

Haziran, 2026

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA TEORİ VE UYGULAMALAR

EDITÖR
PROF. DR. ÖZLEM SALLI BİDECI

DOI:10.5281/zenodo.21048492

İnşaat Mühendisliği Alanında Teori ve Uygulamalar

Editör

Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Prof. Dr. Özlem Sallı Bideci

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Haziran, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-83-7

©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
---------------------	----------

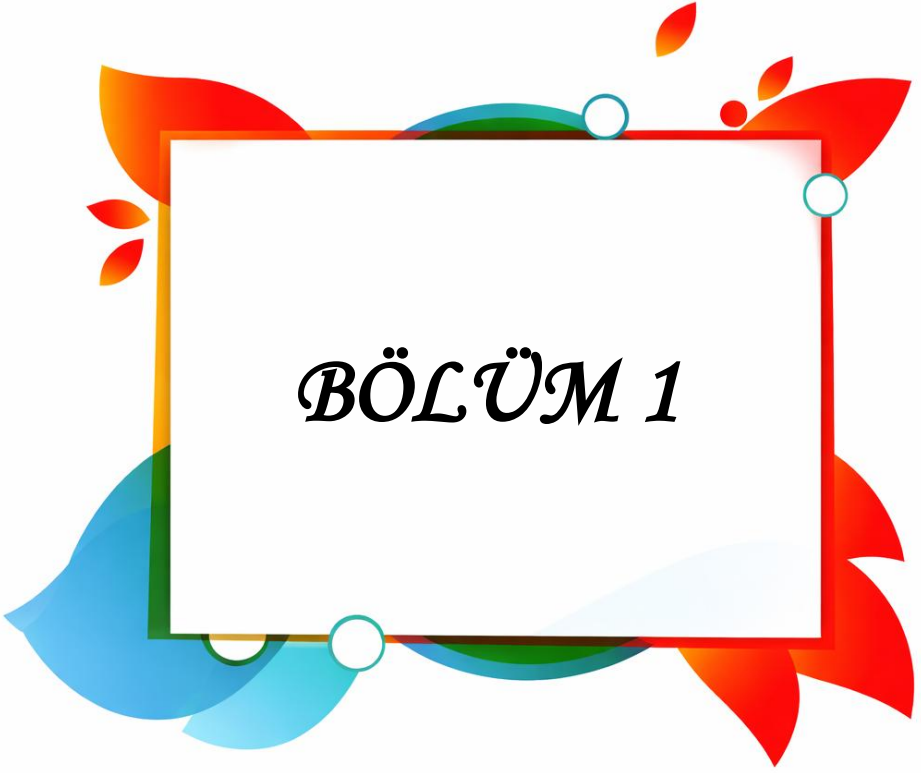
İklim Değişikliğinin Baraj ve Rezervuarlar Üzerine Etkileri

Cengiz Koç

BÖLÜM 2.....	47
---------------------	-----------

Son Kilometre (LAST-MILE) Dağıtımda Yapay Zekâ Uygulamaları: Sistematik Derleme

Özlem Battal Şal



BÖLÜM 1

İklim Değişikliğinin Baraj ve Rezervuarlar Üzerine Etkileri

Cengiz Koç¹

1. Giriş

Su, tüm canlılar için hayati bir ihtiyaçtır; bu nedenle, bu ihtiyacın karşılanabilmesi için mevcut su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşır. Ayrıca, suyun mekânsal ve zamansal değişkenliği nedeniyle birçok ülkede su temini ve taşkın yönetimi için suyun depolanması bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu amaçlarla, farklı sektörlerde (evsel, endüstriyel, hidroelektrik, sulama ve ekosistemler) suyu depolamak ve sağlamak için barajlar ve rezervuarlar inşa edilmiştir. İklim değişikliği nedeniyle iklim koşulları değişmeye devam ettikçe, baraj ve rezervuarların tasarımı ve işletilmesi, benzeri görülmemiş zorluklarla karşı karşıya kalacaktır. Bu altyapılar, su kullanımımızda riskler ve kırılganlıklar yaratabilecek çeşitli işletme ve yapısal sorunlarla giderek daha fazla karşılaşmaktadır. İklim değişikliği bağlamında, dünyanın birçok ülkesinin karşılaşılabileceği mevcut ve gelecekteki kritik sorunları ve zorlukları ele almak için eski baraj tasarımlarının ve işletmelerinin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Değişen iklimin, hem ortalama koşullar hem de değişkenlik açısından su kaynaklarının dağılımı ve kullanılabilirliği üzerinde derin bir etkiye sahip olacağı açıktır. Bu nedenle, iklim değişikliği, baraj ve rezervuarların işletilmesi, yönetimi ve planlaması için önemli bir konu haline gelmiştir. Baraj ve rezervuar sahiplerinin, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki potansiyel etkilerini analiz etmek için kullanabileceği farklı yöntem ve yaklaşımlar bulunmaktadır (Koç, 2003). Sıcaklık, yağış, su kaynaklarının kullanılabilirliği ve değişkenliği gibi faktörler de dahil olmak üzere barajların gelecekteki planlaması ve yönetimine yardımcı olmak için çeşitli iklim değişikliği senaryolarının modellenmesi önemlidir. Bu belirsizliklerle başa çıkmanın en iyi yolu, iklim değişikliği etkilerine en az duyarlı olarak nitelendirilen sağlam altyapıyı planlamak, tasarlamak ve inşa etmektir. İklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki belirsizlikleri ve etkileriyle başa çıkmak için kullanılan yaklaşımları gösteren az sayıda örnek çalışma bulunmaktadır.

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

İklim değışikliği hakkında yapılabilecek en iyi varsayım, geleceğin bugün dűşündüğümüzden farklı olacağıdır. Aşırı koşullarla yaşamak, bazı bölgeler için normal bir durum haline gelebilir ve geleneksel yaklaşımlardan tamamen uzaklaşılabilir. Bazı bölgelerde hava sistemleri daha aşırı hale gelmekte ve her iki uçta da daha az tahmin edilebilir olmaktadır; bu da kuraklık ve aşırı kuraklık gibi durumlarda daha fazla zaman geçirilmesi, daha fazla taşkın olayı yaşanması ve bugün "normal" olarak dűşünülen koşullar altında daha az zaman geçirilmesi anlamına gelmektedir (Koç, 2025a). Doğası gereği kuralcı ve oldukça tahmin edilebilir olaylar için uygun olan geleneksel mühendislik yaklaşımları, iklim değışikliğinin tahmin edilemez doğasına mutlaka uygun olmayacaktır (Murray-Darling Havzası'nda benzeri görűlmemiş kuraklık ve Avustralya genelindeki aşırı taşkın olayları). İklim değışikliğinin etkileri ortaya çıktıkça nehir yönetimine ilişkin geçmiş yaklaşımların geleceğimiz üzerindeki sınırlamalarını daha fazla görmeye başlayacağız. Bu da yeni mühendislik dűşünce ve yaklaşımlarına duyulan ihtiyacı artırmaktadır.

Özellikle, kuraklık ve diğer su kıtlığıyla ilgili sorunların yaşandığı bölgelerde, yenilikçi su politikası reformlarına ve kurumsal kapasiteye yönelik artan bir farkındalık söz konusudur. Ayrıca, iklim değışikliğinin etkileri ve uyum fırsatları, bir bölgeden diğerine önemli ölçűde farklılık göstermektedir. Önemli ayırt edici faktörler, hidrolik ve su kaynakları sisteminin özellikleri, iklim değışikliği, altyapı, yaşam standartları, kültürel ve yerel değerler ile uygulamalar, çevre ve su-çevresel ihtiyaçlar için su gereksinimleri, olarak sıralanabilir (Koç, 2018a; 2018b).

Geçmişte, iklim değışikliğinin etkilerine uyum sağlamada barajlar ve rezervuarlar önemli bir rol oynamıştır. Ancak, iklim değışikliğinden kaynaklanan su kıtlığı koşullarında, teknik ve kurumsal becerilerin bir bileşimi ve uyumunu gerektiren karmaşık havza ölçekli sorunların çözűlmesine giderek daha fazla odaklanılması beklenmektedir. Açıkça söylemek gerekirse, mühendisin teknik uzmanlığına olan talep azalmamıştır; bu çok önemlidir. Ancak, bu teknik uzmanlığın doğası ve mühendislik mesleği dışındaki kişiler tarafından nasıl benimsendiği iklim değışikliği karşısında değışmektedir. Teknik çözümler, ortaya çıkan birçok sorunun yalnızca biridir. Mühendislerin rolű ve etki alanları da genişlemektedir. Sadece belirli yerlerdeki altyapı çözümlerine odaklanmak yerine, zorlukların kapsamı, birden fazla amaca hizmet eden karmaşık nehir yönetim sistemlerine sahip büyük nehir havzaları ya da daha küçük havza grupları ölçeğine genişlemiştir. Geçmişte, insan tüketimi ve ekonomik kalkınma için su sağlamayı güvence altına almak üzere kritik altyapının tasarlanmasına odaklanılıyordu. İklim değışikliğinin zorlukları göz önüne alındığında, nehir yöneticilerinden artık risk azaltma, insan sağlığı, ekonomik kalkınma, su kalitesi,

ekoloji, turizm, navigasyon ve peyzaj gibi birden fazla hedefi bir arada gerçekleştirmeleri beklenmektedir.

İklim değişikliği bağlamında, nehir yöneticileri bu hedeflere ulaşmak için klasik inşaat mühendisliği rolünün çok ötesine geçen önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Örneğin, dünyanın bazı kurak ve yarı kurak bölgelerinde mühendisler, geniş bir nehir havzası ölçeğinde doğal çevreyi ve sağlıklı nehir sistemlerini sürdürebilmek için yeterli suyu güvence altına almak amacıyla çevresel çalışmalar ve önlemler tasarlamaktadır (Koç, 2025). Özellikle, kurak ve yarı kurak bölgeler (kuruyan ve oldukça değişken iklimlerle karakterize edilen) için insan ve ekonomik su tüketimine sürdürülebilir sınırlar getirme düşüncesi, sosyal ve ekonomik kalkınma ile büyüme hakkındaki yaygın görüşlere meydan okumaktadır. Mühendisler, yeni bilgi tabanını oluşturmak ve nehir havzasıyla nehir sistemleri ölçeğinde uyarlamalar yapmada kritik bir öneme sahiptir. Bu uygulamalı uzmanlık, iklim değişikliğinin nehirler ve ekosistemler üzerindeki etkileri ve kırılganlığı, organik madde (karbon ve tuz gibi) döngüleri, taşkın kontrolü, su kullanımı ve çevre koruma planlaması gibi diğer çabalar üzerine yapılan bilimsel araştırmalarla tamamlanmaktadır.

Barajlar, rezervuarlar ve ilgili su kaynaklarına yönelik iklim değişikliği riski; suya bağlı tehlikeler ile su sistemlerinin kırılganlığının etkileşiminden doğmakta olup bölgesel özelliklere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bununla birlikte, barajlar ve rezervuarlar iklim değişikliğine uyum süreçlerinde de kritik bir işlev üstlenmektedir. Yüksek depolama kapasitesine sahip havzalar, su kaynaklarındaki değişkenliğe karşı daha dirençli olmakta ve iklim değişikliğine karşı daha düşük düzeyde kırılganlık sergilemektedir. Bu bağlamda, su depolama kapasitesi iklim değişikliğinin etkilerine karşı bir tampon mekanizması olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, barajlar ve rezervuarlar aracılığıyla elde edilen hidroelektrik enerji, enerji üretiminde önemli bir unsur olarak iklim değişikliğinin azaltılmasına katkı sağlayan etkili bir araç niteliği taşımaktadır (Koç, 2015).

İklim değişikliği altında su kaynaklarının yönetim anlayışı arttıkça ve görüşler farklılaştıkça, neyi yönettiğimizin de değiştiğini gözlemleyebiliriz. Kurak ve yarı kurak bölgeleri referans alırsak, gelişmiş alanlar da dahil olmak üzere bazı yerlerde taşkınların yoğunluğu ve/veya sıklığının artması beklenebilir. Avustralya'da, aşırı yağışlar nedeniyle yaşanan son taşkınlar, taşkın sularının depolanma ve taşınma seçeneklerinin sınırlı olduğunu göstermiştir. Bazı durumlarda, taşkın sularının tüm su yolu (nehir yatağı) boyunca "güvenli bir şekilde" geçirilmesinin yönetilip yönetilemeyeceği, taşkın sularını tamamen kontrol altına alma görüşünden daha fazla önem taşımaktadır (Deroo, 2025). Bu nedenle, taşkın yönetimine ilişkin görüşler kademeli olarak değişmektedir.

Bazen, taşkın ovalarında sürdürülemez gelişmeyi önleyen kararlar, doğal taşkın koruma özellikleri (su tutma havzaları) sağlama, ekosistem hizmetleri sunma ve verimli tarımı destekleyen sulak alan bağlantısına izin verme yönünde dikkate alınabilmektedir. Yönetim odağındaki bu değişim, taşkın, toprak nemi ve yeraltı suyu yenilenmesi için yağış olaylarından daha önemli olup olmadığı sorusunun gündeme geldiği bazı yerlerde oldukça önemlidir. Bu durum, giderek daha fazla suya ihtiyaç duyulan bir dünyada su depolama ve dağıtımında, enerji üretiminde, gıda üretiminde ve taşkından korunmada altyapının kritik rolünü küçümseme amacı taşımamakta; karbon emisyonlarını azaltacak kritik altyapının inşası, işletme ve bakımıyla ilgili iyileştirmeleri de göz ardı etmemektedir.

Geçmişte mühendisler, bölgeye özgü sorunları tanımlamak ve çözmek için bireysel olarak çalışırlardı. Ancak, günümüzde, teslim edilecek işlerin karmaşıklığı, çoklu hedefler ve karar alma ortamı nedeniyle bu durum mümkün görülmemektedir. Mühendislerden, politikacılar, doğal kaynak bilimcileri, sosyal bilimciler, ekonomistler ve daha geniş bir toplulukla birlikte çalışmaları istenmektedir. İklim değişikliğine uyum ve azaltma seçenekleri çok farklı paydaş tarafından değerlendirilmelidir. İşbirliği basit bir kavram olarak görülmesine karşın başarılması oldukça zor bir eylemdir. İşbirliği olmadan uygulanacak politika ve eylemler; havza veya nehir sistemi ölçeğinde koordinasyonsuzluk, yetersiz hedef belirleme ve maliyetli olabilecek bazı riskleri daha da kötüleştirecek verimsizlikler yaratabilir. Ayrıca, "en iyi" veya "en iyi uygulama" sadece belirli bir amaç ve koşul için geçerli olacaktır ("evrensel" bir en iyi uygulama yoktur). Daha da önemlisi, mevcut su kaynağı sınırlı olduğunda sosyal ve ekonomik kalkınma ile büyüme hakkındaki görüşler daha fazla sorgulanacaktır. Bu nedenle, su kaynakları yönetimiyle ilgili karar alma sürecinin başlarında halkın katılımı ve desteği, uyum öncelikleri ve seçeneklerin geliştirilmesi konusunda yapıcı ve sağlıklı karar almayı kolaylaştıracaktır (Koç, 2025).

Geçmişteki çözümler, artık mutlaka doğru çözümler değildir; 20 yıl önceki "iyi bir baraj projesi", iklim değişikliğinin getirdiği bağlam ve baraj projelerinin sürdürülebilirlik gereksinimleri nedeniyle bugün mutlaka "iyi bir proje" olmayabilir. Evrensel çözümler yoktur; değişimin itici gücü küreseldir, ancak iklimsel değişimler ve uyum çözümleri ülkeden ülkeye büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Bu nedenle, her ülke veya bölgede, uygun uyum önlemleri önerebilmek için kaynakları, ihtiyaçları ve tehlikeleri uygun zaman dilimleri (2050, 2100 ve sonrası) üzerinden yeniden değerlendirmek gerekmektedir. Bu hazırlık çalışması, herhangi bir büyük ölçekli projeden önce mutlaka yapılmalıdır.

Bu çalışmanın temel amacı, küresel iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlama bağlamında barajlar ve rezervuarların rolünü kapsamlı bir şekilde değerlendirmektir. Bu çerçevede, mevcut baraj ve rezervuarların karşı karşıya olduğu iklim kaynaklı tehditler ile sunabileceği potansiyel fırsatlar sistematik bir şekilde analiz edilmektedir. Ayrıca, bu etkilerin olumsuz sonuçlarını en aza indirmek ve sürdürülebilir su yönetimi hedefleri doğrultusunda uyum sağlamak amacıyla uygulanabilecek strateji ve önlemler ele alınmaktadır.

2. Beklenen İklim Değişikliği

Küresel iklim, okyanuslar, kara kütleleri ve atmosfer arasındaki dinamik etkileşimler ile bunların ısı akışı dağılımındaki değişikliklere olan katkıları tarafından yönlendirilir ve kontrol edilir (Birleşmiş Milletler, 2013). Isı değişimlerinin çoğu okyanuslarda meydana gelir ve Deniz Yüzeyi Sıcaklıklarındaki (DYS) değişimler, iklim değişikliğinin doğrudan bir göstergesi olarak kabul edilir. Bununla birlikte, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 6. Değerlendirme Raporu (AR6), insan faaliyetleri sonucu ortaya çıkan sera gazlarının (GHG) okyanusu, atmosferi ve karayı ısıttığını ortaya koymaktadır (IPCC, 2021).

Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonu, 2011 yılına kıyasla 2019 yılında sürekli ve önemli bir artış göstermiştir. CO₂, CH₄ ve N₂O'nun ortalama yıllık konsantrasyonları, 2011-2019 yılları arasında sırasıyla 391 ppm'den 410 ppm'e, 1803 ppb'den 1866 ppb'ye ve 324 ppb'den 332 ppb'ye yükselmiştir (IPCC, 2021). Ayrıca, kara ve okyanuslar, insan faaliyetlerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yaklaşık %56'sını yıllık olarak emmektedir. Küresel yüzey sıcaklığı (küresel ortalama yüzey sıcaklığı ve küresel yüzey hava sıcaklığının toplamı), 1850'li yıllara kıyasla 1980-2020 yılları arasında önemli ölçüde artmıştır. Kara yüzeylerindeki küresel hava sıcaklıkları, okyanuslardaki artış oranına göre yaklaşık iki kat daha hızlı artmıştır (Sivakumar ve Stefanski, 2011). Bu kapsamda, küresel yüzey sıcaklığında yaklaşık 0,99°C ile 1,09°C arasında bir artış gözlemlenmiştir.

1980-2000 ve 2000-2020 dönemleri, referans alınan 1850-1900 dönemiyle karşılaştırıldığında, insan etkisinin günümüzde küresel yüzey sıcaklığındaki artışı hızlandırdığını göstermektedir. Karadaki yüzey sıcaklığı artışı, deniz yüzeyi sıcaklıklarındaki (DYS) artıştan daha yüksek olmakla birlikte, insan faaliyetleri okyanusun yüzeye yakın katmanlarında (0-700 m) deniz yüzeyi sıcaklıklarında artışa ve okyanus sularında tuzluluk ile asitlik düzeylerinin yükselmesine neden olmuştur (IPCC, 2021). Ayrıca, insan faaliyetlerinin Kuzey Yarımküre'deki kar örtüsünün erimesi üzerindeki etkisinin, Antarktika buzul örtüsüne kıyasla daha güçlü olduğu görülmektedir. Kar örtüsünün erimesi, küresel deniz seviyesi

yükselmesine yol açmıştır. Bu yükselmenin, 1901-1971, 1971-2006 ve 2006-2018 dönemlerinde sırasıyla yılda 1,3 mm, 1,9 mm ve 3,7 mm olduğu ve zamanla hızlandığı ortaya konmuştur (IPCC, 2021).

Yağış miktarı 1950’li yıllardan bu yana önemli ölçüde artmıştır. Ancak, artış hızı 1980’lerden itibaren kısmen yavaşlamıştır. Ayrıca, aşırı yağışların yoğunluğu ve sıklığı da önemli ölçüde artmıştır. Sera gazı emisyonlarının neden olduğu ısınmanın, Güney Asya, Doğu Asya ve Batı Afrika’da muson yağışlarını artırdığı gösterilmiştir. Buna karşılık, insan kaynaklı aerosol emisyonlarındaki artışa bağlı olarak muson yağışlarının kademeli olarak azaldığı gözlemlenmektedir. Naveendrakumar vd. (2019), Güney Asya’da gözlemlenen yağış ve sıcaklık eğilimlerini incelemiş ve eğilim analizinde kullanılan yöntemleri gözden geçirmiştir. Ayrıca, sıcak hava dalgaları, taşkınlar, kuraklık ve yangınlar gibi bileşik aşırı hava olayları 1950’li yıllardan bu yana artış göstermiştir. Sıcak hava dalgalarındaki artışa bağlı olarak Avrupa’da düşük sıcaklık aşırılıkları daha az yaygın hale gelmiştir. Batı Avrupa’da yaz sıcak hava dalgalarının ortalama süresi ve sıcak gün sayısı önemli ölçüde artmıştır (EEA, 2011). Güney Asya’da da sıcak hava dalgalarının süresi uzamaktadır (Sivakumar ve Stefanski, 2011; Chandrasekara vd., 2021). Tropikal siklonların oluşumu 1980’li yıllardan bu yana artmış; yüksek yoğunluklu tropikal siklonların mekânsal dağılımı ise batı Kuzey Pasifik’ten kuzeye doğru kaymıştır (IPCC, 2021).

3. İklim Değişikliğinin Barajlar ve Rezervuarlar Üzerindeki Etkileri

3.1. İklim değişikliğine bağlı hidrolojik değişiklikler

İklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki etkilerinin izlenmesi, değişen iklim koşullarında rezervuar işletimi de dâhil olmak üzere su yönetimi stratejilerinin sık sık güncellenmesinin gerektiği durumlarda büyük önem taşımaktadır. İran’daki Dez Barajı su havzasına (Tire, Marbore, Sazar ve Bakhtiari alt havzaları dâhil) gelen akış, parametrik olmayan Mann-Kendall testi ile Pettitt ve Buishand testlerine göre, yaz yağışlarındaki azalma nedeniyle önemli bir düşüş eğilimi göstermiştir (Norouzi, 2020). Ayrıca, Çin’deki Sarı Nehir’de (Hu vd., 2011) ve Sanguwa Nehri’nde (Lee vd., 2014) kış akışında önemli azalmalar tespit edilmiş ve bu durum su mevcudiyetini etkilemiştir. Jung ve Kim (2017), Güney Kore’deki kuraklık dönemlerinde su kıtlığı yaşandığını belirlemiş ve Boryeong Barajı’nda ciddi olumsuz etkiler gözlemlemiştir.

Güney Asya muson sistemine ilişkin son çalışmalar, okyanus-kara sıcaklık gradyanları, atmosferik dolaşım ve topografik etkiler arasındaki karmaşık etkileşimi vurgulamaktadır. İklim değişikliğinin, artan atmosferik nem nedeniyle toplam yağış miktarını artıracakları öngörülmekte; ancak muson dolaşımının potansiyel olarak zayıflayabileceğine ilişkin endişeler devam etmektedir. Bu tür

değişiklikler, özellikle muson bağımlı bölgelerde hidrolojik döngüyü önemli ölçüde etkileyebilir. Ek olarak, aerosoller ve sera gazlarının rolü, muson davranışında daha fazla değişkenliğe yol açarak su kaynakları planlamasını ve rezervuar işletimini karmaşıktırmaktadır. Bu dinamikler, aşırı hidrolojik olayların ve mevsimsel kaymaların tahminlerini iyileştirmek amacıyla iklim modelleri ve gözlem araçlarının geliştirilmesinin aciliyetini vurgulamaktadır (Fiaz vd., 2025).

Son çalışmalar, aşırı yağış olaylarındaki artış nedeniyle barajların ve rezervuarların taşkınlara karşı artan savunmasızlığını vurgulamaktadır. Örneğin, EPA (2021), bir istasyonun yıllık maksimum debisini esas alan göstergelere dayanarak akıştaki eğilimleri belirlemiş ve iklim değişikliğiyle ilişkili pik akışlarda artış olduğunu ortaya koymuştur. Yun vd. (2021), Çin'deki Lancang-Mekong Nehri Havzası'nda rezervuar işletimi üzerindeki iklim değişikliğinin etkilerini incelemek amacıyla, değişken sızma kapasitesi (VIC) modeli ile rezervuar modülünü birleştiren bir model geliştirmiştir. Çalışma, yukarı havzadaki rezervuarların, aşağı havzadaki rezervuarlara kıyasla hidroelektrik üretim açısından daha düşük performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Himalayalar bölgesindeki baraj güvenliği ise, buzulların erimesinden kaynaklanan taşkınların tahmini için gerekli olan tarihsel akış verilerinin yetersizliği nedeniyle sorgulanmaktadır (International Rivers, 2011).

Yasarer ve Sturm (2016), iklim değişikliğinin rezervuarlardaki su mevcudiyeti üzerindeki etkileri perspektifinden kapsamlı çalışmalar yapıldığını belirtmiştir. Bununla birlikte, iklim değişikliğinin rezervuar sularının kalitesindeki bozulmaya odaklanan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Kansas'taki Perry Gölü'nde, akarsu kıyısı erozyonundan kaynaklanan sedimentlerin, yüzey toprağından taşınan sedimentlere kıyasla rezervuar su kalitesinin bozulmasına daha fazla katkıda bulunduğu belirlenmiştir (Juracek ve Ziegler, 2009). Ayrıca, iklim değişikliği koşullarında artan aşırı yağışların nehir kıyısı ve yatak erozyonunu artırabileceği ifade edilmektedir (Seneviratne vd., 2012). Daha spesifik olarak, aşırı yağış olayları erozyona önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır; çünkü yüksek yoğunluklu yağışlar daha fazla erozyona yol açmaktadır. Örneğin, Ohio Havzası'nda meydana gelen beş aşırı yağış olayı, toplam erozyonun %66'sına katkıda bulunmuştur (Edwards ve Owens, 1991). Ayrıca, aşırı yağış olayları sırasında sediment taşınımı da artmaktadır. Nitekim, 2010 yılında Kansas'taki Kanopolis Gölü'nün yukarısında gözlemlenen yedi fırtına, toplam askıda sediment yükünün %88'iyle ilişkilendirilmiştir (Juracek, 2011).

İklim değişikliğinin kuraklıkların ve aşırı yağışların şiddetini, ölçeğini ve sıklığını artırması muhtemeldir. Bu nedenle, su girişleri, taşkın ve kuraklık

sıklıkları ile baraj ve rezervuarlardaki sedimentasyon dahil hidrolojik değişikliklerin, izleme verileri kullanılarak nicel olarak belirlenmesi önerilmektedir. Parametrik regresyon, ortalama eğilimleri izlemek için pratik bir yöntemdir; ancak aşırı iklim olaylarının incelendiği çalışmalarda, ortalama eğilimden daha önemli olan üst ve alt uçlardaki dağılımsal değişiklikleri göz ardı etmektedir. Bu bağlamda, uzun vadeli zamansal eğilimlerin eksiksiz bir resmini elde etmek amacıyla kantil regresyonu kullanılmıştır (Uranchimeg vd., 2018; Uranchimeg vd., 2020). Ayrıca, parametrik dağıtım yaklaşımları, artık değerler normal dağıldığında daha verimli olabilirken, parametrik olmayan yaklaşımlar, artık değerlerin normal dağılımdan sapması durumunda daha sağlam sonuçlar vermektedir (Kwon vd., 2007a; Kwon vd., 2007b; Kim vd., 2015; Lima vd., 2018).

3.2. Rezervuarların iklim değişikliğine etkisi

1990'lı yıllardan bu yana biriken bilgiler, her tür rezervuarın, en azından oluşturulduktan sonraki ilk birkaç yıl boyunca, sera gazı emisyonuna yatkın olduğunu göstermektedir. Bu nedenle akla gelen soru şudur: Sera gazı emisyonları açısından “kötü” ve “iyi” rezervuarlar var mıdır? Rezervuarların net emisyonlarını karakterize eden çok az sayıda çalışma bulunmasına karşın, taşkınların iklim değişikliği üzerindeki küresel etkisi hakkında kapsamlı bir değerlendirme yapılamamaktadır. Amazon orman bölgesinde yapılan çalışmalar, bazı tropikal rezervuarların (Balbina, Tucuruí) bir termik santralden daha yüksek oranlarda sera gazı yayabileceğini göstermiştir (Demarty ve Bastien, 2011). Aksine, Kanada'nın Québec eyaletindeki boreal rezervuar Eastmain-1'in uzun vadeli takibi, su tutma işleminden sonra yüksek sera gazı emisyonlarına karşın, bu tür rezervuarların projenin ömrü (100 yıl) göz önüne alındığında havza ölçeğinde emisyonlar açısından belirgin bir etkisi olmadığını ortaya koymuştur.

Bazı tropikal rezervuarların, yüksek birincil üretici konsantrasyonları nedeniyle CO₂'yi yakalayabildiği gösterilmiştir (Rosa vd., 2004; Chanudet vd., 2011). Bu durum, sera gazı emisyonları açısından olumlu görünse de, daha geniş bir çevresel perspektiften bakıldığında, büyük birincil üretici popülasyonları genellikle insan faaliyetleri, alg patlamaları (Deblois vd., 2007) ve su sütunu ile sedimentte anoksi nedeniyle rezervuarların hızlandırılmış ötrofikasyonu ile ilişkilidir; bu durum ise CH₄ oluşumuna yol açabilir. Sonuç olarak, birkaç genel çıkarım yapılabilir. Rezervuar yüzey alanı ve peyzajı, su altında kalan ekosistemlerin organik madde içeriği, havzadaki insan faaliyetleri ile enerji santrali tasarımı ve işletimi gibi faktörler, sera gazı emisyonlarını belirgin şekilde etkiler. Bu süreçler dünyanın her yerinde benzerdir; emisyonların genliği ve süresi genellikle enlem ve su sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir (Marotta vd., 2015; Barros vd., 2011). Bu nedenle, yüksek emisyonlu projelerden kaçınmak

için, gelecekteki rezervuar planlamalarında aşağıdaki noktalar dikkate alınmalıdır:

- Daha küçük rezervuar yüzey/su hacmi oranı, dolayısıyla kısa kalış süresi ve daha az organik madde ile su altında kalma tercih edilmelidir.

- Sera gazı emisyonları ölçülürken tüm yollar (difüzyon, kaynama, gaz çıkışı) dikkate alınmalı ve özellikle metan ölçümüne ile net sera gazı emisyonlarının belirlenmesine özen gösterilmelidir (Teodoru vd., 2012; UNESCO/IHA, 2011; Tremblay vd., 2005).

- Sera gazı emisyonları, tasarım aşamasından itibaren dikkate alınmalıdır. Eğer enerji türbinlerine su girişi rezervuarın yüzeyine yakın bir yerde veya çoğunlukla rezervuarın yüzeyinden su çeken esnek kapaklar aracılığıyla sağlanıyorsa, metan gazının aşağı yönde salınım riski çok daha düşüktür. Türbinlere su, rezervuarın dibine daha yakın olan, oksijen bakımından fakir sudan (hipolimnion) besleniyorsa, çözünmüş metan suyla birlikte sürüklenerek enerji santralinin aşağı yönünde salınabilir. Su salınımı veya rezervuarın temizlenmesi için alt kapakların kullanılması da aynı nedenle aşağı yönde metan emisyonu riskini artırabilir. Suyun rezervuar içinde kısa süreler kalmasını sağlayan hidroelektrik işletmeleri, sera gazı emisyonu riskini azaltacaktır (Harby vd., 2012).

- İnsan faaliyetleri de dikkate alınmalıdır. Rezervuar havzasındaki antropojenik faaliyetler, su sütununda ve sedimentlerde anoksik koşullar oluşturarak sera gazı ve H₂S emisyonlarını önemli ölçüde artırabilen besin ve organik madde girdilerine yol açmaktadır (DelSontro vd., 2010). Şimdiye kadar projelerin tasarımında, toplam askıdaki sediment girdileri, rezervuar dolumunu hesaba katmak ve bakım amaçlı tarama işlemlerini planlamak için dikkate alınmaktaydı. Ancak, bu sediment yükünde bulunan organik madde artık potansiyel olarak büyük bir sera gazı emisyon kaynağı olarak değerlendirilmelidir; bu emisyonları önlemek amacıyla su arıtma tesisleri rezervuarların yukarısına kurulabilir.

İklim değişikliğinin yağış, akış, erozyon ve sediment taşınımı, akış rejimi ve kalış süresi gibi faktörler üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Bu göstergeler, havza karbon ve besin dinamiklerini ve dolayısıyla rezervuarlar ile doğal su ekosistemleri için sera gazı emisyonlarını etkileyebilir. Tablo 1’de, havza ölçeğinde iklim değişikliği etkilerine ilişkin farklı senaryolar için rezervuarlardan kaynaklanan brüt sera gazı emisyonlarında beklenen artış veya azalmaya dair bazı örnekler verilmektedir. Net rezervuar sera gazı emisyonları dikkate alındığında, bu değişiklikler daha küçük olabilir; çünkü doğal ekosistemler de iklim değişikliğinden etkilenecektir.

Tablo 1. İklim değişikliğine bağlı olayların rezervuar sera gazı emisyonları üzerindeki etkilerine örnekler (ICOLD, 2016).

Havza Ölçeğinde	Rezervuarda	Sera Gazı Emisyonunda Artış	Sera Gazı Emisyonunda Azalış
Erozyonda Artış	Organik madde konsantrasyonu ve sediment taşınımında artış	X Organik madde mevcudiyetinde artış	
Yağışta Artış	Kalış süresinde azalma		X Organik madde mevcudiyetinde azalma
Hava Sıcaklığı- Kuraklıkta Artış	Su sütunu sıcaklığında artış	X (CO ₂)	
	Yüzeysel su sütunu	(CH ₄ Kabarcıkları)	X CO ₂ 'nin CH ₄ 'e Oksidasyonu
Rüzgar Fırtınaları, Siklonlar	Su sütunu karışımı	Hipolimniyon da biriken gazların salınımı	Alt-üst olma su anoksisini azaltabilir

3.3. İklim değişikliği nedeniyle baraj ve rezervuarlarda meydana gelen yapısal değişiklikler

Su kaynaklarının dinamik olarak değiştiği koşullarda artan su talebi, dünya genelinde rezervuar ve baraj inşa etme ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle, özellikle ABD ve Avrupa'da 100 yıldan daha uzun bir süre önce birçok baraj inşa edilmiştir. Dikkat çekici bir şekilde, çoğu baraj ve rezervuar aktif ömrünü aşmış ve yaşlanmış olup, çok sayıda mekanik deformasyona ve hem canlı hem de cansız sistemler açısından güvensizliğe yol açmıştır (Koç, 2025). Ayrıca, bazı baraj ve rezervuarlar belirli bir ömür için inşa edilmiş ve ömürleri tasarlanırken iklim değişikliğinin etkisi dikkate alınmamıştır. Bu durum, bir ülke için büyük ekonomik, sosyal ve çevresel riskler doğurabilir (Kraljević, 2013).

Barajlar, iklimle ilgili etkilerin çoğuna yapısal olarak duyarlıdır. Özellikle kemer tipi barajlar da dahil olmak üzere beton barajlar, sıcaklık, yağış ve güneş radyasyonundaki değişikliklerden doğrudan etkilenebilir (FERC, 1999; Malm, 2016). Sıcaklığın iklim değişikliği altında genellikle artması beklenir ve bu, daha sık aşırı değerlerle birlikte önemli etkilere yol açabilir (IPCC, 2021). Ayrıca, bir rezervuardaki su depolamasındaki potansiyel değişim, barajın güneş radyasyonuna maruz kalma süresini ve yüzeyini artırabilir.

Ek olarak, sıcaklık farkındaki ve maksimum sıcaklıktaki artış, beton yüzeyinde hasara yol açabilir. Daha da önemlisi, bu sorunlar barajı mekanik gerilmelere maruz bırakarak hidrostatik yüklere karşı daha savunmasız hâle getirebilir. Bu koşullar altında, artan sıcaklıkların ve güneş radyasyonunun yapısal güvenilirlikle ilgili arıza olasılıklarını nasıl etkilediğini değerlendirmek için geleneksel stabilite analizleri yetersiz kalabilir ve daha titiz yaklaşımlar

benimsenmelidir. İklim değişikliğinden etkilenebilecek diğer arıza modlarında (örneğin taşma ve iç erozyon) da benzer hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

3.4. İklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki etkileri

Yapısal hususlara ve hidrolojik değişikliklere ek olarak, iklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki çeşitli etkilerinin sentezlenmesi de büyük önem taşımaktadır. Tablo 2'de özetlendiği üzere, aşırı sıcaklık ve yağış olayları, kuraklıklar, taşkınlar ve buzulların erimesi gibi iklim faktörleri; su depolama ve hidroelektrik tesislerinin yapısal istikrarını, işletimini ve güvenilirliğini tehdit edebilir. Örneğin, yağış değişkenliği, kurak dönemlerde su girişlerini azaltarak su teminini ve hidroelektrik üretimini düşürürken, daha yağışlı dönemlerde yıkıcı taşkınlara da neden olabilir. Bu tür değişkenlik, tasarım kapasitelerinin belirlenmesindeki zorlukları daha da artırır.

Ayrıca, aşırı sıcaklık ve yağış olayları, rezervuarlarda erozyonu, sediment taşınımını ve siltlenmeyi artırarak baraj güvenliğini tehdit edebilir ve nihayetinde kapasite ile verimliliği azaltabilir. Bu olaylar, daha yüksek akış hacimleri için tasarlanmamış eski toprak dolgu veya daha küçük, topluluk temelli barajlarda taşma ve yapısal hasara yol açabilir. Diğer yandan, daha soğuk bölgelerdeki buzulların erimesi ek belirsizlikler yaratmaktadır: eriyen buz, sediment transferini rezervuar havzalarına hızlandırarak altyapı aşınmasına ve depolama kapasitesinin azalmasına neden olur. Ek olarak, yüksek enlemlerdeki donmuş toprakların çözülmesi, yer altı suyu bağlantılarını değiştirebilir ve daha fazla sediment salınımına neden olarak yeni işletme ve mühendislik zorlukları ortaya çıkarabilir.

Toplu olarak ele alındığında, bu iklimsel etkiler baraj ve rezervuarların tasarımında, yönetiminde ve rehabilitasyonunda daha uyarlanabilir ve dirençli stratejilerin benimsenmesi ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu stratejiler; değişen su girişlerini tespit etmek için gerçek zamanlı izleme sistemlerinin entegre edilmesini, yenilikçi sediment yönetimi tekniklerinin benimsenmesini ve gelecekteki aşırı taşkın olaylarına karşı baraj ve savakların iyileştirilmesini içerebilir. Sonuç olarak, bu etkilerin her birini ayrı ayrı ele almak yerine birbirleriyle bağlantılı doğasını dikkate almak, değişen iklim koşulları altında rezervuar güvenliği, güvenilirliği ve ekolojik sürdürülebilirliği için daha sağlam yaklaşımların geliştirilmesine rehberlik edebilir (Koç, 2015).

Tablo 2. İklim değişikliğinin baraj ve rezervuarlar üzerine gösterge niteliğindeki etkileri (Bae vd., 2025).

iklim değişikliği faktörleri	Etki örnekleri	Kaynak
Yağış değişkenliği	▪ Yağışların az olduğu dönemlerde rezervuara akan su miktarındaki azalma nedeniyle hidroelektrik enerji üretimi düşmektedir. ▪ Balık yaşam alanlarının kaybı ve toplumun geçim kaynaklarına verilen zarar	Cherry vd., 2017
Aşırı sıcaklık ve yağış olayları	▪ Barajlar için tasarım kapasitesi, taşkın kontrolü, su tahliyesi ve taşkın yönetimi stratejisi gibi inşaat ve yönetim kriterlerinin belirlenmesindeki zorluklar, ▪ Ayrıca, aşırı yağış dönemlerinde baraj suyunun taşması nedeniyle suyun hidroelektrik enerji üretimi için kullanılmadan israf edilmesi, ▪ Yüksek sediment ve siltasyon, sedimente bağlı besin maddeleri nedeniyle ötrofikasyon, ▪ Yüzey ve yeraltı sularına gelen akışın bölünmesi, ▪ Erozyona yatkın gövdeye sahip olan eski toprak dolgu barajlar, yoğun yağış dönemlerinde yağmur erozyonuna neden olma eğilimindedirler. Barajların yıkılması durumunda aşağı havzadaki yerleşim yerlerinde oluşacak zararlar. ▪ Yüksek sıcaklık, beton barajlara ilave mekanik gerilim ekleyebilir.	Cherry vd., 2017; Vahedifard vd., 2017; Hugnes ve Hunt, n.d; Sutton, 2019; Toniola ve Schultz, 2005; Rahman vd., 2025
Hava sıcaklığındaki değişkenlik	▪ Kuzey bölgelerinde sonbahar hava sıcaklıklarının artması nedeniyle takip eden bahar aylarında rezervuarlardaki mevcut su miktarı azalır, ısınma kış aylarında yağış miktarını artırır ve kuzeydeki rezervuarların kapasitesini aşar,	Cherry vd., 2017
Taşkınlar	▪ Barajın mevcut kapasitesini ve dolusavak tahliye kanalını aşması, aşağı havzadaki altyapılar ve can kayıpları için yıkıcı bir duruma yol açabilir. Su baskını, yukarı havzadaki altyapıları ve yaşamları etkiler. Sular altında kalan bitki örtüsünden metan gibi yüksek sera gazı emisyonları oluşur. ▪ Havza kalıntılarının ve bitki örtüsünün taşınması, tahliye yapıları ve dolu savaklara zarar verebilir ve bunların performansını olumsuz etkileyebilir. ▪ Barajdaki su kalitesinin, kıyı bitki örtüsü koşullarının ve balıkçılık faaliyetlerinin bozulması,	Cherry vd., 2017; Hugnes ve Hunt, n.d; Scherer ve Pfister, 2016; Yasaer and Sturm, 2016; Kim vd., 2024
Kuraklıklar	▪ Barajlara akan su miktarındaki azalma nedeniyle hidroelektrik enerji üretimi düşmektedir. ▪ Barajlarda mikro-klimal değişiklikler ve buharlaşma-terlemede artış, ▪ Hidrolik yapıların ısıya bağlı genişlemesi,	Cherry vd., 2017; Charalampos vd., 2013; Kwon vd., 2016; Ho vd., 2017.
Buzul erimesi	▪ Buzulların erimesinden kaynaklanan su akışı süreç boyunca eşit dağılmıyor ve hidroelektrik santrallerinin tasarımı ve yönetimi zorlaşıyor. Bazen beklenmedik taşkınlar da gözlemlenebiliyor.	Cherry vd., 2017; Gurnel, 1995; Harrison vd., 1983; Gebre vd., 2013; Bergstrom vd.,

	▪ Büyük miktarda sediment deşarjı, rezervuarın depolama kapasitesinde azalmaya ve hidrolojik yapıların aşınmasına yol açar. ▪ Buz tıkanıklıklarının ve engellerinin sıklığındaki ve yapısındaki değişiklikler hidrolojik yapıları hasara uğratar. Buz tıkanıklıklarının erimesi ve buna bağlı su baskınları, rezervuar içindeki su miktarını artırır.	2001; Prowse ve Beltaos, 2002; US Department of Energy, 2017.
Donmuş toprağın çözülmesi	▪ Yeraltı depolama ve bağlantı kapasitesinde beklenen bir artış. ▪ Termal ve su kaynaklı toprak erozyonu nedeniyle su yollarına yüksek miktarda sediment taşınımı, rezervuar kapasitesinin azalmasına ve hidrolojik yapıların hasar görmesine yol açmaktadır.	Cherry vd., 2017; Tonioto and Schultz, 2005; Gurnell, 1995
Kutupsal genişleme	▪ Kutup bölgelerinde, özellikle Arktik bölgesinde hızlanan ısınma, orta enlemlerdeki dolaşımı zayıflatır ve orta enlemlerde aşırı sıcak ve kuraklık dönemlerine neden olur. Bu olaylar, söz konusu bölgelerde sıcak hava dalgalarına yol açar ve rezervuarları ve barajları etkileyebilir.	Coumou vd., 2018

3.5. İklim değişikliğinin baraj ve rezervuarlar üzerindeki etkilerinin tahmini

Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO), sabit iklim koşulları altında güvenlik tasarım standartlarını incelemek amacıyla olası maksimum yağışı (PMP) hesaplamak için a) istatistiksel yöntem, b) genelleştirilmiş yöntem, c) transpozisyon yöntemi ve d) nem maksimizasyon yöntemini önermiştir. Chen ve Hossain (2019) ise gelecekteki baraj güvenliği için PMP hesaplamalarının etkinliğini tartışmaktadır. Bununla birlikte, iklim temel çizgilerinin sabit olduğu varsayımı, değişen iklim koşullarında baraj güvenliğini değerlendirmek için artık uygun değildir (USACE, 2016). İlginç bir şekilde, yakın zamanda inşa edilen barajlar ve rezervuarlar, iklim değişikliği dikkate alınarak tasarlanmıştır; bu nedenle ömürleri tarihsel örneklerden farklıdır (Arnell ve Hulme, 2006). Bu nedenle, bir barajın güvenliğini sağlamak amacıyla yeni rezervuarlar için tasarım taşkın hesaplamalarının düzenli olarak güncellenmesi zorunludur. Ayrıca, gelecekteki iklim değişikliği senaryolarına yönelik taşkın tasarımı için eş zamanlı duyarlılık analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Chung vd. (2011), iklim değişikliği nedeniyle Han Nehri'ndeki çok amaçlı bir grup barajda su girişi ve depolamasında olumsuz değişiklikler olacağını tespit etmiştir. Ayrıca, Gohari vd. (2014), İran'daki Zayandeh-Rud Nehri havzasında yer alan Chadegan Rezervuarı'nda mevcut su miktarının azalması nedeniyle ülkede tarım için su yetersizliği oluşacağını öngörmüştür. Güney Kore, Gwanghye Rezervuarı'nın gelecekteki su kapasitesi, rezervuar simülasyon süreci kullanılarak RCP 4.5 ve 8.5 iklim değişikliği senaryolarına göre iki farklı koşul (a. baraj gövdesi yükseltilmeden önce; b. baraj gövdesi yükseltildikten sonra) altında değerlendirilmiştir (Lee ve Shin, 2021). Çalışma, gövdenin

yükseltilmesinin Kore’de sulama suyu ihtiyacını karşılamak için etkili bir strateji olabileceğini göstermiştir.

ABD’de hidroelektrik etki değerlendirmesi, RCP 8.5 senaryosu altında 10 IPCC AR5 GCM’den oluşan bir model topluluğu kullanılarak yapılmıştır. Bu değerlendirme, günlük altı atmosferik değişkene ait verilerin dinamik olarak ölçeklendirilmesiyle su mevcudiyetinin modellenmesini içermektedir. GCM sinyalleri, hem tarihsel (1966-2005) hem de gelecek (2011-2050) dönemler için RegCM4 kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Değişken Sızma Kapasitesi (VIC) hidrolojik modeli, hidroelektrik üretimi için gelecekteki su mevcudiyetini simüle etmek amacıyla kullanılmıştır. Toplu Havza-Enerji Depolama modeli ise farklı iklim değişikliği senaryoları altında yıllık, çok yıllık, günlük ve mevsimsel üretimi analiz etmek amacıyla geliştirilmiştir. Çalışma, kış ve ilkbahar dönemlerinde hidroelektrik üretimde artış, yaz ve sonbahar dönemlerinde ise azalma olduğunu ortaya koymaktadır (ABD Enerji Bakanlığı, 2017).

Özetle, uzun vadeli su mevcudiyetine ilişkin çalışmalar, su girişi ve depolamada azalma olduğunu göstermektedir. Bazı araştırmalar, su temini kıtlığına alternatif bir çözüm olarak baraj gövde yüksekliğinin artırılmasını önermektedir. Ayrıca, iklim değişikliğine bağlı bu azalmalar, mevsimsel hidroelektrik üretimde farklılıklara da yol açmaktadır.

3.6. Taşkın riski değerlendirmesi

Aşırı yağış ve taşkın azaltma için risk değerlendirmesi ve su altyapı tasarımı geleneksel olarak Olası Maksimum Yağış (PMP) ve Olası Maksimum Taşkın (PMF) hesaplamalarına dayanmaktadır. Bu yöntemler, en kötü senaryolar için kritik baraj özelliklerini tasarlarlarken genellikle durağan bir iklimi dikkate almaktadır. Ancak, iklim değişikliği durağanlık varsayımını giderek daha fazla zorlamaktadır; çünkü statik PMP ve PMF değerleri, artık gelişen hidrolojik koşulları yansıtmamaktadır (Visser vd., 2022). Folsom, Owyhee ve Güney Holston barajlarının yer aldığı Yukarı Amerika’nın Owyhee ve Holston Nehir havzalarında yapılan bir çalışmada, başlangıçta sabit PMP ve PMF standartlarıyla tasarlanmış eski barajların yeniden değerlendirilmesinin gerektiği vurgulanmıştır. Araştırma, iklim değişikliği ve arazi kullanımındaki değişikliklerin mevcut PMP değerlerini zaten etkilediğini ve önceki varsayımları geçersiz kıldığını ortaya koymuştur. Ayrıca, iklim ve havza koşullarındaki değişiklikleri daha iyi hesaba katmak için gelecekteki barajların tasarımında dinamik bir PMP yaklaşımının kullanılmasını önermektedir (Stratz ve Hossain, 2014).

Tasarım taşkını, a) gözlemlenen veya simüle edilen giriş akış serileri kullanılarak yapılan taşkın sıklığı yaklaşımı ve b) yağış-akış yöntemi (sıklık analizinden elde edilen tasarım yağışlarının hidrolojik modeller aracılığıyla tasarım taşkınlarını tahmin etmek için kullanılması) ile hesaplanabilir (Killingtveit ve Saelthun, 1995; NVE, 2011). Bununla birlikte, yağış-akış

yaklaşımı, taşkın sıklığı analizine kıyasla daha fazla tercih edilebilir; çünkü hem belirsizlik nispeten düşüktür hem de yağış, yerleşik bölgesel yöntemler kullanılarak kolayca enterpolasyon edilebilir ve bölgeselleştirilebilir (Saelthun ve Anderson, 1986). Ancak, bu tekniklerin güvenilirliği belirli bölgesel özelliklere ve veri kullanılabilirliği ile kalitesine bağlıdır. Lawrence vd. (2012), Hollanda, Norveç ve İsveç'te meydana gelen taşkınların miktarında, mevsimselliğinde ve belirsizliklerinde öngörülen değişiklikleri özetlemiştir. Özellikle, birçok çalışma, öngörülen taşkın modellerinin ülke genelinde homojen olmadığını, iklim koşullarıyla havza özelliklerindeki bölgesel değişikliklerin bu farklılıkları büyük ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur (Veijalainen vd., 2010). Chernet vd. (2014) ve Mailhot ve Duchesne (2010), farklı yöntemler kullanarak iklim değişikliğinin hidroloji üzerindeki etkisini araştıran çalışmaları tanımlamıştır. Farklı iklim değişikliği senaryoları altında rezervuar simülasyonu, rezervuarların gelecekteki su yüzeyi yüksekliklerindeki olası değişiklikleri anlamının etkili bir yolu olabilir. Sutton (2019), Batı Virginia'daki Orta Appalachian Ekolojik Bölgesi için benzer bir çalışma yürütmüştür. Niu ve Shah (2018) ise gelecekteki iklim değişikliği senaryoları altında bir barajın en uygun boyutunu tasarlamak amacıyla, sırasıyla Çin'deki Jinsha Barajı ve Mısır'daki Aswan Yüksek Barajı için optimal bir kontrol modeli geliştirmişlerdir. Hidrolojik yağış simülasyonu olan LISFLOOD modeli ve kanal yönlendirme modeli, iklim değişikliği senaryoları altında taşkın tahminleri için kullanılabilir. Ayrıca, nehir düzenleme önlemlerinin ve arazi kullanımındaki değişikliklerin taşkınlarla etkilerini değerlendirmeye de olanak sağlar. LISFLOOD'un detaylı simülasyon süreci, Avrupa Birliği (2013) tarafından hazırlanan kılavuzda mevcuttur.

İklim değişikliğinin baraj güvenliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılan en gelişmiş yöntemler, risk temelli ve geleneksel durağan varsayımların ötesine geçen yaklaşımları kapsamaktadır. Fluixa-Sanmartin vd. (2018), iklim projeksiyonları, ölçek küçültme teknikleri, hata ağacı analizleri ve revize edilmiş taşkın yönlendirme ile su baskını modelleri de dahil olmak üzere çağdaş değerlendirme yöntemlerine kısa bir genel bakış sunmaktadır. Ayrıca, değişen iklim koşullarında sosyo-ekonomik sonuçların dikkate alınmasının öneminin altını çizmektedirler. Aşırı olayların modellenmesindeki doğal belirsizlikleri ele alan araştırmacılar, hidrolojik verilerin bağımsız ve durağan olmama durumunu yakalamak amacıyla daha fazla durağan olmayan taşkın sıklığı analizi ve stokastik hava jeneratörleri kullanmaktadır. Bu tür risk değerlendirmeleri, iklim modelleri, ölçek küçültme yöntemleri ve hidrolojik model yapıları çeşitli kaynaklardan gelen belirsizliklerin dahil edilmesiyle daha da geliştirilmektedir.

Gelişmiş modellemenin dışında baraj altyapısını etkileyen iklim kaynaklı süreçlerin de yakından incelenmesi gerekmektedir. Rezervuarlar için doğal bir yaşlanma fenomeni olan sedimantasyon aşırı hava olaylarına karşı oldukça hassastır. Fırtınalar şiddetlendikçe, sediment taşınımı hızlanarak rezervuar

kapasite kaybını artırmaktadır. Birleşmiş Milletler'in yakın tarihli uyarısına göre dünyanın büyük barajları iklim değişikliği nedeniyle 2050 yılına kadar kapasitelerinin yaklaşık dörtte birini kaybedebilir (The Guardian, 2023). Yağış düzenlerindeki kaymalar ve artan aşırı hava olayları, özellikle toprakları istikrarsızlaştıran ve sediment yüklerini artıran orman yangınlarının ardından ek sediment birikimine yol açmaktadır. (Bayazıt and Koç, 2022). Örneğin, Kaliforniya'daki bir havzada, yangın sonrası erozyon, birleşik orman yangını ve taşkın olaylarından sonra sediment taşınımını üç ila dört kat artırmıştır (East vd., 2024). Bu koşullar altında azalan depolama kapasitesi, su temini, taşkın kontrolü ve ekosistem sağlığını tehlikeye sokmakta, artan taşkın risklerine dirençli baraj yönetimi ve tasarım stratejilerinin planlanmasındaki aciliyeti vurgulamaktadır. Etkili baraj güvenliği planlaması, her biri farklı güçlü ve zayıf yönleri olan yağış-akış ve taşkın olayı sıklık analizlerinden yararlanmaktadır. Birçok çalışma, taşkın riski dinamiklerini belirlemek ve rezervuarlarda beklenen su yüzeyi yüksekliklerini hesaplamak amacıyla çeşitli iklim senaryoları altında hidrolojik simülasyonlar uygulamaktadır. Örneğin, LISFLOOD, nehir düzenlemesi ve arazi kullanımındaki değişikliklerin taşkınlar üzerindeki etkileşimini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. İklim değişikliği ve sediment taşınımının sosyo-ekonomik boyutları da bütüncül baraj güvenliği politikaları oluşturmak için bu simülasyonlara entegre edilmelidir. Özellikle, Wild (2014), alternatif konumların, tasarımların ve işletme politikalarının Mekong Nehir sistemindeki rezervuarlardan sediment geçişini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiş, ancak yapılacak iyileştirmeler için önemli enerji yatırımlarının gerektiğini belirtmiştir. Sonuç olarak, gelişen iklim koşullarına karşı baraj dayanıklılığını korumak için sağlam hidrolojik modelleme, altyapı tasarımı ve sosyo-ekonomik analizleri birleştiren entegre bir yaklaşım gerekmektedir.

4. Baraj ve Rezervuarların İklim Değişikliğine Uyarlanmasına İlişkin Önlemler

Yapılan çalışmalar, başarılı bir uyumun, farklı disiplinler arasında yüksek düzeyde bir iş birliğiyle yürütülen yapısal ve fonksiyonel değişikliklerin bir bileşimini kapsaması gerektiğini göstermektedir. Bu durum, tüm paydaşların ve ilgili tarafların tercih edilen çözüme etkin olarak katılımının sağlanması için gereklidir. İklim değişikliğinin olası etkilerinin geniş çeşitliliği göz önüne alındığında yeni bir baraj inşa etmek, rezervuar kapasitesini artırmak veya daha büyük bir dolusavak inşa etmek gibi “teknik çözümü” tek yöntem olarak görmek uygun değildir. Bu yaklaşım uzun yıllar geçerli olmasına karşın iklim değişikliğinin getirdiği belirsizlik ve sorunlara ilişkin değişkenler, çözüm seçiminde esneklik sağlayabilmek için yapısal iyileştirmeler ile işlevsel değişikliklerin birlikte dikkate alınmasının daha faydalı olduğunu göstermektedir.

4.1. Uyarılama yapılıp yapılmayacağına karar vermek için analiz süreci

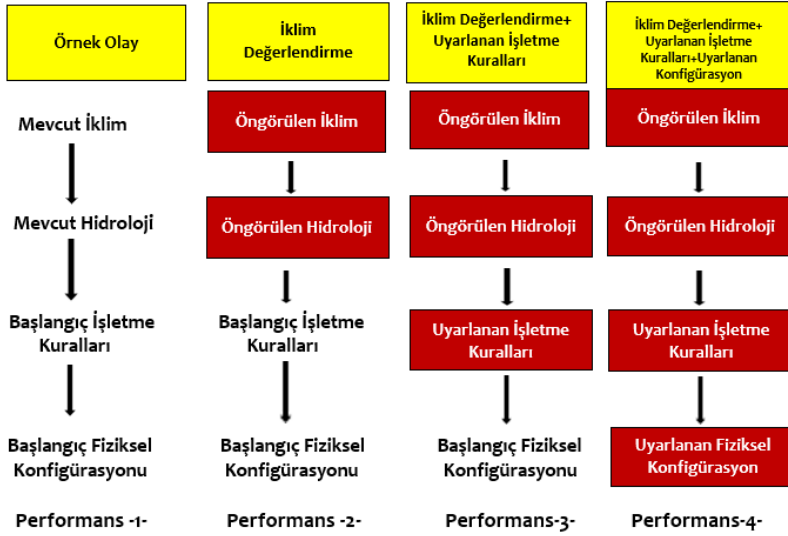
Herhangi bir uyarılama öncesinde belirli bir baraj ve rezervuar sistemi için potansiyel iklim değişikliği etkileri ve uyarılamanın sağlayabileceği faydalar araştırılmalıdır. Bu durum, sistemin farklı iklim senaryoları altındaki performansının incelenmesiyle gerçekleştirilir. Analiz süreci ve tasarımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Uyarılamanın önemini değerlendirmek amacıyla yapılacak (sanal veya sayısal) analiz sistemin bilinen performansını yeni hidro-iklim koşulları altındaki performansla karşılaştırmayı içermektedir. Bu kapsamda dört farklı durum incelenebilir (Roy vd., 2008):

1. Mevcut ekipmanın performansını değerlendirmek (performans 1)
2. İşletme kurallarını veya ekipmanın fiziksel yapısını değiştirmeden yeni hidro-iklimsel koşullar altında ekipman performansını değerlendirmek (performans 2)
3. Ekipmanın fiziksel yapısını değiştirmeden yeni hidro-iklimsel koşullar ve iyileştirilmiş işletme kuralları altında ekipman performansını değerlendirmek (performans 3)
4. Yeni hidro-iklimsel koşullar altında hem iyileştirilmiş işletme kuralları hem de uyarlanmış ekipman fiziksel yapısı altında ekipman performansını değerlendirmek (performans 4)

Herhangi bir fonksiyonel veya yapısal uyarılama önleminin sağladığı faydalar, 1 ila 4 arasındaki performanslar karşılaştırılarak değerlendirilebilir. Dört durumda su yönetim sistemindeki iklim kaynaklı değişiklikleri, sistem performansını etkileyen iklim dışı faktörlerden açıkça ayırmak için titizlikle hareket edilmelidir. Burada, su kaynakları sistemlerine iklim değişikliği etkilerinin analizini gerçekleştirmek için genel bir çerçeve sunulmaktadır. Oldukça basit ve düşük maliyetli analizlerden, daha pahalı ve karmaşık olanlara kadar farklı bilinen ve geliştirilmiş yöntemler tanıtılacaktır. Daha basit yöntemler, sadece sınırlı bilgi mevcut olduğunda, etkilerin geniş bir değerlendirmesi yeterli olduğunda veya başarısızlık riski önemli hasarlarla ilişkili olmadığında dikkate alınmalıdır. Daha kapsamlı ve karmaşık yöntemler, daha fazla iklimsel ve hidrolojik bilgiye erişimi olan ve/veya risk altındaki büyük hidrolik altyapılarla ilgilenen kullanıcılar tarafından tercih edilmelidir. Ancak, daha karmaşık işlemler genellikle daha yüksek belirsizlik içermekte; bu nedenle, mevcut olsa bile, daha basit yaklaşımlar hâlâ etkili olduğu için dikkate alınmalıdır.

Barajların/rezervuarların iklim duyarlılığını analiz etmenin en basit ve erişilebilir yöntemi, "eğer şöyle olursa" senaryolarına dayanmaktadır. Bu yaklaşıma göre iklim ve hidrolojik senaryolar tarihsel veri analizlerinden (özellikle olağandışı koşullar veya bozulmuş gözlemler için) veya mevcut genel sirkülasyon modellerinden (GCM'ler) alınabilir. Uygun olduğunda, küresel iklim

modeli çıktısının dinamik, ampirik veya istatistiksel ölçeklendirilmesini içeren daha doğru yöntemler de kullanılmalıdır. İklim modelleri, arazi yüzeyindeki hidrolojik döngünün modellenmesini içerdiğinden kaba çözünürlük ve potansiyel sapmalar göz önünde bulundurularak iklim simülasyonlarından doğrudan alınan akış verileri kullanılabilir. Bölgesel İklim Modelleri (RCM) mevcut olduğunda daha yüksek çözünürlüklü simülasyonlar sağlanabilir. Uygun durumlarda, iklim değişikliğinin bölgesel ve yerel ölçeklerdeki etkilerini simüle etmek amacıyla hidrolojik modeller kullanılmalıdır. Bu durumda, iklim model bilgileri hidrolojik modelleme ölçeklerine uyarlanmalıdır. Gelecekteki koşullar için simüle edilen hidrolojik model çıktıları potansiyel etkiler hakkında daha fazla bilgi sunarak su yönetimi modellerine girdi olarak kullanılabilir. Beklenen etkiler önemli büyüklükteyse, bu bilgiler herhangi bir hidrolik yapının tasarımı veya işletmesini uyarlamak için kullanılabilir. Etkiler önemsiz olduğunda uyarlama gerekli değildir.



Şekil 1. Uyumun faydalarını nicelleştiren analiz tasarımının gösterimi (Roy vd., 2008)

4.2. Teknik ve yapısal uyum önlemleri

İklim değişikliğine uyum, iklim değişkenliği ve iklim değişikliğiyle ilişkili zararların azaltılmasını ve faydaların anlaşılmasını sağlayan bir süreç olarak tanımlanabilir (Smit ve Pilifosova, 2003). Değişen iklim koşullarına uyum sağlamak için çok sayıda strateji olmasına karşın, sistemin uyum kapasitesi, önerilen uyum stratejisinin etkinliğini belirlemektedir. Ayrıca, uyum stratejileri üç ana başlık altında sınıflandırılabilir: a) politika, planlama ve değerlendirme, b) tasarım ve inşaat, c) baraj ve rezervuarların işletme ve bakımı.

Bir rezervuarın işletmesini değiştirmeye yönelik uyum seçenekleri, iklim değişikliğinin bazı barajlar ve rezervuarlar üzerindeki etkisini hafifletme potansiyeline sahiptir. Rezervuar işletmesi için kapsamlı bir modelleme çerçevesinin uygulanması belirli bir iklim senaryosu için uyum önlemlerinin etkinliğini anlamaya yardımcı olabilir. Bu tür modellere örnek olarak, VMod bölgesel hidrolojik modeli (Lauri vd., 2012), LPJmL küresel hidrolojik modeli (Biemans vd., 2013), Hidrolojik Simülasyon Programı Fortran (HSPF) (Donigian vd., 1995), Tarımsal Noktasal Olmayan Kaynak Kirliliği Modeli (AGNPS) (Young vd., 1989), Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) (Douglas-Mankin vd., 2010) verilebilir. Yasarer ve Sturm, (2016), iklim değişikliğinin rezervuarlar üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel araçları özetlemektedir.

Feldbauer vd. (2020), hidro-fiziksel Genel Göl Modeli'ni kullanarak, bir rezervuarın su çekme oranının veya depolanan hacminin su sıcaklığının zamansal ve mekansal değişimini etkilediğini belirlemiştir. Ayrıca, bu çalışma, su çekme yöntem etkinliğinin su çekme oranına ve mansaba bırakılan suya bağlı olduğunu tespit etmiştir. Bu nedenle, etkili bir su çekme stratejisinin uyarlanması, bir rezervuarda en iyi termal tabakalaşmayı sağlayabilir ve iklim değişikliği nedeniyle su kalitesinin bozulmasını en aza indirebilir. Gopalan vd. (2020), barajlar ve rezervuarlar için iklim değişikliğine yönelik uyarlanabilir stratejileri belirlemek amacıyla hidrolojik modellerin uygulanmasına ilişkin önceki çalışmaları tartışmıştır. Bununla birlikte, sınırlı veriyle yapılan çalışmalar, rezervuar işletme planları ve yeni uyarlanabilir planların karmaşık olması nedeniyle hidrolojik modellerin iklim değişikliğine yönelik uyarlanabilir önlemleri anlamada bir araç olarak uygulanmasını engelleyebilir.

Son dönemde inşa edilen barajların çoğunda benimsenen tasarım kriterleri iklim değişikliğine bağlı olarak değişen akış rejimlerine dayanamayacaktır. Bu nedenle, farklı uyum stratejilerini göz önünde bulundurmak önemlidir; baraj işletmesiyle ağaçlandırmanın birleşimi etkili bir uyum stratejisi olabilir. Ayrıca, değiştirilmiş yapıların uyumu veya rehabilitasyonu barajları ve rezervuarları iklim değişikliğine uyarlayacaktır (Gopalan vd., 2020; Koç, 2025). Tarımsal amaçlı barajların gövde yüksekliğinin artırılması kurak mevsimlerde gerekli su miktarını güvenli bir şekilde sağlamak için Kore Hükümeti tarafından 2009 yılında uygulanmıştır (Lee ve Shin, 2021). Baraj işletmesi için kapsamlı bir modelleme çerçevesinin uygulanması, belirli bir iklim senaryosu altında etkili uyum önlemlerini anlamaya yardımcı olabilir

Gelecekteki esnekliği sağlamak için tasarım standartları, aşırı su seviyesi dalgalanmaları nedeniyle dolguların artan erozyonunu, aşırı yağışlı ve sıcak havalarda meydana gelen erozyon gibi fiziksel değişiklikleri önlemek amacıyla aşınmaya dayanıklı yapılar (örneğin, beton veya duvarcılık) olmalıdır. Ayrıca, beton derzleri, agregalar ve türetilmiş ürünler gibi inşaat malzemelerinin seçimi, özellikle UV radyasyonu ve yüksek sıcaklıkların neden olduğu yaşlanma ile iklim değişikliğinin kanıtlanmış etkilerini dikkate alınmalıdır (Atkins, 2013).

Sedimentasyon sorunuyla ilgili olarak taşkın riski taşıyan rezervuarlarda sediment uzaklaştırma için maliyet etkin çerçevelerin göz önünde bulundurulması önemlidir. ABD Su Kaynakları Yönetimi Bürosu ve işbirlikçileri, rezervuarın işletme hedeflerini koruyarak maliyet etkin çözümler sunan yeni veya geliştirilmiş rezervuar sediment uzaklaştırma ve taşıma tekniklerini araştırmaktadır (ABD Su Kaynakları Yönetimi Bürosu, 2022). Rezervuar ıslahına örnek olarak rezervuarlardan sediment uzaklaştırabilen otonom bir gemi veya sediment ve daha büyük molozları işleyebilen bir tarama teknolojisinin kullanılması gösterilebilir (WEDA, 2021). Ayrıca, PMP'den elde edilen dolusavak tasarım tahminlerinin iklimsel aşırılıklar göz önünde bulundularak yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu süreç, dolusavak tasarımının iyileştirilmesini ve optimize edilmesini içermektedir (Adamo vd., 2020). Örneğin, Höljes Barajı'nın dolusavak tasarım kapasitesi beklenen deşarj artışını karşılamak amacıyla artırılmıştır (Yang vd., 2019). Gelecekteki su altyapı tasarımlarında ekosistem ve su kalitesi göz önünde bulundularak rezervuar kapasitesi ve işletme modelleri tahmin edilirken iklim projeksiyonlarının yanı sıra en kötü senaryo da dikkate alınmalıdır. Uyarlanabilir baraj tasarımı ve en iyi yönetim uygulamaları esnek olmalı, su temini, afet riskinin azaltılması ve ekolojik hususlar arasında iyi bir denge kurmalıdır (MacTavish, 2022).

Yapısal uyum önlemleri, iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmek için mevcut projelerde fiziksel değişikliklerin yapılmasını veya yeni altyapıların inşa edilmesini içerecektir. Bazı durumlarda, bu önlemler, çalışmaların işlevselliğini, güvenliğini ve etkinliğini korumak ve öngörülen iklim değişikliğinin etkileri ışığında orijinal tasarım kriterlerini karşılamak için uygulanmaktadır. Ayrıca, yapısal değişikliklerin sadece iklim değişikliğinden kaynaklanan olumsuz etkileri hafifletmekle kalmayıp performansı da iyileştirmesi beklenmektedir. İklim değişikliğinin gelecekte beklenen olası etkilerini karşılamak amacıyla yeni projelere fiziksel özellikler eklemenin ekonomik yönden kabul edilebilirliği zor olmasına karşın, özellikle projenin aksi durumda beklentileri karşılamama riskinin kabul edilemez düzeyde olduğunda yine de dikkate alınması gerekecektir. Bunun pratik bir örneği, akışlarda artan değişkenliği ortadan kaldırmak, pik ya da düşük giriş akışlarını azaltmaya katkıda bulunmak amacıyla

yukarı havzada depolama kapasitesinin artırılması veya su akışının yönlendirilmesidir. İklim değişikliğine hazırlık veya kademeli uyum sağlamak amacıyla uygulanabilecek potansiyel yapısal önlemler aşağıda sıralanmıştır (Roy vd., 2008):

- Taşkın yönetimi ve su tahliye gereksinimlerini karşılamak amacıyla su kontrol kapaklarının sayısını ve tipini değiştirmek,
- Taşkın savaklarının kapasitesini artırmak ve/veya acil durum savakları eklemek,
- Taşkın piklerinin daha iyi düzenlenebilmesi amacıyla serbest akışlı taşkın savaklarına kontrol edilebilir kapaklar eklemek,
- Su transferi için kullanılan kanalların veya tünellerin boyutlarını değiştirmek,
- Yukarı havzada yeni depolama rezervuarları inşa etmek ve yeni rezervuar projelerinin çok amaçlı potansiyelini yeniden değerlendirmek,
- Depolama barajının yüksekliğini artırarak ve/veya taşkın savaklarının eşik seviyesini yükselterek rezervuarların aktif depolama kapasitesini değiştirmek,
- Taşkın yükselmesi ve dalga yükü değerlerinde öngörülen artışları karşılamak amacıyla maksimum su kotunun üzerindeki serbest yükseklik miktarını artırmak,
- Dalgalardan kaynaklanan artan dinamik yükleme altında yeterli erozyon koruması sağlamak için menba yönündeki yamaç koruma yapılarını (örneğin taş dolgu) değiştirmek veya güçlendirmek,

Bu yapısal değişiklikler, her çeşit baraj ve rezervuar projesine uygulanabilir ve çoğu su kaynakları yöneticisi ve mühendisi, olası maliyetler, teknik zorluklar ve elde edilebilecek faydalar gibi unsurlar açısından bu tür fiziksel müdahalelere oldukça aşina olacaktır. Ayrıca, iklim değişikliği kaynaklı projelerle ilişkili belirsizlikler, kaçınılmaz olarak tüm bu yönlerle ek bir belirsizlik katacaktır. Kesin olan bir şey, gelecekte değiştirme, uyarlama ve dönüştürme ihtiyacının artacağıdır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için yeni barajların tasarımı da dahil olmak üzere yapısal müdahalelerin, gerekirse projeye daha sonra ek savaklar veya diğer fiziksel bileşenlerin ilave edilebileceği şekilde planlanması ve uygulanması gerekecektir.

4.3. İşlevsel uyum önlemleri

İşletmelerde yapılan fiziksel değişikliklerin aksine işlevsel veya yapısal olmayan araçlar, işletme politikalarında yapılan değişikliklerdir. Bu önlemler,

projenin yapısal bileşiminde ve boyutlarında herhangi bir değişiklik yapılmadan tek başlarına uygulanabilir; ancak diğer durumlarda, yapısal ve yapısal olmayan uyumların optimal bir dengesi iklim değişikliğinin ihtiyaçlarını karşılamada en uygun yolu olabilir. Uygulanabilecek işlevsel eylemler aşağıda sıralanmıştır (ICOLD, 2016; Roy vd., 2008; Koç, 2003; 2015).

- Aşırı hidrolojik olayların üstesinden gelmek için uygun önlemlerin geliştirilmesi ve uygulanması, hidrolojik tahmin araçlarının geliştirilmesi veya iyileştirilmesi,
- Projelerin performansını değerlendirmek ve değiştirilmiş iklim koşulları altında yeni işletme yöntemlerini belirlemek amacıyla teknolojilerin geliştirilmesi,
- Artırılmış bir taşkın depolama tamponu (hacmi) sağlamak amacıyla, revize edilmiş rezervuar seviye sınırları gibi işletme kurallarında değişikliklerin yapılması,
- Projenin belirli bileşenlerinin işlevsel gereksinimlerinde değişiklik yapılması,
- Elektrik, enerji veya su fiyatlarında değişikliklerin yapılması sulama, endüstri ve diğer tüketim faaliyetleri için su teminini etkileyebilir,
- Projenin havza içindeki diğer su kullanımlarıyla daha iyi koordine edilmesi,
- Çeşitli hidroelektrik projelerinin etkileşimini ve birden fazla havzayı içeren karmaşık sistemlerin birlikte işletilmesini koordine etmek için kullanılan teknolojilerin geliştirilmesi,
- Rekreasyon, sulama, içme suyu temini ve endüstriyel su çekimini etkileyen kuralların değiştirilmesi,
- Çeşitli paydaşlar tarafından kullanılan iletişim ve karar alma süreçlerinin iyileştirilmesi,
- Bir havza içinde yer alan farklı su kullanıcıları üzerine iklim değişikliğinin etkilerini belirlemeye yönelik çalışmaların yürütülmesi,
- Yeni işletme stratejileri geliştirmek ve uygulamakla görevli düzenleyici kurumların oluşturulması,
- İklim değişikliğinin etkileri konusunda vatandaşları bilgilendirmeyi amaçlayan eğitim çalışmalarının teşvik edilmesi; bu etkileri hafifletecek, barajlar ve rezervuarlar üzerindeki olumsuz etkileri azaltacak uyarlanabilir önlemlerin ortaya konma beklentisinin artırılması,

- Bir havza içindeki farklı su kullanıcıları arasında uygun işbirliğini sağlamak için geliştirilmiş yaklaşımların ortaya konması,
- Su havzasının işleyişini etkileyen çeşitli hükümetler, paydaşlar ve diğer kuruluşlar arasındaki yasal anlaşmalarda yapılacak değişiklikler,
- İklim değişikliklerinin etkisini değerlendirmek için matematiksel modellerin geliştirilmesi,
- Taşkın riski taşıyan bölgelerde arazi gelişimi ve değişikliğinin sınırlandırılması,
- Yapısal olmayan uyarlamaların yapısal değişiklik önerileriyle birlikte dikkate alınması için tasarım sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilen mühendislik tasarım uygulamalarında değişikliklerin yapılması,

4.4. Planlama kavramını geliştirme fırsatları

Geleneksel tasarım taşkın tahmin yöntemlerinin yakın vadeli iklim projeksiyonlarını içerecek şekilde revize edilmesi giderek daha gerekli hale gelmektedir, ancak bu projeksiyonlardaki belirsizlikler nedeniyle bu süreç hala zorlu olmaya devam etmektedir. Ayrıca, genellikle 100 yıldan daha uzun olan tasarım ömürleri veri kıtlığı yaşanan bölgelerde bulunan barajlar için güvenilir taşkın tahminleri yapmayı zorlaştırmaktadır. Buna karşılık, Wasko vd. (2021), bu tür karmaşık bağlamlarda yalnızca geleneksel tasarım taşkınlarına dayanmayan alternatif yaklaşımların kullanılmasını önermektedir.

Merkezi bir sorun, iklim değişikliği altında taşkın tahminine yönelik standart yöntemler konusunda fikir birliğinin olmamasıdır. Baraj güvenliği yönergeleri ise ülke veya yargı yetkisine bağlı olarak önemli ölçüde farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Kore'deki tarımsal rezervuarlarda gövdenin yükseltilmesi gelecekteki iklim senaryolarını tam olarak hesaba katmamaktadır (Lee ve Shin, 2021). Bu durum, baraj yapılarında ve yönetim uygulamalarında yapılan değişiklikler de dahil olmak üzere mevcut tasarım yönergelerinin, değişen iklim koşullarını ele almada yeterince standartlaşmadığını göstermektedir.

Bazı kurumlar, iklim değişikliği senaryolarını ve güncellenmiş risk bileşenlerini içeren daha dirençli karar alma kılavuzları geliştirmekte ve uygulamaktadır. İklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki etkilerini inceleyen önemli miktarda araştırma yapılmış olmasına karşın, baraj güvenliğine yönelik pratik uygulamalar sınırlı kalmaktadır. Ayrıca, uyum planları belirli bir idari bölgeyle sınırlı kalmamalı, daha geniş bir etkinlik sağlamak için ulusal düzeydeki uyum stratejilerine ve politikalara entegre edilmelidir.

Wasko vd. (2021), tasarım taşkın tahmini karar verme sürecindeki belirsizlikleri ele almak için tasarlanmış çeşitli yöntemleri özetlemiştir; bunlar arasında a) standart tabanlı, b) risk tabanlı, c) sağlam ve d) uyarlanabilir yaklaşımlar yer almaktadır. Baraj ve rezervuarların tasarım ömrü boyunca ve herhangi bir büyük yapısal değişiklik sırasında bu yöntemlerin düzenli olarak gözden geçirilmesi değişen iklim koşullarıyla ilgili önemli belirsizlikleri en aza indirmeye yardımcı olabilir. Potansiyel gözden geçirme süreçleri; a) fiziksel akıl yürütmeye dayalı sezgisel yaklaşımlar, b) tarihsel verilere dayalı projeksiyonlar ve c) küresel iklim modellerine dayalı projeksiyonlar, olarak sıralanmaktadır. En uygun taşkın tahmin tekniğinin seçilmesi de aynı derecede önemlidir. Wasko vd. (2021), a) taşkın sıklığı analizi, b) yoğunluk-süre-sıklık eğrilerini kullanan olay tabanlı yaklaşımlar, c) sürekli simülasyon ve d) olası maksimum yağış gibi yaklaşımları önermektedir.

Ayrıca, Wasko vd. (2021), kesin olarak ölçülmesi zor olmasına karşın belirsizliklerin açıkça kabul edilmesini önermektedir. Olası sonuçların güvenilir bir aralığında duyarlılık testi, araştırmacıların ve uygulayıcıların taşkın tahminlerinde çeşitli parametrelerin veya varsayımların etkilerini incelemelerini sağlayan değerli bir uygulamadır. Bu tür duyarlılık analizleri, çeşitli iklim modellerinden veya yollarından elde edilen 'yüksek' ve 'düşük' projeksiyonlar da dahil olmak üzere birden fazla olası senaryo dikkate alınarak gerçekleştirilir.

Yeni baraj ve rezervuarların tasarımında, iklimsel toleransların uygulanması, gelecekteki iklim koşullarının üstesinden gelmek için kritik öneme sahiptir. Örneğin, Birleşik Krallık'ta, tasarımcılar 2060 yılından sonra hizmet vermesi beklenen barajların planlanmasında merkezi toleransları hesaba katmakta, 2100 yılından sonra dayanacak yapılar için taşkın risk değerlendirmesinde yıllık %1 aşım olasılığı olayında üst sınır toleranslarını içermektedir (Birleşik Krallık Hükümeti, 2016). Bu strateji, kırılganlıkları azaltacak ve taşkın direncini artıracaktır. Ayrıca, Birleşik Krallık Çevre Ajansı, iklim değişikliği etkilerine karşı korunmak amacıyla savak tasarımlarında tasarım taşkın hacminde %20'lik bir artış gerektirmektedir (Atkins, 2013).

Avustralya'da, güncellenmiş Yoğunluk-Sıklık-Süre (IFD) eğrileri ve iklim modeli tabanlı belirsizlik değerlendirmeleri olay bazlı tasarım taşkın tahminlerini bilgilendirmek için kullanılmaktadır. Baraj ve sedde yapımına yönelik uyarlanabilir bir yaklaşım giderek daha fazla ilgi görmekte; bu yaklaşım, sedde temellerine ek kapasite eklenmesi ve gelecekteki sedde yükseltme veya genişletmeyi kolaylaştırmak amacıyla nehir kıyısı koridorlarının genişletilmesiyle örneklendirilmektedir. Bazı projeler, taşkın riskinin yıllık %1'lik aşılma olasılığı seviyesinde koruma sağlamak için bu önlemleri zaten içermektedir (Ball vd., 2019).

4.5. İleriye yönelik bir yol haritası için araştırma gündemi

Barajlar ve rezervuarlar üzerine gelecekteki iklim değişikliği etkilerine uyum sağlamak ve bu etkileri azaltmak için sürekli ve zamanında araştırma yapmak çok önemlidir. Araştırma, barajlar ve rezervuarlarda iklim direncine ilişkin bilgiyi iletmeli ve bu süreç sistematik olarak yürütülmelidir. Çoğu çalışma, yalnızca iklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki doğrudan etkilerine odaklanarak baraj güvenliğini ayrı bir şekilde değerlendirmiştir. Bu nedenle, barajlar ve rezervuarlar üzerindeki etkilerin çok disiplinli analizlerinin yapılması önerilmektedir.

Kentleşmeyle ilişkili sorunların dolaylı etkileri üzerine yapılan araştırmalarda, arazi kullanım değişikliği, kirlilik, nehir kıyısı işgali gibi faktörler eş zamanlı olarak ele alınmalıdır. Çünkü insan faaliyetleri, değişen iklimin etkisini hızlandırabilir (Koç, 2025a; 2025b). Atmosferik ve okyanus dolaşimleri arasındaki tele bağlantılar, iklim araştırmalarını ve tahminlerini radar teknolojilerini kullanan dağıtılmış hidrolojik modellerle birleştirerek, barajların ve rezervuarların iklim değişikliğine karşı direncini artırmaya yönelik yeni bulgular geliştirebilir. Baraj ve rezervuarların dinamik taşkın kontrolü ve yapay zekâ tabanlı işletimi üzerine yapılan araştırmalar, iklim değişikliğinin barajlar ve rezervuarlar üzerindeki etkilerini azaltmanın bir başka yaklaşımı olabilir.

Ho vd. (2017), ABD'deki barajlar ve rezervuarlar için etkili ve verimli bir araştırma gündemi önerdi. Bu gündem, ABD'deki barajlar ve rezervuarlar için iklim kaynaklı taşkın ve kuraklık risklerini yönetmeye yönelik çeşitli stratejiler içermektedir. En önemlisi, gündem iklim değişikliği senaryolarının analizini, su tasarrufuna yönelik kurumsal yönleri ve suyun yanı sıra ilgili altyapıların güvenilir yönetimini ele almaktadır.

Güncel ve gelecekteki projeler, genellikle 20 veya 50 yıl öncesine ait projelerden farklıdır. Ortaya çıkan fikirler arasında, bazıları özellikle uyum açısından önemlidir. Nehir dışı su depolama, sedimantasyon, sürdürülebilirlik ve buharlaşma (daha büyük ortalama rezervuar derinliklerine sahip olmak mümkün olduğu için) açısından ilginç bir kavramdır. Bu tür bir çözüm, tüm topografik ve hidrolojik bağlamlarda uygun olmayabilir, ancak çeşitli kullanımlar için dünya çapında giderek daha yaygın hale gelmektedir (Koç, 2025b)

Rezervuarlar, yerçekimi veya pompaj ile beslenir; bu durum, sediment sorunlarını önemli ölçüde sınırlandırır ve ana su yolundaki bariyer etkisini azaltır. Ayrıca, daha düşük sosyal ve çevresel etkiye sahip alanlarda inşa edilebilirler. Rezervuarı çevreleyen baraj, havzanın kendisinden çıkarılan malzemeler kullanılarak inşa edilebilir. Önemli bir konu, havzanın su geçirmezliği olup, her durumda dikkatli bir değerlendirme yapılmasını gerektirir. Pompaj depolamalı

hidroelektrik santralleri, bu depolama seçeneğini yaygın ve başarılı bir şekilde kullanmaktadır. Su yalıtım çözümleri gelişmektedir. Geçmişte neredeyse sistematik olarak bitümlü beton kaplamalar kullanılırken, birçok büyük projede artık açıkta kalan jeomembranlar tercih edilmektedir. Güneş ve rüzgar enerjisinin artan yaygınlığı, bu tür yapıların inşasını teşvik edecektir. Bu durum, önemli yükseklik farkları olmayan ülkeler için düşük debili pompaj depolamalı santrallerin, adalar ve muhtemelen kıtasal kıyı bölgeleri için kıyı pompaj depolamalı santrallerin uygulanmasını gündeme getirmektedir.

Hidroelektrik enerjisinin güneş enerjisiyle entegrasyonu giderek daha ileriye gitmektedir. Hidro ve güneş enerjisinin birleşimi, yeni fırsatlar sunmaktadır. Son yıllarda, baraj rezervuarlarına yüzer güneş panelleri yerleştirme projeleri gündeme gelmiştir. Güneş enerjisi, mevcut su yüzeyinden ve hidroelektrik barajlar söz konusu olduğunda mevcut trafo merkezlerinden ve iletim hatlarından faydalanmaktadır. Bu projeler, oldukça az sayıda olsa da, yüzer güneş adalarının demirlenmesi ve baraj güvenliği üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesiyle ilgili yeni teknik zorluklar ortaya çıkarmaktadır.

Sadece rezervuar alanını ve iletim altyapısını paylaşmanın ötesinde, hidro-güneş hibritleşmesi, güvenilir ve bol miktarda yenilenebilir enerji üretmek için yeni yaklaşımlara yol açabilmektedir. Tam Güneş Hidro (FSH) formunda, hidro-güneş teknolojisi, su kaynaklarına bağımlı olmayan, kontrol edilebilir bir yenilenebilir enerji santralinin geliştirilmesini sağlayarak, termik santrallere önemli bir alternatif sunmaktadır. Yüksek Hibrit Güneş Hidro (HhSH) versiyonu ise elektrik üretiminde herhangi bir kayıp olmaksızın su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltarak, mevcut ve gelecekteki rezervuarların çok amaçlı kullanım potansiyelini artırmaktadır.

Yeraltı suyu depolama, bazı yerlerde alüvyal akiferlerde yüzey altı depolama veya uygun kaya oluşumlarında derin depolama için zaten uygulanmış eski bir kavramdır. Günümüzde, bu depolama yönteminin daha da genişletilip genişletilemeyeceği sorusu gündeme gelmektedir. Ön analizler, uygulanabilirliğinin sınırlı olabileceğini göstermektedir, ancak daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Daha geniş bir konu ise denizin rolüdür. Tatlı su kıtlığıyla karşı karşıya olan birçok ülkede deniz suyu arıtma zaten bir gerçeklik haline gelmiştir. Japonya'da deniz suyu kullanan bir pompaj depolama tesisi inşa edilmiş ve 20 yıldır işletilmektedir; diğer projeler ise incelenmektedir. Yeni açık deniz havza projeleri, gelgit enerjisi üretimi veya elektrik depolama için değerlendirilmektedir. Denizin su altında bırakmasına karşı koruma sağlamak için binlerce kilometre set inşa edilmiştir ve bu yapıların önümüzdeki on yıllarda

yükselen deniz seviyelerine yanıt olarak uyarlanması gerekecektir. Kıyı nüfusunu koruma ihtiyacı giderek daha kritik hale gelecektir.

4.6. Baraj ve rezervuarların iklim değişikliği karşısındaki eksiklikleri ve potansiyel araştırma yönleri

İklim değişikliği belirsizliğinin nicelleştirilmesi: Geleceğe yönelik iklim verilerinin projeksiyonlarıyla ilişkili belirsizlik, özellikle buz oluşumu ve taşkın gibi birden fazla iklim değişkenini içeren bileşik parametreler için önemli ölçüde fazla olabilir. İklim projeksiyonlarındaki belirsizlikler nedeniyle, özellikle uzun vadeli planlama ufuklarında, iklim değişikliğinin barajlar gibi su kaynakları altyapısı üzerindeki etkilerini nicelleştirmek oldukça zordur. İklim değişikliği belirsizliğinin nicelleştirilmesi ve her bir belirsizlik kaynağının payı, daha fazla incelenmesi gereken boşluklar olarak belirlenmektedir.

Giriş ve çıkış akışlarını tahmin etme araçları: Baraj işletme planlaması büyük ölçüde giriş ve çıkış akışlarının tahminine dayanır ve her iki faktör de değişen iklimden etkilenir. Operatörlerin, iklim değişikliğini hesaba katarak sağlam bir giriş ve çıkış akışı tahmini yapmalarını sağlayacak bir araca erişimi, kısa vadeli (yani günlük) karar alma süreçlerinde uzun vadeli eğilimlerin dikkate alınmasına olanak tanıyabilir (Koç, 2018).

İşletme optimizasyonu: Bir barajın giriş ve çıkış akımlarındaki değişiklikler, farklı baraj işletme yaklaşımlarına yol açar. Bakım programı, su tahsisi, sediment yıkama programı ve türbin işletmeleri bu değişikliklerden etkilenir. Beklenen yağış ve sıcaklıkta meydana gelen birim değişikliklerine dayalı olarak bu etkilerin nicelleştirilmesi, iklim değişikliğiyle ilişkili riskleri en aza indirmeye yardımcı olacaktır (Koç, 2015). Buradaki temel amaç, model simülasyonu yoluyla çeşitli iklim senaryoları (yağış ve sıcaklık açısından) üretmek ve bunları, çeşitli baraj işletme ve su tahsisi gereksinimlerini hesaba katarak, son teknoloji ürünü çok amaçlı bir optimizasyon modeliyle birleştirmektir. Bu araç, yukarıda açıklanan giriş ve çıkış tahmin aracıyla birlikte, değişen iklimle ilişkili belirsizlikleri hesaba katarak, iklim değişikliğinin çeşitli baraj işletme gereksinimleri üzerindeki etkisini nicelleştirebilir.

Buzlanma ve kırılma olaylarının yönetimi için kılavuz: Soğuk iklim bölgelerinde rezervuarların ve göllerin her yıl donması beklenir, ancak bu olaylar sırasında barajların nasıl yönetileceğine dair herhangi bir kılavuz bulunmamaktadır. Isınan iklim, bu donma olaylarının sıklığını artıracaktır. Bu nedenle, buzlanma ve kırılmaların çeşitli baraj operasyonları ve barajların yapısal bütünlüğü üzerindeki etkisini ölçmek, baraj sahipleri ve işletmecilerine genel kılavuzlar sağlamak, bu olaylar sırasında barajların yönetimine yardımcı olabilir.

Entegre bir su kalitesi modelinin geliştirilmesi: Sıklığı ve yoğunluğu artması beklenen iklim olayları, baraj rezervuarı su kalitesi ve baraj içindeki sucul yaşam alanı üzerinde farklı etkilere sahiptir. Özellikle, belirli koşullar altında, bazı rezervuar özellikleri, rezervuarın su kalitesi sorunlarına karşı savunmasızlığını artırmaktadır. Gelecekteki çalışmalar için literatür incelemesine dayalı entegre bir su kalitesi modelinin geliştirilmesi amacıyla uygun bir baraj rezervuarının seçilmesi önerilmektedir. Geliştirilen model, gelecekteki çeşitli iklim senaryoları altında bir baraj rezervuarındaki su kalitesi üzerindeki iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde faydalı olabilir. Model, rezervuarların fiziksel özelliklerine ve havza özelliklerine bağlı olarak diğer rezervuarlara da genişletilebilir.

Uydu tabanlı baraj izleme: Baraj emniyetini izleme, barajın hizmet ömrü boyunca güvenlik koşullarını sağlamak ve işlevlerini sürdürebilmek açısından vazgeçilmez bir araçtır. Birçok baraj, yerleşim yerlerinden uzakta yer aldığı için özellikle kış aylarında geleneksel ölçüm ekipleri için erişilmesi zor olabilmektedir. Uydu tabanlı izleme teknikleri bu soruna çözüm sunabilir, ancak yüzey yer değiştirmelerini ölçmek için tek veri kaynağı olarak uzaydan gelen gözlemlere güvenmek için henüz oldukça erkendir. Bu nedenle, InSar teknolojisinin baraj izleme pratiğinde uygunluğunu doğrulamak amacıyla kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır (Koç, 2018).

Risk değerlendirmesi: Barajın hizmet ömrü boyunca arıza riskini yönetmek, gerekli bir eylemdir. Ancak, mevcut baraj risk değerlendirme araçları iklim değişikliği unsurlarını içermemekte ve mevcut eksikliklere veya beklenen arıza modlarına göre hangi uyarlamaların yapılması gerektiği konusunda özel bir rehberlik sağlamamaktadır. İklim değişikliğinin etkilerinin farklılık göstermesi beklendiğinden, baraj sahipleri ve mühendisler için, barajın konumuna bağlı olarak arıza modlarını tahmin edebilmek faydalı olacaktır. Ayrıca, her bir eksikliği ve iklim değişikliğinin beklenen etkilerini ele almak için hangi uyarlamaların kullanılacağına dair bir çerçeve veya öneriler sunmak da faydalı olacaktır.

Beton barajların yapısal stabilitesi ve bütünlüğü: Bugüne kadar iklim değişikliğinin hidrolik yapılar üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Ancak, birçok çalışma yalnızca iklim değişikliği sorununun hidrolojik yönleri üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Değişen iklimin etkileri, günümüzde işletilen beton barajların tasarım aşamasında dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, artan sıcaklık ve yoğun yağışların bozulma mekanizmaları (örneğin alkali-silika reaksiyonları nedeniyle beton şişmesi), mevcut baraj güvenliğinin stabilitesi ve yapısal bütünlüğü üzerindeki etkileri hâlâ belirsizdir. Bu bağlamda,

iklim değişikliğinin beton barajların stabilitesi ve bütünlüğü üzerindeki etkilerini hafifletmek için uyarlanabilir ve önleyici çözümlerin incelenmesi önemlidir.

Beton barajların bozulmasında potansiyel hızlanmanın değerlendirilmesi ve önleyici tedbirler: İklim değişikliğinin, beton altyapısının bozulmasında artışa yol açması beklenmektedir, ancak iklim değişikliğinin beton barajlar üzerindeki etkisine ilişkin çok az araştırma bulunmaktadır. Alkali-silika reaktif agregalar içeren beton elemanların maruz kaldığı çevresel koşullar, reaksiyonun ilerlemesi, ortaya çıkışı ve hasarları belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Beton barajlar için ciddi bir sorun olan alkali-silika reaksiyonları, yüksek nem ve yüksek sıcaklıktan etkilenir. Alkali-silika reaksiyonlarıyla ilişkili hasarları değerlendirme yöntemlerinin yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Sıcaklık artışını dikkate almak için betondaki çimentonun bir kısmını değiştirmek amacıyla ek çimentolu malzemelerin kullanılması gibi önleyici yöntemlerin, mevcut ve yeni beton barajlar için değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, diğer bozulma mekanizmalarının (donma-çözölme döngüleri, karbonatlaşma, korozyon vb.) birleşik etkileri daha ayrıntılı olarak incelenmelidir.

Su boruları ve çelik kapakların korozyonu: İklim değişikliğinin, barajın çelik bileşenlerinin (çelik su boruları ve kapakları) korozyonunu nasıl etkileyebileceği belirsizdir. Bu elemanların korozyonu ve kusurları, barajın güvenli işletimi ve kullanımını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, iklim değişikliğinin barajın çelik bileşenleri üzerindeki etkilerini belirlemek önemli olacaktır.

Toprak dolgu barajların yapısal stabilitesi ve bütünlüğü: Bu konuyla ilgili olarak belirlenen başlıca eksiklikler sıralanmakta olup, Bunlar: (1) Toprağın etkin gerilmesindeki değişiklikler nedeniyle barajların sismik sınılaşmaya karşı hassasiyetinin artması; (2) Çeşitli iklim koşulları altında yeraltı suyu seviyelerindeki değişimleri tahmin etmek ve mevcut yamaçların gelecekteki iklim değişikliklerine karşı hassasiyetini değerlendirmek için yapay zeka algoritmalarına dayalı gelişmiş yöntemler geliştirilmesi ihtiyacı; (3) İklim değişikliği sonucu, yeni barajların ömrü boyunca ortaya çıkabilecek kritik koşulları belirleme ihtiyacı. İklim değişikliğinin gelecekteki etkileri (taşma veya artan yağış nedeniyle savaklarda oluşabilecek hasarlar), yeni barajların inşasından önce ve mevcut barajların güçlendirilmesi veya rehabilitasyon programlarının bir parçası olarak ele alınmalıdır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Barajlar, önemli miktarda suyu depolamak ve hidrolik yüklere dayanmak üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, su akışını etkileyen iklim değişikliği faktörlerinin barajları da etkilemesi beklenmektedir. Baraj işletmelerinde beklenmedik kesintiler önemli ekonomik kayıplara yol açabilirken, baraj arızaları

felaketlere neden olabilir. Tarihsel olarak, baraj tasarımı, yapımı ve işletimi, sabit iklimsel ve iklimsel olmayan koşullar varsayımıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak, günümüzün değişen ikliminde, sabit iklimsel temel çizgi varsayımları, uzun vadeli baraj tasarımı ve işletimi için artık uygun değildir. İklim Dirençli Barajlar (İDB), kamuya ait su barajlarının değişen iklimin olumsuz etkilerini azaltmak için uyarlanması yönelik teknolojilerin, prosedürlerin ve kılavuzların geliştirilmesine odaklanmaktadır.

Barajlar ve rezervuarlar uzun zamandır su depolamak ve artan talebi karşılamak amacıyla inşa edilmektedir, ancak iklim değişikliği bu altyapılar üzerinde yeni ve önemli baskılar yaratmıştır. Buna karşılık, araştırmacılar ve paydaşlar, barajların ve rezervuarların iklim direncini artıran uyum önlemlerini belirlemeye ve uygulamaya giderek daha fazla odaklanmaktadır. Bu uyum stratejileri genellikle, geleneksel, durağan yaklaşımlardan, belirsizliği açıkça ortaya koyan dinamik, durağan olmayan yöntemlere geçişi; artan sediment oranları, yapısal yaşlanma ve ekosistem etkileri gibi en kötü senaryoları hesaba katan kapsamlı risk değerlendirmeleri yapmayı; ve aşırı hava olaylarının artan sıklığına ve yoğunluğuna etkili bir şekilde yanıt verebilecek uyarlanabilir yönetim uygulamalarını içermektedir.

Umut vadeden çözümlere karşın, baraj ve rezervuarların değişen iklim koşullarına uyarlanmasının pratik zorlukları devam etmektedir. Bu engellerin aşılmasında kilit bir adım, iklim değişikliği tahminlerini baraj tasarımının, yapımının ve işletmesinin tüm yönlerine entegre eden, küresel olarak tanınan tek tip çerçevelerin oluşturulmasıdır. Sevindirici bir şekilde, birçok bölge ve kurum, hem ortaya çıkan araştırmaları hem de bölgeye özgü riskleri dikkate alarak yeni standartlar ve kılavuzlar geliştirmektedir. Mühendisler, politikacılar ve araştırmacılar arasında devam eden işbirliği, baraj ve rezervuarların artan iklim değişkenliği karşısında güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde çalışmaya devam etmesini sağlamak için kritik bir öneme sahiptir.

Baraj ve rezervuarların iklim değişikliğine karşı direncinin artırılabilmesi için bütüncül bir sistem yaklaşımının benimsenmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, nehir havzası ölçeğinde çoklu ihtiyaç ve hedefler dikkate alınmalı; risk temelli yaklaşımlar kullanılarak su kaynakları sisteminde hangi unsurların risk altında olduğu açık biçimde ortaya konulmalıdır. Ayrıca, su kullanımları ve gereksinimleri arasında önceliklendirme yapılmalı; özellikle, aşırı kurak dönemlerde doğal ekosistemlerin ve sağlıklı nehir sistemlerinin sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla çevresel su gereksinimi güvence altına alınmalıdır. Bunun yanı sıra, aşırı kurak veya aşırı yağışlı dönemlerden etkilenebilecek bağımlı toplulukların kritik insani ihtiyaçlarını karşılamak üzere yeterli miktarda ve uygun kalitede suyun temini de güvence altına alınmalıdır.

Baraj ve rezervuarların iklim değişikliğine uyumu için uyarlanabilir bir yönetim süreci izlenmelidir. Bunu sağlayabilmek için öncelikle uzmanlık ve bilgi eksiklikleri belirlenmeli; iklim değişikliğinin tüm olası gelişim aralıklarını kapsayan birden fazla senaryo göz önünde bulundurulmalı; yanıltıcı sonuçlardan (çok kötümser veya çok iyimser) kaçınmak için yalnızca tek bir senaryoya bağlı kalınmamalı; uygun yöntem ve yaklaşımlar geliştirilmeli ve paylaşılmalı; ayrıca nehir havza yönetiminde en iyi uygulamaları geliştirmek ve yaygınlaştırmak amacıyla entegre bir havza yönetim organizasyonu kurulmalıdır.

Baraj ve rezervuar yönetiminde kalıcı ve etkili uyum seçeneklerinin değerlendirilmesi için farklı disiplinlerden, ilgi alanlarından ve paydaş gruplarından (politikacılar, mühendisler, doğal kaynak bilimciler, sosyal bilimciler ve ekonomistler) oluşan geniş bir iş birliği sağlanmalıdır. Bu kapsamda, ilgili paydaşlara baraj ve rezervuarların havza ölçeğinde iklim değişikliğinin etkilerini nasıl azaltabileceği belirlenmeli ve açıklanmalı; sera gazı emisyonlarının barajlar ve rezervuarlarla nasıl ve ne ölçüde ilişkili olduğu ortaya konulmalı; kamuoyu ve paydaşlar sürece aktif, erken ve sürekli biçimde dâhil edilmeli; ayrıca baraj ve rezervuarların iklim değişikliğinin risk ve fırsatlarının yönetimindeki rolü hakkında açık, özlü ve anlaşılır bir iletişim kurulmalı ve eğitim faaliyetleri yürütülmelidir.

Georges Annandale: “Uyarlanabilir bir yaklaşıma odaklanmamız gerektiği konusunda hemfikirim. Bana göre, iklim değişikliğindeki eğilimi değiştirmek için elimizden gelenin en iyisini yapsak bile başarılı olamayacağız, çünkü, bence artık geri dönüşü olmayan bir noktayı çoktan geçtik.”

Peter Rae: “Sihirli çözümler yok. Önemli olan, son on yıllarda deneyimle geliştirilen uygulamaların gelecekteki iklim için artık geçerli olmayacağını kabul etmektir.”

Kaynakça

- ABD Enerji Bakanlığı. (2017). Effects of Climate Change on Federal Hydropower. The second report to congress January 2017. United States Department of Energy, Washington DC. 20585.
- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., and Knutsson, S. (2020). Dam Safety and Overtopping. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10 (6), 41-78.
- Amerika Su Kaynakları Yönetim Bürosu. (2022). Guardians of the Reservoir. <https://www.usbr.gov/research/challenges/sedimentremoval.html> (Accessed March 25, 2025).
- Arnell, N. W. and Hulme, M. (2006). Implications of climate changes for large dams and their management. Thematic review II, World Commission on Dams, Cape Town, South Africa, 88.
- Atkins. (2013). Impact of Climate Change on Dams & Reservoirs. Department of Environment, Food and Rural Affairs, United Kingdom.
- Avrupa Birliği. (2013). LISVAP Evaporation Pre-Processor for the LISFLOOD water balance and flood simulation model. Revised User Manual, JRC technical report. Eds. Burek, P., van der Knijff, J. and Ntegeksa, V. European Union. ISBN 978-92-79-33199-2
- Bae, D., Kwon, H.H., and Jia, Y. (2025). Adaptations for Dams and Resorvoirs to Climate Change. Guidance for Water Engineering in Chaging Climate. Guidance for Water Engineering in Changing Climate. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IHAR). Water Monograph. Chapter 8. P.115-130.
- Ball, B.M., Nathan, R., Weeks, W., Weinmann, E., Retallick, M., and Testoni, I. (2019). Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation.
- Barros N., J.J. Cole, L.J. Tranvik, Y.T. Prairie, D. Bastviken, V.L. M. Huszar, P. Del Giorgio and F. Roland. (2011). Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*. DOI: 10.1038/NGEO1211.
- Bayazıt, Y., Koç, C. (2022). The impact of forest fires on floods and erosion: Marmaris, Turkey. *Environment, Development and Sustainability*, Volume 24, 13426–13445.
- Bergstrom, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindstrom, G., Pettersson, A., and Rummukainen, M. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden – assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modeling, *Climate Research*, 16, 101–112.
- Biemans, H., Speelman, L.H., Ludwig, F., 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.
- Birleşik Kırallık. (2016). Flood Risk Assessments: Climate Change Allowances. <https://www.gov.uk/guidance/flood-riskassessments-climate-change-allowances> (Accessed March 26, 2025).
- Birleşmiş Milletler. (2013). Climate change impacts and adaptations for international transport networks. Expert group report. United Nations, New York and Geneva.
- Chandrasekara, S.S., Kwon, H.H., Vithanage, M., Obeysekera, J., and Kim, T.W. (2021). Drought in South Asia: A review of drought assessment and prediction in South Asian countries. *Atmosphere*, 12(3): 369.
- Chanudet V, S. Descloux, A. Harby, H. Sundt, B.H. Hansen, O. Brakstad, D. Serça and F. Guerin. (2011). Gross CO₂ and CH₄ emissions from the Nam Ngum and Nam Leuk sub-tropical reservoirs in Lao PDR. *Sci Total Environ*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.018.
- Charalampos, S., Jean-Marie, M. and Jacques, G. (2013). Climate Change Impacts on Dams Projects in Transboundary River Basins. The Case of Mesta/Nestos River Basin, Greece. Available at: <http://www.inweb.gr/twm4/abs/SKOULIKARIS%20Charalampos.pdf> Accessed on 22nd October, 2021
- Chen, X. and Hossain, F. (2019). Understanding Future Safety of Dams in a Changing Climate, American Meteorological Society, 1395.
- Chernet, H.H., Alfredsen, K. and Midttomme, G.H. (2014). Safety of Hydropower Dams in a Changing Climate. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(3): 569–582.
- Cherry, J.E., Knapp, C., Trainor, S., Ray, A.J., Tedesche, M. and Walker, S. (2017). Planning for climate change impacts on hydropower in the Far North. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21: 133–151.
- Chung, G.H., Jeon, M.H., Kim, H.S. and Kim, T.W. (2011). Adaptation capability of reservoirs considering climate change in the Han River basin, South Korea. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 31: 439–447.
- Coumou, D., Di Capua, G., Vavrus, S., Wang, L. and Wang, S. (2018). The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation, *Nature Communications*, 9: 2959.
- Deblois C.P., R. Aranda-Rodriguez, A. Giani and D.F. Bird. (2007). Microcystin accumulation in liver and muscle of tilapia in two large Brazilian hydroelectric reservoirs. *Toxicon*. 51(3):435-448.
- DelSontro, T., D.F. McGinnis, S. Sobek, I. Ostrovsky and B. Wehrli. (2010). Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. *Environ. Sci. Technol.* 44, 2419–2425.

- Demarty, M., J. Bastien, A. Tremblay, R.H. Hesslein and R. Gill. (2009). Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Québec, Canada, measured with automated systems. *Environ. Sci. Technol.* 43:8908–8915.
- Deroo, L. (2025). Dams and Reservoirs for Climate Change Adaptation. Question 108. Vingt-Hutieme Congress des Grands Barrages. Chengdu. Mai 2025. 415-519p
- Donigian, A Jr., Bicknell, B., Imhoff, J. and Singh, V. (1995). Hydrological simulation Program-Fortran (HSPF). Computer models of watershed hydrology. p. 395–442.
- Douglas-Mankin, K., Srinivasan, R. and Arnold, A. (2010). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: current developments and applications. *T Am Ag Biol Eng.* 53:1423–1431.
- East, A.E., Logan, J.B., Dow, H.W., Smith, D.P., Iampietro, P., Warrick, J.A., Lorenson, T.D., Hallas, L., and Kozlowicz, B. (2024). Post-Fire Sediment Yield Froma Central CaliforniaWatershed: FieldMeasurements and Validation of theWEPP Model. *Earth and Space Science*, 11(7). <https://doi.org/10.1029/2024ea003575>
- Edwards, W. and Owens, L. (1991). Large storm effects on total soil erosion. *Journal of Soil Water Conservation*, 46:75–78.
- EEA. (2011). European Environmental Agency.
- EPA. (2021). Climate Change Indicators: River Flooding. Available at: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climatechange-indicators-river-flooding> Accessed on 28th October, 2021.
- Feldbauer, J., Kneis, D., Hegewald, T., Berendonk, T.U. and Petzoldt, T. (2020). Managing climate change in drinking water reservoirs: potentials and limitations of dynamic withdrawal strategies. *Environmental Sciences Europe*, 32: 48
- FERC. (2018). Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects, Chapter 11 - Arch dams. Federal Energy Regulatory Commission, Division of Dam Safety and Inspections, Washington DC, USA
- Fiaz, A., Rahman, G., and Kwon, H.H. (2025). Impacts of climate change on the South Asian monsoon: A comprehensive review of its variability and future projections. *Journal of Hydro-Environment Research*, 59: 100654.
- Fluxia-Sanmartin, J., Altarejos-Garcia, L., Morales-Torres, A. and Escuder-Bueno, I. (2018). Review article: Climate change impacts on dam safety. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18: 2471–2488.
- Gebre, S., Alfredsen, K., Lia, L., Stickler, M., and Tesaker, E. (2013). Review of Ice Effects on Hydropower Systems, *Journal of Cold Regions Engineering*, 27, 196–222.

- Gohari, A., Bozorgi, A., Madani, K., Elledge, J. and Berndtsson, R. (2014). Adaptation of surface water supply to climate change in Central Iran. *Journal of water and Climate Change*, 5: 391–407.
- Gopalan, S.P., Hanasaki, N., Chanpathong, A. and Tebakari, T. (2020). Impact assessment of reservoir operation in the context of climate change adaptation in the Chao Phraya River basin. *Hydrological Processes*, 35(1): <https://doi.org/10.1002/hyp.14005>
- Gurnell, A. M. (1995). Sediment yield from Alpine glacier basins, in: *Sediment and Water Quality in River Catchments*, Eds. Foster, I. D. L., Gurnell, A. M., and Webb, B. W., Wiley, New York, 407–435.
- Harby, A., F. Guerin, J. Bastien and M. Demarty. (2012). Greenhouse gas status of hydro reservoirs. CEDREN Report, Trondheim, Norway.
- Harrison, W., Drage, B., Bredthauer, S., Johnson, D., Schoch, C., and Follet, A. (1983). Reconnaissance of the Glaciers of the Susitna River Basin in Connection with Proposed Hydroelectric Development, *Annals of Glaciology*, 4, 99–104.
- Ho, M., Lall, U., Allaire, M., Devineni, N., Kwon, H.H., Pal, I., Raff, D. and Wegner, D. (2017). The future role of dams in the United States of America, *Water Resources Research*, 53: 982–998.
- Hu, Y., Maskey, S., Uhlenbrook, S. and Zhao, H. (2011). Streamflow trends and climate linkages in the source region of the Yellow River, China, *Hydrological Process*, 25: 3399–3411.
- Hughes, A.K. and Hunt, D. (n.d.). A guide to the effects of climate change in Dams. Available at: <https://britishdams.org/2012conf/papers/3%20Riskrelated%20aspects%20of%20reservoirs%20ad%20their%20operation/Papers/3.7%20Hughes%20%20A%20Guide%20to%20the%20Effects%20of%20Climate%20Change%20in%20Dams.pdf> Accessed on 22nd October, 2021
- ICOLD (2016). Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources. International Commission on Large Dams (ICOLD). Technical Committee “Y”. Final Version. P.89.
- International Rivers. (2011). Wrong Climate for Big Dams: DESTROYING RIVERS WILL WORSEN CLIMATE CRISIS, International Rivers, 2150 Allston Way, Suite 300, Berkeley, CA 94704.
- IPCC. (2021). Summary of policymakers. In: *Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R. and Zhou, B. Cambridge University Press. In Press.

- Jung, W. and Kim, Y. (2017). Evaluation of Boryeong Dam Water Supply Capacity and Proposal of a drought policy. *ChungNam Rep.*, 278, 1–16.
- Juracek K, and Ziegler, A. (2009). Estimation of sediment sources using selected chemical tracers in the Perry lake basin, Kansas, USA. *International Journal Sediment Research*, 24:108–125.
- Juracek, K.E. (2011). Suspended-sediment loads, reservoir trap efficiency, and upstreamand downstreamchannel stability for Kanopolis and Tuttle Creek lakes, Kansas, 2008-10. Reston (VA): US Geological Survey 2011–5187.
- Killingtveit, Å. and Saelthun, N. R. (1995). Hydrology. Vol. 7 of hydropower development, Norwegian Institute of Technology, Division of Hydraulic Engineering, Trondheim, Norway.
- Kim, K.B., Kwon, H.H., and Han, D. (2015). Bias correctionmethods for regional climate model simulations considering the distributional parametric uncertainty underlying the observations. *Journal of Hydrology*, 530: 568–579.
- Kim, Y.T., Yu, J.U., Kim, T.W., and Kwon, H.H. (2024). A novel approach to a multi-model ensemble for climate change models: Perspectives onthe representationofnatural variability andhistorical andfuture climate. *Weather and Climate Extremes*, 44: 100688.
- Koç, C. (2003). Su Kıtlığı ve Gelişmede Depolamanın Rolü (Water Scarcity and Role of Storage in Development), I. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Araştırmacı Su Mühendisleri Derneği, Gümöldür, İzmir.
- Koç, C. (2015). A study on the role and importance of irrigation management in integrated river basin management. *Environmental Monitoring and Assessment*. Volume 187, Issue 8, 488, 1-20.
- Koç, C. (2018). Investigation of the Possibilities of Measuring, Monitoring and Evaluating with Modern Methods of Water Resources in Integrated Watershed Management. *European Journal of Science andTechnology*. 14, 222-227.
- Koç, C. (2018a). Integrated Management of Water Resources at River Basin Level: A Case Study in Büyük Menderes Basin. *International Water and Environment Congress*, 22-24 March 2018, Merinos Atatürk Congress and Culture Center, Bursa, Proceedings, page 72-81
- Koç, C. (2018b). Past and Future of Integrated River Basin Management Studies in Turkey and Other Countries. *International Congress on Engineering and Architecture*. 14-16 November 2018, Alanya-Turkey.
- Koç, C. (2025). Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine Giden Yolda Hidrolik Yapılar ve Hidrolik Yapı Mühendisliği. *Mühendislik Alanında Akademik*

- Araştırmalar. Platonus Publishing. Haziran-2025. Bölüm 10. Sf 125-171. Mamak - Ankara.
- Koç, C. (2025a). Şehir, İklim Değişikliği ve Afet Riskini Azaltma. Mimarlık, Planlama ve Tasarım: Teori, Metodoloji ve Uygulama. Platonus Publishing. Ekim-2025. Bölüm 4. Sf 64-103. Mamak - Ankara.
- Koç, C. (2025b). Su Kaynaklarında ve Su Hizmetlerinde İklim Değişikliğine Uyum. Mühendislik Alanında Uluslararası Çalışmalar. Serüven Yayınları. Mart-2025. Bölüm 5. Sf 95-121. Çankaya - Ankara.
- Kraljevic, A., Meng, J-h. and Schelle, P. (2013). Seven sins of dambuilding. WWF International - Freshwater Programme & WWF-Germany, Switzerland.
- Kwon, H. H., Moon, Y.I., and Khalil, A.F. (2007a). NonparametricMonte Carlo simulation for flood frequency curve derivation: An application to aKoreanwatershed 1. JAWRAJournal of the AmericanWater Resources Association, 43(5): 1316–1328.
- Kwon, H.H., Lall, U., and Khalil, A.F. (2007b). Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: Applications to rainfall and temperature. Water Resources Research, 43(5).
- Kwon, H.H., Lall, U., and Kim, S.J. (2016). The unusual 2013–2015 drought in South Korea in the context of a multicentury precipitation record: Inferences froma nonstationary, multivariate, Bayesian copula model. Geophysical Research Letters, 43(16): 8534–8544.
- Lauri, H., de Moel, H., Ward, P.J., Rasanen, T.A., Keskinen, M. and Kummu, M. (2012). Future changes in Mekong river hydrology: Impact of climate change and reservoir operation on discharge. Hydrology and Earth System Sciences, 16, 1603–4619.
- Lawrence, D., Graham, L. P. and Besten, J. (2012). Climate change impacts and uncertainties in flood risk management: Examples fromthe Northsea Region.” Rep. No. 2012:5, NorwegianWater Resources and Energy Directorate (NVE), Oslo, Norway,http://www.web.by.nve.no/publikasjoner/rapp_ort/2012/rapport2012_05.pdf (Mar. 21, 2012).
- Lee, A., Cho, S., Kang, D.K. and Kim, S. (2014). Analysis of the effect of climate change on the Nakdong river streamflow using indicators of hydrological alteration, Journal of Hydro-Environment Research, 8: 234–247.
- Lee, J. and Shin, H. (2021). Assessment of Future Climate Change Impact on an Agricultural Reservoir in South Korea. Water, 13, 2125.
- Lima, C. H., Kwon, H.H., andKim, Y.T. (2018). Alocal-regional scaling-invariant BayesianGEVmodel for estimating rainfall IDF curves in a future climate. Journal of Hydrology, 566: 73–88.

- MacTavish, L., Bourgeois, G., Lafleur, C., and Ristic, E. (2022). Climate Change Adaptation for Dams. National Research Council Canada.
- Mailhot, A. and Duchesne, S. (2010). Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2): 201–208.
- Malm R (2009) Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method. PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- Marotta, A., J. Pavlovic, B. Ciuffo, S. Serra and G. Fontaras (2015). Gaseous Emissions from Light-Duty Vehicles: Moving from NEDC to the New WLTP Test Procedure. *Environmental Science and Technology* 49(14): 8315–8322
- Naveendrakumar, G., Vithanage, M., Kwon, H.H., Chandrasekara, S.S.K., Iqbal, M.C.M., Pathmaraja, S., Fernando, W.C.D.K. and Obeysekera, J. (2019). South Asian perspective on temperature and rainfall extremes: A review. *Atmospheric Research*, 225(1): 110–120
- Niu, Y. and Shah, F.A. (2018). Design and Management of Multi-Purpose Dams under Climate Change. 2018 Agricultural & Applied Economics Association Annual Meeting, Washington, D.C., August 5–August 7.
- Norouzi, N. (2020). Climate change impacts on the water flow to the reservoir of the Dez dam basin, *Water Cycle*, 1: 113–120.
- NVE. (2011). Retningslinjer for flomberegninger (Guidelines for flood calculations). Rep. No. 04/2011, Oslo, Norway.
- Prowse, T. D. and Beltaos, S. (2002). Climatic control of river ice hydrology: a review, *Hydrological Processes*, 16, 805–822.
- Rahman, G., Jung, M.K., Kim, T.W., and Kwon, H.H. (2025). Drought impact, vulnerability, risk assessment, management and mitigation under climate change: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Article ID 100120.
- Rosa, L.P., M.A. dos Santos, B. Matvienko, E.O. dos Santos, and E. Sikar. (2004). Greenhouse gases emissions by hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climate Change*. 66 (1–2):9–21.
- Roy, R., Pacher, G., Adamson, P., G., Roy, L., Silver, R. (2008). Adaptive Resources Management for Water Resources Planning and Operations, Scientific and Technical Report requested by the World Bank.
- Saelthun, N. R. and Andersen, J. H. (1986). New procedures for flood estimation in Norway. *Nordic Hydrol.*, 17(4–5), 217–228.

- Scherer, I. and Pfister, S. (2016). Hydropower's biogenic carbon footprint, *PLoS ONE*, 11, 30161947, DOI: 10.1371/journal.pone.0161947.
- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D.R., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K. and Rahimi, M. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of Working Group I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J. Cambridge (UK): Cambridge University Press. p. 109–230.
- Sivakumar, M.V.K. and Stefanski, R. (2011). Chapter 2: Climate Change in South Asia. In: *Climate Change and Food Security in South Asia*. s.l.: Springer Netherlands, pp. 13–30.
- Smit, B. and Pilifosova, O. (2003). Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. *Sustainable Development*, 8(9).
- Stratz, S.A., and Hossain, F. (2014). Probable Maximum Precipitation in a Changing Climate: Implications for Dam Design. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001021](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001021)
- Sutton, A.R. (2019). Evaluating design criteria for high hazard dams in a changing climate, Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. 3838. <https://researchrepository.wvu.edu/etd/3838>
- Teodoru, C R., J. Bastien, M.C. Bonneville, P. A. Del Giorgio, M. Demarty, M. Garneau, J.F. Hélie, L. Pelletier, Y.T. Prairie, N.T. Roulet, I.B. Strachan and A. Tremblay. (2012). The net carbon footprint of a newly created boreal hydroelectric reservoir. *Global Biogeochem. Cycles*, 26, GB2016, doi:10.1029/2011GB004187.
- The Guardian. (2023). World's Large Dams Could Lose Quarter of Capacity by 2050, Says UN. <https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/11/worlds-large-dams-could-lose-quarterof-capacity-by-2050-says-un> (Accessed March 25, 2025).
- Toniolo, H and Schultz, J. (2005). Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs, lakes & reservoirs, *Research and Management*, 10, 13–24.
- Tremblay A., J. Bastien, M. Demarty, C. Demers. (2009). GHG Fluxes (CO₂, CH₄, N₂O) before and during the first three years after flooding at the Eastmain-1 reservoir (Quebec, Canada). Canadian dam association.
- UNESCO/IHA, 2010. Goldenfum, J.A. (Ed.), *GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs*. IHA, London, UK.
- Uranchimeg, S., Kim, J.G., Kim, J.G., Kwon, H.H., and Lee, S.O. (2018). A Bayesian quantile regression approach for nonstationary frequency analysis of annual

- maximum sea level in a changing climate. *Journal of Coastal Research*, (85): 536–540.
- Uranchimeg, S., Kwon, H.H., Kim, B., and Kim, T.W. (2020). Changes in extreme rainfall and its implications for design rainfall using a Bayesian quantile regression approach. *Hydrology and Current Research*, 51(4): 699–719.
- US Department of Energy. (2017). Effects of climate change on federal hydropower. The second report to Congress January 2017. U.S. Department of Energy, USA.
- USACE. (2016). Guidance for Incorporating Climate Change Impacts to InlandHydrology in CivilWorks Studies, Designs, and Projects, United States Army Corps of Engineers, EBC 2016-25, 2016.
- Vahedifard, F., AghaKouchak, A., Ragno, E., Shahrokhbadi, S. andMallakpour, I. (2017). Lessons fromtheOroville dam. *Science*, 355, 1139–1140,
- Veijalainen, N., Dubrovin, T., Marttunen, M. and Vehviläinen, B. (2010). Climate change impacts onwater resources and lake regulation in the VuoksiWatershed in Finland. *Water Res. Manage.*, 24(13), 3437–3459.
- Visser, J.B., Kim, S., Wasko, C., Nathan, R., and Sharma, A. (2022). “The Impact of Climate Change on Operational Probable Maximum Precipitation Estimates.” *Water Resources Research*, 58(11). <https://doi.org/10.1029/2022wr032247>
- Wasko, C., Westra, S., Nathan, R., Orr, H.G., Villarini, G., Herrera, R.V. and Fowler, H.J. (2021). Incorporating climate change in flood estimation guidance. *Philosophical Transactions Royal Society. A.* 379: 20190548. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0548>
- WEDA. (Western Dredging Association). (2021). Reservoir Dredging: A Practical Overview. WEDA Technical Report.
- Wild, T. B. (2014). Managing flow, sediment and hydropower in theMekong River basin. Unpublished PhD thesis, Faculty of the Graduate School of Cornell University.
- Yang, J., Andreasson, P., Teng, P., and Xie, Q. (2019). The Past and Present of Discharge Capacity Modeling for Spillways-A Swedish Perspective. *Fluids*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/fluids4010010>
- Yasarer, L.M.W. and Sturm, B.S.M. (2016). Potential impacts of climate change on reservoir services and management approaches, *Lake and Reservoir Management*, 32: 13–26. DOI: 10.1080/10402381.2015.1107665.
- Young, R.A., Onstad, C., Bosch, D. and Anderson W. (1989). AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J Soil Water Conserv.* 4:168–173.

Yun, X., Tang, Q., Sun, S. and Wang, J. (2021). Reducing climate change induced flood at the cost of hydropower in the Lancang-Mekong River basin. *Geophysical Research Letters*, 48(20): <https://doi.org/10.1029/2021GL094243>



BÖLÜM 2

Son Kilometre (LAST-MILE) Dağıtımda Yapay Zekâ Uygulamaları: Sistematiik Derleme

Özlem Battal Şal¹

1. GİRİŞ

Küresel e-ticaret hacminin 2015 yılındaki 1,5 trilyon dolar düzeyinden 2024 itibariyle 6 trilyon doların üzerine çıkması (UNCTAD, 2024), kentsel lojistik sistemleri üzerinde benzeri görülmemiş bir baskı oluşturmuştur. Bu baskının odak noktasını, toplam dağıtım maliyetlerinin %41 ile %53'ü arasında değişen payıyla "son kilometre" (last-mile) dağıtım aşaması oluşturmaktadır (Statista, 2024; Joerss vd., 2016). Son kilometre; depodan ya da dağıtım merkezinden nihai tüketiciye uzanan son halkayı ifade etmekte olup fiziksel mesafesi kısa olmasına karşın operasyonel karmaşıklığı, trafik belirsizliği, teslimat başarısızlıkları ve çevresel etkileri nedeniyle tedarik zincirinin en maliyetli ve en verimsiz segmenti olma özelliğini korumaktadır (Boysen vd., 2021).

Bu yapısal sorunlara yanıt olarak yapay zekâ (YZ) teknolojilerinin lojistik süreçlere entegrasyonu 2015'ten itibaren hız kazanmıştır. Makine öğrenmesi (ML), derin öğrenme (DL), pekiştirmeli öğrenme (RL), doğal dil işleme (NLP) ve otonom sistem teknolojilerinin olgunlaşması; talep tahmini, rota optimizasyonu, depo yönetimi ve insansız araç koordinasyonu gibi kritik son kilometre süreçlerini dönüştürme potansiyeli taşımaktadır (Elbert vd., 2020; Moons vd., 2019). Amazon Robotics, UPS ORION sistemi ve DHL'in yapay zekâ destekli depo operasyonları, bu dönüşümün öncü endüstriyel örnekleri arasında yer almaktadır (Xu vd., 2020). Bununla birlikte, son kilometre dağıtımında YZ uygulamalarını kapsayan akademik çalışmalar tematik olarak parçalı bir görünüm sergilemektedir. Mevcut derleme çalışmaları ya belirli bir YZ alt teknolojisine odaklanmakta ya da tek bir coğrafi bağlamı ele almaktadır. Bu eksiklik, akademisyenlerin ve uygulayıcıların alanın bütünsel gelişimini izlemesini güçleştirmektedir.

Söz konusu boşluğu gidermek amacıyla bu bölüm, 2015–2025 dönemini kapsayan ve PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protokolünü temel alan kapsamlı bir sistematiik derleme sunmaktadır. Çalışma; makine öğrenmesi, derin öğrenme, pekiştirmeli öğrenme, otonom hava ve kara araçları ile doğal dil işleme gibi YZ alt teknolojilerinin son

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, 0000-0002-2308-7933

kilometre dağıtımında nasıl uygulandığını, hangi performans kazanımlarını sağladığını ve hangi engellere takıldığını bütüncül bir perspektiften ortaya koymaktadır.

Bölüm, yalnızca mevcut bilgiyi derlemekle yetinmeyip beş temel özgün katkı sunmaktadır: (1) YZ teknolojilerinin son kilometre bağlamına özgü çok boyutlu bir taksonomisinin geliştirilmesi, (2) yayın eğilimlerinin ve araştırma odak noktalarının on yıllık bir perspektiften haritalanması, (3) kentsel-kırsal ve gelişmiş-gelişmekte olan ülke eksenlerinde karşılaştırmalı bir analizin yapılması, (4) temel araştırma boşluklarının ve metodolojik sınırlılıkların tespit edilmesi, (5) politika yapıcılar ve uygulayıcılar için çıkarımların sunulması.

Bu bölüm, aşağıdaki temel araştırma sorularını yanıtlamayı amaçlamaktadır:

1. AS1: 2015–2025 döneminde son kilometre dağıtımında hangi YZ teknolojileri ve yöntemleri ön plana çıkmıştır?
2. AS2: Bu uygulamaların operasyonel verimlilik, maliyet ve sürdürülebilirlik üzerindeki ölçülebilir etkileri nelerdir?
3. AS3: YZ tabanlı son kilometre çözümlerinin yaygınlaşmasının önündeki başlıca teknik, düzenleyici ve kurumsal engeller nelerdir?
4. AS4: Literatürdeki temel boşluklar ve gelecek araştırma öncelikleri nelerdir?

Bu sistematik derleme, Scopus veri tabanında 2015–2025 yılları arasında İngilizce yayımlanmış hakemli makaleleri kapsamaktadır. Kapsam dışında bırakılan çalışmalar; yalnızca geleneksel lojistik optimizasyon yöntemlerine (YZ bileşeni içermeyen) odaklanan araştırmalar, yayımlanmamış tezler, teknik raporlar ve konferans bildiri özetleridir. Coğrafi bir sınırlama uygulanmamış; gelişmiş ve gelişmekte olan ülke bağlamlarını inceleyen çalışmalar eşit ölçüde değerlendirmeye alınmıştır.

Bölümün geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölüm, son kilometre dağıtımının kavramsal çerçevesini ve YZ teknolojilerinin sistematik taksonomisini sunmaktadır. Üçüncü bölüm, benimsenen PRISMA metodolojisini ve literatür tarama sürecini ayrıntılı biçimde açıklamaktadır. Dördüncü bölüm, altı tematik başlık altında bulgular ve sentez sunmaktadır. Beşinci bölüm elde edilen bulguları tartışmakta; altıncı bölüm gelecek araştırma gündemini ortaya koymakta ve yedinci bölüm genel bir sonuç ile öneriler sunmaktadır.

2. SON KİLOMETRE DAĞITIMI

2.1. Tanımı ve Temel Özellikleri

Son kilometre dağıtımı; bir malın son dağıtım noktasından (depo, mikro-hub veya aktarma merkezi) nihai alıcıya ulaştırılmasını kapsayan tedarik zinciri aşamasını ifade etmektedir (Boysen vd., 2021). Kavram, fiziksel mesafe

açısından kısa olmakla birlikte lojistik açıdan en karmaşık, en pahalı ve en çevre üzerinde baskı yaratan segment olarak tanımlanmaktadır. McKinsey & Company (2016) tarafından gerçekleştirilen araştırma, son kilometre maliyetlerinin toplam dağıtım zinciri harcamalarının %41 ile %53'ünü oluşturduğunu ortaya koymuştur. Daha güncel veriler bu oranın kentsel alanlar ve yoğun e-ticaret dönemlerinde %60'ı aşabildiğine işaret etmektedir (Statista, 2024).

Son kilometre dağıtımının kendine özgü zorluklarını belirleyen dört temel yapısal özellik bulunmaktadır. Birincisi, mekânsal dağınıklığıdır: Teslimat noktaları coğrafi olarak yayılmış, erişim koşulları heterojen ve adres doğruluğu tartışmalı bir yapı sergilemektedir. İkincisi, talep belirsizliğidir: Teslimat zamanlaması, müşteri mevcudiyeti ve sipariş hacmi kısa vadede önemli ölçüde dalgalanmaktadır. Üçüncüsü, çevresel ve sosyal baskıdır: Kentsel trafik yoğunluğu, gürültü kirliliği ve karbon emisyonları son kilometre araçlarından orantısız biçimde kaynaklanmaktadır; Avrupa Çevre Ajansı'na göre kentsel lojistik, şehirlerdeki CO2 emisyonlarının %25'inden sorumludur (EEA, 2020). Dördüncüsü, başarısız teslimat maliyetleridir: İkinci teslimat denemeleri, ortalama sipariş başına maliyeti %12 ile %18 arasında artırmaktadır (Gevaers vd., 2014).

2.2. Yapay Zekanın Lojistik Bağlamındaki Konumu

Yapay zekâ, genel bir çerçevede, belirli görevleri gerçekleştirirken normalde insan zekâsı gerektiren bilişsel işlemleri makinelerle yaptırmayı mümkün kılan algoritma ve sistem bütünü olarak tanımlanmaktadır (Russell & Norvig, 2021). Lojistik bağlamında YZ; veri toplama, örüntü tanıma, karar verme ve öğrenme döngülerini entegre biçimde yürütebilen sistemlerin tasarımını ve uygulanmasını kapsamaktadır. Bu bölümde benimsenen YZ tanımı, dar anlamda makine öğrenmesi ile sınırlı kalmayıp metasezgisel optimizasyon algoritmalarını, bilgisayarla görmeyi, doğal dil işlemeyi ve otonom fiziksel sistemleri de kapsamaktadır.

2.3. YZ Teknolojilerinin Taksonomisi: Son Kilometre Bağlamı

Bu sistematik derleme, son kilometre dağıtımındaki YZ uygulamalarını altı temel kategoride sınıflandırmaktadır. Söz konusu sınıflandırma, mevcut literatür sentezi ve uzman değerlendirmeleri temel alınarak geliştirilmiş özgün bir taksonomidir.

Kategori 1: Makine Öğrenmesi (ML) Tabanlı Tahmin ve Sınıflandırma

Denetimli öğrenme algoritmalarının (karar ağaçları, rastgele ormanlar, destek vektör makineleri ve gradyan artırma yöntemleri başta olmak üzere) son kilometre süreçlerinde talep tahmini, teslimat süresi kestirimi ve müşteri segmentasyonu gibi amaçlarla yaygın biçimde kullanıldığı görülmektedir. XGBoost ve LightGBM algoritmaları, özellikle günlük sipariş hacmi tahmininde

yüksek doğruluk oranları sergilemesi nedeniyle endüstriyel uygulamalarda öne çıkmaktadır (Chen & Guestrin, 2016; Ke vd., 2017).

Kategori 2: Derin Öğrenme (DL) ve Zaman Serisi Modelleri

Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağları, mevsimsel ve trendsel bileşenler içeren teslimat talebi verilerinin modellenmesinde konvansiyonel istatistiksel yöntemlere kıyasla belirgin performans avantajı sunmaktadır (Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Bandara vd., 2020). Transformer mimarisine dayalı modellerin zaman serisi tahminindeki üstün performansı, son yıllarda bu teknolojinin lojistik uygulamalarına aktarılmasını hızlandırmıştır (Lim vd., 2021).

Kategori 3: Pekiştirmeli Öğrenme (RL) ve Dinamik Optimizasyon

Pekiştirmeli öğrenme, bir etmenin çevreyle sürekli etkileşim halinde deneme-yanılma yoluyla politika öğrendiği bir YZ paradigmasını temsil etmektedir. Son kilometre dağıtımında RL'nin en kritik uygulama alanı, araç rota problemlerinin (VRP) gerçek zamanlı ve dinamik versiyonlarının çözümüdür. Q-öğrenmesi, Actor-Critic ve Proximal Policy Optimization (PPO) yöntemleri literatürde en sık karşılaşılan RL algoritmalarıdır (Nazari vd., 2018; Kool vd., 2019).

Kategori 4: Metasezgisel ve Hibrit Optimizasyon Yöntemleri

Genetik algoritmalar, Tabu arama, simüle edilmiş tavlama ve karınca kolonisi optimizasyonu gibi metasezgisel yöntemler; VRP ve Gezgin Satıcı Problemi (TSP) varyantlarının çözümünde onlarca yıldır başvurulan temel araçlardır. Bu yöntemlerin YZ bileşenleriyle hibritleştirilmesi hem çözüm kalitesini hem de hesaplama verimliliğini artırmıştır (Vidal vd., 2013).

Kategori 5: Otonom Sistemler (UAV ve Kara Araçları)

İnsansız hava araçları (drone/UAV) ve otonom kara araçları, son kilometre literatüründe en hızlı büyüyen alt alanı oluşturmaktadır. Drone lojistiğinde YZ; rota planlaması, enerji yönetimi, engellerden kaçınma ve çoklu-drone koordinasyonu için kritik bir altyapı sağlamaktadır (Macrina vd., 2020). Kamyon-drone hibrit sistemleri ise TSP-D formülasyonu ile kapsamlı biçimde araştırılmaktadır (Murray & Chu, 2015; Agatz vd., 2018).

Kategori 6: Doğal Dil İşleme (NLP) ve Müşteri Etkileşim Sistemleri

Müşteri iletişimi, adres doğrulama, şikâyet yönetimi ve teslimat tercihlerinin analizinde NLP teknolojileri giderek yaygınlaşmaktadır. Büyük dil modelleri (LLM) ise teslimat talimatlarının otomatik yorumlanması ve müşteri hizmetleri chatbot uygulamalarında son yıllarda artan bir ilgi görmektedir (Brown vd., 2020).

3. METODOLOJİ

3.1. Metodolojik Yaklaşımın Gerekçesi

Bu bölüm, sistematik derlemenin neden yapıldığını, araştırmacıların ne yaptığını ve ne bulduğunu şeffaf biçimde raporlamayı amaçlayan PRISMA 2020 protokolüne uygun olarak tasarlanmıştır. PRISMA 2020 bildirisi, 27 maddelik bir kontrol listesi, madde başına ayrıntılı raporlama önerileri ve güncellenmiş akış diyagramlarını bir arada sunmaktadır (Page vd., 2021). Son kilometre dağıtımında YZ uygulamalarına yönelik bu sistematik derleme; heterojenik bir çalışma havuzunu, farklı YZ tekniklerini ve çeşitli bağlamsal koşulları bir arada ele almaktadır. Bu nedenle, nicel meta-analiz yerine nitel tematik sentezi esas alan PRISMA uyumlu bir yaklaşım metodolojik açıdan en uygun seçenek olarak değerlendirilmiştir.

3.2. Araştırma Soruları ve PICO Çerçevesi

Sistematik derlemelerde araştırma sorularının yapılandırılması için yaygın olarak benimsenen PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcome) çerçevesi, bu çalışmada lojistik bağlamına uyarlanmış biçimiyle uygulanmıştır. P (Bağlam): Son kilometre dağıtım operasyonları; kentsel, yarı-kentsel ve kırsal alanlarda faaliyet gösteren lojistik sağlayıcılar ve e-ticaret aktörleri. I (Müdahale): YZ alt teknolojilerinden en az birini doğrudan uygulayan çözümler. C (Karşılaştırma): Geleneksel optimizasyon yöntemleri ve YZ öncesi operasyonel pratikler. O (Çıktı): Operasyonel verimlilik göstergeleri, sürdürülebilirlik metrikleri ve müşteri deneyimi göstergeleri.

3.3. Dahil Etme ve Dışlama Kriterleri

Çalışmaların kapsama alınması ya da dışlanması, önceden tanımlanmış kriterlere göre sistematik biçimde gerçekleştirilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Dahil etme ve dışlama kriterleri

Boyut	Dahil Etme Kriterleri	Dışlama Kriterleri
Yayın türü	Hakemli dergi makaleleri	Kitap bölümleri, tezler, teknik raporlar, konferans özetleri
Dil	İngilizce	İngilizce dışındaki tüm diller
Zaman	Ocak 2015 – Aralık 2025	2015 öncesi yayınlar
Konu	Son kilometre dağıtımında en az bir YZ teknolojisinin uygulanması	Yalnızca geleneksel OR/yönetim yöntemleri; YZ bileşeni içermeyen çalışmalar

Bağlam	Ticari lojistik, e-ticaret, kentsel/kırsal dağıtım	Askeri lojistik, insansı yardım lojistiği
Veri	Nicel, nitel veya karma yöntemli deneysel/simülasyon çalışmaları	Yalnızca editöryal görüş bildiren yazılar, fikir makaleleri
Erişim	Tam metne erişilebilen çalışmalar	Yalnızca özet erişimine sahip çalışmalar

Bu kriterler, iki araştırmacı tarafından bağımsız biçimde uygulanmış; anlaşmazlık durumunda üçüncü bir araştırmacının görüşüne başvurulmuştur. Anlaşma düzeyi Cohen's Kappa istatistiği ile ölçülmüş ve $\kappa = 0.84$ (yüksek uyum) olarak hesaplanmıştır.

3.4. Veri Kaynakları ve Arama Stratejisi

3.4.1. Veri Tabanları

Literatür taraması, kapsamlı disiplinler arası kapsamı ve son kilometre lojistiği ile yapay zekâ literatürünü güçlü biçimde indekslemesi nedeniyle Scopus veri tabanında gerçekleştirilmiştir. Tek veri tabanı kullanımının olası kapsam sınırlılığı, çalışmanın sınırlılıklar bölümünde tartışılmaktadır.

3.4.2. Arama Dizesi

Scopus veri tabanında kullanılan temel arama dizesi Boolean operatörleriyle yapılandırılmıştır: ("last-mile delivery" OR "last mile logistics" OR "final-mile delivery") AND ("artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "reinforcement learning" OR "drone" OR "UAV" OR "autonomous vehicle") AND ("route optimization" OR "demand forecasting" OR "warehouse management" OR "vehicle routing"). Arama filtresi olarak 2015–2025 yayın yılı ve makale türü kısıtlamaları uygulanmıştır.

3.5. Seçim Süreci ve PRISMA Akış Özeti

Seçim süreci PRISMA 2020 protokolüne uygun olarak dört aşamada yürütülmüştür. Aşama 1 (Veri tabanı taraması): Scopus veri tabanında 717 kayıt belirlenmiştir. Aşama 2 (Ön eleme): Mükerrer kayıtların ve konu alanı filtresi dışında kalan kayıtların çıkarılmasıyla 673 benzersiz kayıt elde edilmiştir. Aşama 3 (Başlık/özet taraması): Başlık ve özet düzeyinde tarama sonucunda 264 çalışma tam metin değerlendirmesine alınmıştır. Aşama 4 (Nihai havuz): Tam metin incelemesi sonucunda YZ bileşeni içermeyen, bağlam dışı ve erişilemeyen çalışmalar elenmiş; 227 çalışma nihai senteze dahil edilmiştir.

Tablo 2. PRISMA 2020 akış özeti

Aşama / İşlem	n
Veri tabanı taraması (Scopus)	717
Ön eleme sonrası (mükerrer + konu filtresi)	673
Başlık/özet taraması sonrası	264
Tam metin değerlendirmesi sonrası	227
Nihai analiz havuzu	227

3.6. Kalite Değerlendirmesi

Dahil edilen çalışmaların metodolojik kalitesi, Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) ölçeği esas alınarak değerlendirilmiştir. Her çalışma 1 ile 5 arasında puanlanmış; 3 ve üzerinde puan alan çalışmalar dahil etme kapsamında tutulmuştur. Kalite değerlendirmesi iki araştırmacı tarafından bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir.

3.7. Sentez Yaklaşımı

Dahil edilen çalışmaların metodolojik ve tematik heterojenliği, nicel meta-analiz uygulanmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle sentez; tematik analiz, betimsel istatistik ve anlatısal sentez yöntemlerinin birlikte kullanıldığı karma bir yaklaşıma dayanmaktadır. Kodlama sürecinde çok-etiketli bir yaklaşım benimsenmiş; birden fazla YZ kategorisini entegre eden çalışmalar ilgili tüm kategorilerde etiketlenmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Yayın Eğilimleri ve Bibliyometrik Görünüm (2015–2025)

Sistemik tarama sürecine dahil edilen 227 çalışmanın yıllara göre dağılımı incelendiğinde, son kilometre dağıtımında YZ uygulamalarına yönelik akademik ilginin 2015–2018 döneminde nispeten sınırlı kaldığı, 2019'dan itibaren belirgin bir ivme kazandığı ve 2021–2024 döneminde zirveye ulaştığı görülmektedir. Bu ivmelenmenin arka planında üç ana etken öne çıkmaktadır: COVID-19 pandemisinin e-ticaret talebi üzerindeki sıçrama etkisi, derin öğrenme ve pekiştirmeli öğrenme tekniklerinin olgunlaşması ve hesaplama maliyetlerinin belirgin biçimde düşmesi.

Coğrafi dağılım açısından değerlendirildiğinde Çin (n = 58, %24,7), Amerika Birleşik Devletleri (n = 41, %17,4), Almanya (n = 22, %9,4) ve Birleşik Krallık (n = 18, %7,7) en üretken ülkeler olarak öne çıkmaktadır. YZ kategorisi bazında

dağılımda rota optimizasyonu ve VRP çalışmaları açık ara önde gelmektedir (n = 78, %34,4); bunu otonom sistemler (n = 51, %22,5), talep tahmini (n = 43, %18,9), hibrit optimizasyon (n = 31, %13,7), NLP/müşteri deneyimi (n = 19, %8,4) ve diğer/karma kategorili çalışmalar (n = 5, %2,2) izlemektedir. Otonom sistemler kategorisi, insansız hava araçları (drone/UAV) ile otonom kara araçları ve teslimat robotları alt alanlarını birlikte kapsamakta olup bu iki alt alan sırasıyla 4.4 ve 4.5 numaralı başlıklar altında ayrı ayrı ele alınmaktadır.

4.2. Rota Optimizasyonu ve Araç Rota Problemi (VRP)

4.2.1. Derin Pekiştirmeli Öğrenme Yaklaşımları

Derin pekiştirmeli öğrenme (DRL), son yılların en dikkat çekici araştırma akımını oluşturmaktadır. Dinamik VRP'yi Markov karar süreci olarak formüle eden çalışmalar, yeni müşteri taleplerinin dinamik biçimde geldiği ortamlarda gerçek zamanlı kararlar veren sistemler geliştirmektedir. LSTM tabanlı talep tahmini, CNN destekli trafik tahmini ve DQN yönlendirmeyi bütünleştiren ML-CALMO çerçevesi, güncel yöntemlere kıyasla teslimat süresinde %18,5 oranında azalma ve hizmet verimliliğinde yaklaşık %12,2 oranında iyileşme sağlamıştır (Jiang & Chang, 2025). DRL ile karınca kolonisi optimizasyonunu hibrit hale getiren bir yaklaşım ise Chicago, Phoenix ve Seattle veri setleri üzerinde CO2 emisyonlarında %21,6 ve teslimat maliyetlerinde %17,3 oranında azalma sağlarken teslimat süresi uyumunu %95,7'nin üzerinde tutmayı başarmıştır (Shi & Wang, 2026).

4.2.2. Graf Tabanlı ve Hibrit Yöntemler

Yığılmış graf evrişim modüllerini kullanan Graf Güdümlü Derin Pekiştirmeli Öğrenme (GDRL) yaklaşımı, hem sezgisel hem de öğrenme tabanlı karşılaştırma yöntemlerine kıyasla üstün performans sergilemiş ve rota uzunluğunu %5,81'e varan oranlarda azaltmıştır (Yan vd., 2025). Hibrit yöntemler, büyük ölçekli stokastik VRP senaryolarında saf YZ yaklaşımlarına kıyasla daha istikrarlı ve genellenebilir sonuçlar üretmektedir.

4.2.3. Elektrikli Araç Entegrasyonu

İncelenen VRP çalışmalarının %23'ü elektrikli araç kısıtlarını probleme dahil etmektedir. Bu alt alanda pekiştirmeli öğrenme, çok kısıtlı optimizasyon uzayında etkili keşif stratejileri geliştirme kapasitesi nedeniyle öne çıkan yöntem olmuştur. Elektrikli araçların şebekeye enerji satabildiği çok hizmetli operasyon modelleri de bu dönemde araştırma gündemine girmiştir.

4.3. Talep Tahmini ve Depo Yönetimi

İncelenen 43 çalışmanın yaklaşık %60'ı ML tabanlı tahmin modellerini konu almaktadır. XGBoost ve LightGBM algoritmaları, mevsimsel dalgalanmaları ve promosyon etkilerini yakalama kapasiteleri nedeniyle tutarlı biçimde üst sıralarda

yer almaktadır. Ensemble yöntemlerin, tek model yaklaşımlarına kıyasla MAE değerlerini %15 ile %28 arasında düşürdüğü raporlanmaktadır.

LSTM ağırları bu kategoride en sık çalışılan model mimarisidir; özellikle uzun ufuklu tahmin görevlerinde (7–30 gün) belirgin avantaj sağlamaktadır. Son yıllarda Transformer tabanlı modellerin (Temporal Fusion Transformer, PatchTST) zaman serisi tahmininde LSTM'yi geride bıraktığına dair çalışmalar çoğalmaktadır. Depo yönetimi alanında CNN modelleri hasarlı paketleri %94 ile %98 arasında doğruluk oranıyla tespit etmekte; robotik sipariş toplama sistemleriyle entegre DL yaklaşımları sipariş başına işlem süresini %35'e varan oranlarda kısaltmaktadır.

4.4. İnsansız Hava Araçları (UAV/Drone) ile Teslimat

İncelenen 51 drone/UAV çalışmasının tematik dağılımı incelendiğinde rota planlaması ve çeşitlemelerinin ($n = 21$, %41,2) açık ara önde geldiği görülmektedir. Bunu enerji yönetimi ve optimizasyonu ($n = 12$, %23,5), çoklu-drone koordinasyonu ($n = 9$, %17,6) ve engel algılama sistemleri ($n = 5$, %9,8) takip etmektedir. Kalan dört çalışma ($n = 4$, %7,8) ise sertifikasyon, düzenleyici uyum ve kamu kabulü gibi konuları ele alan karışık temalı çalışmalardan oluşmaktadır.

Gerçek drone uçuş verilerini kullanarak ML tabanlı enerji modeli eğiten bir çalışma, üç drone ve beş kamyon durağını kapsayan en verimli senaryonun tek drone ve dört durağa kıyasla enerji tüketimini %36 oranında azalttığını ortaya koymuştur. İncelenen çalışmaların %73'ünün gelişmiş ülke bağlamlarında yürütülmüş olması, gelişmekte olan piyasalardaki önemli bir araştırma boşluğuna dikkat çekmektedir.

4.5. Otonom Kara Araçları ve Teslimat Robotları

Otonom kara araçları bu derlemenin en hızlı büyüyen alt kategorisini oluşturmaktadır; ancak gerçek dünya saha deneylerini konu alan çalışmalar tüm alt kategorinin %19'uyla sınırlı kalmaktadır. Algılama katmanında derin öğrenme tabanlı nesne tespiti (YOLO, Faster R-CNN) ve LiDAR nokta bulutu işleme algoritmaları öne çıkmaktadır. İncelenen çalışmaların %67'si, çok katmanlı YZ mimarilerinin tek katmanlı yaklaşımlara kıyasla belirgin güvenilirlik ve güvenlik avantajı sağladığını raporlamaktadır.

5. TARTIŞMA

Bu sistematik derlemenin bulguları bir bütün olarak değerlendirildiğinde, alanın belirgin biçimde olgunlaştığı ancak teorik gelişim ile pratik ölçekleme arasındaki mesafenin hâlâ kapatılamamış olduğu görülmektedir. YZ'nin son kilometre dağıtımında performans kazanımları sağladığına dair kanıtlar tutarlı ve geniş kapsamlıdır: rota optimizasyonunda maliyetler ortalama %12–22, talep tahmininde hata oranları %15–35 ve enerji tüketiminde %30'un üzerinde

iyileşmeler gözlemlenmektedir. Bununla birlikte bu kazanımların %77'si simülasyon ortamlarında elde edilmektedir.

İkinci önemli bulgu, yöntemsel çeşitliliğin artmasına karşın performans ölçümünde standartlaşmanın sağlanamamış olmasıdır. Onlarca farklı metrik kullanılması, çalışmalar arasında nicel karşılaştırmayı güçleştirmektedir. Üçüncü olarak, derin pekiştirmeli öğrenmenin alandaki belirleyici yöntemsel dönüşümü temsil ettiği görülmektedir: 2018 öncesine hâkim olan metasezgisel yaklaşımların yerini giderek DRL ve Transformer tabanlı modeller almaktadır.

Olgunluk düzeyi açısından rota optimizasyonu ve VRP hem akademik birikim hem de endüstriyel uygulama bakımından tartışmasız en ileri konumdadır. Talep tahmini ve depo yönetimi ikinci olgunluk basamağını oluşturmaktadır. Drone sistemleri ile otonom kara araçları teknolojik potansiyel bakımından yüksek; ancak gerçek dünya benimsemesi bakımından sınırlı bir olgunluk sergilemektedir. NLP ve müşteri deneyimi teması akademik birikimi en az olan ancak hızla büyüyen kategori konumundadır.

Diğer yandan İncelenen çalışmaların %79'u büyük kentsel alanları araştırma bağlamı olarak seçmiştir. Kırsal bağlamdaki çalışmalar, drone teslimatının geleneksel araç bazlı dağıtıma kıyasla maliyet-etkinlik avantajını en belirgin biçimde sergilediği bağlam olarak öne çıkmaktadır. Zipline'ın Ruanda ve Gana'daki tıbbi malzeme teslimat operasyonları bu potansiyelin en çarpıcı kanıtı olmaya devam etmektedir.

Coğrafi bağlam analizi, araştırma önceliklerinde belirgin bir asimetri ortaya koymaktadır. Çin kaynaklı çalışmalar hem teknik derinlik hem de gerçek dünya veri seti kullanımı bakımından küresel literatürde belirleyici bir ağırlık taşımaktadır. Güney ve Güneydoğu Asya, Latin Amerika ve Afrika kaynaklı çalışmalar ise toplam havuzun %14'üyle temsil edilmekte; bu çalışmalar gelişmiş ekonomilerde geliştirilen çözümlerin doğrudan aktarımının sorunlu yönlerine dikkat çekmektedir.

Bu sistematik derleme dört temel araştırma boşluğunu açıkça gözler önüne sermektedir. Birinci boşluk gerçek dünya doğrulaması eksikliğidir: incelenen çalışmaların %77'si simülasyon ortamlarında yürütülmüştür. İkinci boşluk sürdürülebilirlik metriklerinin sınırlı entegrasyonudur: yalnızca %31'i çevresel metrikleri birincil performans göstergesi olarak benimsemiştir. Üçüncü boşluk insan faktörü ve örgütsel boyutların ihmaline işaret etmektedir: çalışmaların %89'u insan faktörünü bağımsız değişken olarak ele almamaktadır. Dördüncü boşluk ise sistem düzeyi analizlerin yetersizliğidir.

Lojistik operatörleri için YZ entegrasyonuna başlanacak en verimli nokta rota optimizasyonu ile talep tahminidir. Politika yapımcılar için en kritik öncelik, açık ve öngörülebilir hava sahası yönetimi çerçevelerinin oluşturulması, veri paylaşım protokollerinin standartlaştırılması ve kentsel lojistik için özel test bölgelerinin

tahsis edilmesidir. Araştırmacılar için ise ortak kıyaslama veri setleri ve performans değerlendirme protokollerinin geliştirilmesi aciliyet kazanmaktadır.

6. SONUÇ

Bu bölüm, 2015–2025 yılları arasında son kilometre dağıtımında yapay zekâ uygulamalarını inceleyen 227 hakemli çalışmayı PRISMA 2020 protokolü çerçevesinde sistematik biçimde derlemiş ve sentezlemiştir. Bütüncül değerlendirme, yapay zekânın son kilometre lojistiğini dönüştürme kapasitesinin güçlü kanıtlarla ortaya konduğunu; ancak bu dönüşümün hâlâ büyük ölçüde laboratuvar ve simülasyon ortamlarıyla sınırlı kaldığını, dolayısıyla alanın teknolojik olgunluk ile operasyonel ölçekleme arasında kritik bir geçiş eşiğinde bulunduğunu göstermektedir.

Dört temel dönüşüm hattı bu on yıllık birikimi tanımlamaktadır: derin pekiştirmeli öğrenmenin rota optimizasyonundaki yükselişi, makine öğrenmesi tabanlı talep tahmininin operasyonel planlamayla bütünleşmesi, otonom hava ve kara araçlarının fizibilite araştırmalarındaki hızlı genişleme ve müşteri deneyiminin yapay zekâ perspektifinden yeniden kurgulanması. Araştırma sorularına verilen yanıtlar bu çerçeveyi somutlaştırmaktadır. AS1 bağlamında, 2019 sonrasında derin pekiştirmeli öğrenme ve Transformer tabanlı modeller rota optimizasyonunun baskın yöntemi hâline gelmiş; topluluk (ensemble) öğrenme yaklaşımları talep tahmininde geleneksel istatistiksel yöntemlerin yerini almıştır. AS2 bağlamında, incelenen çalışmalar rota maliyetlerinde %12–22, teslimat başarısızlık oranlarında %15–27 ve enerji tüketiminde %21–36 aralığında iyileşme bildirmektedir; ancak bu kazanımların büyük bölümü gerçek saha koşullarında değil simülasyon ortamlarında elde edilmiştir. AS3 bağlamında, teknik sınırlılıkların yanı sıra olgunlaşmamış düzenleyici çerçeveler, veri gizliliği kısıtları ve kurumsal dönüşüm kapasitesinin yetersizliği yaygınlaşmanın önündeki yapısal engeller olarak belirginleşmektedir. AS4 bağlamında ise gerçek dünya doğrulamasının eksikliği, sürdürülebilirlik metriklerinin sınırlı entegrasyonu, insan faktörünün ihmali ve gelişmekte olan piyasalara yönelik araştırmaların yetersizliği en kritik boşluklar olarak öne çıkmaktadır.

Bu derlemenin alana sağladığı katkı beş eksende toplanmaktadır: son kilometre bağlamına özgü altı kategorili bir yapay zekâ taksonomisinin geliştirilmesi, on yıllık yayın eğilimlerinin bibliyometrik olarak haritalanması, kentsel–kırsal ve gelişmiş–gelişmekte olan ekonomiler eksenlerinde karşılaştırmalı bir analizin sunulması, dört temel araştırma boşluğunun sistematik biçimde tespiti ve politika yapıcılar, operatörler ile akademisyenler için ayrıştırılmış çıkarımların üretilmesi. Bu katkıların ötesinde, geliştirilen taksonominin ve boşluk haritasının, parçalı görünen literatürü ortak bir kavramsal zemine taşıyarak gelecek çalışmalar için yapılandırıcı bir referans çerçevesi sunması beklenmektedir.

Bulgular birtakım sınırlılıklar ışığında okunmalıdır. Literatür taraması tek bir veri tabanıyla (Scopus) sınırlandırılmıştır; bu tercih indeksleme kalitesi ve disiplinler arası kapsam gerekçesiyle yapılmış olsa da, başka veri tabanlarında (Web of Science, IEEE Xplore) yer alan ya da gri literatürde kalan çalışmaların kapsam dışında kalmış olması olasıdır. Çalışmaların yalnızca İngilizce yayımlanmış hakemli makalelerle sınırlandırılması, İngilizce dışı dillerde üretilen ve özellikle gelişmekte olan piyasalara ilişkin değerli bulgular içerebilecek araştırmaların temsil edilememesine yol açmış olabilir. Ayrıca, dahil edilen çalışmaların yöntemsel ve bağlamsal heterojenliği nicel meta-analizi uygulanabilir kılmadığından, sentez tematik ve anlatsal bir yaklaşıma dayandırılmıştır; bu durum performans kazanımlarına ilişkin sayısal karşılaştırmaların kesinliğini doğal olarak sınırlamaktadır.

Sonuç olarak, yapay zekânın son kilometre lojistiğine entegrasyonu artık yalnızca bir verimlilik iyileştirmesi değil; kentlerin işleyişini, çevresel sürdürülebilirliği, iş gücü yapısını ve tüketici davranışlarını yeniden biçimlendiren çok boyutlu bir dönüşüm sürecidir. Bu dönüşümün sorumlu ve kapsayıcı biçimde yönlendirilmesi, disiplinler arası iş birliklerinin derinleştirilmesini, gerçek dünya verilerine dayalı ortak kıyaslama altyapılarının kurulmasını ve gelişmiş ekonomilerin ötesine uzanan coğrafi olarak kapsayıcı bir araştırma gündemini gerektirmektedir. Önümüzdeki on yıl; teknolojik potansiyelin sahaya taşındığı, ölçeklenebilirlik ve adalet sorularının merkeze yerleştiği ve insanın sistem içindeki rolünün yeniden tanımlandığı belirleyici bir dönem olacaktır.

KAYNAKLAR

- Agatz, N., Bouman, P., & Schmidt, M. (2018). Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 52(4), 965–981.
- Bandara, K., Bergmeir, C., & Smyl, S. (2020). Forecasting across time series databases using recurrent neural networks on groups of similar series. *Expert Systems with Applications*, 140, 112896.
- Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, 43(1), 1–58.
- Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., ... & Amodei, D. (2020). Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 1877–1901.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794.
- Elbert, R., Müller, J. P., & Rentschler, J. (2020). Tactical network planning and design in multimodal freight transportation. *Business Research*, 13(2), 1085–1128.
- European Environment Agency. (2020). CO₂ emissions from cars: The facts. EEA Report No. 04/2020.
- Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslender, T. (2014). Cost modelling and simulation of last-mile characteristics in an innovative B2C supply chain environment with implications on urban areas and cities. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 125, 398–411.
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
- Jiang, T.-H., & Chang, Y.-C. (2025). Machine learning-enhanced last-mile delivery optimization: Integrating deep reinforcement learning with queueing theory for dynamic vehicle routing. *Applied Sciences*, 15(21), 11320.
- Joerss, M., Schröder, J., Neuhaus, F., Klink, C., & Mann, F. (2016). Parcel delivery: The future of last mile. McKinsey & Company Report.
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... & Liu, T. Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- Kool, W., van Hoof, H., & Welling, M. (2019). Attention, learn to solve routing problems! *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- Lim, B., Arık, S. Ö., Loeff, N., & Pfister, T. (2021). Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, 37(4), 1748–1764.

- Macrina, G., Di Puglia Pugliese, L., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020). Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C*, 120, 102762.
- Moons, S., Braekers, K., Ramaekers, K., Caris, A., & Abelshausen, B. (2019). The value of integrating real-time traffic information in vehicle routing for urban logistics. *Transportation Research Procedia*, 39, 56–65.
- Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C*, 54, 86–109.
- Nazari, M., Oroojlooy, A., Snyder, L., & Takác, M. (2018). Reinforcement learning for solving the vehicle routing problem. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 31.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
- Shi, W., & Wang, J. (2026). Intelligent path optimization for carbon-constrained last-mile delivery: A reinforcement learning and heuristic approach. *Sustainability*, 18(1), 417.
- Statista. (2024). Global e-commerce market size 2015–2024. Statista Research Department.
- UNCTAD. (2024). Global e-commerce hits \$26 trillion, COVID-19 boosts online retail. United Nations Conference on Trade and Development.
- Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2013). Heuristics for multi-attribute vehicle routing problems: A survey and synthesis. *European Journal of Operational Research*, 231(1), 1–21.
- Xu, M., Ferrand, A., & Clarke, M. (2020). The last mile of supply chain management: An overview. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 23(1), 1–22.
- Yan, D., Guan, Q., Ou, B., Yan, B., & Cao, H. (2025). Graph-driven deep reinforcement learning for vehicle routing problems with pickup and delivery. *Applied Sciences*, 15(9), 4776.