perspektifi**

Hüseyin Yıldırım Dalkılıç¹

¹ Prof. Dr. : Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, ORCID: 0000-0002-4405-9341

1. Giriş

İklim değişikliği, çocukların ve gençlerin geleceğine ilişkin soyut bir çevre sorunu olmaktan çıkmış; suya erişim, sağlık, eğitim, gıda güvenliği, afet riski ve toplumsal eşitsizlikler üzerinden bugünkü yaşamlarını etkileyen çok boyutlu bir sorun hâline gelmiştir. Yağış rejimlerindeki düzensizlik, uzayan kurak dönemler, kısa sürede oluşan şiddetli yağışlar, taşkınlar, orman yangınları ve su kalitesindeki bozulma, iklim krizinin su aracılığıyla hissedilen başlıca sonuçlarıdır. Bu etkiler karşısında çocukları yalnızca korunması gereken kırılgan bir grup olarak görmek yeterli değildir. Çocuklar ve gençler aynı zamanda öğrenebilen, çevrelerindeki davranışları etkileyebilen, yerel gözlem yapabilen ve karar süreçlerine anlamlı biçimde katılabilen aktörlerdir. Bu bölümün temel savı, iklim ve su bilincinin basit tasarruf öğütleriyle sınırlandırılmayacağıdır. Etkili bir su bilinci; su döngüsünü ve havza kavramını anlamayı, suyun enerji ve gıdalla bağlantısını kurmayı, kuraklık ile taşkınların aynı iklim sisteminin farklı yüzleri olabileceğini görmeyi ve bireysel davranışlarla kurumsal sorumlulukları birlikte değerlendirmeyi gerektirir. Dolayısıyla eğitim, yalnızca ‘musluğu kapatma’ davranışını değil; ölçme, sorgulama, yerel sorunları tanımlama, çözüm tasarlama ve demokratik katılım yeterliklerini geliştirmelidir.

Türkiye’nin 9–20 Kasım 2026 tarihlerinde Antalya’da düzenlenecek Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı COP31’e ev sahipliği yapması bu tartışmaya özel bir güncellik kazandırmaktadır (UNFCCC, 2026). COP31 henüz sonuçlanmadığından, bu bölüm konferansın gelecekte alacağı kararları olmuş gibi sunmamakta; mevcut ulusal ve uluslararası çerçeveleri inceleyerek Türkiye’nin COP31 başkanlığı döneminde çocuk ve gençlik odaklı iklim-su gündemini nasıl güçlendirebileceğine ilişkin öneriler geliştirmektedir.

Bu amaçla .alışmada önce iklim-su-çocuk ilişkisi açıklanmakta, ardından küresel yaklaşımlar ve Türkiye’de Tarım ve Orman Bakanlığı öncülüğünde yürütülen çalışmalar değerlendirilmekte, son olarak COP31’e taşınabilecek somut bir eylem çerçevesi önerilmektedir.

2. İklim Değişikliği, Su Güvenliği ve Genç Kuşaklar

Su, iklim değişikliğinin etkilerinin toplum tarafından en doğrudan algılandığı ortamdır. Isınan atmosfer su döngüsünü hızlandırırken yağışın zamanı, şiddeti ve mekânsal dağılımı değişebilmekte; bazı bölgelerde kuraklık şiddetlenirken başka bölgelerde aşırı yağış ve taşkın riski artabilmektedir. Hatta aynı havza farklı mevsimlerde hem su kıtlığı hem taşkın yaşayabilir. Bu nedenle iklim eğitiminde kuraklık ve taşkın birbirinden kopuk afetler olarak değil, değişen hidrolojik rejimin birbiriyle ilişkili sonuçları olarak ele alınmalıdır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, su güvenliği üzerindeki risklerin sıcaklık artışıyla birlikte yükseldiğini ve kırılgan grupların bu risklerden orantısız etkilendiğini vurgulamaktadır (IPCC, 2022).

Çocuklar su kaynaklı iklim etkilerine yetişkinlerden farklı biçimlerde maruz kalabilir. Güvenli içme suyuna erişimin bozulması, su ve sanitasyon hizmetlerinin kesintiye uğraması, sıcak hava dalgaları, su kaynaklı hastalıklar, tarımsal üretimdeki kayıplar ve afetler nedeniyle eğitime ara verilmesi çocukların sağlık ve gelişim haklarını etkiler. UNICEF'in Çocukların İklim Riski Endeksi yaklaşımı, iklim tehlikelerine maruz kalmayı su, sanitasyon, sağlık, eğitim ve sosyal koruma sistemlerinin kırılganlığıyla birlikte değerlendirmektedir (UNICEF, 2021). Bu bakış, su bilincinin yalnızca doğal kaynak yönetimi konusu değil, aynı zamanda çocuk hakları ve iklim adaleti konusu olduğunu göstermektedir.

Türkiye, Akdeniz iklim kuşağında yer alması nedeniyle artan sıcaklıklar, kuraklık, orman yangınları, şiddetli yağışlar ve taşkınlar bakımından hassas bir konumdadır. Nüfusun, tarımsal üretimin, turizmin ve sanayinin su talebiyle iklim kaynaklı belirsizlikler birlikte düşünüldüğünde, suyun verimli kullanılması stratejik bir zorunluluk hâline gelmektedir. Ancak verimlilik, her durumda daha az su kullanmakla eş anlamlı değildir. Esas amaç aynı hizmeti, üretimi veya toplumsal faydayı daha düşük su kaybı ve daha az çevresel baskıyla sağlamaktır. Çocukların bu ayrımı erken yaşta öğrenmesi, tasarrufu suçluluk üreten bireysel bir görev olmaktan çıkarıp adil ve sistemik bir sorumluluk olarak kavramalarına yardımcı olur.

İklim değişikliğinin fiziksel temeli, sıcaklık artışıyla birlikte su döngüsünün ve aşırı olayların özelliklerinin değişebileceğini ortaya koymaktadır (IPCC, 2021; Dalkılıç et al., 2021; Öziş et al. 2002). Nehir akımları, kar birikimi ve erimesi, rezervuarlara gelen su, buharlaşma ve sediment taşınımındaki değişimler; içme suyu, sulama, enerji ve taşkın kontrolü hizmetlerini aynı anda etkileyebilir. İsveç akımları üzerine yapılan modelleme (Bergström et al., 2001) ile iklim değişenliği altında akarsu eğilimlerini inceleyen çalışmalar (Hu et al., 2011; Erkol et al., 2024), hidrolojik etkinin bölgesel olduğunu ve tek bir küresel genellemenin yerel planlama için yeterli olmayacağını göstermektedir. Bu bilimsel gerçek, gençlere iklim değişikliğini kendi havzasının verileriyle okuma becerisi kazandırılmasını gerekli kılar.

Baraj ve rezervuarlar bu sistemde hem iklim etkilerine maruz kalan hem de uyuma katkı sağlayabilen yapılardır. Koç (2026), tarihsel iklim koşullarının gelecekte değişmeden süreceği varsayımının baraj planlaması ve işletmesi için artık yeterli olmadığını; belirsizlik, havza ölçeği, ekosistem gereksinimleri ve paydaş katılımının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu da iklim değişikliği, barajlar ve su kaynakları arasındaki ilişkinin risk temelli ve bütüncül ele alınmasını önermektedir (ICOLD, 2016; Öziş et al. 2004). Bu çerçeve, gençlerin barajları yalnızca elektrik üreten veya su depolayan yapılar olarak değil; güvenlik, ekoloji,

enerji, tarım ve toplumsal kararların kesişim noktası olarak incelemesine imkân verir.

3. Su Bilincinden Su Okuryazarlığına

Su bilinci, suyun değerli olduğunu bilme ve israftan kaçınma yönünde olumlu tutum geliştirme olarak tanımlanabilir. Su okuryazarlığı ise bunun ötesine geçer, bireyin suyun nereden geldiğini, nasıl arıtıldığını, hangi sektörlerde kullanıldığını, kirleticilerin havza boyunca nasıl taşındığını, iklim değişikliğinin arz ve talebi nasıl etkilediğini anlayabilmesi; güvenilir bilgiyi değerlendirebilmesi ve çözüm süreçlerine katılabilesidir. Bu nedenle bilişsel bilgi, duyuşsal bağlılık, uygulama becerisi ve yurttaşlık katılımı birlikte ele alınmalıdır.

Davranış değişikliği yalnızca bilgi aktarımıyla oluşmaz. Öğrenci su kıtlığının önemini bildiği hâlde okulunda kaçakları bildirecek bir mekanizma yoksa veya ölçüm sonuçlarını göremiyorsa bilgi eyleme dönüşmeyebilir. Çevre eğitimi araştırmaları; yerel, deneyimsel, sorun çözmeye dayalı ve öğrencinin öz yeterliğini güçlendiren uygulamaların daha etkili olduğunu göstermektedir (Ardoin, Bowers, Roth, & Holthuis, 2018; Monroe, Plate, Oxarart, Bowers, & Chaves, 2019). Çocukların aileleriyle kurdukları iletişim de önemlidir. İklim eğitiminin öğrenciler aracılığıyla ebeveynlerin iklim kaygısı ve tutumlarını etkileyebildiğine ilişkin bulgular, çocukların toplumsal dönüşümdeki çarpan etkisine işaret etmektedir (Lawson et al., 2019).

Yaşa uygunluk bu sürecin temel koşuludur. Okul öncesi ve ilköğretim düzeyinde suyun canlılıkla ilişkisi, yağmur gözlemi, duyuşsal etkinlikler ve günlük davranışlar öne çıkarılabilir. Ortaokul düzeyinde su döngüsü, havza, kirlilik, su ayak izi ve basit ölçümler kullanılabilir. Lise ve üniversite gençliği için iklim senaryoları, su tahsisi, tarım-su ilişkisi, afet risk azaltımı, veri analizi, etik ikilemler ve politika müzakereleri ele alınabilir. Her düzeyde korku ve felaket anlatısı yerine, riskin ciddiyetini saklamayan fakat öğrencinin çözüm kapasitesini de görünür kılan dengeli bir dil kullanılmalıdır.

4. Dünyada İklim Eğitimi ve Gençlik Katılımı

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamındaki İklim Güçlendirme Eylemi (Action for Climate Empowerment–ACE), iklim eğitimi ile katılım arasında doğrudan bağ kuran temel uluslararası çerçevedir. ACE; eğitim, öğretim, kamuoyu farkındalığı, halkın katılımı, bilgiye erişim ve uluslararası iş birliği olmak üzere altı unsurdan oluşur (UNFCCC, 2024). Bu yapı, çocuk ve gençlerin yalnızca iklim hakkında bilgi edinmesini değil, bilgiye erişmesini, görüş bildirmesini ve iklim eylemine katılmasını amaçlar. Glasgow Çalışma Programı ve ilgili eylem planı, ACE’nin ulusal düzeyde uygulanması için politika tutarlılığı, paydaş katılımı ve izleme gereksinimini güçlendirmiştir.

UNESCO'nun İklim Eğitimi ve Yeşil Eğitim Ortaklığı çalışmaları, eğitim sistemlerinin bütüncül dönüşümüne odaklanmaktadır. Bu yaklaşımda müfredatın yeşillendirilmesi tek başına yeterli görülmez; okul altyapısı, öğretmen eğitimi, topluluk ilişkileri ve eğitim sisteminin yönetimi birlikte ele alınır (UNESCO, 2021, 2024). Böylece okul binası da bir öğrenme ortamına dönüşür. Yağmur suyu hasadı, düşük debili armatürler, okul bahçesinde kurakçıl peyzaj, tüketim panoları ve öğrenci su ekipleri, derslerde öğrenilen bilginin günlük okul yaşamıyla birleşmesini sağlar.

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları da bu bağlantıyı destekler. Nitelikli eğitim (SKA 4), temiz su ve sanitasyon (SKA 6), sorumlu üretim ve tüketim (SKA 12) ve iklim eylemi (SKA 13) birbirinden bağımsız hedefler değildir. Özellikle SKA 4.7, sürdürülebilir kalkınma için gerekli bilgi ve becerilerin eğitim yoluyla geliştirilmesini öngörür (United Nations, 2015). Su eğitimi bu hedefler arasında somut bir köprü kurabilir: bir okulun su kullanımını ölçen öğrenci hem matematik ve fen becerilerini kullanır hem tüketim davranışını sorgular hem de yerel iklim uyumuna katkı sağlar.

Dünya uygulamalarından çıkarılabilecek ortak ders, tek seferlik farkındalık günlerinin sınırlı etkisidir. Kalıcı sonuç için programların müfredata bağlanması, öğretmenlerin desteklenmesi, yerel su idareleri ve üniversitelerle ortaklık kurulması ve öğrencilerin ürettiği verilerin karar süreçlerinde karşılık bulması gerekir. Gençlik iklim konseyleri, vatandaş bilimi projeleri, akarsu ve kıyı gözlemleri, okul su denetimleri ve genç delegelik mekanizmaları bu yaklaşımın araçlarıdır. Katılımın sembolik olmaması için gençlerin hangi konuda görüş sunduğu, önerilerinin kim tarafından değerlendirildiği ve hangi kararların değiştiği şeffaf biçimde açıklanmalıdır.

5. Türkiye’de Su Verimliliği Politikaları ve Eğitim Çalışmaları

Türkiye’de su bilincini ulusal ölçekte görünür kılan başlıca girişimlerden biri, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü koordinasyonunda başlatılan Su Verimliliği Seferberliği’dir. Seferberlik; bireysel, kentsel, tarımsal ve endüstriyel su verimliliğini birlikte ele almakta, su ayak izi, iyi uygulamalar, rehberler, eğitim materyalleri ve kamuoyu çalışmaları üzerinden çok paydaşlı bir yaklaşım geliştirmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023a). Bu kapsamın önemli tarafı, su sorumluluğunu yalnızca hanelere yüklemeyip belediyeler, tarım, sanayi, turizm ve kamu kurumlarıyla paylaşmasıdır.

Politika düzeyindeki ana dayanak, Değişen İklimle Uyum Çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2023–2033’tür. Belge, su verimliliğini bütün sektörler için bir yol haritası olarak tanımlamakta; kentsel, tarımsal ve endüstriyel kullanımın yanında bireysel farkındalık ve kurumsal kapasiteyi de kapsamaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2023b). Su verimli kentler, belediyeler arasında deneyim paylaşımı, kurakçıl peyzaj, kayıp-kaçakların azaltılması ve sulama verimliliğinin geliştirilmesi gibi uygulamalar,

çocukların günlük yaşamlarında gözlemleyebileceği somut politika alanları sunar.

Tarım, Türkiye’de su politikası ile iklim uyumunun kesiştiği en önemli alanlardan biridir. Eğitimlerde tarımsal su kullanımı yalnızca ‘çok su tüketimi’ ifadesiyle ele alınmamalıdır. Ürün deseni, iklim ve toprak koşulları, sulama zamanı, iletim ve uygulama kayıpları, çiftçinin ekonomik koşulları ve gıda güvenliği birlikte değerlendirilmelidir. Güney Asya havzalarında gıda üretimi ve su kaynakları üzerine yapılan modelleme, iklim etkileri karşısında arz-talep dengesinin üretim ve uyum seçenekleriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir (Biemans, Speelman, Ludwig, & Kabat, 2013). Damla ve yağmurlama gibi basınçlı sistemler uygun koşullarda önemli kazanımlar sağlayabilir; ancak teknoloji tek başına havza ölçeğinde tasarrufu garanti etmez. Çekilen toplam suyun, geri dönüş akımlarının, enerji kullanımının ve üretim desenindeki değişimin de izlenmesi gerekir. Entegre havza yönetiminde sulama yönetiminin rolü de tahsis, kurumlar ve kullanıcı katılımıyla birlikte değerlendirilmelidir (Koç, 2015). Gençlere bu bütüncül bakışın kazandırılması, ‘tek araç–tek çözüm’ yanılığını önler.

Millî Eğitim Bakanlığı ile Tarım ve Orman Bakanlığı arasında yürütülen öğrenci yarışmaları, eğitim setleri ve farkındalık etkinlikleri, su verimliliğinin okul çağındaki nüfusa ulaşması bakımından değerlidir. Su Verimliliği Seferberliği kapsamında öğrenci eserlerinin bir katalogta bir araya getirilmesi, çocukların ürettiği mesajların görünürlüğünü artıran güncel örneklerden biridir (Millî Eğitim Bakanlığı, 2026). Yarışmalar çocukların resim, afiş, slogan, kompozisyon veya proje yoluyla konuya duygusal ve yaratıcı bağ kurmasını sağlar. Bununla birlikte bu etkinin kalıcı olması için çalışmaların ders kazanımlarıyla, okulun gerçek tüketim verileriyle ve yerel havza deneyimiyle desteklenmesi gerekir. Bir öğrencinin yalnızca suyu korumaya ilişkin afiş hazırlaması yerine, okulunun aylık tüketimini analiz etmesi, kaçakları belirlemesi, çözüm önermesi ve uygulama sonrasındaki değişimi izlemesi daha derin bir öğrenme sağlar.

Mevcut Türkiye uygulamalarının güçlü tarafları; ulusal sahiplik, sektörler arası kapsam, kamuoyunda görünürlük ve eğitim materyali üretimidir. Geliştirilmesi gereken alanlar ise programların etkisini ölçen ortak göstergeler, yaş gruplarına göre süreklilik gösteren bir öğrenme çerçevesi, öğretmen desteği ve gençlerin karar süreçlerine kurumsal katılımıdır. Kaç öğrenciye ulaşıldığı önemli olmakla birlikte tek başına yeterli bir başarı göstergesi değildir. Bilgi düzeyindeki değişim, öğrenci öz yeterliği, okulun ölçülen su tüketimi, öğrenci önerilerinin uygulanma oranı ve programların farklı sosyoekonomik gruplara erişimi birlikte değerlendirilmelidir.

6. COP31 Perspektifinde Türkiye İçin Fırsatlar

COP31'in Antalya'da düzenlenecek olması, Türkiye'ye yalnızca büyük bir uluslararası toplantıya ev sahipliği yapma değil, iklim eğitimi ve su konusunda kalıcı bir ulusal miras oluşturma fırsatı vermektedir. Türkiye dönem başkanlığını ve ev sahipliğini üstlenirken, Avustralya'nın müzakere sürecindeki özel rolü ve Pasifik ülkelerinin iklim kırılganlığına ilişkin beklentileri konferansın kendine özgü yönlerinden biridir. Su kıtlığı yaşayan Akdeniz havzası ile deniz seviyesi yükselmesi ve aşırı olaylarla karşı karşıya bulunan Pasifik toplulukları arasında gençlik merkezli bir öğrenme ve dayanışma hattı kurulabilir.

Bununla birlikte COP31'in kesin gündemi ve karar metinleri müzakere sürecinde şekillenecektir. Bu nedenle bugün için akademik olarak doğru yaklaşım, COP31'in çocuk ve su konusunda belirli bir karar alacağını ileri sürmek değil; Türkiye'nin bu temaları görünür kılmak için kullanabileceği politika araçlarını tartışmaktır. ACE'nin altı unsuru, Paris Anlaşması'nın uyum gündemi, ülkelerin ulusal katkı beyanları ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri bu öneriler için meşru bir zemin sağlar.

COP31 hazırlık sürecinde bir 'Çocuk ve Gençlik İklim-Su Diyalogu' oluşturulabilir. Diyalog; farklı bölgelerden öğrencileri, genç çiftçileri, öğretmenleri, belediye temsilcilerini, su idarelerini, üniversiteleri ve sivil toplumu bir araya getirmelidir. Katılım sadece büyükşehirlerde ve yabancı dil bilen gençlerle sınırlanmamalı; kırsal bölgeler, afetten etkilenmiş topluluklar, engelli gençler ve su hizmetlerine erişimde güçlük yaşayan gruplar için erişilebilir yöntemler geliştirilmelidir. Bölgesel toplantılarda üretilen öneriler ulusal bir gençlik su bildirisine dönüştürülerek COP31'de sunulabilir.

Konferansın kalıcı etkisi için etkinlik sayısından çok kurumsal devamlılık önemlidir. COP31 sonrasında kapanacak geçici bir gençlik platformu yerine, Ulusal Su Kurulu ve ilgili iklim yönetişimi mekanizmalarıyla bağlantılı danışma yapısı kurulabilir. Gençlerin temsil biçimi, seçim yöntemi, görev süresi, geri bildirim hakkı ve önerilerin izlenmesi açıkça tanımlanmalıdır. Böyle bir yapı, gençlik katılımını törensel konuşmalardan ölçülebilir politika katkısına taşır.

7. Çocuk ve Gençlik Odaklı İklim ve Su Eylem Çerçevesi

Türkiye için önerilen çerçeve beş aşamalı bir öğrenme ve katılım döngüsüne dayanır: öğrenme, gözlemlleme, uygulama, katılma ve değerlendirme. Bu döngü, okullarda yürütülecek faaliyetleri ulusal politika hedefleriyle ilişkilendirir. Amaç tüm okullara aynı etkinliği dayatmak değil; ortak yeterlikler ve göstergeler altında yerel iklim, havza ve okul koşullarına uyarlanabilen bir model oluşturmaktır.

Tablo 1. Çocuk ve Gençlik Odaklı İklim ve Su Eylem Çerçevesi

Aşama	Amaç	Örnek araç	Temel gösterge
Öğren	İklim-su ilişkisini, havzayı, su ayak izini ve adalet boyutunu kavrama	Yaşa uygun ders modülü; öğretmen eğitimi	Bilgi ve kavram yanılışı ölçümü
Gözlemle	Yerel suyu ve kurum tüketimini veriyle tanıma	Sayaç okuma; yağış günlüğü; dere gözlemi	Düzenli ve doğrulanmış öğrenci verisi
Uygula	Belirlenen soruna çözüm geliştirip deneme	Kaçak bildirimi; kurakçıl bahçe; yağmur suyu uygulaması	Su tüketimindeki veya riskteki ölçülen değişim
Katıl	Görüşü okul ve yerel karar süreçlerine taşıma	Öğrenci su kurulu; belediye ve havza buluşması	Değerlendirilen ve yanıtlanan öneri oranı
Değerlendir	Bilgi, davranış, eşitlik ve çevresel sonucu izleme	Başlangıç-son ölçümü; açık okul su panosu	Yıllık ilerleme ve kapsayıcılık raporu

Kaynak: Yazar tarafından UNFCCC ACE ve Türkiye Su Verimliliği Seferberliği çerçevelerinden yararlanılarak geliştirilmiştir.

7.1. Öğrenme ve Öğretmen Kapasitesi

Çerçevenin ilk koşulu öğretmen kapasitesidir. Su konusu yalnızca fen bilimleri öğretmenin sorumluluğunda bırakılmamalıdır. Matematik dersinde tüketim verisi analiz edilebilir; coğrafyada havza ve iklim ele alınabilir; sosyal bilimlerde su hakkı ve yönetim tartışılabilir; Türkçe ve sanat derslerinde iletişim ürünleri geliştirilebilir. Öğretmenlere bilimsel olarak güncel, pedagojik olarak yaşa uygun ve yerel veriye erişimi kolaylaştıran açık materyaller sunulmalıdır. Kaygıyı artırmadan risk iletişimi kurma ve yanlış bilgiyle mücadele de eğitimin parçası olmalıdır.

7.2. Okulun Bir Yaşayan Laboratuvara Dönüştürülmesi

Her okul yılda en az bir kez su denetimi yapabilir. Denetim; sayaçların ve armatürlerin kontrolü, aylık tüketimin öğrenci ve personel sayısına göre değerlendirilmesi, sulama uygulamaları, temizlik süreçleri ve yağmur suyunun yönetimini kapsayabilir. Sonuçlar kişisel verileri veya güvenlik bilgilerini açığa çıkarmadan okul panosunda paylaşılmalıdır. Öğrenciler sorunu belirleyip müdahale önerisi oluşturmali, okul yönetimi uygulanabilir önerilere gerekçeli yanıt vermeli ve sonuçlar yeniden ölçülmelidir. Böylece su okuryazarlığı soyut bir kavram olmaktan çıkar.

Yağmur suyu hasadı ve gri su gibi uygulamalar, mühendislik ve halk sağlığı ilkelerine uygun olarak uzman gözetiminde tasarlanmalıdır. Öğrencilerin hazırladığı her öneri doğrudan uygulanmamalı; su kalitesi, mevzuat, bakım, maliyet ve güvenlik ölçütleri değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım öğrencilere yeniliğin yalnızca fikir üretmek değil, kısıtları ve olası yan etkileri yönetmek olduğunu öğretir.

7.3. Yerel Havza ve Tarımla Bağ Kurulması

Su eğitiminin idari sınırlar yerine havza ölçeğiyle ilişkilendirilmesi önemlidir. Öğrenci yaşadığı yerin içme suyunun hangi kaynaktan geldiğini, atıksuyun nereye gittiğini, yakınındaki akarsu veya gölün hangi baskılarla karşılaştığını bilmelidir. Belediyeler, Devlet Su İşleri birimleri, tarım teşkilatı, üniversiteler ve su kullanıcı örgütleri okul programlarına veri ve uzmanlık sağlayabilir. Kırsal okullarda sulama takvimi, toprak nemi ve ürün deseni; kent okullarında kayıp-kaçak, geçirimsiz yüzeyler, yağmur suyu ve su talebi öne çıkabilir.

Tarım ve gıda boyutunda su ayak izi kavramı dikkatli kullanılmalıdır. Tek bir ürün için küresel ortalama değerleri ezberletmek yerine üretim yeri, yağış, sulama yöntemi, verim ve tedarik zinciri arasındaki farklar açıklanmalıdır. Amaç gıdayı veya çiftiçi suçlamak değil, üretim ve tüketim kararlarının suyla ilişkisini kanıta dayalı biçimde tartışmaktır. Okul yemeklerindeki gıda kaybının azaltılması da hem su hem enerji hem emisyon açısından ölçülebilir bir öğrenci projesine dönüşebilir.

Havza temelli etkinliklerde depolama ve su tahsisi tartışmaları da kullanılabilir. İklim değişikliği koşullarında yüzey suyu arzının uyarlanmasına ilişkin araştırmalar, fiziksel altyapı ile talep yönetimi ve kurumsal kararların birlikte değerlendirilmesini gerekli görmektedir (Gohari, Bozorgi, Madani, Elledge, & Berndtsson, 2014). Tarımsal rezervuarlarda gelecekteki iklim etkilerinin incelenmesi ise yağış, akım, sulama talebi ve işletme kurallarının birbirine bağlı olduğunu göstermektedir (Lee & Shin, 2021). Öğrenciler bu ilişkileri basitleştirilmiş rol oyunlarıyla deneyebilir; çiftçi, kent sakini, ekosistem temsilcisi ve işletmeci rollerinde sınırlı suyu nasıl paylaşacaklarını tartışabilir.

7.4. Dijital Araçlar, Vatandaş Bilimi ve Etik

Dijital sayaçlar, düşük maliyetli sensörler, mobil uygulamalar, uydu görüntüleri ve açık veriler gençlerin su süreçlerini izlemesini kolaylaştırabilir. Ancak teknoloji eğitimin amacı değil aracıdır. Verinin doğruluğu, cihaz kalibrasyonu, eksik gözlemler, mahremiyet, dijital eşitsizlik ve yanlış yorumlama riskleri öğrencilere açıklanmalıdır. Öğrencilerin topladığı çevresel veriler profesyonel izleme ağlarının yerine geçmez; yerel farkındalığı ve bilimsel düşünmeyi destekleyen tamamlayıcı veri olarak değerlendirilmelidir.

Sosyal medya kampanyaları geniş kitlelere ulaşsa da etkileşim sayısı davranış değişikliğinin kanıtı değildir. Görüntülenme ve beğeni sayılarının yanında katılımcıların bilgi kazanımı, gerçekleştirdiği uygulamalar ve ölçülen su kazanımı izlenmelidir. Yanlış veya bağlamından kopuk su ayak izi verilerinin yayılmasını önlemek için içerikler uzman kontrolünden geçirilmeli, kaynaklar açıkça belirtilmelidir.

7.5. İzleme, Değerlendirme ve Eşitlik

Programların etkisi dört düzeyde izlenebilir: öğrenme, davranış, kurumsal uygulama ve çevresel sonuç. Kısa sınavlar bilgi değişimini; gözlem ve öz değerlendirme davranışı; okul karar kayıtları kurumsal karşılığı; sayaç verileri ise gerçek tüketim değişimini gösterebilir. Mevsim, okul nüfusu, bina kullanımı ve iklim koşulları dikkate alınmadan yalnızca toplam tüketimdeki düşüşü başarı saymak yanıltıcıdır. Bu nedenle kişi başına kullanım, faaliyet düzeyi ve başlangıç koşulları gibi karşılaştırılabilir göstergeler kullanılmalıdır.

Eşitlik göstergeleri de sonuç sistemine dâhil edilmelidir. Kırsal-kentsel farklılıklar, gelir düzeyi, cinsiyet, engellilik ve afet deneyimi öğrencilerin programa erişimini ve su sorununu algılayışını etkileyebilir. Güvenli suya düzenli erişemeyen bir çocuğa yalnızca tasarruf mesajı vermek etik açıdan sorunludur. Program, farklı deneyimleri görünür kılmalı ve hizmet sağlayıcıların sorumluluğunu bireysel davranışlarla dengelemelidir.

8. COP31 İçin Politika Önerileri

Birinci olarak, iklim ve su okuryazarlığı için okul öncesinden yükseköğretime uzanan yaşa göre kademelendirilmiş ulusal yeterlik çerçevesi hazırlanmalıdır. İkinci olarak, Su Verimliliği Seferberliği kapsamındaki eğitim ve yarışmalar okul su denetimi, yerel havza gözlemi ve öğretmen eğitimiyle bütünleştirilmelidir. Üçüncü olarak, her ilde üniversite, yerel yönetim, su idaresi ve millî eğitim birimlerinin katıldığı bölgesel destek ağı kurulmalıdır. Dördüncü olarak, programların başarısı erişilen kişi sayısı ile değil öğrenme, katılım ve ölçülen çevresel sonuç göstergeleriyle değerlendirilmelidir.

Beşinci olarak, COP31 hazırlıkları kapsamında Türkiye Çocuk ve Gençlik İklim-Su Diyalogu başlatılmalı; bölgesel görüşmelerin sonuçları ulusal bir taahhüt metnine dönüştürülmelidir. Altıncı olarak, COP31 sonrasında da çalışacak bir gençlik danışma mekanizması oluşturulmalı ve yıllık ilerleme raporları kamuya açıklanmalıdır. Yedinci olarak, Akdeniz ve Pasifik gençleri arasında su güvenliği, kıyı riskleri ve iklim uyumu temalı okul ve üniversite ortaklıkları geliştirilmelidir. Sekizinci olarak, güvenilir açık veri setleri ve öğretmen rehberleriyle desteklenen ulusal vatandaş bilimi programı kurulmalıdır. Koç'un (2025b) su hizmetlerinde iklim uyumuna ilişkin değerlendirmesi, uyumun yalnızca yeni altyapı değil; işletme, yönetim ve hizmet sürekliliği kapasitesi gerektirdiğini hatırlatmaktadır.

Bu önerilerin finansmanı yalnızca kısa süreli proje çağrılarına bırakılmamalıdır. Okul altyapısındaki su verimliliği yatırımları, öğretmen mesleki gelişimi ve izleme sistemi için düzenli bütçe ayrılmalıdır. Özel sektör katkıları şeffaflık ve çıkar çatışması kuralları altında yürütülmeli; su yoğun

faaliyet gösteren kurumların eğitim alanındaki görünürlüğü, gerçek performans ve doğrulanabilir taahhütlerle ilişkilendirilmelidir.

Dokuzuncu olarak, baraj ve rezervuar güvenliği gençlik su eğitimine uygun düzeyde dâhil edilmelidir. Baraj güvenliğinin iklim değişikliği altında değerlendirilmesi, taşkınların yanı sıra kuraklık, sediment, su kalitesi, altyapı yaşlanması ve işletme belirsizliğini kapsar (Fluixá-Sanmartín, Altarejos-García, Morales-Torres, & Escuder-Bueno, 2018; MacTavish, Bourgeois, Lafleur, & Ristic, 2022). Ancak eğitim faaliyetleri teknik korku üretmemeli; erken uyarı, risk iletişimi, hazırlık ve kurumların sorumluluğunu açıklamalıdır. Onuncu olarak, orman yangını sonrası taşkın ve erozyon süreçleri yerel iklim-su derslerine eklenmelidir. Marmaris örneği, yangınla bozulan yüzey koşullarının taşkın ve erozyon risklerini artırabileceğini göstermektedir (Bayazıt & Koç, 2022). Böylece gençler kuraklık, yangın ve taşkınların birbirinden yalıtılmış olaylar olmadığını kavrayabilir.

On birinci olarak, su yapıları hakkındaki eğitim yalnızca yararları veya yalnızca riskleri aktaran tek yönlü bir anlatıya dayanmamalıdır. Barajların gelecekteki rolünü inceleyen çalışmalar, su temini, taşkın kontrolü ve enerji gibi faydalarla ekolojik ve toplumsal etkilerin birlikte tartışılması gerektiğini ortaya koymaktadır (Ho et al., 2017). Gençlik müzakerelerinde alternatifler, maliyetler, ekosistem ihtiyaçları ve kuşaklar arası etkiler açıkça ele alınmalı; karar verme, mühendislik bilgisinin etik ve toplumsal değerlendirmeye birleştiği bir öğrenme alanına dönüştürülmelidir.

9. Sonuçlar ve Öneriler

Çocuklarda ve gençlerde iklim ve su bilinci, yalnızca çevreye duyarlı birey yetiştirme hedefi değildir; su güvenliği, afetlere direnç, halk sağlığı, gıda sistemleri ve demokratik katılım açısından uzun vadeli bir toplumsal kapasite yatırımdır. Bu yatırımın etkili olabilmesi için bilgi aktarımından su okuryazarlığına, tek seferlik etkinliklerden sürekli öğrenmeye ve sembolik katılımdan kararlarla bağlantılı mekanizmalara geçilmesi gerekir.

Türkiye'nin Su Verimliliği Seferberliği ve 2023–2033 Strateji Belgesi önemli bir kurumsal temel sunmaktadır. COP31 ev sahipliği ise bu temeli çocuk ve gençlik merkezli, uluslararası görünürlüğü yüksek ve ölçülebilir bir programa dönüştürme fırsattır. Bu fırsatın değeri konferans günlerinde düzenlenecek etkinliklerin sayısıyla değil, sonrasında yaşamaya devam edecek müfredat, öğretmen kapasitesi, okul uygulamaları, açık veri ve gençlik katılım mekanizmalarıyla ölçülecektir.

Önerilen öğren–gözlemle–uygula–katıl–değerlendir döngüsü, çocukları iklim politikasının pasif muhatabı olmaktan çıkarıp kanıta dayalı yerel eylemin ortağı hâline getirmeyi amaçlamaktadır. Böyle bir yaklaşım, suyu yalnızca tüketilen bir kaynak değil; ekosistemleri, toplumları ve kuşakları birbirine bağlayan ortak bir

değer olarak kavrayan yeni bir yurttaşlık kültürünün gelişmesine katkı sağlayabilir.

Kaynakça

- Ardoin, N. M., Bowers, A. W., Roth, N. W., & Holthuis, N. (2018). Environmental education and K–12 student outcomes: A review and analysis of research. *The Journal of Environmental Education*, 49(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/00958964.2017.1366155>
- Bayazıt, Y., & Koç, C. (2022). The impact of forest fires on floods and erosion: Marmaris, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, 24, 13426–13445. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01947-3>
- Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A., & Rummukainen, M. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden: Assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*, 16, 101–112.
- Biemans, H., Speelman, L. H., Ludwig, F., Moors, E. J., Wiltshire, A. J., Kumar, P., Gerten, D., & Kabat, P. (2013). Future water resources for food production in five South Asian river basins and potential for adaptation: A modeling study. *Science of the Total Environment*, 468–469, S117–S131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.092>
- Dalkılıç, H. Y., Bayçınar, M., Samui, P. (2021). Evaluation of combined use of drought indices in the case of Konya Closed Basin. *International Journal Of Global Warming*, 23(2), 169-190. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2021.112895>
- Erkol, Z. İ., Yeşilyurt, S., Dalkılıç, H. Y. (2024). Impacts of climate change on spatial drought distribution in the Mediterranean Basin (Turkey): different climate models and downscaling methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 4065-4087. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04867-0>
- Fluixá-Sanmartín, J., Altarejos-García, L., Morales-Torres, A., & Escuder-Bueno, I. (2018). Review article: Climate change impacts on dam safety. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2471–2488. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2471-2018>
- Gohari, A., Bozorgi, A., Madani, K., Elledge, J., & Berndtsson, R. (2014). Adaptation of surface water supply to climate change in Central Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 5(3), 391–407. <https://doi.org/10.2166/wcc.2013.189>
- Ho, M., Lall, U., Allaire, M., Devineni, N., Kwon, H. H., Pal, I., Raff, D., & Wegner, D. (2017). The future role of dams in the United States of America. *Water Resources Research*, 53, 982–998. <https://doi.org/10.1002/2016WR019905>
- Hu, Y., Maskey, S., Uhlenbrook, S., & Zhao, H. (2011). Streamflow trends and climate linkages in the source region of the Yellow River, China. *Hydrological Processes*, 25, 3399–3411. <https://doi.org/10.1002/hyp.8069>

- International Commission on Large Dams. (2016). Global climate change, dams, reservoirs and related water resources. IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Koç, C. (2015). A study on the role and importance of irrigation management in integrated river basin management. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 488. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4707-7>
- Koç, C. (2025b). Su kaynaklarında ve su hizmetlerinde iklim değişikliğine uyum. In *Mühendislik alanında uluslararası çalışmalar (Bölüm 5, ss. 95–121)*. Serüven Yayınları.
- Koç, C. (2026). İklim değişikliğinin baraj ve rezervuarlar üzerine etkileri. İçinde Ö. Sallı Bideci (Ed.), *İnşaat mühendisliği alanında teori ve uygulamalar (Bölüm 1, ss. 5–46)*. Platanus Publishing.
- Lawson, D. F., Stevenson, K. T., Peterson, M. N., Carrier, S. J., Strnad, R. L., & Seekamp, E. (2019). Children can foster climate change concern among their parents. *Nature Climate Change*, 9, 458–462. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0463-3>
- Lee, J., & Shin, H. (2021). Assessment of future climate change impact on an agricultural reservoir in South Korea. *Water*, 13, 2125. <https://doi.org/10.3390/w13152125>
- MacTavish, L., Bourgeois, G., Lafleur, C., & Ristic, E. (2022). Climate change adaptation for dams. National Research Council Canada.
- Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. *Environmental Education Research*, 25(6), 791–812. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842>
- Millî Eğitim Bakanlığı. (2026). Su Verimliliği Seferberliği yarışması eser kataloğu. <https://www.meb.gov.tr/>
- Öziş, Ü., Türkman, F., Baran, T., Özdemir, Y., Dalkılıç, H. Y. (2002). Güneydoğu Anadolu Projesi ve su siyaseti. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 422, 35–45.
- Öziş, Ü., Özdemir, Y., Dalkılıç, H. Y., Türkman, F., Baran, T. (2004). Development of the Euphrates – Tigris Basin. EWRA Symposium on Water Resources Management: Risks and Challenges for the 21st Century, İzmir, Türkiye, 2 - 04 Eylül 2004, cilt.1, ss.85-98.

- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023a). Su Verimliliği Seferberliği. <https://www.suverimlilik.gov.tr/>
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023b). Değişen iklime uyum çerçevesinde Su Verimliliği Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2023–2033. <https://www.tarimorman.gov.tr/>
- UNESCO. (2021). Learn for our planet: A global review of how environmental issues are integrated in education. UNESCO.
- UNESCO. (2024). Greening curriculum guidance: Teaching and learning for climate action. UNESCO.
- UNFCCC. (2024). Action for Climate Empowerment. <https://unfccc.int/topics/education-and-youth/big-picture/ACE>
- UNFCCC. (2026). UN Climate Change Conference—Antalya, November 2026. <https://unfccc.int/>
- UNICEF. (2021). The climate crisis is a child rights crisis: Introducing the Children’s Climate Risk Index. UNICEF.
- United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.

