

# EVALUATING NEW APPROACHES IN MARITIME TRANSPORT AND COASTAL STRUCTURES FROM AN ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY PERSPECTIVE

Orçun TOPRAKÇI, Ozan Hikmet ARICAN

## ABSTRACT

Maritime transport and coastal structures are among the fundamental components of global maritime trade and are undergoing a sustainability-focused transformation process in line with the strict emission measures enacted by the IMO (International Maritime Organization) and the EU (European Union) as a result of increasing environmental concerns. This study aims to examine new approaches developed and implemented in maritime transport and port activities worldwide from an environmental sustainability perspective. In particular, by comparing different countries, ports, or policies, a conceptual and comparative literature analysis was conducted. As a result of the status assessment of current practices, it was determined that alternative fuels (LNG, methanol, ammonia, etc.), digitalization and smart shipping applications, energy efficiency measures, and green port initiatives play a critical role in ensuring environmental sustainability. However, it has been observed that alternative fuels have limitations such as supply security, high investment costs, and methane leakage, and that digital infrastructure investments may be insufficient, especially in developing countries. The findings reveal that sectoral transformation is possible not only through technological innovations but also through predictable regulations by policymakers, financial incentive mechanisms, and the concerted action of stakeholders. The study serves as a guide for strategic decision-making processes for shipping companies, port authorities, and policymakers, emphasizing the importance of comprehensive solutions for environmental sustainability goals.

**Keywords:** Maritime Transport, Coastal Structures, Environmental Sustainability, Green Port, Alternative Fuels, Digitalization

Orçun TOPRAKÇI  
Kocaeli Üniversitesi

Mail: [orcun402386@gmail.com](mailto:orcun402386@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0491-5133>

Ozan Hikmet ARICAN  
Doç.Dr., Kocaeli Üniversitesi

Mail: [ozanhikmet.arican@kocaeli.edu.tr](mailto:ozanhikmet.arican@kocaeli.edu.tr)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2061-6112>

|                      |   |
|----------------------|---|
| Makale Atıf Bilgisi: | Toprakçı, O., Arican O.H. (2025). "Denizyolu ve Kıyı Yapılarında Yeni Yaklaşımların Çevresel Sürdürülebilirlik Perspektifinden Değerlendirilmesi". Ulaştırma ve Altyapı, Yıl:2, Sayı: 3, s.(X-17) |
| Makale Türü:         | İnceleme  |
| Geliş Tarihi:        | 16.10.2025  |
| Kabul Tarihi:        | 11.12.2025  |
| Yayın Tarihi:        | 29.12.2025  |
| Yayın Sezonu:        | Temmuz-Aralık   |

# DENİZYOLU VE KIYI YAPILARINDA YENİ YAKLAŞIMLARIN ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

## ÖZET

Denizyolu taşımacılığı ve kıyı yapıları, küresel deniz ticaretinin temel bileşenleri arasında yer almakta ve artan çevresel kaygılar sonucu IMO (Uluslararası Denizcilik Örgütü) ve AB (Avrupa Birliği)'nin yürürlüğe koyduğu sıkı emisyon tedbirleri doğrultusunda sürdürülebilirlik odaklı bir dönüşüm sürecine girmektedir. Bu çalışma, dünya genelinde denizyolu taşımacılığı ve liman faaliyetlerinde geliştirilen ve hayata geçirilen yeni yaklaşımları çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden incelemeyi amaçlamaktadır. Özellikle farklı ülkeler, limanlar veya politikalar kıyaslanarak kavramsal ve karşılaştırılmalı literatür analizi sonucu güncel uygulamaların durum değerlendirmesi neticesinde, alternatif yakıtlar (LNG, metanol, amonyak vb.), dijitalleşme ve akıllı denizcilik uygulamaları, enerji verimliliği tedbirleri ile yeşil liman girişimlerinin çevresel sürdürülebilirliğin sağlanmasında kritik rol oynadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, alternatif yakıtların arz güvenliği, yüksek yatırım maliyetleri ve metan kaçağı gibi sınırlılıklar ile dijital altyapı yatırımlarının özellikle gelişmekte olan ülkelerde yetersiz kalabileceği görülmüştür. Bulgular, sektörel dönüşümün yalnızca teknolojik yeniliklerle değil, aynı zamanda politika yapıcıların öngörülebilir düzenlemeleri, finansal teşvik mekanizmaları ve paydaşların ortak bir tavırla hareketi ile mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır. Çalışma, denizcilik firmaları, liman otoriteleri ve politika yapıcılar için stratejik karar alma süreçlerinde yol gösterici nitelikte olup, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik bütüncül çözümlerin önemini vurgulamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Denizyolu Taşımacılığı, Kıyı Yapıları, Çevresel Sürdürülebilirlik, Yeşil Liman, Alternatif Yakıtlar, Dijitalleşme

## 1.Giriş

Küresel ekonominin can damarı olan denizcilik sektörü, küresel ticaretin yaklaşık %90'ını oluşturmakta ve küresel ticaret pazarının ön saflarında yer almaktadır. Küresel ticaretin sürekli genişlemesi ile birlikte, sürdürülebilir deniz taşımacılığı optimizasyonu ve operasyonları ile limanlar ve terminaller gibi kıyı yapıları deniz taşımacılığı şirketleri için önemli bir stratejik nokta haline gelmiştir (Xu ve Chen, 2025).

Ancak, deniz taşımacılığı, en çevre dostu ulaşım yöntemlerinden biri olarak kabul edilse de, artan deniz trafiği ile birlikte gemilerden kaynaklanan emisyonların sebep olduğu hava kirliliği ve bunun olumsuz etkileri önemli ölçüde artış göstermektedir. Egzoz gazlarından yayılan başlıca sera gazları (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> vb.) ve hava kirleticiler (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, CO vb.), küresel ısınmaya, asit yağmurlarına ve hava kalitesinin düşmesine neden olarak insan sağlığı üzerinde ciddi zararlar yaratmaktadır (EPA, 2025). Deniz taşımacılığı faaliyetlerinden kaynaklanan karbon emisyonlarının küresel insan kaynaklı emisyonlar içindeki payı son on yılda artmış olup, toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık olarak %3'ünü oluşturmaktadır (Lugovskyy vd., 2025).

İnsan sağlığına zarar veren ve küresel ısınmaya sebep olan gemi kaynaklı emisyonlar dünya genelinde çevresel kaygılara sebebiyet vermekte ve acil çözümler gerektiren bir husus haline gelmektedir. Bu durum da denizcilik sektörünün iç ve dış çevresini kapsayacak şekilde bir bütün halinde sürdürülebilirlik odaklı dönüşümünü zorunlu kılmaktadır (Wang vd., 2025).

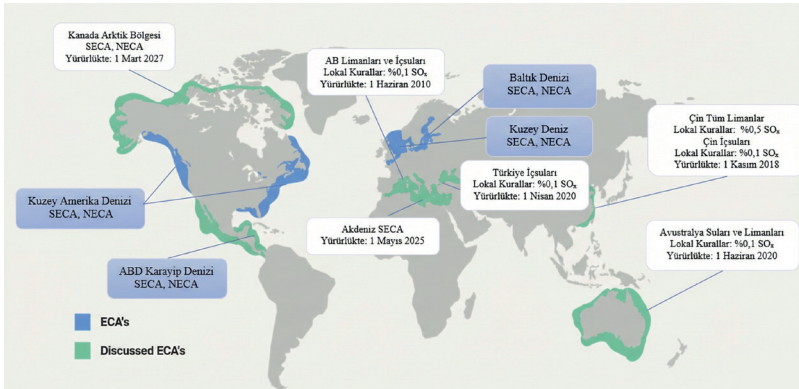
Bu makale, denizyolu taşımacılığı ve kıyı yapılarında yeni yaklaşımları inceleyerek çevresel sürdürülebilirlik penceresinden mevcut uygulamaları ve gidişatı değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

## 2. Literatür Taraması

### 2.1 Düzenlemeler

Artan çevresel kaygılar neticesinde politika yapımcılar tarafından gerek lokal gerekse global olarak bir dizi kurallar yürürlüğe konulmuş ve tedbirler her geçen yıl daha da sıkılaştırmaktadır.

IMO, MARPOL 73/78 Sözleşmesi'nin Ek-VI protokolü, "Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesine İlişkin Kurallar" başlığı altında gemi egzoz gazlarından yayılan hava kirleticisi sınıfında olan sülfüroksit, azotoksit ve partiküler maddeler ECA (Emisyon Kontrol Alanları)'larda sınırlandırılmıştır (Vuskovic vd., 2023).









Şekil 1: Dünya Geneli Emisyon Kontrol Alanları (IMO,2025)

IMO tarafından, 2023 yılında Gemilerden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Azaltılması Stratejisi kabul edilmiştir. Yeni strateji, uluslararası deniz taşımacılığının sebep olduğu toplam sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar %50 azaltma hedefinin yerine, 2050 yılı civarında net sıfır emisyon hedefini getirmiştir (Wan vd., 2025). Avrupa Birliği (AB)'de, bir takım düzenlemeler ile denizcilik sektöründe kullanılan yakıtların sera gazı yoğunluğunu 2050 yılına kadar %80 oranında azaltmayı amaçlamaktadır (Ramsay vd., 2023).

IMO ve AB tarafından karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda yıllara sari olarak yürürlüğe konulan kuralların gereklilikleri ve kapsamı Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Sera Gazı Düzenlemeleri

| DÜZENLEYEN  | KURAL                                       | KAPSAM EMİSYON  | KAPSADIĞI ALAN   | GEREKLİLİK   | GEÇERLİLİK TARİHİ |
|---|---|---|--|--|-------------------|
|    | EEDI Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi     | TtW/<br>CO <sub>2</sub>   | Dünya Geneli / Yeni İnşa Edilen Gemiler                                  | Gemilerde taşınan yük birimi başına (ton-mil) CO <sub>2</sub> emisyonlarına dayalı olarak enerji verimliliğini ölçmek        | Ocak 2013         |
|    | EEXI Enerji Verimliliği Mevcut Gemi İndeksi | TtW/<br>CO <sub>2</sub>   | Dünya Geneli/400 GT ve Üzeri Mevcut Gemiler                              | Gemilerde taşınan yük birimi başına (ton-mil) CO <sub>2</sub> emisyonlarına dayalı olarak mevcut enerji verimliliğini ölçmek | Kasım 2022        |
|   | CII Karbon Yoğunluğu Göstergesi             | TtW/CO <sub>2</sub>   | Dünya Geneli/ Tüm Gemiler  | A, B, C, D ve E gemilerinin, yük taşıma kapasitesi ve deniz mili başına saldıkları gram cinsinden CO <sub>2</sub> miktarı    | Ocak 2023         |
|  | AB ETS Emisyon Ticaret Sistemi              | TtW /CO <sub>2</sub> 2024'ten itibaren; CH <sub>4</sub> ve N <sub>2</sub> O 2026'dan itibaren | AB içi seferler ve AB limanlarına uğrayan uluslararası seferlerin %50'si | Emisyon Ödemesi  | Ocak 2024         |
|  | FuelEU Maritime                             | WtW/CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> & N <sub>2</sub> O                                      | AB içi seferler %100, AB dışı seferler %50 5000 GT ve üzeri gemiler      | Gemilerde kullanılan enerji için sera gazı yoğunluğu sınırı  | Ocak 2025         |
|  | EU-MRV                                      | WtW/CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> & N <sub>2</sub> O                                      | AB limanlarında 400 GT ve üzeri AB içi seferler                          | İzleme, Raporlama ve Doğrulama   | Haziran 2025      |

Sürdürülebilir liman ve denizcilik yönetimi için sera gazı düzenlemeleri, teknik uygulamaların yanında çevre ve enerji odaklı yönetim standartlarıyla da desteklenmektedir. ISO 14001, işletmelerin çevresel etkilerini kontrol altına alması ve düzenli olarak iyileştirmesi için temel bir yapı sunarken, ISO 50001 enerji kullanımının izlenmesi ve verimliliğin artırılmasında rehberlik etmektedir. Limanlara yönelik PERS (EcoPorts) ve North America Green Marine programı ise çevresel performansı objektif ölçütlerle değerlendirerek şeffaf bir izleme sistemi oluşturmaktadır (Dong vd., 2022).

Bahse konu kuralların haricinde son olarak; IMO tarafından The Net-Zero Framework (NZF), Nisan 2025'te MEPC 83'te onaylanmıştır ve 2028'den itibaren geçerli olmak üzere kabul edilmesi beklenmektedir. 7-11 Nisan 2025 tarihinde icra edilen MEPC 83 toplantısı ile CII metriğine ilave olarak, FuelEU Maritime düzenlemesinde olduğu gibi WtW (well-to-wake) sera gazı yoğunluğu hesaplama mekanizmasının global olarak hayata geçirilmesi üzerine kararlar alınmıştır. Bu düzenleme, bir geminin kullandığı deniz yakıtlarının Greenhouse Gas Fuel Intensity (GFI) yıllık ölçümlerini ve iki aşamalı azaltım hedeflerine göre değerlendirilmesini içerecek; gerekli emisyon azaltımları WtW'e dayalı olarak her yıl artırılabilecektir. Bu hedefler; GFI Direct Compliance Balance Target (Tier-I), GFI Base Target (Tier II) olarak belirlenmiş, uyulmaması durumunda CO<sub>2</sub>eq başına ceza ödemesi yapılacak şekilde düzenlenmiştir (Arıcan vd., 2025; IMO, Nisan 2025).

Bahse konu düzenlemeler denizcilik sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmesi yolunda uluslararası organizasyonların hedefleri ile paralellik gösteren önemli adımlardır.

Bu çerçevede, IPCC AR6- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) tarafından yayımlanan Altıncı Değerlendirme Raporunun (Assessment Report 6) üç temel yaklaşımı olan azaltım, uyum ve dayanıklılık; denizcilik sektörünün sürdürülebilirlik hedefleriyle örtüşmektedir. Alternatif yakıtların kullanımı, enerji verimliliği önlemleri ve dijital uygulamalar emisyon azaltımına katkı sağlarken; liman altyapılarının iklim kaynaklı risklere karşı güçlendirilmesi uyum sürecinin temelini oluşturmaktadır. Bu üç eksen, AB Yeşil Mutabakatı, FuelEU Maritime ve IMO'nun Net Sıfır 2050 hedefleriyle bir araya geldiğinde sektöre yönelik bütüncül bir sürdürülebilirlik çerçevesi oluşturmaktadır (Ülker ve Göksu, 2025).

## 2.2. Denizyolu Taşımacılığında Sürdürülebilirlik Üzerine Çalışmalar

Kotzampasakis(2025) ABETS'nin düzenleyici alternatiflere kıyasla daha düşük toplam maliyetle önemli emisyon azaltımları sağlayabileceğini, deniz taşımacılığında teknik ve operasyonel karbon azaltım çözümlerinin benimsenmesini teşvik edebileceğini vurgulamaktadır. Park vd. (2024) Karbon CII, AB-ETS ve FuelEU Maritime gibi düzenlemelerin operasyonel maliyetler ve emisyonlar üzerindeki etkilerine dair kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Oh vd. (2024) kuyudan-pervaneye (well-to-wake) sera gazı emisyonu azaltımı konusunda karbon yakalama sistemlerinin sera gazı salınımını %54-68 oranında azalttığını bulmuştur. Wang vd. (2025) ECA düzenlemesi kapsamında gemilerin rota değiştirme davranışının kaçınılmaz olduğunu ve bunun daha fazla karbon emisyonuna yol açtığını göstermiştir. Wu vd. (2022) tarafından Scopus ve Web of Science veri tabanlarından seçilen ilgili makaleler incelenerek denizcilik sektöründe bir Karbon Emisyon Ticaret Sistemi'nin uygulanmasına ilişkin itici güçleri, zorlukları ve etkileri gözden geçirilmiş, tanımlanmış ve sentezlenmiştir. Sun vd. (2025) Çin-Avrupa rotasında faaliyet gösteren denizcilik şirketlerinin, hız ve sefer sürelerini dikkatli bir şekilde yöneterek karbon fiyatlandırmasının finansal yükünü azaltabileceğini göstermiştir.

Hellström vd. (2024) dekarbonizasyonlaşma hedefleri içerisinde denizcilik segmentleri arasındaki farklılıkları ve alternatif yakıtlar için kısa ve uzun vadeli tercihleri ortaya

koymuştur. Shi vd. (2023) tarafından yeşil enerji (yeşil hidrojen, yeşil amonyak ve yeşil metanol) üretim yöntemlerini incelemiş ve yeşil yakıtların deniz taşımacılığında uygulanma potansiyelini analiz etmiştir. He vd. (2024) yıllık 2000 ton LNG yakıtı tüketen bir gemi için 10.000 ila 20.000 dolar arasında potansiyel AB-ETS tahsisat tasarrufu sağladığını bulmuştur. Rony vd. (2023) denizcilik sektörünün operasyonlarını karbonsuzlaştırmasına yardımcı olacak farklı olası yolları ve teknolojileri incelemiştir. Issa vd. (2022) tarafından IMO ve AB'nin dekarbonizasyonlaşma yolundaki hedeflerinin iki veya üç teknolojinin birleştirilmesiyle ya da yenilikçi, yüksek verimli çözümler sunabilecek radikal bir teknoloji değişimiyle karşılanabileceği tespit edilmiştir. Sjerić vd. (2025) tarafından yapılan bir çalışma, LNG yakıtlı balıkçı gemileri için karbon ayak izinde %14-16 ve toplam maliyette %9,5-13,8 azalma olduğunu göstermiştir. Xing vd. (2021) tarafından kükürt oksitler, azot oksitler ve karbondioksit emisyonlarının eş zamanlı azaltımının yanı sıra sürdürülebilirlik açısından da en umut verici alternatif deniz yakıtlarını belirlemek amacıyla teknolojik bir inceleme yapılmıştır. Cullinane ve Yang (2022) alternatif, sıfır karbonlu yakıtların ileriye dönük en iyi çözüm yolu olduğunu, ancak operasyonel ve teknolojik yeniliklerin sektörün yakın gelecekte tamamen karbonsuzlaşmasını sağlamak için yeterli olmayacağını ortaya koymuştur. Taskar vd. (2023), yapay zekâ destekli rota optimizasyonu ve büyük veri analizlerinin gemi yakıt tüketiminde %2 ila %10 arasında tasarruf sağlayabileceğini göstermiştir.

### 2.3. Kıyı Yapılarında (Limanlar vb.) Uygulanan Yaklaşımlar Üzerine Çalışmalar

Alamouh vd. (2022) limanların ve gemilerin GHG emisyonlarının azaltılmasını kolaylaştırmak için benimseyebileceği mevcut teşvik programlarının zahmetli olduğunu ve hem denizcilik sektörü hem de limanlar tarafından teşvik sağlayıcı olarak benimsenme oranlarının sınırlı olduğunu göstermiştir. Jia vd. (2017) limanlarda 'tam zamanında' varış stratejisinin uygulanması yoluyla yakıt tüketimi ve emisyonların azaltılması potansiyelini incelemiş, daha sürdürülebilir deniz lojistiğine katkı sağlayabilecek önemli operasyonel değişiklikleri vurgulamıştır. Song vd. (2024) tarafından karbon vergisi uygulanmasının limanların konteyner elleçleme hacmini azaltacağı ve böylece hem limanların hem de denizcilik şirketlerinin kârını düşüreceği tespit edilmiştir. Wan vd. (2025) önde gelen küresel limanlara ait vaka analizleri, sürdürülebilir deniz lojistiğinde bir inovasyon merkezi olma hedefinin nasıl başarılabileceğini ortaya koymuştur. Hossain vd. (2021) çevresel etkilerini yönetme ve iyi bir kurumsal vatandaş olma konusundaki kamu söylemlerine rağmen, Avrupa limanlarının Kuzey Amerika ve Asya-Pasifik limanlarına kıyasla çeşitli sürdürülebilirlik girişimlerini benimsemeye daha fazla ilerleme kaydettiğini göstermiştir. Lalla-Ruiz vd. (2019) tarafından limanlarda çevresel sürdürülebilirlik kavramı tanıtılmış ve çevresel göstergelerin modelleme ve karar verme süreçlerine nasıl entegre edilebileceği açıklanmıştır. Acciaro vd. (2014) tarafından limanların çevresel sürdürülebilirliğini artıran başarılı yenilikleri incelenmiş, Avrupa Birliği'nin 7. Çerçeve Programı (FP7) kapsamındaki InnoSuTra projesinde geliştirilen araştırma kavramları öneri olarak ortaya atılmıştır. Bahri vd. (2025) tarafından Malezya limanlarının operasyon ve yönetiminde doğrudan yer alan aktörlerle yapılan etkileşimler aracılığıyla hayata geçirilen çevresel girişimler ve stratejiler hakkında stratejik bilgiler verilmiştir. Khalifeh ve Caliskan (2025) Avrupa limanlarının sürdürülebilirlik göstergelerinin, akıllı operasyonlar ve genel Akıllı Liman Sürdürülebilirlik Endeksi açısından Kuzey Amerika ve Asya'daki limanlara kıyasla daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

## 2.4.Çalışmanın Amacı ve Yöntemi

Bu çalışma, denizyolu taşımacılığı ve kıyı yapıları (limanlar, terminaler ve ilgili altyapılar) alanındaki güncel uygulamaları çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle çevresel etkiler, enerji verimliliği ve yeşil lojistik uygulamaları dikkate alınarak, ulusal ve uluslararası uygulamalar ve politikalar karşılaştırmalı olarak incelenmekte, dünya genelinden çeşitli örnekler verilmektedir. Bu yaklaşım ile, hem sektörel uygulamaların etkinliğinin anlaşılmasına hem de geleceğe yönelik iyileştirme önerilerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Bu çalışmada, özellikle farklı ülkeler, limanlar veya politikalar kıyaslanarak kavramsal ve karşılaştırılmalı literatür analizi yöntemi kullanılmıştır. Aynı zamanda, dünya genelinde sürdürülebilirlik çalışmalarını ve gidişatı değerlendirerek durum analizi yapılmıştır.

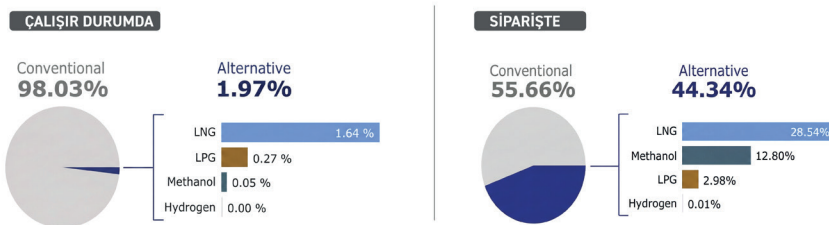
## 3.Denizyolu Taşımacılığında Yeni Yaklaşımlar

### 3.1. Alternatif Yakıtlar

IMO ve AB tarafından egzoz emsionlarının kısıtlanmasına yönelik alınan bahse konu sıkı tedbirler neticesinde, gemi sahipleri ve işletmeciler filoları için uyumlu yakıt seçenekleri aramak zorunda kalmıştır. Yakıt değişimi kapsamında, önlerinde bir takım seçenekler bulunmaktadır. Bunlar; ağır yakıt yağı (HFO) yerine deniz gaz yağı (MGO), deniz dizel yağı (MDO), düşük sülfürlü (LSD) ve ultra düşük sülfürlü (ULSD) yakıtlarını kullanarak yakıt kalitesini değiştirmektedir.

Düşük kükürtlü yakıt yağlarına (LSD, ULSD) veya distile yakıtların (MGO, MDO) sülfür oranı açısından gereklilikleri karşıladığı görülse de, yüksek maliyeti ve artan talep nedeniyle hem fiyatının daha da yükselmesi hem de bulunabilirlik konusunda belirsizlikler mevcuttur. Ayrıca bu yakıtlar, CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılması açısından bu yakıtlar tek başına yeterli olmamaktadır. Bu durum, armatörlerin LNG, LPG, Metanol gibi diğer alternatif yakıt ve çözümlere yönelmesi gerektiğini ortaya koymaktadır ve alternatif yakıtlara yönelimi artırmaktadır.

Hali hazırda dünya genelinde, alternatif yakıtlı gemiler %1,97 lik bir kısmı, siparişteki gemilerin ise %44.34 lük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu da yeni sipariş edilen gemilerin alternatif yakıt seçiminde artış olduğunu göstermektedir. (Şekil 2)



Şekil 2: Alternatif Yakıtların Yüzdeleri (Dünya Geneli ve Siparişte) (DNV, AFI Platform, 2025)

Alternatif yakıtlı gemiler arasında ise LNG yakıtı, hem diğer yakıtlara göre daha düşük fiyatlı olması hem de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının dördünü birden azaltma konusundaki avantajlarıyla en önemli alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir. Mevcut alternatif yakıtlı gemilerin büyük bir çoğunluğunu oluşturmakta ve sıfır emsion hedefleri doğrultusunda bir geçiş yakıtı olarak görülmektedir.

Şekil 3'te gösterilen ilk LNG yakıtlı VLCC tanker olan Yuan Rui Yang tarafından teslimatından bu yana toplamda 18 kez sefer yapılarak, 12000 ton LNG tüketilmiştir. Şirketin duyurusuna göre, geleneksel fuel oil ile kıyaslandığında CO<sub>2</sub> emisyonları yaklaşık üçte bire düşerken, SO<sub>x</sub> emisyonları neredeyse sıfıra gerilemiştir.

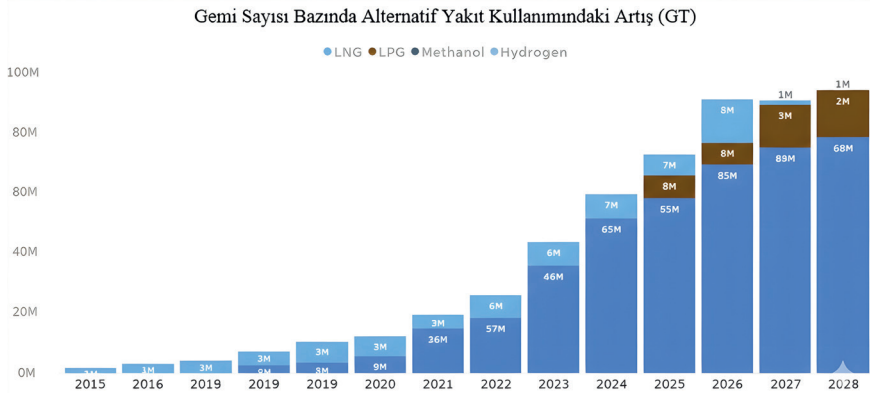


Şekil 3: LNG Yakıtlı İlk VLCC Tanker (OffshoreEnergy, 28 Şubat 2022)

Ancak, LNG kullanımı, uluslararası deniz taşımacılığında sera gazı (GHG) emisyonlarında tam bir azalmaya yol açmamıştır. LNG, yakıt yanması sırasında gemideki CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmasına rağmen, özellikle LNG yakıtlı bazı tip motorlardan kaynaklanan yanmamış metan salınımı nedeniyle bu GHG emisyonlarındaki azalmasını nötürlemektedir.

Bu konuda, zamanlarda sıkı çalışmalarda bulunan Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. (MOL), Kanadevia Corporation ve Yanmar Power Solutions Co., Ltd., LNG yakıtlı gemilerde yapılan deneme seferlerinde metan kaçak oranını %98 oranında azaltmayı başarmıştır. Bu sonuçlar, %70 olan ilk hedefi aşarak önemli bir teknolojik atılımı işaret etmekte ve sürdürülebilir deniz taşımacılığına doğru dönüştürücü bir adım olduğunu göstermektedir.

Denizcilik sektöründe dünya genelinde çevresel sürdürülebilirlik çalışmaları kapsamında en önemli yaklaşım olan alternatif yakıt tercihi hızlı bir şekilde artmaktadır. Alternatif yakıtların gros ton (GT) cinsinden yıllara göre büyümesi ise Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4: Alternatif Yakıtlı Gemilerin Gelişimi (DNV, AFI Platform, 2025)

### 3.2. Dijitalleşme ve Akıllı Denizcilik

Denizyolu taşımacılığı, tüm ulaşım türlerinde olduğu gibi, otomasyon ve teknolojik gelişmelerin etkisiyle yapısal bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Sektörde ileri düzey otomasyonun ve teknolojik sistemlerin uygulanması, insan kaynağına ve bilişsel süreçlere olan bağımlılığı azaltırken, aynı zamanda operasyonel etkinliği ve üretim kapasitesini artırarak sektörel verimliliğin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Geçtiğimiz on yıllık süreçte yapay zekâ ve kablolu iletişim teknolojilerinde kaydedilen gelişmeler, deniz taşımacılığı sistemlerinde kapsamlı bir otomasyon sürecini beraberinde getirmiştir. Bu gelişmeler; limanların organizasyonel yapısı, gemi tasarımları ve yük elleçleme süreçlerinin etkinliğini artırarak deniz taşımacılığının daha güvenilir, doğru ve hızlı bir şekilde yürütülmesini mümkün kılmıştır. Bununla birlikte, söz konusu teknolojik ilerlemeler insan faktörünün dolaylı biçimde (uzaktan kumanda veya önceden programlama yoluyla) dahil olduğu yeni nesil gemilerin, yani akıllı gemilerin gelişimini teşvik etmiştir.

Mürettebat ihtiyacını azaltarak daha emniyetli seyir imkânı sunan uzaktan kontrollü veya tamamen otonom gemiler, denizyolu taşımacılığına farklı bir perspektif kazandırmaktadır. 2015'li yıllarda yalnızca teorik tartışma çerçevesinde gündeme gelen akıllı gemi kavramı, bu süreçte ortaya koyduğu potansiyel faydalar sayesinde deniz testleri ve deneysel uygulamalar aşamasına ilerlemiş, kısmen de olsa sektörde kullanılmaya başlanmıştır.

Akıllı gemilerin sevk ve idaresinde gerekli görülen; çevrenin algılanması, gemi ve yük durumunun takibi, seyir planlaması, çatışmadan kaçınma, demirleme ve manevra işlemleri, yükün elleçlenmesi ile bakım-onarım faaliyetleri, farklı düzeylerde insanın dolaylı kumanda ve/veya kontrolü altında gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, çevresel algılama ile gemi ve yük durumunun izlenmesi gibi bazı fonksiyonlar, modern konvansiyonel gemilerde dahi doğrudan insan kontrolüne ihtiyaç duymadan uygulanabilmektedir.

Dijitalleşme sürecinin bir yansıması olan akıllı denizcilik uygulamaları, özellikle yapay zekâ (YZ) ve büyük veri analitiği sayesinde deniz taşımacılığında çevresel sürdürülebilirlik kapsamında önemli bir dönüşüm yaratmaktadır. Bu teknolojiler; gemi operasyonlarından toplanan çok boyutlu verilerin (hava ve deniz koşulları, akıntı, rüzgâr, gemi hızı, yük ağırlığı, yakıt türü vb.) işlenerek optimum seyir rotalarının belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Rota optimizasyonu sayesinde seyir süresi kısaltılmakta, yakıt tüketiminde %10-15 arasında tasarruf sağlanabilmekte ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarında da kayda değer azalma elde edilmektedir.

Bunun yanında, yapay zekâ tabanlı sistemler yalnızca rota planlamasında değil, aynı zamanda hava tahminleri, bakım-onarım planlaması, liman operasyonlarının zamanlaması ve filo yönetimi gibi alanlarda da etkin rol oynamaktadır. Böylece hem operasyonel maliyetlerin düşürülmesi hem de çevresel sürdürülebilirliğin güçlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Örneğin, yapılan çalışmalar gelişmiş Yapay Zeka optimizasyonunun, her seferin CO<sub>2</sub> salınımını aktif olarak azaltabileceğini göstermektedir. AI destekli rota belirleme, gerçek zamanlı hava durumu, dalga ve rota verilerini analiz ederek, programlardan veya güvenlikten ödün vermeden en verimli rotayı bulur. Sürekli emisyon izleme yöntemiyle, geleneksel rotalara kıyasla yakıt tüketimini ve CO<sub>2</sub> salınımını yüzde 10'a kadar azaltma, daha kısa transit süresi için rotaları günlük olarak uyarılama, varış süresini yüzde 7'ye kadar kısaltma ve emisyonları azaltma, hem çevreyi hem de ticari uyumluluğu korumak için IMO düzenlemelerine (CII, EEXI, FuelEU Maritime) uyum sağlama gibi avantajlar sağlamaktadır.

Dünya genelinde bu tür uygulamaları hayata geçiren gerçek otonom gemi örneklerinden biri, Şekil 5'teki Norveçli Yara Birkeland'dır. Yara Birkeland, dünyanın ilk elektrikli ve otonom konteyner gemisi olarak tasarlanmıştır. Geminin tasarımında, YZ destekli rota optimizasyonu ve emisyon azaltımı hedeflenmiştir. Bu gemi, çevresel etkileri azaltmayı ve deniz taşımacılığında sürdürülebilirliği artırmayı amaçlamaktadır.




Şekil 5: Norveçli Yara Birkeland Otonom Gemisi (Yara, 2025)

### 3.3. Enerji Verimliliği Tedbirleri

Denizcilik sektöründe sadece alternatif yakıta geçiş yada otonom yaklaşımlar, IMO'nun dekarbonizasyon stratejisine uyum sağlamak için tam bir çözüm değildir. CO<sub>2</sub> azaltım limitlerine ulaşmak için yapılan planlamalar hız optimizasyonu veya enerji verimliliğini artırıcı diğer yöntemler gibi farklı stratejilerle desteklenmelidir.

Bu sebepten, gemiler EEDI, EEXI ve CII kurallarına uymak için yada uyulmadığı durumlarda; yakıt tasarruflu operasyonlar, draft&trim optimizasyonu, pervane ve gövde temizliği, hız optimizasyonu, zamanında bakım, rüzgâr yardımı, pervane optimizasyonu, hız optimizasyonu, alternatif yakıt kullanımı gibi düzeltici tedbirler içeren SEEMP (Enerji Verimliliği Yönetim Planı) planı uygulamak zorundadırlar. Şekil 6'da her bir kural için başlıca enerji verimliliği tedbirleri listelenmiştir.

| Yeni Gemiler İçin<br><b>EEDI</b>   | Tüm Gemiler İçin<br><b>EEXI</b>   | Tüm Gemiler İçin<br><b>CII</b>  |
|--|---|---|
| Geliştirilmiş gövde tasarımı  | Güç sınırlaması        | Hız optimizasyonu            |
| Atık ısı geri kazanımı        | Rüzgâr desteği         | Biyolojik kirlenme yönetimi  |
| Azaltılmış elektrik tüketimi  | Pervane optimizasyonu  | Alternatif yakıtlar          |
| vb.  | vb.   | vb.   |

Şekil 6: Gemiler İçin Temel Enerji Verimliliği Tedbirleri (IMO, 2024)

## 4. Kıyı Yapılarında Yeni Yaklaşımlar

### 4.1. Yeşil Liman Uygulamaları

Limanlar, özellikle uluslararası ve bölgesel tedarik zincirlerinin kesiştiği bağlantı noktaları olarak hizmet verdikleri için, yeşil tedarik zinciri yönetimini iyileştirmeye yönelik girişimlerin kapsamını genişletmek ve büyütmek için aktif ortamlardır. Bu kapsamda dünya genelinde yeşil liman uygulamaları çevresel performansı standardize etmeye katkı sağlamakta ve yeşil gemi, liman operasyonları ve iç bölge terminal alanlarında yeni yaklaşımlar görülmektedir.

Limanlarda ortaya çıkan emisyonların önemli bir kısmı, gemilerin rıhtımda bağlı veya demirde bekledikleri süre boyunca gerçekleşmektedir. Bu durum, gemi sahipleri ve işletmeciler ile birlikte IMO gibi uluslararası kuruluşların ve liman otoritelerinin emisyon azaltım süreçlerinde aktif rol üstlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda öne çıkan temel eylem alanları şunlardır:

- Gemi trafik yönetim sistemlerinin optimize edilmesiyle bekleme ve dönüş süreleri kısaltılarak emisyonlar düşürülmektedir.
- ESI (Environmental Ship Index) gibi gönüllü programlarla, çevresel performansı yüksek gemilere liman ücretlerinde indirim sağlanmaktadır.
- Gemilerin rıhtımda yardımcı makineleri yerine kara elektriği kullanmasıyla emisyonların önüne geçilmektedir. (Şekil 7)
- Limanlarda LNG, metanol, amonyak ve batarya gibi düşük veya sıfır karbonlu yakıtların kullanımı altyapı ve teşviklerle desteklenmektedir.



Şekil 7: Vancouver Kruvaziyer Limanında Elektrik Kaynağı (Notteboom vd., 2022)

Yeşil liman geliştirme, liman faaliyetlerinin çevresel etkilerini en aza indirmeyi ve sürdürülebilirlik hedeflerini hayata geçirmeyi amaçlayan uygulamaları kapsamaktadır. Bu çerçevede, yeşil limanların planlanması ve işletilmesine yönelik çeşitli politika araçları, stratejiler ve kavramsal yaklaşımlar geliştirilmiştir. Başlıca öne çıkan unsurlar şunlardır:

- Terminal sözleşmeleri ve kiralama süreçlerinde çevreci maddeler içeren politikalar uygulanmakta, emisyon ve atık yönetimi standartları tüm liman kullanıcılarına zorunlu kılınmaktadır.
- Birbirini tamamlayan üretim ve dağıtım faaliyetleri teşvik edilmektedir.
- Liman bölgelerinde yeşil tampon alanlar ve parklar oluşturularak ağır sanayi ile yerleşim bölgeleri arasında doğal koruma şeritleri tesis edilmektedir.
- Limanlarda rüzgâr ve güneş enerjisi parkları kurulmakta, dalga enerjisi ve entegre enerji yönetim sistemleri ile yenilenebilir enerji kullanımı artırılmaktadır. Yapılan çalışmalar, limanlarda güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri kurulumu, elektrik ihtiyacının %20-40'ını karşılayabildiğini göstermektedir. Şekil 8'de dünya genelinde liman bölgelerindeki rüzgâr santrallerine örnekler verilmiştir. (1-KarhuSaari, Finlandiya, 2-Rotterdam, Hollanda, 3-Zeebrugge, Belçika, 4-Blyth Limanı, Birleşik Krallık)



Şekil 8: Liman Bölgeleri Örnek Rüzgâr Santralleri (Notteboom vd., 2022)

- Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) ile gaz geri dönüşüm sistemleri uygulanmakta, aynı zamanda karbonun farklı ürünlerde girdi olarak kullanılması (CCU) desteklenmektedir.
- Biyo-yakıtlar ve biyolojik temelli kimyasalların üretimi ve kullanımı, özellikle liman içi taşımalarda teşvik edilmektedir.
- Rihtim ve terminal sahasında düşük veya sıfır emisyonlu ekipmanlar kullanılmakta, elektrikli araç ve makineler yaygınlaştırılmaktadır.
- Gemi ve kara taşımacılığında bekleme süreleri, veri paylaşımı ve randevu sistemleri sayesinde azaltılmaktadır.
- Liman depolarında sürdürülebilir tasarımlar uygulanmakta; enerji verimli aydınlatma, akıllı ısıtma-soğutma sistemleri ve enerji/malzeme geri dönüşümü gerçekleştirilmektedir.

İç lojistik; yüklerin hinterland ile liman arasında mavna, demiryolu, kara yolu veya boru hattı aracılığıyla taşınmasını kapsamaktadır. Bu süreçte liman otoriteleri, Yeşil Tedarik Zinciri Yönetimi (GSCM) kapsamında çeşitli alanlarda önemli roller üstlenebilmektedir. Bunlar:

- Yeşil limanlarda, fiyatlandırma, teşvikler, emisyon standartlarının düzenlenmesi, bilgi sağlama ve altyapı yatırımlarıyla çok modlu taşımacılık çözümleri ve mod değişimi teşvik edilmektedir.
- Boş seferlerin azaltılması, araç kullanım oranlarının artırılması ve taşıma araçlarının kapasite ölçeğinin büyütülmesi yoluyla her bir taşımacılık modu daha verimli kullanılmaktadır.
- Liman kullanıcıları, yük birleştirme stratejileriyle kargoları daha büyük partiler halinde taşıyabilmektedir.
- Liman alanına giren araçlara minimum emisyon standartları getirilmekte ve düşük emisyonlu, özellikle elektrikli araçların kullanımı teşvik edilmektedir.
- Kuru limanlar, iç terminaller ve hinterland stratejileri, limanların kapasitelerini artırmak amacıyla yeşil tedarik zinciri yönetimi kapsamında genişletilmiş kapılar olarak kullanılmaktadır.
- Raylı sistem, kamyon ve mavna taşımacılığı için gelişmiş ve entegre trafik yönetim sistemleri uygulanmaktadır.
- Randevu sistemleri, yoğun saatlerde fiyatlandırma ve gece terminal açılışları gibi fiyatlandırma mekanizmalarıyla trafik yeşil limanlarda zamana ve mekâna yayılmaktadır.
- Limanlarda sıvı yüklerin kısa ve uzun mesafelerde taşınabilmesi için boru hattı ağları (liman içi, limanlar arası ve hinterland bağlantılı) geliştirilmektedir.

Limanlar ekonomik büyümeye önemli katkı sağlasa da artan gemi ve kara trafiği; hava kirliliği, gürültü, trafik yükü ve kıyı ekosistemleri üzerinde baskı gibi çeşitli olumsuz dışsallıkları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle yeşil liman yaklaşımlarının, çevresel iyileştirmenin yanı sıra bu büyüme kaynaklı dışsal maliyetleri azaltmayı hedefleyen bir araç olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Örnek yeşil liman uygulamalarına dair bulgular, çevre odaklı yatırımların orta vadede ekonomik avantajlar yarattığını göstermektedir. Kara elektriği, dijitalleşmiş terminal süreçleri ve elektrikli ekipman kullanımı, yakıt ve işletme giderlerini azaltırken operasyonel verimliliği artırmaktadır. Bu nedenle sürdürülebilir liman uygulamaları, çevresel yararlarının yanı sıra ekonomik getirisi bulunan stratejik adımlar olarak değerlendirilmektedir.

## 4.2. Dijital Limanlar

Dijital dönüşüm, liman ve denizcilik sektörlerinde bilgi teknolojilerinin iş süreçlerine entegrasyonunu ifade eder ve organizasyonların yönetim, operasyon ve müşteri hizmetlerini geliştirmeye yöneliktir. Süreç, belgelerin dijital formata dönüştürülmesi (dijitalleştirme) ve iş süreçlerinin otomasyonla dönüştürülmesini (dijitalleşme) kapsar. Bu sayede limanlar daha verimli, şeffaf ve müşteri odaklı hizmet sunabilirken, insan müdahalesi azaltılmakta ve çalışanlar daha çok yönetim, programlama ve stratejik rollere yönlendirilmektedir.

Dijital limanlarda veri paylaşımı ve işbirliği, tedarik zincirinde rekabet avantajı sağlamanın anahtar unsurlarındandır. Limanlar, lojistik ve taşıma hizmet sağlayıcıları ile entegre bilgi sistemleri kullanarak, kısa, sürdürülebilir ve maliyet etkin tedarik zincirleri oluşturmaktadır. Bununla birlikte, veri güvenliği ve siber saldırılar dijitalleşmenin kritik riskleri arasında yer almaktadır; örneğin 2017'de Maersk ve APM Terminals ciddi bir siber saldırı ile karşılaşmıştır.

Dijital liman uygulamaları arasında otomatik konteyner vinçleri, Automated Guided Vehicles (AGV), Akıllı Terminal İşletim Sistemleri (TOS), RFID ve OCR tabanlı kapı süreçleri, randevu ve araç takip sistemleri, dijital terminal simülasyonları yer almaktadır.

Örneğin, Güney Kore'deki Pusan Newport International Terminal (PNIT)'in Şekil 9'da gösterilen dijital ikiz modeli, terminalin fiziksel ve sanal ortamda birebir eşleşen dijital bir temsildir ve terminal operasyonlarının simülasyonu için kullanılmaktadır.



Şekil 9: Digital Twin PNIT Busan New Port (Notteboom vd., 2022)

Ayrıca, otonom kamyonlar, otonom iç su mavnaları ve Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) gibi insansız taşıma araçları limanlarda operasyonel verimliliği artırmak için kullanılmaktadır.

Dijitalleşme, limanlarda sadece teknolojiye değil, organizasyonel değişime de işaret eder; süreçler yeniden tasarlanır, müşteri memnuniyeti ölçülür ve daha az verimli süreçler iyileştirilir. Bu kapsamda, limanlar dijital dönüşümü bir rekabet aracı olarak benimsemekte ve hem operasyonel hem de yönetsel verimliliklerini artırmaktadır.

## 5.Çevresel Sürdürülebilirlik Perspektif

Denizcilik ve liman operasyonlarına ilişkin kapsayıcı çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımı beş temel boyut altında ele alınabilmektedir.

- **Ekosistem bütünlüğü**, kıyı ve deniz habitatlarının korunmasını, doğal çevre üzerindeki baskıların azaltılmasını içermektedir.
- **Döngüsel ekonomi**, limanlarda oluşan atıkların geri kazanılması, malzeme kullanımının optimize edilmesi ve kaynakların daha verimli yönetilmesini kapsamaktadır.
- **İklim dayanıklılığı**, altyapının deniz seviyesi yükselmesi, şiddetli fırtınalar ve benzeri iklim risklerine karşı güçlendirilmesini ifade etmektedir.
- **Enerji verimliliği**, limanlarda elektrikli ekipmanların kullanılması, otomasyon sistemlerinin devreye alınması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu içermektedir.
- **Sosyal adalet** ise liman faaliyetlerinin çevrede yaşayan topluluklar üzerindeki gürültü, trafik ve hava kalitesi gibi etkilerinin azaltılmasını hedeflemektedir.

Bu beş boyut birlikte değerlendirildiğinde, limanların ve deniz taşımacılığı faaliyetlerinin çevresel performansını sistematik ve bütüncül şekilde analiz etmeye imkân tanıyan bir çerçeve ortaya çıkmaktadır.

## 6. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışma ile, denizyolu taşımacılığı ve kıyı yapıları (limanlar, terminaller ve ilgili altyapılar) alanında dünya genelindeki güncel uygulamalar sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirilmiştir.

Öncelikle, IMO ve AB'nin, artan çevresel kaygılar neticesinde aldığı geniş kapsamlı tedbirler ve yürürlüğe koyduğu kurallar neticesinde gemi sahiplerinin ve denizcilik işletmelerinin egzoz emisyonlarının azaltılmasına yönelik yaklaşımlar çalışmada sunulmuştur.

Dünya genelinde alternatif yakıt kullanım oranları, avantajları ve dezavantajları verilmiş, dijitalleşme ve akıllı denizcilik kapsamında uygulamalardan ve çevresel faydalarından bahsedilmiştir. Öte yandan; denizcilik sektörünün kalbi konumunda olan limanların yeşil operasyon uygulamalarına örnekler verilmiş ve dijital liman uygulamalarının çevresel sürdürülebilirliğe katkılarından bahsedilmiştir.

Kavramsal ve karşılaştırılmalı literatür taraması sonucu yapılan durum değerlendirmesinde; hem denizyolu taşımacılığı hem de kıyı yapılarında teknolojik yenilikler ve yeşil dönüşüm, sürdürülebilirlik açısından kaçınılmazdır. Sürdürülebilirlik uygulamalarında, alternatif yakıt kullanımı, limanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonu ve dijitalleşme öncelikli yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bulgular, denizcilik sektörünün uluslararası düzenlemeler, çevresel kaygılar ve teknolojik gelişimler doğrultusunda hızlı bir şekilde dönüşüm içerisinde olduğunu göstermektedir.

Yapılan durum analizinde, alternatif yakıtların (LNG, metanol, amonyak vb.) kısa ve orta vadede önemli bir geçiş unsuru olduğunu, ancak tek başına yeterli çözüm sağlamadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, dijitalleşme, yapay zekâ tabanlı rota optimizasyonu, enerji verimliliği tedbirleri ve limanlarda yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi yaklaşımlar sürdürülebilirliğin tamamlayıcı parçaları olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, LNG kullanımında metan kaçağı sorunu veya yeşil yakıtların arz güvenliği gibi hususlar, çevresel kazanımların sınırlanmasına neden olabilecek riskler barındırır da son zamanlarda metan kaçağını azaltan teknolojik gelişmelerin ortaya çıktığı görülmektedir.

Kıyı yapıları açısından yapılan değerlendirmede; yeşil liman uygulamaları ve dijital liman projeleri, sürdürülebilir denizcilik ekosisteminin gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır. Karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin, yenilenebilir enerji altyapısının ve kara elektriği kullanımının yaygınlaştırılması, limanların çevresel performansını artırırken; dijital ikiz ve otonom araç sistemleri, operasyonel verimliliği desteklemektedir. Bununla birlikte, bu yatırımların yüksek maliyetli olması, özellikle gelişmekte olan ülkelerde uygulama düzeyinin sınırlı kalmasına yol açabilmektedir.

Sonuç olarak, denizyolu taşımacılığı ve kıyı yapılarında sürdürülebilirlik odaklı dönüşüm kaçınılmazdır. Bu dönüşümün başarıya ulaşabilmesi için sektör paydaşlarının (gemi sahipleri, denizcilik işletmeleri, liman otoriteleri, politika yapımcılar ve hükümetler) eşgüdüm içerisinde hareket etmesi kritik öneme sahiptir. 2050 yılına yönelik küresel karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak, yalnızca teknolojik yeniliklerin değil, aynı zamanda teşvik mekanizmalarının, uzun vadeli finansal stratejilerin ve politika uyumunun etkin şekilde hayata geçirilmesine bağlıdır.

Bu çerçevede mevcut yeşil denizyolu ve kıyı yapıları yaklaşımlarının hız kazanması için aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Politika yapımcılar, liman altyapısına yapılan yatırımları hızlandırmalı, özellikle alternatif yakıtlar (örneğin LNG, metanol, amonyak) için ikmal tesislerinin geliştirilmesine ve kıyı elektrik bağlantılarının kurulmasına odaklanmalıdır. Bu, alternatif yakıtların benimsenmesini mümkün kılan ve daha geniş çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayan temel bir adımdır.
- Hükümetler, liman altyapısı dönüşümünü ve alternatif yakıt kullanan yeni gemi inşaat projelerini desteklemek amacıyla teşvikler sunmalı ve kamu-özel sektör ortaklıkları kurmalıdır.
- Düzenleyici otoriteler (örneğin IMO, AB), emisyon politikalarını daha öngörülebilir, aşamalı ve şeffaf bir şekilde yayımlamalıdır. Bu sayede denizcilik paydaşları stratejik gelecek planlamasına katılabilir ve finansal risklerini daha etkin yönetebilirler.
- Denizcilik şirketleri, uluslararası ve ulusal düzenlemelere uyum sağlamak için proaktif stratejiler geliştirmeli; bunu operasyonel ve stratejik kararlarında birincil nedensel faktör olarak kabul etmelidir.
- Şirketler, düşük karbonlu ve alternatif yakıtların kullanımını önceliklendirmeli ve yeni inşaat ile retrofit planlarını yeni düzenlemelerin WtW hesaplama mekanizmalarıyla uyumlu hale getirmelidir. Doğru yakıt seçimi, uzun vadeli karbonsuzlaştırma hedeflerine ulaşmak için kritik önemdedir.
- Gemi sahipleri ve işletmeciler, gerekli altyapı iyileştirmeleri için liman otoriteleri ve politika yapımcılarla iş birliği yaparak taleplerini iletmelidir. Bu iş birliği, liman altyapısının sektörün teknolojik ve düzenleyici talepleriyle uyumlu ilerlemesini sağlayacaktır.

Bu çalışma, denizyolu taşımacılığı ve liman işletmeciliği sektörlerinde sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda atılması gereken adımlar konusunda bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır. Alternatif yakıt stratejileri, dijital dönüşüm uygulamaları ve yeşil liman girişimlerinin entegrasyonu konusunda sektör paydaşları için yol gösterici bir rehber oluşturulmuştur.

Gelecekteki araştırmalar alternatif yakıtların son çıkan düzenlemeler çerçevesinde kuyudan-pervaneye (well-to-wake) emisyon etkileri karşılaştırılabilir, yapay zekâ temelli denizcilik sistemlerinin enerji verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilebilir. Dünya genelindeki bu sürdürülebilirlik yaklaşımların Türkiye özelinde değerlendirmesi yapılabilir.

## KAYNAKÇA

Acciaro, M., Vanelander, T., Sys, C., Ferrari, C., Rouboutsos, A., Giuliano, G., ... & Kapros, S. (2014). Environmental sustainability in seaports: a framework for successful innovation. *Maritime Policy & Management*, 41(5), 480-500.

Alamouh, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F. (2022). Ports' role in shipping decarbonisation: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emissions reduction. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 3, 100021

Arıcan, O. H., Toprakçı, O., Ünal, A. U., & Özbağ, G. K. (2025). Analyzing Carbon Regulation Impacts on Maritime Sector Using Fuzzy Delphi-DEMATEL-ISM Approach. *Systems*, 13(11), 955.

Bahri, M. S. S., Shariff, S. S. R., & Yahya, N. (2025). Sustainable port operations and environmental initiatives in Malaysia: A focus on environmental sustainability. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 41(1), 38-51.

Cullinane, K., & Yang, J. (2022). Evaluating the costs of decarbonizing the shipping industry: A review of the literature. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 946.

- Dong, J., Zeng, J., Yang, Y., & Wang, H. (2022). A review of law and policy on decarbonization of shipping. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1076352.
- He, Y., Yan, X., Fan, A., Yin, X., Meng, Q., Zhang, L., & Liu, P. (2024). Assessing the influence of actual LNG emission factors within the EU emissions trading system. *Transport Policy*, 159, 345-358.
- Hellström, M., Rabetino, R., Schwartz, H., Tsvetkova, A., & Haq, S. H. U. (2024). GHG emission reduction measures and alternative fuels in different shipping segments and time horizons—A Delphi study. *Marine Policy*, 160, 105997.
- Hossain, T., Adams, M., & Walker, T. R. (2021). Role of sustainability in global seaports. *Ocean & Coastal Management*, 202, 105435.
- Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*, 15(21), 7910.
- Jia, H., Adland, R., Prakash, V., & Smith, T. (2017). Energy efficiency with the application of Virtual Arrival policy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 50-60.
- Khalifeh, M., & Caliskan, A. (2025). The role of port smartness in achieving sustainable development goals. *Maritime Policy & Management*, 52(1), 106-120.
- Kotzampasakis, M. (2025). Maritime Emissions Trading in the EU: Systematic Literature Review and Policy Assessment. *Transport Policy*.
- Lalla-Ruiz, E., Heilig, L., & Voß, S. (2019). Environmental sustainability in ports. In *Sustainable transportation and smart logistics* (pp. 65-89). Elsevier.
- Lugovskyy, V., Skiba, A., & Terner, D. (2025). Unintended consequences of environmental regulation of maritime shipping: carbon leakage to air shipping. *Journal of International Economics*, 155, 104081.
- Notteboom, T., Pallis, A., & Rodrigue, J.-P. (2022). *Port economics, management and policy* (1. baskı). Routledge.
- OffshoreEnergy.2022. COSCO: 'World's first' LNG dual-fuel VLCC delivered in China. <https://www.offshore-energy.biz/cosco-worlds-first-lng-dual-fuel-vlcc-delivered-in-china/>. Erişim Tarihi: 16 Aralık 2024.
- Oh, J., Kim, D., Roussanaly, S., & Lim, Y. (2024). Greenhouse gas emissions of shipping with onboard carbon capture under the FuelEU Maritime regulation: a well-to-wake evaluation of different propulsion scenarios. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155407.
- Park, S., Lee, H., & Kim, D. (2024). Regulatory compliance and operational efficiency in maritime transport: Strategies and insights. *Transport Policy*, 155, 161-177.
- Ramsay, W., Fridell, E., & Michan, M. (2023). Maritime energy transition: future fuels and future emissions. *Journal of Marine Science and Application*, 22(4), 681-692.
- Rony, Z. I., Mofijur, M., Hasan, M. M., Rasul, M. G., Jahirul, M. I., Ahmed, S. F., ... & Show, P. L. (2023). Alternative fuels to reduce greenhouse gas emissions from marine transport and promote UN sustainable development goals. *Fuel*, 338, 127220
- Shi, J., Zhu, Y., Feng, Y., Yang, J., & Xia, C. (2023). A prompt decarbonization pathway for shipping: green hydrogen, ammonia, and methanol production and utilization in marine engines. *Atmosphere*, 14(3), 584
- Sjerić, M., Perčić, M., Jovanović, I., & Vladimir, N. (2025). Carbon Footprint and Economic Analysis of LNG-fueled Fishing Vessel Using Real Engine Performance Simulation. *Journal of Marine Science and Application*, 1-18.
- Song, J., Xu, C., & Wang, C. (2024). Impacts of the carbon tax on green shipping supply chain under the port competition. *Expert Systems*, 41(5), e13229

- Sun, M., Vortia, M. P., Xiao, G., & Yang, J. (2025). Carbon Policies and Liner Speed Optimization: Comparisons of Carbon Trading and Carbon Tax Combined with the European Union Emissions Trading Scheme. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 204.
- Taskar, B., Sasmal, K., & Yiew, L. J. (2023). A case study for the assessment of fuel savings using speed optimization. *Ocean Engineering*, 274, 113990.
- Ülker, D., & Goksu, S. (2025). The Bilateral Impacts of Global Climate Change on the Shipping Sector: An Analysis of IPCC Scenarios and IMO'S GHG Emissions Reduction Strategies. *The Role of Exergy and Energy in Sustainability*, 85-98.
- Vuskovic, B., Rudan, I., & Sumner, M. (2023). Fostering sustainable LNG bunkering operations: development of regulatory framework. *Sustainability*, 15(9), 7358.
- Wan, Z., Nie, A., Chen, J., Pang, C., & Zhou, Y. (2025). Transforming ports for a low-carbon future: Innovations, challenges, and opportunities. *Ocean & Coastal Management*, 264, 107636
- Wang, X., Liu, H., Zhang, J., Fu, X., Chen, D., Zhang, W., ... & He, K. (2025). Global shipping emissions from 1970 to 2021: Structural and spatial change driven by trade dynamics. *One Earth*, 8(4).
- Wang, T., Cheng, P., & Wang, Y. (2025). How the establishment of carbon emission trading system affects ship emission reduction strategies designed for sulfur emission control area. *Transport Policy*, 160, 138-153.
- Wu, M., Li, K. X., Xiao, Y., & Yuen, K. F. (2022). Carbon Emission Trading Scheme in the shipping sector: Drivers, challenges, and impacts. *Marine Policy*, 138, 104989.
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651.
- Xu, L., & Chen, Y. (2025). Overview of sustainable maritime transport optimization and operations. *Sustainability*, 17(14), 6460.
- Yara, 2025. MV Yara Birkeland. <https://www.yara.com/>. Erişim Tarihi: 08 Ekim 2025.