

NEW APPROACHES AND SUSTAINABILITY IN MARITIME TRANSPORT AND COASTAL STRUCTURES

Emirhan YENİYOL

ABSTRACT

This study examines the structural and sustainable transformations occurring in maritime transport and coastal structures in response to changing global dynamics. Technological advancements from the Industrial Revolution to the present have significantly influenced the traditional dynamics of maritime routes and coastal infrastructures. Increasing global warming is one of the primary factors intensifying the need for transformation in maritime and coastal systems. The global wave of change driven by efforts to combat climate change has become particularly evident in maritime transport through green port practices, digitalization, autonomous vessels, and energy-efficiency policies. In addition, Turkey's geostrategic location, positioned at the center of international logistics corridors, provides a substantial advantage. However, to effectively utilize this strategic position, traditional methods must be integrated with next-generation technologies. Developing strong policies that ensure the effective implementation of this integration in the field is essential. In conclusion, sustainability-oriented approaches in maritime transport and coastal structures represent one of the most critical components shaping countries' future logistics and transportation objectives.

Keywords: Sustainable Maritime Transport, Coastal Structures, Technological Integration, Digital Transformation, Green Ports

Emirhan YENİYOL

İstanbul Teknik Üniversitesi

Mail: yeniyl22@itu.edu.tr

© ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2644-654X>

Makale Atıf Bilgisi:	Yeniyl, E. (2025). "Denizyolu ve Kıyı Yapılarında Yeni Yaklaşımlar ve Sürdürülebilirlik". Ulaştırma ve Altyapı, Yıl:2, Sayı: 3, s.(72-97)
Makale Türü:	Araştırma
Geliş Tarihi:	10.10.2025
Kabul Tarihi:	16.12.2025
Yayın Tarihi:	29.12.2025
Yayın Sezonu:	Temmuz-Aralık

DENİZYOLU VE KIYI YAPILARINDA YENİ YAKLAŞIMLAR VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

ÖZET

Bu makalede, değişen dünya dinamikleri karşısında denizyolu ve kıyı yapılarındaki yapısal ve sürdürülebilir dönüşümler ele alınmaktadır. Sanayi Devrimi'nden günümüze kadarki teknolojik atılımlar, denizyolları ve kıyı yapılarındaki geleneksel dinamikleri derinden etkilemiştir. Artan küresel ısınma, denizyolları ve kıyı yapılarındaki dönüşüm ihtiyacını artıran en önemli unsurlardan biridir. Dünya üzerinde küresel ısınmaya karşı her alanda etkisini gösteren değişim rüzgârı, özellikle yeşil liman uygulamaları, dijitalleşme, otonom gemiler ve enerji verimliliği politikalarıyla birlikte denizyolu taşımacılığında da etkisini göstermektedir. Öte yandan Türkiye'nin jeostratejik konumu, uluslararası lojistik koridorların merkezinde yer alması nedeniyle büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ancak bu stratejik konumu etkin kullanabilmek için geleneksel yöntemlerin yeni nesil teknolojilerle entegre edilmesi gerekmektedir. Bu entegrasyonun sahaya etkin şekilde yansıtılmasına yönelik güçlü politikaların geliştirilmesi önem taşımaktadır. Sonuç olarak, denizyolu ve kıyı yapılarında sürdürülebilirlik odaklı yaklaşımlar, ülkelerin gelecekteki lojistik ve ulaşım hedeflerini belirleyen en önemli unsurdur.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir Denizyolu, Kıyı Yapıları, Teknolojik Entegrasyon, Dijital Dönüşüm, Yeşil limanlar

1. Giriş

1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi

Günümüzün uluslararası ulaşım ve lojistik alanındaki stratejik rekabet ortamı, denizyolu lojistiği ve liman yapılarındaki değişimlere adapte olabilmek için teknolojik gelişmelere hızlıca uyum sağlamak zorunlu hale gelmiştir. Bu doğrultuda limanların dijitale geçişi, otomasyonun yaygınlaşması ve enerji verimliliği çözümlerinin artması, sektörün çehresini kökten değiştirmektedir. Türkiye bağlamında ise, jeopolitik avantajların uluslararası taşımacılık rotaları üzerindeki önemi daha da artarken, sektörün sürdürülebilir dönüşümüne liderlik edecek stratejik politikalar geliştirmesi gerekmektedir. Bu nedenle, stratejik olarak geliştirilen politikaların, sürekli gelişen yeni nesil teknolojilerle entegre şekilde hareket etmesi önem arz etmektedir. Örneğin, "Bir büyük konteyner terminalinde dijital ikiz tabanlı planlama, rıhtım bekleme süresini %32 azaltmış ve beklemede çalışan gemilerden kaynaklanan CO₂ eşdeğeri emisyonları %15 düşürmüştür" (Eom vd., 2023). Bu veriler neticesinde, limanlarımızın ve gelişen deniz yollarının yeni teknolojilerle desteklenmesi, uluslararası limanlardaki teknolojik entegrasyonlar, karbon emisyonunu ve operasyonel gecikmeleri önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmektedir. Limanlardaki yapay zeka ve otomasyon entegrasyonu hem çevresel hem de ekonomik anlamda önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, stratejik planlamalar ve inovatif mühendislik çözümleri, mevcut teknolojik altyapı gelişimi için kritik bir eşittir. Sonuç olarak bu çalışmanın amacı, dünyamızın sürekli değişen küresel dengelerinin karşısında sürdürülebilir yaklaşımların nasıl gerçekleştirilmesi gerektiğini ele almaktadır. Bu çerçevede, kapsayıcı ve yenilikçi yaklaşımları benimseyen ülkeler, geleceğin zorlu küresel arenasında etkili rol oynayarak kalıcı bir liderlik ve belirleyicilik konumunu sağlam temeller üzerine inşa edeceklerdir.

1.2. Küresel Dinamikler ve Değişim İhtiyacı

Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkisiyle, deniz yolları ve kıyı yapılarında yaşanan dönüşümler çok boyutlu bir hâl almıştır. Özellikle liman şehirleri artan deniz seviyesi, ani iklim olaylarıyla mücadele etmektedir. Deniz seviyesindeki yükselme, aşırı hava olayları ve fırtına taşkınları, liman altyapılarının işleyişini ve dayanım kapasitesini doğrudan etkilemeye başlamıştır (Becker, Inoue & Cohen, 2020). Bu nedenle, artık liman altyapı projelerinde "dirençlilik" ve "yeşil dönüşüm" merkezde yer almaktadır. Bu ortamda, sürdürülebilirlik odaklı yeni nesil teknolojik entegrasyon kaçınılmazdır. "Dijital ve sürdürülebilir dönüşüm, küresel liman sektöründe tam ölçekli bir devrim niteliğine ulaşmış olup; yapay zekâ, otonom sistemler ve veri odaklı otomasyon artık operasyonel stratejilerin merkezine yerleşmiştir" (IAPH World Ports Tracker, 2025). Küresel çapta yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerinin kullanımının artması, bu tür ileri teknolojilerin küresel ölçekte benimsenmeye başladığını açıkça göstermektedir. Bu gelişmelerle birlikte liman altyapılarının, değişen çevresel koşullara ve küresel trendlerin gereksinimlerine yanıt verebilecek şekilde sürekli olarak gözden geçirilmesi ve yenilenmesi kritik önem taşımaktadır. Son yarım yüzyılda afetlerin büyük çoğunluğu iklim kaynaklı tehlikelerden kaynaklanmış olup bu olayların görülme sıklığı belirgin biçimde yükselmektedir (UNDRR, 2020). Bununla birlikte, 1901–2018 döneminde küresel ortalama deniz seviyesi yaklaşık 20 cm yükselmiş olup, yükselme hızı son yüzyılda belirgin şekilde artmıştır (IPCC, 2022). Bu gibi küresel ısınma kaynaklı etkiler dünyanın değişen dinamiklerine adapte olmayı zorunlu hale getirmiştir. Gelecekte tüm kıyı yapılarında değişim ihtiyacının kaçınılmaz olduğu öngörülmektedir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı ve Metodolojisi

Bu makalede, dünyada ve Türkiye'deki denizyolu taşımacılığında sürdürülebilirlik, teknolojik entegrasyon ve yeşil liman uygulamaları hem makro hem de mikro ölçeklerde analiz edilmektedir. Çalışma, literatür taraması ve uygulama analizleri ile çevresel etkilerin azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve yeşil lojistik uygulamalarının yaygınlaştırılması gibi alanlarda sürdürülebilir politika önerileri geliştirmeyi amaçlamaktadır.

2. Literatür Taraması

2.1. Küresel Perspektifler

2.1.1. IMO Regülasyonları ve Paris Anlaşması

IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü), uluslararası deniz taşımacılığı sektöründen kaynaklı karbon emisyonunun artmasıyla birlikte emisyonu azaltmaya yönelik yasal zemin hazırlayan, küresel taşımacılıkta önemli bir otoritedir. Uluslararası deniz taşımacılığında sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik ilk bütüncül adım, 2000'li yılların başında yayımlanan küresel GHG stratejileriyle atılmış; devamında MARPOL Ek VI düzenlemeleri ile düşük sülfür-lü yakıt zorunluluğu getirilerek gemi kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması yasal çerçeveye kavuşturulmuştur (Mi & Zhang, 2022). IMO'nun deniz taşımacılığı için belirlediği net-sıfır çerçevesi kapsamında, 2050 yılına kadar sektörel emisyonların sıfırlanması hedeflenmiş ve bu hedef doğrultusunda küresel düzeyde yakıt standartları ile karbon fiyatlandırma şemalarının devreye alınması yönünde ilk onaylar MEPC tarafından verilmiştir (Chang & Wang, 2024). Avrupa Birliği, IMO'nun emisyon azaltım vizyonunu yetersiz bularak, 2024 itibarıyla denizcilik sektörünü AB Emisyon Ticaret Sistemi kapsamına dâhil etmiş ve küresel kuralların ötesine geçen daha katı bir karbon fiyatlandırma rejimi yürürlüğe koymuştur (Baldursson & Kusch, 2024). Bu adımlar, Paris Anlaşması'nın karbon emisyonunu azaltma yolundaki küresel ölçekteki sorumluluğunu artırmıştır. Paris Anlaşması'nın ana odağı uluslararası deniz taşımacılığı olmamakla birlikte, IMO, sektörün düzenleyici kurumu olarak, gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik faaliyetleriyle Paris Anlaşması'nı desteklemektedir. MARPOL Ek VI ile yürürlüğe giren enerji verimliliği standartları kapsamında, yeni inşa edilen gemiler için enerji verimliliği tasarım endeksi (EEDI) kademeli olarak sıkılaştırılmakta ve 2025 itibarıyla gemilerden %30 oranında daha yüksek enerji performansı beklenmektedir (Deng & Mi, 2023). Sonuç olarak, IMO regülasyonları denizyollarıyla alakalı sera gazı azaltımına odaklanırken, Paris Anlaşması genel kapsamda dünya üzerinde sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda ilerlemektedir. IMO regülasyonları ve Paris Anlaşması'nın entegre şekilde hareket etmesiyle birlikte sıfır emisyon hedefine kararlılıkla ulaşılabileceği görülmektedir.

2.1.2. Küresel Isınma ve Deniz Taşımacılığına Etkileri

Küresel çapta ülkelerin ekonomisi için kritik öneme sahip olan deniz taşımacılığı, karayolları üzerindeki taşımacılığa göre maliyet ve enerji açısından daha verimli bir taşıma modu olmasına rağmen, gemilerden kaynaklı emisyon üretiminin çevreye zararı azımsanamayacak seviyededir. AB açısından yapılan değerlendirmede, "2021 yılında deniz taşımacılığı, AB toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %3-4'ünü oluşturmuştur" (European Environment Agency, 2022). Projeksiyonlara göre ise, denizcilik sektöründeki gelişimle birlikte dünya genelindeki emisyon ticaret sisteminin yeniden gözden geçirilmesi önem arz etmektedir. "Ocak 2024 itibarıyla AB Emisyon Ticaret Sistemi deniz taşımacılığına da genişletilmiş olup, bu durum sektörün karbonsuzlaştırılmasında önemli bir düzenleyici dönüm noktasıdır" (European Commission, 2024). Sadece emisyon ticaret sistemine denizcilik sektörünün eklenmesi, önlem alınması açısından kesin bir çözüm olmamaktadır. AB'nin denizcilik kaynaklı emisyon üretimini şeffaf şekilde denetlemesi ve raporlaması gerekmektedir. "AB sularında faaliyet

gösteren armatörler, 2015/757 sayılı düzenleme uyarınca, gemi bazında CO₂ emisyonlarını izlemek, raporlamak ve doğrulamakla yükümlüdür" (EU MRV Regulation, 2015). 2024 güncellemesiyle bu raporlama, AB'nin ETS sistemine tam entegrasyon sağlamasıyla birlikte denizcilik sektöründeki emisyonlardan kaynaklı maliyet bilincini oluşturmaktadır. "Karbon fiyatlandırma mekanizmaları, armatörler açısından düşük karbonlu teknolojilere yatırım yapılmasını doğrudan finansal olarak teşvik eden bir baskı unsuru oluşturmaktadır" (Handl, 2023). Sonuç olarak, toplam dünya ticaret hacminin denizcilik sektörü üzerindeki etkisinin artmasıyla birlikte iklim değişikliği açısından ciddi risk oluşturmaktadır; bu risk, denizcilik sektöründe kapsamlı kısıtlayıcı regülasyonlara gidilmesini gerektirmiştir. IMO ve Paris Anlaşması'yla birlikte denizcilik sektörü kaynaklı emisyon salınımı minimize edilmektedir. Kapsamlı denetim mekanizmalarıyla birlikte mevcut regülasyonların etkisinin artmasıyla denizcilik sektöründe kapsamlı bir dönüşüm hareketine ihtiyaç vardır.

2.1.3. Yeşil Liman ve Sürdürülebilir Uygulamalar

Limanlar özelinde düşük karbon emisyonuna sahip teknolojilerin gelişmesiyle birlikte "Yeşil liman" ve "sürdürülebilirlik" odaklı uygulamalar dünya çapında Rotterdam, Singapur ve Los Angeles gibi limanlarda öncü uygulamalara imza atmaktadır. Düşük karbonlu teknolojilerin etkisi, "Port of Rotterdam" gibi limanlarda giderek daha somut hâle geliyor. Bu bağlamda, "Rotterdam Limanı'nda uygulanan düşük karbon politikaları kapsamında alternatif yakıt kullanımı, enerji verimliliği projeleri ve operasyonel optimizasyon stratejileri, limanın toplam karbon ayak izinde anlamlı bir azalma sağlamaktadır" (van den Berg & Notteboom, 2021). Yeşil dönüşümün ivmesinin arttığı bir başka liman ise Singapur Limanı'dır; "Singapur Limanı'nda uygulanan iklim uyum stratejileri, yenilenebilir enerji çözümlerinin liman altyapısına entegre edilmesi ve su yönetim sistemlerinin modernizasyonu ile birlikte enerji tüketimini azaltarak yeşil liman dönüşümünü hızlandırmaktadır" (Ng & Lam, 2021). Öte yandan, "Port of Los Angeles", kara taşımacılığı kaynaklı emisyonları azaltmak için "Clean Truck Program" kapsamında sıfır emisyonlu araç filosu kullanımını teşvik ediyor. Liman, çevre dostu araçlara teşvikler sunarak ciddi oranda hava kirliliğinin önüne geçmeyi hedefliyor (Port of Los Angeles, 2023). "Liman çevresindeki ağır taşıtlara yönelik düşük emisyon programları, filo dönüşümünü hızlandırarak dizel kaynaklı kirlleticileri kısa vadede %80'in üzerinde azaltmış ve hava kalitesinde ölçülebilir iyileşmeler sağlamıştır" (Barboza et al., 2020). Bu gibi limanlar, küresel sıfır emisyon hedefine giden yolda rol model olmaktadır. Sürdürülebilir limanların enerji altyapı entegrasyonu ve yenilenebilir enerjinin verimli kullanımı, dünya üzerinde rol model olmaktadır. Sürdürülebilir uygulamalardan bir diğeri Avrupa'nın lider limanı Rotterdam Limanı'dır; liman kendi doğal sevkiyat yollarına sahiptir. Sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaja sahip olan doğal sevkiyat yollarını etkin şekilde kullanmaktadır. Ren Nehri boyunca uzanan bu doğal su yolu, Avrupa'nın yoğun sanayi bölgeleri ile doğrudan bağlantı sağlamaktadır. Doğal su yollarındaki en büyük avantajlardan bir tanesi yük taşımacılığı açısından tasarruflu oluşudur. Doğal su yollarından geçen yükler, denizyollarından daha düşük emisyon salınımına sebep olmaktadır. "İç su yolu taşımacılığı, karayolu taşımacılığına kıyasla birim yük başına daha düşük enerji tüketmekte ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltarak sürdürülebilir lojistik zincirlerinin kurulmasına katkı sağlamaktadır" (Notteboom & Pallis, 2021). Bu sayede, ağır ve hacimli yüklerin karayolu taşımacılığına kıyasla daha az enerji harcayan ve daha düşük karbon emisyonuna yol açan nehir taşımacılığı sevkياتını mümkün kılmaktadır.

2.2. Teknolojik Gelişmeler

2.2.1. Dijital İkiz ve Otomasyon Teknolojileri

Denizcilik sektöründe kullanılan dijital ikiz teknolojisi, otomasyon sistemleri ve gelişmiş algoritmalar, liman operasyonları üzerinde paradigma değişimi yapmaktadır. Dijital ikiz teknolojisi, liman ve deniz taşımacılığı operasyonlarının gerçek ortamdan alınan verileri analiz ederek sanal bir ikizini oluşturup, potansiyel zorlukların belirlenmesi, liman operasyonları üzerinde gerekli optimizasyonların yapılması ve hataların tespiti konusunda kolaylık sağlamaktadır. "Dijital ikiz yaklaşımları, fiziksel liman varlıklarının gerçek zamanlı durumunu izlemenin yanı sıra, öngörücü bakım, operasyonel anomalilerin erken tespiti ve süreç optimizasyonu için simülasyon temelli karar desteği sağlamaktadır" (Zhang, Li & Huang, 2022). Bu yaklaşım, liman operasyonlarında şeffaflık oluşturarak potansiyel hataları indirgemektedir. Yapay zekâ entegrasyonlu denetim sistemi ve kendi alanında uzman insan gücünün birleşimiyle birlikte potansiyel hatalar, çevresel ve finansal analizler kolay ve sistematik şekilde yapılabilir. Bununla birlikte, gelişmiş sensörler, IoT ağı ile entegre edilerek temel çevresel ölçüm sistemleriyle birlikte karar mekanizmalarına veri temin edilmesi daha etkili bir şekilde yürütülmektedir. Limanlardaki otomasyon teknolojisinin yaygınlaşması, hem insan kaynağına olan ihtiyacı azaltmakta hem de gemi operasyon süreçlerinde verimliliği yükseltmektedir. Bilgi tabanlı yapay zekâ sistemleri, uzman bilgisini kurallara dayalı çıkarım mekanizmalarıyla işleyerek karar verme süreçlerini desteklemekte ve çevresel uyum kriterlerinin denetlenmesini otomatikleştirmektedir (Demir & Karatay, 2021). Son yıllarda, birçok liman ve gemi işletmesi, yapay zekâ desteğiyle otomatik rota planlaması, yük yönetimi, yakıt optimizasyonu, arıza tahmini ve bakım uygulamaları gibi alanlarda yenilikçi sistemleri tercih etmektedir. Bu teknolojik gelişmeler, sektörün rekabetçi yapısını güçlendirmekte; sürdürülebilir liman ve denizcilik operasyonları açısından kritik rol oynamaktadır.

2.2.2. Yapay Zekâ ve Otonom Gemiler

Yapay zekâ ve otomasyon entegrasyonunun gelişmesiyle birlikte karbon emisyon salınımı düşmekte ve insan gücüne olan ihtiyaç azalmaktadır. Denizcilik sektöründeki bu değişim ve dönüşüm trendi, gemiler üzerinde de etkisini göstermeye başlamıştır. Küresel çapta otonom gemilerin daha az karbon salınımı yaptığı ve bunun sonucunda gemilerin mürettebatsız ve otonom şekilde işletilmesinin gelecek açısından önemli bir atılım olabileceği düşünülmektedir. Norveç'in Yara Birkeland otonom gemi projesi, otonom gemilerin gelecekte lojistik açıdan etkili olacağını gösteren ve geleceğe ışık tutan bir projedir. Otonom gemilerin ve akıllı limanların yapay zekâ entegrasyon seviyesinin artması, ilerideki küresel lojistik tasarımının köklü bir şekilde değişeceğini göstermektedir. Otonom gemiler, insan müdahalesi olmadan, gelişmiş hassas sensörler ve ileri yapay zekâ teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte gelecekte denizcilik sektöründe kritik bir rol oynayabilecektir. "Denizcilik sektöründe otomasyonun temel gerekçesi, insan etkileşimine olan bağımlılığı azaltarak süreçleri standartlaştırmak ve hataya açık adımları otomatikleştirmektir" (Yorulmaz & Derici, 2023). Ancak, "Otonom deniz ulaşım sistemlerinin yaygınlaşması, teknik ilerlemenin ötesinde, ulusal ve uluslararası ölçekte hukuki çerçevenin yeniden tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır" (Öztürk & Kılıç, 2022). Hukuksal anlamda mevzuat altyapısının güçlendirilmesiyle birlikte otonom teknolojiler dünya üzerinde kritik bir konumda yer alabileceklerdir. Yapay zekâ teknolojilerinin, denizcilik sektörü üzerindeki etkisinin artmasıyla birlikte gelecekte denizcilik sektöründe atılacak yenilikçi adımların gerçekleşmesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum, denizcilik sektöründeki uygulama alanlarını her geçen gün artırmaktadır. Bununla birlikte, otonom ve insansız gemilere yönelik yatırımlar da hızla artmaktadır (Yorulmaz & Derici, 2023). Ancak, insansız gemilerin sektörde yaygın olarak kullanılabilmesi için zaman gerekmektedir. Tüm denizcilik

dinamiklerinin uyum sağlaması gerekmektedir. Hâlen karar alma ve operasyon süreçleri büyük ölçüde insan gücüne dayalıdır. “Yapay zekâ tabanlı otomasyon sistemleri, denizcilik sektöründe operasyonel maliyetleri azaltmakta ve gemi işletmecilerine önemli verimlilik kazançları sağlamaktadır” (Xu et al., 2022). “Yapay zekâ tabanlı karar destek ve otomasyon sistemleri, denizcilikte operasyonel süreçleri düzenleyerek maliyetleri düşürmekte ve insan hatasına bağlı iş güvenliği risklerini anlamlı düzeyde azaltmaktadır” (Kim & Schröder, 2021). Gelişen bu teknolojilerin bir sonucu olarak, denizcilikte sadece kaptan köşkünden ibaret olmayan; kara-deniz arasında, taşıma şirketleri, lojistik sağlayıcıları ve yetkililerle yakın teması mümkün kılan gerçek zamanlı veri alışverişi öne çıkmaktadır. Gerçek zamanlı veri paylaşımını mümkün kılan dijital liman platformları, gemi işletmecileri, lojistik sağlayıcıları ve liman otoriteleri arasında operasyonel entegrasyonu güçlendirerek tedarik zinciri verimliliğini belirgin ölçüde artırmaktadır (Rios & Maqueda, 2020). Sonuç olarak, ileri yapay zekâ teknolojileri birçok operasyonel faaliyette yer almaktadır. Artık küresel çapta devletler, yapay zekâ teknolojisini kendi altyapısına entegre edebilmek için yollar aramaktadır. Otonom gemilerin gelişimi, yapay zekânın varlığıyla birlikte daha da hızlanacağı öngörülmektedir. Yapay zekâ sayesinde çoklu verilerin işlenmesi, raporlanması ve analiz edilmesi otonom gemi projelerinin gerçekliğini artırmaktadır.

2.2.3.Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik

Küresel ölçekte artan teknolojik atılımlarla birlikte değişen ve gelişen deniz yolları düzeninde, enerji verimliliği ve bu alandaki sürdürülebilir çalışmalar küresel çapta önemli rol oynamaktadır. “Limanlarda uygulanan IoT tabanlı enerji yönetim çözümleri, soğutmalı konteynerlerin şarj planlamasını gerçek zamanlı verilerle optimize ederek toplam enerji maliyetlerinde %20'ye varan tasarruf sağlamaktadır. Benzer şekilde, yapay zekâ destekli rota optimizasyonu uygulamaları, gemi operasyonlarında yakıt tüketimini %10-15 aralığında azaltarak enerji verimliliğini artırmaktadır” (Li, Zhang & Yuen, 2022). Bu dijital entegrasyonların yanı sıra, gemiler özelinde nasıl tasarruf yapılacağı konusunda da çalışmalar yapılmaktadır. “LNG, metanol, hidrojen ve düşük sülfürlü yakıtlar gibi alternatif deniz yakıtlarının benimsenmesi; hem enerji verimliliğini artırmakta hem de gemi kaynaklı karbon ve hava kirlenmesi emisyonlarını anlamlı şekilde azaltarak operasyonel maliyetlerde düşüş sağlamaktadır” (Balcombe et al., 2019). Dünya üzerindeki bu tarz atılımları, gelecekteki yenilikçi hareketlerin öncüsü olarak konumlandırabiliriz.

2.3.Türkiye’deki Gelişmeler

2.3.1. Liman Altyapısı ve Kapasite Durumu

Türkiye Devleti, jeostratejik konumu sayesinde Asya ve Avrupa ticari koridorlarını birbirine bağlayan bir köprü konumundadır. Bu durum, ülkemizin küresel ticarete kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, küresel ticarete transit üs olma yolunda birçok adım atılmaktadır. Limanlar özelinde son yıllarda Mersin, Ambarlı ve İzmir limanlarında yapılan optimizasyon ve kapasite artırımı projeleriyle, Mersin Limanı Genişleme Projesi'nin tamamlanmasıyla liman, 2,6 milyon TEU'dan 3,6 milyon TEU kapasiteye ulaşacaktır. 880 metrelik rıhtıma iki adet 400 metrelik mega gemi aynı anda yanaşabilecektir (UAB, 2025). Mersin Limanı'ndaki artış diğer limanlarca da takip edilmektedir. 2024 yılı Aralık ayında Ambarlı Bölge Liman Başkanlığı idari sınırlarında toplam 232.014 TEU konteyner elleçlemesi gerçekleşmiştir (UAB, Denizcilik İstatistikleri, 2024). 2023 yılında Ambarlı Bölge Liman Başkanlığı idari sınırlarında toplam 3.170.430 TEU konteyner elleçlenmiştir (UAB, Denizcilik İstatistikleri, 2024). 2024 yılında Türkiye limanlarında taşınan konteyner miktarı 13.529.729 TEU olarak gerçekleşmiştir (Denizcilik İstatistik Bülteni, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2024). Ülkemiz, demiryolu ve otoyol yatırımlarıyla hinterland bağlantılarını güçlendirerek çok modlu taşımacılıkta lider ülke olma hedeflerini pekiştirmektedir. Ancak, küresel ölçekte

ticari kapasitemizi değerlendirdiğimizde, jeostratejik konumumuz güçlü olmasına rağmen, dünyada öne çıkan ülkelerin oldukça gerisinde kaldığımız görülmektedir. Dolayısıyla, liman altyapısı ve kapasite durumunun sistematik bir analizle tekrar gözden geçirilmesi ve ciddi bir optimizasyona gidilmesi gerekmektedir. Bundan sonraki süreçte, mevcut limanlarımızın kapasitelerini ve elleçleme hızını nasıl artırabileceğimize odaklanmamız kritik önemdedir. Türkiye'nin avantajlı jeostratejik konumu liman altyapısını desteklerken, içeride yapılacak yapısal optimizasyonların eksikliği, dış bağlantılarımızı, yani uluslararası lojistik bağlantı ağlarını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, stratejik analizler yapmalı, uluslararası örnekleri doğrudan yerinde inceleyip dünyadaki iyi uygulamaları ülkemize uyarlayacak ekipler oluşturmalıyız. Stratejik ve bütüncül yaklaşımı merkeze alarak, limanlarımızı küresel arenada rekabetçi bir konuma taşımak mümkün olacaktır.

2.3.2. Türkiye'nin Lojistik Koridorlardaki Rolü

Küresel ticaret yollarının tam ortasında yer alan Türkiye, koridorlar arası geçiş merkezi olarak konumlanmaktadır. Türkiye'nin Orta Koridor ticaret rotasındaki stratejik rolü büyüktür. "Türkiye, Avrupa, Orta Asya ve Orta Doğu arasında stratejik bir kara köprüsü işlevi görmekte olup, bu koridor üzerindeki altyapı yatırımları mevcut doğu-batı ticaret rotalarındaki operasyonel darboğazların giderilmesini hedeflemektedir" (Rentschler, 2025). Asya ve Avrupa'yı birbirine bağlayarak önemli bir jeopolitik konuma sahip olan Türkiye, lojistik koridorlardaki mevcut zorlukları her geçen gün aşarak daha etkili bir konuma yerleşmektedir. Türkiye, lojistik koridorlar üzerinde stratejik bir köprü olma konumunu güçlendirmek amacıyla taşıma modları arasında aktarma merkezleri oluşturma, ölçekle büyüme ve intermodal taşımacılığı destekleme yönünde net hedeflere sahiptir (Ticaret Bakanlığı, 2024). Ayrıca Demir İpek Yolu olarak da bilinen Bakü-Tiflis-Kars (BTK) Hattı'nın etkinliği, Orta Koridor'un verimli işlemeyen bölümlerini desteklemek amacıyla öncelikli yatırım konularındandır (TCDD 2024 Faaliyet Raporu, Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2024). Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın 2024-2028 Stratejik Planı, Türkiye'nin lojistik ve ulaştırma ağları aracılığıyla küresel ticaretteki konumunu güçlendireceğine dair bir vizyon içermektedir (UAB Stratejik Planı, 2024). Ayrıca, Özel İhtisas Komisyonu Raporu'na göre limanların demiryolu ağlarına bağlanması konusunda da somut ilerleme kaydedilmiş olup, 217 liman ve iskelenin 16'sı demiryolu bağlantılıdır ve bu limanlardaki yükün yaklaşık %7,5'i demiryolu taşımacılığı ile gerçekleşmektedir (ÖİK Raporu, 2025). Bu gelişmeler bize gösteriyor ki Türkiye, Orta Doğu'da yükselen lojistik bir güç olarak ön plana çıkmaktadır. Mevcut koridorlara yapılacak yatırımlarla birlikte ulaştırma ve lojistik alanında lider ülke olma yolunda kararlı şekilde ilerleyebilecektir.

3. Yöntem

3.1. Araştırma Yaklaşımı

Makalenin temel araştırma yöntemi, literatür taraması yoluyla küresel örnek ve uygulamaların analizine; nitel karşılaştırmalı analizler ve sürdürülebilirlik odaklı politika üretimine dayandırılmıştır. Ayrıca, nicel veri kaynakları kullanılarak uluslararası karşılaştırmalar yapılmıştır.

3.2. Veri Kaynakları

Mevcut bilimsel makaleler, resmi kuruluş yayınları (IMO, UNCTAD, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı verileri vb.), sektörel raporlar ve saha çalışması sonuçları analiz için temel kaynaklar olarak kullanılmıştır.

3.3. Analiz Yöntemi

Küresel ve ulusal bazda sürdürülebilirlik ve teknik gelişmeler, SWOT analizi ve çok kriterli karar analizi (MCDM) gibi yöntemlerle değerlendirilmiştir. Özellikle liman ve gemi teknolojilerindeki yeni yaklaşımlar, maliyet-fayda ve çevresel etki analizleri ile incelenmiştir.

4. Denizyolu ve Kıyı Yapılarında Yeni Yaklaşımlar

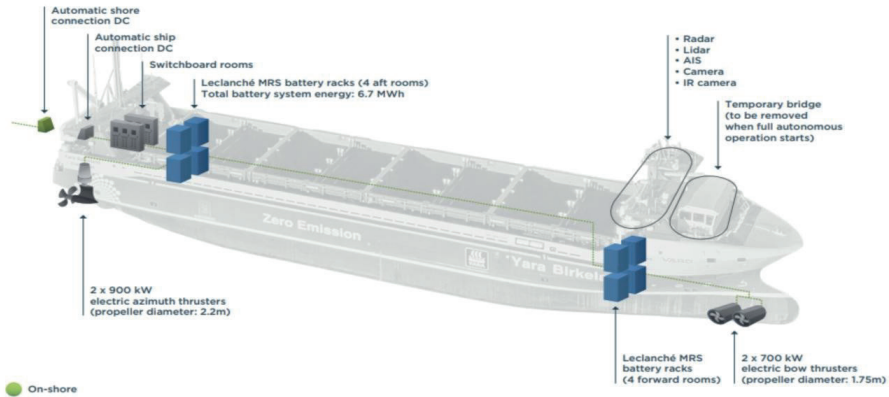
4.1.Yapay Zekâ ve Otomasyon Entegrasyonu

Limancılıkta otomasyon, sensör ağları, büyük veri analitiği ve yapay zekâ algoritmaları operasyonel verimlilikte etkili değişimlere neden olabilmektedir. Bu durum, limanlar üzerinde birçok farklı gelişmenin oluşmasında etkilidir. "Liman otomasyonu, ilk olarak uzaktan kumandalı ekipmanların kullanımıyla başlayıp, ardından süreç otomasyonuna evrilmiş ve son dönemde yapay zekâ temelli karar verme sistemlerinin entegre edildiği akıllı liman aşamasına ulaşmıştır" (Heilig, Lalla-Ruiz & Voß, 2017). Bu süreçler neticesinde tam otomasyonlu entegre limanların dünya üzerinde yayılması hızlanmıştır. Liman teknolojilerini geliştirebilen ve sahada etkin biçimde uygulayabilen ülkelerin sayısı günümüzde sınırlıdır. Dünya üzerinde tam entegre otomasyon teknolojisinin yaygınlaşmasının en büyük sebebi, insan hatalarından kaynaklanan operasyonel kesintileri minimize ederek süreci hızlandırmasıdır. "Şanghay Yangshan Derin Su Limanı'nın dördüncü faz genişlemesi, yüksek kapasiteli otomatik istif vinçleri ve sürücüsüz AGV filosu ile tam otomasyonlu konteyner operasyonları yürüterek yıllık milyonlarca TEU elleçleme kapasitesine ulaşmıştır" (Zeng, Luo & Xu, 2020). "Gelişmiş limanlarda dijital karar destek sistemlerinin uygulanması, rıhtımda bekleme sürelerini çift haneli oranlarda azaltırken; gelişmekte olan ülkelerde otomasyon altyapısının sınırlı olması, ekipman arızalarının sıklaşmasına ve operasyonel verimliliğin düşmesine yol açmaktadır. Afrika limanlarında IoT sensör penetrasyonu %20'nin altında kalırken, Avrupa hub limanlarında bu oran %70'in üzerindedir (Parola, Risitano & Ferretti, 2022). "Singapur Limanı'nda uygulanan entegre otomasyon çözümleri uzaktan kontrollü vinçler, otonom yönlendirmeli araçlar (AGV), istifleme vinçlerinin otomasyonu (ASC) ve yapay zekâ destekli gemi trafik planlama sistemleri terminal verimliliğini belirgin ölçüde artırmış, bekleme sürelerini azaltmış ve operasyonların sürekliliğini güvence altına almıştır" (Lam & Yap, 2021). Yangshan Derin Su Terminali'nde 5G tabanlı endüstriyel ağ ile makine görüşü destekli uzaktan vinç kontrolü uygulanmakta; bu sistem ±2-3 cm konum doğruluğu sağlayarak yüksek yoğunluklu konteyner operasyonlarında günlük on binlerce TEU'nun tam otomasyonla elleçlenmesine imkân vermektedir (Li, Chen & Wu, 2021). Otomasyon entegrasyonunun artmasıyla birlikte elleçleme oranlarının da arttığı görülmektedir. Öte yandan, denizcilik finans altyapısında da yapay zekâ etkisi artmıştır; denizcilik sektöründe dijital dönüşüm örnekleri arasında COSCO'nun yapay zekâ tabanlı filo optimizasyon sistemleri, Maersk'in IoT destekli soğuk zincir projeleri ve TradeLens blokzincir platformu gibi girişimler operasyonel görünürlüğü artırmış ve finansal işlem sürelerini radikal biçimde kısaltmıştır (Rodrigue & Notteboom, 2022). Sonuç olarak, güçlü ticari altyapıya sahip olmak isteyen ülkeler, günümüz dünyasındaki teknolojik gelişmeleri yakından takip etmelidir. Bununla birlikte mevcut limanlar ve deniz yollarındaki sistemlerin ileri teknoloji odaklı entegrasyonu sağlanmalıdır. Ulaşımda güçlü ve bağımsız bir ülke, ekonomide güçlü ve bağımsız bir ülke anlamına gelmektedir

4.2. Yeni Nesil Gemi Teknolojileri

"Endüstri 4.0, siber-fiziksel sistemlerin üretime entegre edilmesiyle, makinelerin insan müdahalesi olmadan üretimi özerk biçimde koordine etmesini ifade eder" (Lasi ve ark., 2014). Gelişen teknolojilerin etkisiyle, Endüstri 4.0 tüm sektörlerde olduğu gibi denizcilik sektöründe de köklü bir değişimin öncüsü olma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, "Gerek

sivil gerekse askerî sektörlerde ortaya çıkan teknolojiler yakından izlenmekte ve sektörel gereksinimlere göre stratejik biçimde uyarlanmaktadır" (Bayar & Şeker, 2020). Denizcilik sektörü, bu büyük dönüşümsel değişikliklerle yüzleşirken, öncelik olarak maliyetlerin düşürülmesi ve taşımacılıkta insan gücünün azaltılması hedeflenmektedir. Böylece insan kaynaklı oluşabilecek potansiyel hataların önüne geçilmesi amaçlanır (IMO, 2018a). Yeni nesil gemi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte birçok ülke farklı teknoloji odaklı çözümler geliştirmeye başlamıştır. Özellikle Norveç ve Finlandiya, bu alanda önemli yatırımlar yapan ülkelerin başında gelmektedir. Norveç merkezli DNV GL'nin ReVolt konsepti, kısa deniz taşımacılığı için tasarlanmış, sıfır emisyonlu, batarya ile çalışan ve otonom olarak işletilebilen mürettebatsız bir gemi tasarımıdır (DNV GL, 2014). Bu gemi tasarımının genel teknik yerleşimi Şekil 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Yara Birkeland otonom ve sıfır emisyonlu konteyner gemisinin teknik bileşenleri (Leclanché SA, 2021).

Ar-Ge çalışmaları da bu yönde hızla devam etmektedir. Düşük karbonlu hibrit yakıtlı gemiler, LNG ile çalışan konteyner ve tankerler, elektrikli akü destek sistemleri ve yelken destekli enerji yönetimi gibi yeni gemi tasarımları; enerji verimliliğini artırarak çevre üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılmasında kritik önem taşımaktadır. Otonom ve yarı otonom gemiler ise hem insan kaynaklı riskleri azaltmakta hem de operasyonel güvenlik (örneğin çarpışmayı önleme, acil durum müdahalesi) açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin küresel ölçekte uygulanabilir olması için hukuki anlamda somut adımların atılması gerekmektedir. Çin'in uluslararası standartizasyon süreçlerine aktif katılımına rağmen, otonom gemiler için bağlayıcı bir hukuki çerçevenin eksikliği, veri egemenliği ilkelerinin netleşmemiş olması ve özellikle gelişmekte olan ülkelerin dijital liman teknolojilerine erişimi için fon mekanizmalarının yetersizliği, küresel ölçekli dönüşümün önündeki başlıca engeller olarak tanımlanmaktadır (Haralambides & Langen, 2022). Fakat insansız gemilerin mevcut deniz yolları sistemine entegrasyonunun sürdürülebilir olmadığı ve hukuki çerçeveye tam olarak oturtulmadığı görülmektedir.

4.3. Çevresel Sürdürülebilirlik ve Yeşil Limanlar

Çevresel sürdürülebilirlik ve yeşil limanların özünde yer alan temel anlayış, bulundukları çevresel ekosistemi bozmadan doğayla entegre çalışabilen yapıları "yeşil liman" olarak adlandırmaktadır. Yeşil limanların temel yapısı, doğaya zarar veren karbon salınımlarını minimize ederek, yenilenebilir enerji ve biyoçeşitliliği destekleyici uygulamalarla birlikte doğayla entegre hareket etmektedir. Yeşil liman yaklaşımının ana unsurları Şekil 2'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. Yeşil liman konseptinin temel bileşenleri
(Desapex Engineering Consultants LLP, 2024).

Bununla birlikte, yeşil limanlar için sertifikasyon programları, karbon salınımı azaltım hedeflerinin izlenip raporlanması ve doğal yaşam alanlarının bütünsel koruma planları kritik rol oynamaktadır. Yeşil limanların sayısının artmasıyla birlikte çevresel sürdürülebilirlik dünya çapında mümkün hale gelebilecektir. Örneğin, şehir merkezinde bulunan Hamburg Limanı, başarılı çevre uygulamalarıyla öne çıkmaktadır. Şimdiye kadar uyguladıkları çeşitli projelerle her yıl 76.000 ton karbon emisyonu önlenmiş ve 60 milyon kWh enerji tasarrufu sağlanmıştır (Port of Hamburg, 2018). Dünya genelindeki bu tür yaklaşımlar hem rol model olmakta hem de aynı zamanda küresel çapta limanlar üzerindeki "çevresel sürdürülebilirlik" hedeflerinin başarılabildiğini göstermektedir. Küresel boyutta, sıfır emisyon hedefine ulaşmak için birçok limanda çeşitli projeler uygulanmaktadır. Dünya genelinde birçok liman, çevresel sürdürülebilirlik adına farklı teknik ve anlayış biçimleri geliştirmiştir. Örneğin, "San Diego Limanı, elektrifikasyon, yenilenebilir enerji ve topluluk temelli çevre girişimlerine yatırım yaparak daha temiz ve sürdürülebilir bir geleceğe geçiş yapmaktadır" (Port of San Diego, 2024). Bununla birlikte, "San Diego Limanı'nın Denizcilik Temiz Hava Stratejisi, mahalle programlarını ve temiz hava çözümlerini destekleyerek topluluk geliştirme, halk sağlığı ve çevre koruma girişimlerini bütünlüştirmektedir" (Port of San Diego, 2024). Bütün bu uygulamalar, limanların doğayla yeniden bütünleşmesini sağlamakta ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli örnekler sunmaktadır.

4.4. Altyapı Kapasitesinin Küresel Standartlara Yükseltilmesi

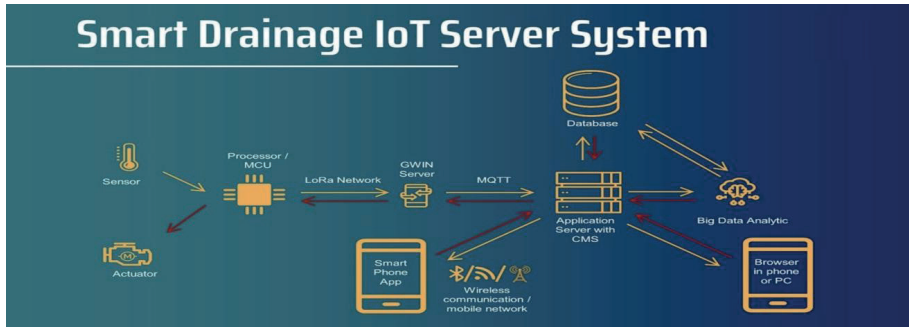
Teknik altyapı kapasitesinin küresel standartlara yükseltilmesi, limanların rekabet gücünün artması açısından kritik öneme sahiptir. "Çin hükümeti tarafından yayımlanan ulusal akıllı liman strateji dokümanları, liman otomasyonu, gemi-kıyı entegrasyonu ve yapay zekâ tabanlı araştırmaların hızlandırılması için düzenleyici ve finansal teşvikleri içermektedir" (Liu, Wang & Chen, 2022). Limanlara gelen demiryolu ağlarının geliştirilmesi, otomasyon destekli depolama alanları, konteyner terminal yönetim sistemleri ve yeni nesil güvenlik ağları (siber güvenlik vb.) ile altyapı geliştirme projeleri hız kazanmıştır. Küresel çapta akıllı limanların sayısının artmasıyla birlikte devletler arası küresel ticaret ağının birbirleriyle entegrasyonunun artacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak, limanların küresel çapta gelişmesi hem ülkelerin ticari hacmini artıracak hem de çevresel sürdürülebilirlik konusunda katma değer sağlayabilecektir.

4.5. İklim Değişikliğinin Kıyı Drenajı ve Taşkın Riski Üzerine Teknik Etkileri

Küresel çapta iklim değişikliğinin etkisini göstermesi neticesinde, kıyı drenajı ve taşkın yönetimi açısından temel akış ve denge parametrelerinde köklü değişiklikler oluşmuştur. Eski yıllarda drenaj sistemleri istatistiksel geçmiş verilere göre tasarlanıyordu. Fakat küresel iklim değişikliğiyle birlikte bu tarz statik tasarımlar yerine adaptif/akıllı drenaj sistemlerinin tasarlanması gerekmektedir. Özellikle deniz seviyesindeki artış, fırtına dalga parametrelerinin yükselmesi ve kısa sürede artan şiddetli yağışlar drenaj şebekesinin tasarım debisi ve geri tepme yüksekliklerinde ani artışlara sebep olur. Bununla birlikte, deniz suyunun drenaj sistemine infiltrasyonu, özellikle düşük kotlarda hidrolik gradyanların tersine dönmesine ve iç bölgelerde terfi gereksiniminin artmasına yol açar. Bileşik taşkın olaylarında; deniz seviyesi, fırtına şişmesi ve yoğun yağış eş zamanlı olduğunda sistemde bileşkeli hidrolik yük, tahmin edilenden çok daha büyük seviyelere ulaşabilir. Bu durum neticesinde denize tahliye edilmeye çalışan su, fırtına şişmesi ve deniz seviyesinin yükselmesiyle deşarj ağzını tıkalıdır. Böyle bir durumda potansiyel su baskınları limanlar üzerinde ciddi etki oluşturabilmektedir.

4.5.1. Akıllı Drenaj Sistemlerinin Teknik Bileşenleri ve Altyapı Mimarisi

Güncel akıllı drenaj sistemleri; çok katmanlı sensör topolojisine (su seviyesi, LIDAR/radar, basınç, debi, tuzluluk, yağış ve pompa/kapak pozisyon sensörleri), IoT ve 5G tabanlı düşük gecikmeli/büyük bant veri aktarımına ve merkezi bulut bilişim odaklı analiz altyapısına dayanır. "Fırtına suyu yönetimi kapsamında, bir dijital ikiz; kanalizasyon akış sensörlerinin, toplam sisteminin entegre hidrodinamik modeliyle birleştirilmesiyle oluşturulur" (Chandler & Digman, 2022). Bu kapsamda Şekil 3'te gösterilen IoT tabanlı akıllı drenaj veri iletim mimarisi, sensör-haberleşme-bulut analiz-kullanıcı arayüzü zincirinin bütüncül bir yapı içerisinde nasıl etkileşim kurduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Akıllı drenaj sistemlerinde IoT tabanlı veri iletim mimarisi ve bileşen etkileşimi (Bivocom, 2023).

Sensörler, drenaj tünelleri ve kanallarındaki belirli karakteristik noktalar (giriş-çıkış, pompa istasyonu, geri tepme klapesi) üzerinde konumlandırılır. LoRa/4G/5G ile geniş etki alanı ve düşük enerji tüketimi sağlanırken; bulut tabanlı panolar üzerinden bakım, alarm ve sistem optimizasyonu için anlık veri akışı gerçekleştirilir. Bu bağlamda, "NB-IoT sinyal yayılım koşullarının zor olduğu ortamlar için umut vadeden bir kablosuz haberleşme teknolojisidir. Akıllı altyapılara yönelik kontrol sistemlerinin uygulanması, düşük maliyetli ve düşük enerji tüketimli yeraltı sensör cihazlarına olan ihtiyacı artırmaktadır" (Galeano et al., 2023). Bu alıntıdan anlaşılacağı üzere, IoT temelli izleme ağlarının altyapı gereksinimleri

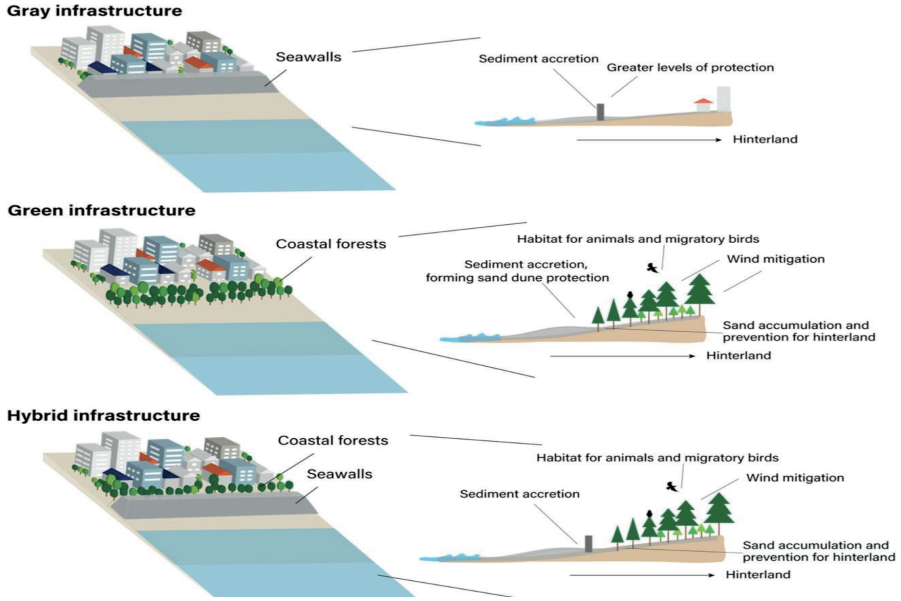
açıkça ortaya konmaktadır. Model öngörülü kontrol (MPC), pekiştirmeli öğrenme (RL) ve dijital ikiz entegrasyonu, debi ve su seviyesi sapmalarına milisaniyelik ölçeklerde yanıt verilmesini mümkün kılar. "MPC, gelecekteki yağış ve sistem yüklerini öngörerek kapak ve pompaları önceden ayarlamak suretiyle taşkın oluşmadan önce müdahale edilmesini sağlar" (Sun et al., 2018). "Pekiştirmeli öğrenme (RL) algoritmaları, drenaj ağında pompaların ve kapakların kontrolünü geçmiş hatalardan öğrenerek optimize eder ve böylece taşkın riskini olay gerçekleşmeden önce azaltır" (Qin et al., 2021). Bu tarz kontrol sistemlerinin entegrasyonu, gelecekte limanlar üzerinde tehdit oluşturabilecek taşkınlara karşı açıkça koruma sağlamaktadır.

4.5.2. Akıllı Taşkın Yönetimi: Sayısal Modeller ve Erken Uyarı Sistemleri

Sensör istasyonlarından kesintisiz gelen verilerle beslenen hidrodinamik (örneğin Saint-Venant denklemleri) ve hidrolik modeller, gerçek zamanlı olarak taşkın hacmini, tepe debiyi ve sistemin beklenen yanıt süresini modelleyebilir. Literatürde bu durum şöyle açıklanmaktadır: "Gerçek zamanlı taşkın tahmin sistemleri, genellikle Saint-Venant denklemlerine dayalı 1-B/2-B hidrodinamik modellere dayanır ve tepe debiyi ile taşkın dinamiklerini öngörmek için canlı sensör verileriyle sürekli olarak güncellenir" (Bates et al., 2021). Burada makine öğrenmesi (ML) ve özellikle pekiştirmeli öğrenme tabanlı kontrol mekanizmaları, pompa, kapak ve depolama hacimlerinin en etkin kombinasyonunu milisaniyelik ölçeklerde tespit eder. Nitekim, "Pekiştirmeli öğrenme denetleyicileri, belirsizlik altında taşkın taşıma hacmini en aza indirerek pompa ve kapakların optimum işletimini gerçek zamanlı olarak öğrenir ve bu süreçte önceden tanımlı kural eğrilerine ihtiyaç duymaz" (Qin et al., 2021) şeklinde rapor edilmiştir. Dijital ikizler ise meteorolojik (rüzgâr, yağış, basınç) ve hidrolik/hidrografik (su seviyesi, salinite, dalga yüksekliği) parametreleri yaygın varlıklarla (altyapı cihazları, kapaklar) entegre ederek çoklu senaryo analizini mümkün kılar. Bu bağlamda, "Bir dijital ikiz, meteorolojik zorlayıcılar ile hidrolik altyapı durumlarını tek bir karar katmanında bütünleştirerek çoklu senaryo taşkın azaltım analizlerinin, koşullar gerçekleşmeden önce yapılmasına imkân tanır" (Chandler & Digman, 2022) bulgusu bu yaklaşımı doğrulamaktadır.

4.5.3. Hibrit (Yeşil-Gri) Altyapı Çözümlerinin Mühendisliği

Kıyı drenajı ve taşkınlarda optimum çözüm, ekosistem tabanlı yeşil altyapılar (mangrov, sazlık, yağmur bahçesi) ile mühendislik odaklı gri altyapıların (beton set, taşkın havuzu, pompa istasyonu, savak) senkronize olarak çalışmasıyla elde edilir. Bu durum literatürde, "Ekosistem tabanlı çözümler, geleneksel gri altyapı ile birlikte uygulandığında taşkın riskinin azaltılmasında tekil çözümlere kıyasla daha yüksek performans göstermektedir" (IPCC, 2022) ifadesiyle desteklenmektedir. Bu bütünsel altyapı yaklaşımı Şekil 4'te görselleştirilmektedir.



Şekil 4. Kıyı koruma yapılarında gri, yeşil ve hibrit altyapı yaklaşımlarının karşılaştırmalı şeması (Omori, 2021).

Dalga enerjisinin biyolojik tamponlarla (örneğin mangrov restorasyonu) sönümlemesi, gri altyapıların hidrolik yükünü azaltır; nitekim, "Mangrov ormanları, kıyı boyunca dalga enerjisini %50–90 oranında sönümleyerek yapısal kıyı savunularının maruz kaldığı hidrolik yükün anlamlı şekilde azalmasını sağlar" (UNEP, 2021). Özellikle "Nehirlere Alan Açmak" gibi yaklaşımlar, hidrolik taşıma kapasitesinde lineer olmayan artış sağlayarak, sel düzeyi ve taşkın hacmini fonksiyonel olarak azaltır. Bu bağlamda, "Taşkın yatağı restorasyonu ve 'Nehirlere Alan Açmak' stratejileri, taşıma kapasitesini doğrusal olmayan biçimde artırarak tepe taşkın seviyesinde ve toplam su basma hacminde ölçülebilir azalmalar sağlamaktadır" (Deltares, 2019). Hibrit sistemlerde, debi, maksimum yağış ve sürekli su yüksekliği gibi parametreler gerçek zamanlı kontrol algoritmalarıyla optimize edilir.

4.5.4. Önemli Uygulama Örnekleri ve Performans

Göstergeleri

Singapur PUB Marina Barrage; 350 m'lik baraj kanalı ve dokuz savak, düşük kotlu şehir merkezinde hidrostatik ve dinamik taşkın kontrolünü sağlar. Kapak-pompa yönetimi otomatikleştirilmiştir. Nitekim, "Entegre savak kapakları ile pompa istasyonları, çift modlu taşkın savunması sunar; böylece deniz seviyesi yüksek olduğunda zorlamalı drenaj, normal koşullarda ise yerçekimi ile deşarj mümkün olur" (Singapore PUB, 2020). Bu sistemin genel yerleşimi Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5. Marina Barrage taşkın savunma sistemi (PUB Singapore, 2024).

Yine bir başka örnek, "Singapur'un liman arka sahasında konumlanan Marina Coastal Expressway (MCE) tüneli ve ona entegre akıllı drenaj sistemi, yüksek yağış ve gelgit dönemlerinde liman bölgesindeki suyu öncelikli olarak depolama tünellerine yönlendirmekte; pompa ve kapak kararları gerçek zamanlı kontrolle optimize edilerek liman erişim yollarının taşkın kaynaklı kapanması önlenmektedir" (Chong & Lee, 2020). Stamford Detention Tank; 38.000 m³ geçici depolama, fırtına debilerini absorbe ederek drenaj sistemindeki pik yükün gecikmeli aktarılmasını sağlar. Bu yaklaşımın mühendislik temeli, "Geciktirme depolaması, pik debiyi zamansal olarak kaydırarak, fırtına girişi akışı ile çıkışı akışı arasındaki bağı koparır ve böylece aşağı havzadaki hidrolik yükü düşürür" (Mays, 2019) ifadesiyle açıklanmıştır.

Bu mekanizma, sistemin hidrolik stresini azaltan en etkin taşkın azaltım stratejilerinden biridir. (Zoppou, 2020) ABD StormSense; IoT tabanlı 200+ sensörlü geniş ağ sayesinde taşkın modellemesi gerçek zamanlı olarak beslenmekte ve uyarı doğruluğu mekânsal olarak optimize edilmektedir. Bu dönüşüm, "Gerçek zamanlı algılama ağları, canlı hidrolik durumların sürekli asimilasyonu sayesinde taşkın savunmasını tepkisel kural bazlı işletmeden çıkarıp öngörücü denetime dönüştürür" (Kerkez et al., 2021) ifadesiyle açıklanmaktadır. Bu sensör tabanlı izleme ağı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. StormSense IoT tabanlı taşkın izleme ağı (VIMS, 2018).

Yoğun sensör ağlarıyla desteklenen akıllı taşkın altyapısı, ölçülen hidrolojik veriyi gerçek zamanlı olarak modellerle birleştirerek sistemin taşkına tepki vermesinden önce müdahale etmesini mümkün kılan öngörücü kontrol paradigmasına geçiş sağlamaktadır (Sadler, Mullapudi & Kerkez, 2020). Hollanda Room for the River; taşkın yatağını genişletme ve kanal kesitini artırma programı, lineer olmayan hidrolik iyileşme ve ekosistem fonksiyonlarını bütünleştirmiştir. Bu nehir koridoru düzenlemesi Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 7. Room for the River nehir koridoru genişletme planı (Landscape Architects, 2017).

Bu durum, "Taşkın yatağına alan kazandırmak, ek enkesit alanının aynı anda hem su seviyesini hem de enerji eğimini düşürmesi nedeniyle hidrolik taşıma kapasitesini doğrusal olmayan şekilde artırır" (Deltares, 2019) ifadesiyle tanımlanmaktadır. "Nehir koridoruna ek alan tanınması, akışın hidrolik kısıtlarını gevşeterek geri basıncı düşürür; bu yaklaşım, set yükseltmekten farklı olarak debi-su seviyesi ilişkisini kökten değiştirerek taşkın riskini daha düşük enerji eğrisi altında yeniden tanımlar" (Kleinhans et al., 2021). Rotterdam Limanı Dijital İkizi; varlık, operasyon ve harici (meteorolojik/hidrografik) verilerin entegrasyonu ile risk temelli envanter ve kapasite yönetimi uygulanmıştır. Bunun mühendislik mantığı, "Bir liman dijital ikizi, fiziksel varlık durumlarını dış zorlayıcılarla bütünleştirerek, arıza modlarını operasyonel olarak ortaya çıkmadan önce önceden değerlendirmeye imkân tanır" (McKinsey & Company, 2023).

Bununla birlikte, "Liman ölçeğinde dijital ikiz uygulamaları, ekipman durum verilerini operasyonel yüklenme ve meteorolojik girdilerle eşleştirerek, kritik arıza modlarının ortaya çıkmadan önce tahmin edilmesini ve kapasite kararlarının risk temelli şekilde optimize edilmesini mümkün kılmaktadır" (Tsioumas & Papoutsidakis, 2022).

4.5.5. Modelleme, Simülasyon ve Değerlendirme Pratikleri

Kıyı drenaj sistemlerinde Delft3D, MIKE21, SWMM ve SWAN gibi gelişmiş simülasyon yazılımları kullanılır; nitekim, "Integrated coastal flood risk assessments routinely employ advanced numerical models such as Delft3D, MIKE21, SWAN and SWMM to resolve hydrodynamic, wave and urban drainage interactions" (Vousdoukas et al., 2020). Bu tür modellerde veri füzyonu, gerçek zamanlı olay analizleri ve çoklu model (ensemble) simülasyon teknikleri kritik rol oynar. Bu bağlamda, "Model skill is enhanced through multisource data assimilation, combining tide gauges, radar rainfall, salinity and discharge sensors with statistical error calibration to reduce structural and parametric uncertainty" (Bates et al.,

2021) yaklaşımı uygulamada benimsenmektedir. Model kalibrasyonu için çok kaynaklı saha verisi (IoT seviye, debi, radar yağış ölçümleri, tide gauge, salinite vb.) ile istatistiksel hata analizi gerçekleştirilir. Bileşik taşkın modellemesinde, deniz seviyesi + şiddetli yağış + yeraltı suyu birleşik sınır koşullarıyla hassasiyet analizi yapılır; literatürde bu durum, "Compound flooding scenarios are simulated by coupling storm surge, extreme rainfall and groundwater boundary conditions, enabling sensitivity testing under simultaneous drivers" (Zscheischler et al., 2018) ifadesiyle açıklanmaktadır.

4.5.6. Politikalar, Finansal Sürdürülebilirlik ve Yönetimsel Stratejiler

Çok amaçlı kıyı projeleri için yönetimsel düzeyde uluslararası mevzuat uyumu (örneğin AB Su Direktifi), uzun vadeli finansal modelleme ve kamu-özel iş birliği gereklidir. Nitekim, "Kıyı altyapısı planlamasının AB Su Çerçeve Direktifi gibi ulus-üstü düzenlemelerle hizalanması, uzun vadeli çevresel uyumun ve yatırım meşruiyetinin sağlanması için zorunludur" (OECD, 2022). Yatırımın etkinliği için hem iklim uyum kapasitesi hem de toplumsal fayda düşünülerek hibrit finansman (hibe, kredi, PPP) ve açık veri ilkeleri benimsenir. Bu yaklaşım literatürde, "Hibe, imtiyazlı kredi ve PPP mekanizmalarının birleştirildiği hibrit finansman şemaları, iklim dirençli liman yatırımlarını finansal açıdan uygulanabilir ve toplumsal olarak savunulabilir hale getirmek için giderek daha fazla benimsenmektedir" (World Bank, 2021) şeklinde açıklanmaktadır. Katılımcı yönetim ve entegre politika araştırmaları (planlama + ekoloji + inşaat) uzun dönemli fonksiyonellik açısından kritik bir öneme sahiptir. Liman yatırımlarında dijital bir ikiz ile tüm paydaşların (operatör, kamu, risk uzmanı) veri tabanlı karar vermesi sağlanır; bu durum, "Liman dijital ikizleri, yönetimi kanaat temelli müzakereden kanıta dayalı koordinasyona dönüştürerek, işletmeciler-kamu-risk uzmanı gibi paydaşların aynı bilgi katmanı üzerinden ortak karar almasını mümkün kılar" (McKinsey & Company, 2023).

4.5.6. Gelecek Araştırma Alanları ve Dijitalleşme Perspektifleri

İleri düzey modelleme için çok katmanlı makine öğrenmesi, büyük veri analitiği, uydu tabanlı sürekli izleme ve otonom robotik görüntüleme sistemleri anahtar olacaktır. Özellikle bileşik taşkın yönetiminde, kıyı-nehir-kent etkileşiminin anlık olarak çoklu ölçekli modellemesiyle karar destek sistemleri güçlenecektir. Standartlaştırılmış IoT ve açık veri protokolleri ile farklı üreticilerden sensörlerin entegre edilmesi, hem ölçeklenebilirliği hem de maliyet etkinliğini artıracaktır. Dijital ikiz tabanlı prediktif bakım, sistemlerin çevik ve sürdürülebilir kontrolünü mümkün kılabilecektir. Dijitalleşme ve yapay zekâ entegrasyonu, gelecekte karşılaşılabileceğimiz limanlar üzerindeki kritik sorunları çözebilecek potansiyele sahiptir.

5. Araştırma Bulguları ve Tartışma

5.1. Otomasyon Teknolojilerinin Maliyet-Fayda Analizi

Akıllı liman dönüşümü; teknolojik inovasyon hızının kurumsal uyum kapasitesini aşması, veri egemenliği ile küresel veri paylaşımı arasındaki çatışma ve gelişmiş-gelişmekte olan limanlar arasındaki dijital uçurum nedeniyle yapısal gerilimler üretmektedir. Ayrıca, geliştirmekte olan ekonomilerde liman dijitalleşmesine yönelik yıllık yatırımların mevcut finansman ihtiyacını karşılamaktan uzak olduğu vurgulanmaktadır (Notteboom & Haralambides, 2023). Otomasyon ve yapay zekâ teknolojilerinin gelişimi ve küresel çapta limanlara entegrasyonu önündeki en büyük engel, maliyetin yüksek seviyelerde olmasıdır. Otomasyon yatırımları kısa vadede büyük maliyetler doğursa da, uzun vadede

maliyetin optimum seviyelere inebileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte, otomasyon teknolojilerinin entegrasyonu ile ilgili maliyet-fayda analizi yapıldığında, otomasyonun liman operasyonlarındaki en kritik ayaklardan biri olan yük elleçleme sürelerinde düşüş yarattığı görülmektedir. Görülüyor ki, otomasyon entegrasyonu ile birlikte liman operasyon süreleri büyük oranda azaltılabilmektedir. Devletler nezdinde yeni dijital teknolojilerin limanlar ve deniz yolları üzerinde etkin kullanımıyla ilgili uzmanlar kurulunun oluşturulmasıyla birlikte bir çözüme varılması muhtemeldir. Bir ülkenin dijital teknoloji entegrasyonunun güçlü olması, başka bir ülke için daha hızlı sevkiyat anlamına gelmektedir. Burada devletler kendi dijital teknolojik entegrasyon altyapılarını geliştirmede süreci bu darboğazların aşılması zor görünmektedir. Bununla birlikte bir başka uyumsuzluk, veri aktarım politikalarından kaynaklanmaktadır. Uluslararası veri aktarım rejimleri ile denizcilik standartları arasındaki uyumsuzluk, özellikle ISO ve IMO düzenlemelerinin eşzamanlı uygulanması gereken mega limanlarda ciddi uyum maliyetleri doğurmakta ve operasyonel entegrasyon üzerinde ek baskılar yaratmaktadır (Wang & Chen, 2023). Veri standartları ile denizcilik regülasyonları arasındaki uyumsuzluk, özellikle yüksek otomasyon seviyesine sahip hub limanlarda ciddi uyum maliyetleri doğurmaktadır. Çin'deki mega terminallerde bu çatışmaların, yıllık yüz milyonlarca CNY ek düzenleme maliyetine yol açtığı rapor edilmiştir (Liu & Zhang, 2022). Otomasyon teknolojilerinin küresel çapta kullanımının artmasıyla birlikte, dünya genelinde ortak bir hukuki altyapının oluşturulması elzem hale gelmiştir. Ülkeler düzeyinde çeşitli alanlarda master planlar yapılmaktadır. Bununla birlikte, limanlar üzerinde "Sürdürülebilir ve Dijital Otomasyon Entegrasyonu" başlıklı bir master planın hazırlanması, diğer ülkeler için de rol model olma potansiyeli taşımaktadır.

5.2. İklim Değişikliğinin Liman Operasyonlarına Etkileri

Küresel çapta iklim değişikliği, dünya üzerindeki iklimsel düzeni değiştirmektedir. Artan fırtına sıklığı, ani deniz seviyesi yükselmeleri ve değişkenlik gösteren hava olayları, liman altyapılarında daha dayanıklı tasarımlar gerektirmektedir. Operasyonel süreçlerin dinamik olarak iklim koşullarına adapte edilmesi, aksama sürelerini minimize etmek açısından yaşamsaldır. "Deniz seviyesinin muhtemelen hızlanan bir oranla yükselmeye devam etmesi ve limanlar ile kıyı altyapıları için sel ve kıyı erozyonu risklerinde artışla ilişkilendirilmesi beklenmektedir" (Coyle ve ark., 2023). "Birçok iklimsel tehlike limanları etkileyebilir (örneğin sıcak hava dalgaları, aşırı rüzgâr ve yağış), ancak ortalama deniz seviyesi yükselişi (SLR) ve buna bağlı aşırı deniz seviyeleri (ESL), özellikle büyüyen önemli bir tehdittir" (UNCTAD, 2021). "Fırtınaların sıklığı ve şiddetinde beklenen artışın, liman operasyonlarını etkileyerek deniz taşımacılığında artan kesintilere ve deniz yapılarının işletme ile bakımında daha yüksek maliyetlere yol açması beklenmektedir." (MCCIP, 2023). Küresel çapta denizlerdeki taşma seviyesinin yükselmesiyle birlikte, liman operasyonları üzerinde baskı oluşacağı düşünülmektedir. "Aşırı hava olayları, güçlenen rüzgârlar ve büyüyen dalgalar; limanların fiziksel varlıklarını ve operasyonlarını artan kesinti riskine maruz bırakmaktadır" (Bertrand & Williams, 2022). Limanların doğal konumlarının deniz kenarında olması nedeniyle, denizlerdeki iklim değişikliği etkisi karşısında savunmasız hale gelebilmektedir. "Deniz seviyesinin yükselmesi doğrudan tehdit oluşturur; rıhtımlar, depolar ve diğer tesislere zarar verebilir" (GCA, 2024). İklim koşullarına duyarlı, dinamik operasyon planlaması, limanlardaki kesinti sürelerinin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda liman teknolojilerinin bu tarz gelecekte yaşanabilecek zorluklara karşı revize edilmesi ve yapısal anlamda güçlendirilmesi, limanların sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Hâlihazırda dünya üzerinde hacimsel olarak büyük paya sahip limanlar, potansiyel iklim değişikliği kaynaklı tehlikelere karşı önlem almaya başlamışlardır. "Port of Rotterdam İdaresi ve Rotterdam Belediyesi, limanın her bölgesine özgü zayıflıkları göz önünde bulunduran bir uyum stratejisi üzerinde paydaşlar ve uzmanlarla birlikte çalışmıştır" (EEA, 2024). Altyapısal yenilikler kapsamında Rotterdam Limanı, önlemler arasında toprak

setlerinin ve/veya eğimlerin yükseltilmesi yer alır; bu önlem, su seviyesi tasarımıda belirtilen seviyenin altında kaldığı sürece alçakta kalan alanların su baskınına maruz kalmasını engeller (EEA, 2024). Bu yenilikçi yaklaşımlara rağmen, dünya genelinde iklim değişikliği kaynaklı potansiyel tehlikelere karşı hâlâ yeterince önlem alınmış değildir. "Gelişmekte olan ülkeler, enerji verimli ve iklimle dayanıklı liman altyapılarına geçişte önemli yatırım açıklarıyla karşı karşıyadır" (IAPH, 2024). Sonuç olarak, liman operasyonlarının iklim değişikliğine karşı dayanımının artırılması gerekmektedir. Sürekli gelişen mühendislik teknolojilerinin kıyı yapıları üzerine entegre edilmesiyle birlikte, potansiyel zorlukların aşılması muhtemel hale gelebileceği düşünülmektedir.

6. Sonuç ve Tartışma

6.1. Genel Çıkarımlar

Türkiye'nin liman operasyon sistemlerinin ve deniz taşımacılığıyla alakalı politikalarının; küresel çapta gelişmiş limanlar seviyesine yükseltilmesi için dijitalleşme, otomasyon, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik odağında yeniden oluşturulması kritik bir öneme sahiptir. Günümüzde, küresel standartların uygulanması ulusal rekabet gücünü ve lojistik kapasiteyi artırırken, sektörel gelişimin temelini oluşturmaktadır. Türkiye'nin genel liman operasyon kapasitesi değerlendirildiğinde, küresel çapta entegre bir yapının yeterince sağlanmadığı ve bazı alanlarda küresel rakiplerinin gerisinde kaldığı görülmektedir. Bölgesel kalkınma hareketleri ulaşım ve lojistik alanında katkı sağlamaya başlamasına rağmen hâlâ yetersiz seviyededir. Daha kapsamlı stratejik hamlelerin atılması gerekmektedir. Özellikle sürdürülebilir büyümeyi sağlayacak bütüncül kalkınma modellerine, iş modeli inovasyonuna ve akıllı lojistik stratejilerine ihtiyaç vardır. Sektörel çapta karbon salınımla alakalı bilincin artması, çevreci standartlara tam uyumun sağlanması ve küresel teknolojik reçetelere uygun entegrasyon, Türkiye'nin gelecekteki lojistik haritalarında daha güçlü konumlanmasına olanak tanıyacaktır. Dijital altyapının güçlendirilmesiyle lojistik süreçlerin verimliliği artacak, otomasyon ve enerji verimliliği odaklı uygulamalar ise sürdürülebilirlik hedefleriyle tam uyum sağlayacaktır. Sonuç olarak, teknoloji odaklı dönüşüm ve bütüncül sürdürülebilirlik yaklaşımları, Türkiye'nin deniz taşımacılığı ve limanlarda uluslararası arenada öne çıkmasını sağlayacak en temel unsurlardır. Türkiye'nin liman yatırımlarının sürdürülebilir bir anlayışla planlanması, insan kaynağının yeni teknolojilere hızla adapte olması, sektörel işbirliklerinin güçlendirilmesi, yeni nesil gemi tasarımlarına teşvik sağlanması ve çevreye duyarlı mevzuat düzenlemelerinin uygulanması en önemli politika başlıkları arasında yer almaktadır. Özellikle yeşil liman teşviklerinin, başarılı ulusal örneklerle yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Savunma sanayisinde başlatılan dönüşüm gibi, lojistik alanında da köklü bir değişimin hayata geçirilmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Dünya genelindeki lojistik ağlardaki hacimsel gelişim incelendiğinde, Türkiye'nin her sene biraz daha geriye gittiği görülmektedir. Ekonomik bağımsızlık adına güçlü ve entegre bir lojistik ağ oluşturulması gerekmektedir. Bu doğrultuda, lojistik ağlarımızın güçlendirilmesi ve yeniden yapılandırılması, küresel ölçekte söz sahibi olabilmemiz için savunma sanayisindeki dönüşümün bir benzerinin ulaşım ve lojistikte başlatılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm hareketi mutlaka üniversitelerden başlamalıdır. Üniversitelerdeki ulaşım ve lojistik odaklı öğrenci kulüpleri ile Ar-Ge takımlarının kurulması noktasında devletin ciddi teşvikler sunması gerekmektedir. Atılacak adımlarla birlikte Türkiye'nin gelecekte katma değerli, yenilikçi ve sürdürülebilir bir lojistik ve ulaşım ağına sahip olmasının önü açılacaktır. Ulaşım ve lojistikte kendi teknolojilerini üretebilen, güçlü lojistik ağlarına sahip bir Türkiye; ekonomik açıdan daha güçlü ve tam bağımsız bir ülke olma yolunda kritik bir eşiği aşacaktır. Türkiye'nin dönüşüm yolculuğu, mutlaka ulaşım ve lojistik teknolojilerindeki atılımlarla sürdürülmelidir.

6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Yol Haritası

Gelecek vizyonunda; yapay zekâ tabanlı liman yönetimi, karbon nötr ulaşım projeleri, dalga enerjisi santralleri ve dijital veri paylaşım platformlarının geliştirilmesi öne çıkan stratejik başlıklardır. Bununla birlikte, akademi ile endüstri arasındaki bağların kuvvetlendirilmesi ve gelişmiş test altyapılarının kurulması, Türkiye'nin küresel lojistikte etkinliğini artıracaktır. Özellikle küresel çapta rol model olan lojistik ağların derinlemesine incelenmesi, hem mevcut sistemlerin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi açısından yol gösterici nitelikte olabilir. Ayrıca, devletin aktif rol üstlenerek genç bilim insanlarının ve mühendislerin sektöre yönlendirilmesi, ülkemizdeki kapsamlı savunma sanayi dönüşümündeki başarı, ulaşım ve lojistik kalkınmamızda da olabilecektir. Bu noktada, herhangi bir devletin etki alanına girmeden, bağımsız hareket ederek kendi teknolojik vizyonumuzu ortaya koymamız elzemdir. Yeni lojistik ağları eklemek ve mevcut sistemdeki dar boğazları tespit ederek bu engelleri aşmak, sürdürülebilir büyümenin anahtarıdır. Ülkemizin uluslararası arenada fark yaratacak projelere imza atma kapasitesi belirgin biçimde artacaktır. Sonuç olarak, stratejik önerilerimizin merkezine şu noktaları almak gereklidir: Akademi-endüstri işbirliklerinin teşvik edilmesi; özelleşmiş Ar-Ge merkezleri kurulmalı ve üniversite-sanayi işbirliği projeleri yaygınlaştırılmalıdır. Test ve demonstrasyon altyapısının güçlendirilmesi; yeni teknolojilerin uygulama öncesi kapsamlı şekilde test edildiği inovatif merkezler yaygınlaştırılmalıdır. Lojistik ve ulaşımın insan kaynağı yatırımı; sektöre özel eğitim ve sertifikasyon programlarıyla, nitelikli uzmanlar yetiştirilmelidir. Ekosisteme entegre yerli teknolojiler; yalnızca ithal edilen değil, yerli ve katma değerli lojistik teknolojileri geliştirilip yaygınlaştırılmalıdır. Politika ve teşviklerin ölçeklenmesi; proje bazlı finansal destekler, devlet teşvikleri ve stratejik yatırım programları artırılmalıdır. Uluslararası iş birliği ve iyi uygulama transferi; başarılı ülkelerin lojistik modelleri analiz edilerek, ülkemize uygun çözümler uyarlanmalıdır. Özetle, sürdürülebilir büyüme ve küresel rekabetçilik için mevcut darboğazları akılcı stratejilerle aşmak ve yenilikçi yaklaşımları sürekli güncel tutmak, Türkiye'nin oyun kurucu rolünü pekiştirecektir.

KAYNAKÇA

- AghaKouchak, A., et al. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>
- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, 182, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- Baldursson, F. M., & Kusch, J. (2024). EU ETS extension to maritime transport: Regulatory tightening beyond IMO frameworks. *Energy Policy*, 185, 113–128. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113128>
- Baptist, M. J., Smits, A. J. M., & van der Nat, A. (2020). Nature-based river widening as an alternative to hard flood defences: Hydraulic and ecological co-benefits. *Science of the Total Environment*, 722, 137–284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137284>
- Barboza, F. L., Miller, J., & Corbett, J. J. (2020). Evaluating the effectiveness of port drayage truck emissions reduction programs on air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102450. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102450>

Bates, P. D., Neal, J. C., & Fewtrell, T. J. (2021). Real-time flood forecasting using coupled hydrodynamic models and live sensor assimilation. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3), e12741. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12741>

Becker, A., Inoue, S., & Cohen, S. (2020). Climate change impacts on seaports: Adaptation challenges for coastal infrastructure. *Marine Policy*, 118, 103964. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103964>

Bertrand, S., & Williams, B. (2022, February 1). Climate change mitigation and adaptation at U.S. ports [Issue Brief]. Environmental & Energy Study Institute. <https://www.eesi.org/papers/view/issue-brief-climate-change-mitigation-and-adaptationat-u-sports-2022>

Bivocom, (2023). Smart Drainage IoT Server System. <https://www.bivocom.com/solution/iotbased-smart-drainage-monitoring-system>

Chandler, I., & Digman, C. (2022). Digital twins for smart stormwater and wastewater systems: Concepts and applications. *Water Research*, 220, 118622. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118622>

Chang, Y., & Wang, T. (2024). Global decarbonization trajectories in maritime transport: IMO net-zero framework and the emergence of carbon pricing. *Marine Policy*, 154, 105649. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.105649>

Chong, J. T., & Lee, P. H. (2020). Integrated smart drainage and tunnel-based flood control for port-adjacent coastal corridors in Singapore. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51, 101904. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101904>

Coyle, C., Gouldby, B., & Stenek, V. (2023). Climate resilience of ports and coastal logistics infrastructure. *Journal of Maritime Policy & Management*, 50(2), 145–168. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.1234567>

Deltares. (2019). Room for the River: Integrated floodplain restoration and hydraulic capacity enhancement for flood risk reduction. Deltares Research Institute. <https://www.deltares.nl>

Demir, H., & Karatay, B. (2021). Bilgi tabanlı yapay zekâ sistemlerinin çevresel izleme ve uyum süreçlerindeki rolü. *Yapay Zekâ Uygulamaları Dergisi*, 6(1), 33–47. <https://doi.org/10.5152/yzu.2021.006>

Desapex Engineering Consultants LLP. (2024). Green Ports: Charting a sustainable course for maritime trade. <https://www.desapex.com/blog-posts/green-ports-charting-a-sustainable-coursefor-maritime-trade>

Det Norske Veritas GL (DNV GL). (2014, September 11). ReVolt – Next generation short sea shipping [News release]. DNV. <https://www.dnv.com/news/2014/revolt-next-generationshortsea-shipping-7279/>

Eom, J., Park, J., & Lee, S. (2023). Digital-twin-based berth scheduling for emission reduction in container terminals. *Maritime Transport Research*, 4, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2023.100089>

European Commission. (2024). EU ETS extension to maritime transport — Policy update. Directorate-General for Climate Action. <https://climate.ec.europa.eu>

European Environment Agency. (2022). Maritime transport emissions in the EU. EEA Report. <https://www.eea.europa.eu>

European Union. (2015). Regulation (EU) 2015/757 on the monitoring, reporting and verification of CO₂ emissions from maritime transport. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu>

Galeano, G. L., Céspedes, S., & Farias, C. (2023). Monitoring and control of smart urban drainage systems using NB-IoT cellular sensor networks. *Journal of Hydroinformatics*, 25(4), 911–928. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.021>

Global Center on Adaptation. (2024, November 11). Climate adaptation in ports: A global imperative for resilience. GCA. <https://gca.org/climate-adaptation-in-ports-a-globalimperativefor-resilience>

H+N+S Landscape Architects. (2017). Room for the River floodplain expansion plan [Illustration]. Netherlands Rijkswaterstaat Programme. <https://www.hnsland.nl/en/projecten/room-for-the-river>

Handl, G. (2023). Carbon pricing and decarbonisation incentives in international shipping. *Journal of Environmental Law*, 35(2), 201–223. <https://doi.org/10.1093/jel/eqad012>

Haralambides, H., & Langen, P. (2022). Governance gaps in autonomous maritime systems: Legal uncertainty, data sovereignty, and technology transfer barriers. *Maritime Policy & Management*, 49(8), 1201–1220. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2037745>

Heilig, L., Lalla-Ruiz, E., & Voß, S. (2017). Digital transformation in maritime ports: Evolution of automation and intelligent decision support. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 459–475. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.011>

IAPH. (2025). The digital and sustainable transformation of ports: A snapshot of an industry in full revolution. PierNext — Port of Barcelona. <https://piernext.portdebarcelona.cat>

International Association of Ports and Harbors. (2024). Study on investment requirements of developing countries for port decarbonization and adaptation to climate change. Maritime & Transport Business Solutions for IAPH. <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/2024-09-26-MTBS-IAPH-Port-Climate-Investments-Report.pdf>

International Maritime Organization. (2018). Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) Human element and safety-related treaties: MSC.1/Circ.1638. IMO. <https://www.imo.org>

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability — Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

Kerkez, B., Qin, Z., & Jia, X. (2021). Real-time sensing and predictive operation for floodresilient drainage systems. *Water Research*, 199, 117184. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117184>

Kim, S., & Schröder, M. (2021). AI-assisted decision systems and safety optimization in maritime operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(11), 1456. <https://doi.org/10.3390/jmse9111456>

Kleinhans, M. G., Van Dijk, W. M., & Straatsma, M. W. (2021). Floodplain reconnection and river corridor expansion as sustainable flood mitigation strategies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(11), 2275–2291. <https://doi.org/10.1002/esp.5134>

Lam, J. S. L., & Yap, W. Y. (2021). Automation and AI-driven optimization in mega-hub ports: The case of Singapore. *Maritime Policy & Management*, 48(7), 1002–1018. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1863124>

Leclanché SA. (2021). The Yara Birkeland – the world's first fully electric and autonomous container ship. <https://www.leclanche.com>

Li, K. X., Zhang, D., & Yuen, K. F. (2022). AI- and IoT-enabled energy optimization in maritime logistics: Impacts on fuel consumption and operational costs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 165, 102869. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102869>

Liu, Q., Wang, J., & Chen, Y. (2022). National policy drivers for smart port development in China: Regulatory acceleration and research incentives. *Transport Policy*, 115, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.11.009>

Li, Y., Chen, Z., & Wu, H. (2021). 5G-enabled remote crane control and machine vision applications in fully automated container terminals: Evidence from Yangshan Deepwater Port. *Ocean Engineering*, 234, 109258. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109258>

Liu, Y., & Zhang, H. (2022). Regulatory interoperability gaps and compliance cost escalation in smart mega ports: Evidence from Chinese automated terminals. *Maritime Policy & Management*, 49(8), 1123–1142. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2031814>

MCCIP (Marine Climate Change Impacts Partnership). (2023). Marine climate change impacts: Evidence report 2023. MCCIP Secretariat. <https://www.mccip.org.uk>

McKinsey & Company. (2023). Digital twins and AI-enabled resilience in port infrastructure. McKinsey Global Institute. <https://www.mckinsey.com>

Mi, Z., & Zhang, H. (2022). Evolution of international maritime decarbonization policies: From GHG strategies to MARPOL Annex VI compliance. *Ocean & Coastal Management*, 226, 106261. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106261>

Ng, A. K. Y., & Lam, J. S. L. (2021). Green transition pathways in Asian megahubs: The case of the Port of Singapore. *Maritime Policy & Management*, 48(7), 987–1004. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1863104>

Notteboom, T., & Haralambides, H. (2023). Structural frictions in global port digitalization: Innovation speed, data governance and the Global South investment gap. *Maritime Economics & Logistics*, 25(4), 612–634. <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00250-9>

Notteboom, T., & Pallis, A. (2021). Inland waterway transport as a sustainable alternative in multimodal freight corridors. *Transport Policy*, 104, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.007>

Omori, Y. (2021). Preference heterogeneity of coastal gray, green, and hybrid infrastructure against sea-level rise: A choice experiment application in Japan. *Sustainability*, 13(16), 8927. <https://doi.org/10.3390/su13168927>

Parola, F., Risitano, M., & Ferretti, M. (2022). Digital maturity gaps in global ports: Comparative analysis of automation performance between developed and emerging economies. *Maritime Policy & Management*, 49(6), 875–892. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1958243>

Port of Hamburg. (2021). Environmental Programme 2020 – status report. Hamburg Port Authority. <https://www.hamburg-port-authority.de/en/environment/environmentalprogramme>

Port of Rotterdam Authority. (2024). Annual report 2024: Navigating towards a sustainable future. Port of Rotterdam Authority. <https://www.portofrotterdam.com/en/news-andpressreleases/2024-annual-report-port-rotterdam-authority-navigating-towards-sustainable>

Port of San Diego. (2024). Maritime Clean Air Strategy: Highlights 2023-2024. Port of San Diego. <https://www.portofsandiego.org/mcas>

Port of San Diego. (2024). Energy & sustainability: Port of San Diego. <https://www.portofsandiego.org/environment/energy-sustainability>

PUB Singapore. (2020). Marina Barrage operations and flood control strategy. Public Utilities Board Singapore. <https://www.pub.gov.sg>

PUB Singapore. (2024). Marina Barrage flood defence system [Photograph]. Public Utilities Board (PUB) Singapore. <https://www.pub.gov.sg/marinabarrage>

Qin, Z., Jia, X., & Kerkez, B. (2021). Reinforcement learning for real-time control of urban drainage systems under uncertainty. *Water Research*, 199, 117184. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117184>

Rentschler, J. (2025). The Trans-Caspian corridor: Geopolitical implications for Eurasian trade. *Transport Policy*, 45, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.02.004>

Rios, I., & Maqueda, F. (2020). Digital platforms and real-time data exchange in port logistics integration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 101972. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101972>

Rodrigue, J.-P., & Notteboom, T. (2022). Digitalization in maritime logistics: From IoT and AI to blockchain-enabled trade platforms. *Maritime Economics & Logistics*, 24(3), 345–366. <https://doi.org/10.1057/s41278-021-00203-3>

T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2025). Özel İhtisas Komisyonu Raporu (2025). Kalkınma Planları ve Strateji Belgeleri Dairesi. <https://www.sbb.gov.tr>

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2023). Türkiye limanları yıllık konteyner elleçleme verileri. Denizcilik Genel Müdürlüğü. <https://denizcilik.uab.gov.tr>

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2024). 2024–2028 Stratejik Planı. Strateji Geliştirme Başkanlığı. <https://www.uab.gov.tr>

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2024, Ocak). Denizcilik Genel Müdürlüğü Haber Bülteni – Aralık 2024 Yük İstatistikleri. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. <https://denizcilik.uab.gov.tr/uploads/pages/aylik-yayinlar/dgm-haber-bulteni-2024-yilialalik2024.pdf>

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2024). Denizcilik İstatistik Bülteni 2024. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Denizcilik Genel Müdürlüğü. <https://denizcilik.uab.gov.tr/uploads/pages/yayinlar/Denizcilik-İstatistik-Bülteni-2024.pdf> denizcilik.uab.gov.tr

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı – Denizcilik Genel Müdürlüğü. (2024). Denizcilik istatistik bülteni 2024. <https://denizcilik.uab.gov.tr>

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2024). Bölgesel liman faaliyet raporları. Strateji Geliştirme Başkanlığı. <https://www.uab.gov.tr>

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2025). Mersin Limanı genişleme projesi Teknik Bilgilendirme. T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. <https://www.uab.gov.tr>

Tsioumas, E., & Papoutsidakis, M. (2022). Digital twin-based predictive risk management in port logistics infrastructure. *Journal of Maritime Logistics*, 14(2), 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.marlog.2022.05.004>

UNCTAD. (2021). Climate change impacts on seaports: Addressing Extreme Sea Levels (ESL) and Sea Level Rise (SLR). United Nations Conference on Trade and Development. <https://unctad.org>

UNDRR. (2020). Human cost of disasters: An overview of the last 20 years (2000–2019). United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/publication/human-costdisasters-2000-2019>

UNEP. (2021). Protecting coasts with nature: The value of mangroves for coastal defense and climate resilience. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org>

van den Berg, R., & Notteboom, T. (2021). Decarbonization strategies in major European ports: The case of the Port of Rotterdam. *Journal of Transport Geography*, 94, 103030. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103030>

Virginia Institute of Marine Science (VIMS). (2018). StormSense IoT-based flood monitoring network [Diagram]. VIMS Smart Infrastructure Project. <https://www.vims.edu/research/centers/physical/programs/stormsense>

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., & Feyen, L. (2020). Coastal flood risk assessment and adaptation under 21st century sea level rise. *Nature Communications*, 11, 2350. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16202-z>

Wang, L., & Chen, Z. (2023). Data governance conflicts and compliance burdens in largescale automated ports: ISO–IMO standard misalignment in practice. *Journal of Maritime Policy & Management*, 50(5), 612–629. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.1198456>

World Bank. (2021). Blended finance and PPP mechanisms for climate-resilient port investment. World Bank Group. <https://www.worldbank.org>

Yorulmaz, M., & Derici, Ö. (2023). Otonom ve yarı otonom gemi teknolojilerinde insan faktörünün azalmasının operasyonel etkileri. *Denizcilik Fakültesi Dergisi*, 15(2), 211–230. <https://doi.org/10.5152/dfd.2023.015>

Zeng, Q., Luo, M., & Xu, H. (2020). Automation and efficiency gains in mega-hub container terminals: Evidence from the Yangshan Deep-Water Port expansion. *Maritime Economics & Logistics*, 22(4), 578–598. <https://doi.org/10.1057/s41278-019-00140-7>

Zhang, R., Li, Y., & Huang, S. (2022). Digital twin-driven predictive maintenance and operational optimization in smart port systems. *Ocean Engineering*, 263, 112312. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112312>

Zoppou, C. (2020). Flood mitigation using detention storage and controlled release strategies. *Journal of Hydrology*, 587, 124945. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124945>

Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B. J. J. M., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., OECD. (2022). Coastal infrastructure and regulatory alignment under EU Water Framework compliance. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org>