

**MODERN DENİZCİLİKTE RİSK VE
SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNE ÇOK DİSİPLİNLİ
YAKLAŞIMLAR**

Editör: Doç.Dr. Ozan Hikmet ARICAN

yaz
yayınları

Modern Denizcilikte Risk ve Sürdürülebilirlik Üzerine Çok Disiplinli Yaklaşımlar

Editör

Doç.Dr. Ozan Hikmet ARICAN

yaz
yayınları

2025

**Modern Denizcilikte Risk ve
Sürdürülebilirlik Üzerine Çok Disiplinli
Yaklaşımlar**

Editör: Doç.Dr. Ozan Hikmet ARICAN

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayımlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-92-5

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Askeri Tersane Kuruluş Yer Seçimi Üzerine Bir Araştırma	1
<i>İlker AFACAN</i>	
Assessing The Slow Steaming in Shipping Under International Emission Regulations	28
<i>Süleyman Doğan GENÇ, Osman ARSLAN</i>	
Denizde İletişim, Karar Verme ve Liderlik: Teknik Olmayan Yetkinlikler ve Araştırma Gündemi.....	55
<i>Serkan KARAKAŞ</i>	
LNG Yakıtlı Gemilerin Deniz Taşımacılığına Etkisinin İncelenmesi.....	71
<i>Orçun TOPRAKÇI</i>	
Petrol Tankerlerinde Yangın ve Patlama: Riskler, Mekanizmalar, Önleme Stratejileri ve Kaza Analizleri.....	92
<i>Sercan İNFAL</i>	
Denizcilik Coğrafyası Riskleri ve Deniz Kazalarına Türkiye Perspektifinden Bakış	119
<i>Ergün KARSLI, Gönül KAYA ÖZBAĞ</i>	
Machine Learning Approaches in Maritime Transportation.....	138
<i>Süleyman Doğan GENÇ, Osman ARSLAN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

ASKERİ TERSANE KURULUŞ YER SEÇİMİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA¹

İlker AFACAN²

1. GİRİŞ

21'inci yüzyılın ilk çeyreğinin sonunda küresel ticaretin sürdürülebilirliği, büyük ölçüde denizyolu taşımacılığına bağlıdır. UNCTAD'ın güncel verilerine göre uluslararası ticarete konu mal hacminin %80'inden fazlası denizyolu ile taşınmakta; değer bazında ise küresel ticaretin %50'sinden fazlası deniz taşımacılığına dayanmaktadır (UNCTAD, 2024; UNCTAD, 2021; aktaran Ferrari ve ark., 2023). Dolayısıyla gemiler hem küresel ekonomik düzenin hem de kıyı devletlerinin savunma mimarisinin temel unsurlarını oluşturmaktadır. Denizcilik sektörü açısından taşıma kapasitesi, doğrudan gemi inşa endüstrisinin üretim kabiliyetiyle ilgilidir. Bu endüstri metalurji, makine, elektrik-elektronik, kompozit üretimi, boya, lojistik ve pek çok yan sanayi ile yoğun etkileşim içinde olup savunma kapasitesine, teknolojik yeniliklere ve sanayi-temelli kalkınmaya katkı sağlayan geniş bir ekonomik ekosistem yaratmaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2023). Türkiye'de 2025 itibarıyla kamu ve özel sektöre ait 85 faal tersane bulunmaktadır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025a). Bu tersanelerin büyük çoğunluğu Marmara Denizi kıyılarında konumlanmış olup özel sektör tersanelerinin yaklaşık %78,7'si İstanbul, Yalova, Kocaeli ve

¹ Afacan, İ., & Arıcan, O. H. (WOSCON 2025, Şubat). *Askerî tersane kuruluş yeri seçimi üzerine bir araştırma* adlı bildiri metni üzerinden geliştirilmiştir. <https://www.wosconkongreleri.com/>

² İlker AFACAN, Y.Lisans Öğr. Kocaeli Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Denizcilik İşletmeleri Yönetimi, Kocaeli, Türkiye, ORCID: 0009-0004-4899-8874.

Çanakkale hattında yoğunlaşmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2025b). Tarihsel olarak da Marmara kıyıları Doğu Roma, Osmanlı ve Cumhuriyet dönemlerinde gemi inşa faaliyetlerinin ana bölgesi olmuştur (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, n.b.; Baykal, 2015). Türkiye'nin milli gelirinin neredeyse yarısının üretildiği Marmara Bölgesi'nin genel sanayi altyapısı da bu yoğunlaşmayı desteklemektedir (Bakır, 2024). Her ne kadar sanayi yükünün ülke geneline yayılması orta- ve uzun vadeli planlarda hedeflense de mevcut ekonomik yapı, Marmara merkezli gemi inşa kümelenmesinin kısa ve orta vadede devam edeceğine işaret etmektedir.

Tersaneler tarihsel olarak da askerî ihtiyaçların şekillendirdiği kurumlardır. Gerek Osmanlı İmparatorluğu döneminde gerek Cumhuriyet döneminde harp gemilerinin inşa ve modernizasyon süreçleri, devletin deniz hakimiyeti vizyonu doğrultusunda kritik önem taşımıştır. Günümüzde Türk tersaneleri ticari gemilerin yanı sıra karakol gemileri, çıkarma gemileri, lojistik destek gemileri ve insansız deniz araçları dahil olmak üzere çok çeşitli modern platformlar inşa etmektedir. Bu üretim kabiliyeti, Türkiye'nin bölgesel deniz güvenliğinde görünürlüğünü artırmış ve Türk tersaneciliğini Orta Doğu ve Avrasya'da rekabetçi bir konuma taşımıştır (Aliefendioğlu & Sağır, 2015). Özellikle 2010'lu yıllarda Aden Körfezi ve Doğu Afrika'daki deniz haydutluğu olaylarının uluslararası ticaret üzerindeki etkisi dikkate alındığında, bu süreçte ticaret filolarını koruyan donanma unsurlarının önemi daha da belirginleşmiştir.

Bu çerçevede gemi inşa endüstrisi yalnızca ekonomik faaliyet alanı olarak değil, savunma kapasitesi, teknolojik bağımsızlık ve stratejik otonomi açısından da kritik bir sektördür. Dolayısıyla tersane altyapısının ülkenin uzun vadeli güvenlik ve teknolojik ihtiyaçlarına uygun biçimde konumlandırılması hem ulusal savunma stratejisi hem de sürdürülebilir denizcilik politikaları açısından kaçınılmaz bir gerekliliği ifade etmektedir.

2. MARMARA BÖLGESİNDEKİ ASKERİ TERSANELERİN GEÇMİŞİ VE MEVCUT DURUMLARI

Tersaneler, ticari veya turistik amaçlı gemilerin durgun su ortamında inşa, bakım ve onarım faaliyetlerinin yürütüldüğü; teknik altyapı, sosyal birimler, kuru ve yüzer havuzlar gibi kritik tesisleri bünyesinde barındıran endüstriyel kıyı yapılarıdır (Cengiz & Güneri, 2007). Bu yapılar arasında askerî tersaneler, daha katı standartlar, yüksek mühendislik gereksinimleri ve gizlilik seviyesi nedeniyle ayrı bir öneme sahiptir. Askerî platformların inşası ve modernizasyonunun yapıldığı askerî tersaneler yalnızca teknik bir faaliyet alanı değil, devletlerin savunma stratejilerinin ayrılmaz bir bileşeni olduğundan, bu tür tesislerin yer seçimi limanlardan ve sivil tersanelerden çok daha kapsamlı, yalnızca yük akışı ve ağır sanayi gereksinimleri ile değil, askerî ihtiyaçların ilave edildiği hassas üretim süreçleri ve yüksek gizlilik düzeyleri nedeniyle çok daha kapsamlı kriterlerle değerlendirilmesi gereken tesislerdir.

Türkiye Cumhuriyeti'nin kuruluşundan bu yana savaş gemisi inşası ve -yurt dışından alınanlarla birlikte- bunların modernizasyonu büyük ölçüde Gölcük ve İstanbul Tersaneleri üzerinde gerçekleşmiştir. 1999 yılında yaşanan deprem felaketi sonrasında nitelikli iş gücünde ve fiziki altyapısı açısından kapasite kaybı yaşayan Gölcük Tersanesi, günümüzde büyük ölçüde yeniden yapılanmış olmakla birlikte üretim kabiliyetini özellikle denizaltı platformlarının inşası ve bakım-onarımı üzerine yoğunlaştırmış; büyük tonajlı savaş gemileri ile millî tasarım projeleri ise İstanbul Tersanesi ve Savunma Sanayii Başkanlığı koordinasyonundaki özel sektör tersanelerine dağıtılmıştır. Bu durum, Türkiye'de askerî gemi inşa kapasitesinin bölgesel olarak uzmanlaşmış bir yapıya evrildiğini göstermektedir.

Gölcük Tersanesi'nin kuruluşu, teknik gereklilikler ile stratejik güvenlik kriterlerinin tarihsel olarak nasıl iç içe geçtiğinin önemli bir örneğidir. Osmanlı Bahriyesi'nden devralınan I. Dünya Savaşı sonunda ağır yıpranmaya uğramış, mütareke ve Millî Mücadele yıllarında bakım eksiklikleri nedeniyle ciddi yapısal sorunları bulunan Yavuz Zırhlısı'nın güvenli biçimde havuzlanması için uygun coğrafi özelliklere sahip bir yer aranmış; 1912 tarihli Vickers-Armstrong etütleri doğrultusunda sazlık–bataklık karakteriyle kontrollü karaya oturtmaya uygun, rüzgârlara kapalı ve iç deniz konumuyla tehditlere karşı güvenli Gölcük–Kavaklı kıyısı tercih edilmiştir (Ulugün & Gezen, n.d.). Demiryolu bağlantısı, yılın büyük bölümünde iki ara yön dışında kuvvetli rüzgârlara kapalı, nispeten korunaklı, kendine özgü iklim dengesine sahip bir iç deniz niteliğinde olması; Türk boğazlarının dışında kalan Anadolu ve Trakya kıyı şeridinde nazaran düşman tehdidinden uzakta bulunması; yerel işgücü varlığı ve tarihsel denizcilik kültürü de bu tercihi güçlendirmiş ve Yavuz Zırhlısı için sipariş edilen, 6 puntolu ve 25.000 ton kaldırma kapasiteli yüzer havuzun inşasıyla birlikte sahilde kurulan ilk tesisler Gölcük Tersanesi'nin çekirdeğini oluşturmuş ve nihayetinde diğer ağır sanayi kuruluşlarının da bölgeye yerleşmesiyle Gölcük, ideal bir askeri gemi inşa merkezine dönüşmüştür (Ulugün & Gezen, n.d.).

Bu gelişim çizgisi 20. yüzyıl boyunca devam etmiş; büyük Orga kızak biriminin 1999 depreminde kaybedilmesine kadar Cumhuriyet Donanması için çok sayıda ve çeşitli işlevlere sahip harp gemisi Gölcük'te inşa edilmiştir. Dolayısıyla tersanenin kuruluşu, coğrafi–topoğrafik uygunluk, stratejik güvenlik, lojistik erişilebilirlik, endüstriyel kapasite ve yerel işgücü gibi çok boyutlu yer seçimi kriterlerinin tarihsel olarak bir araya gelmesinin somut bir örneğini oluşturmaktadır.

Pendik Tersanesi ise modern savaş gemisi üretiminde Türkiye'nin kurumsal altyapısını oluşturan diğer ana merkezdir.

Kökleri 1939'daki donanma ihtiyaçlarına dayanan planlamalara uzanan bu süreçte, Haliç çevresindeki dağınık ve yetersiz tesislerin yerleşim dokusundan uzak ve genişleme potansiyeli yüksek sahalara taşınmasını hedeflenmiştir. 1960'larda Devlet Planlama Teşkilatı tarafından Pendik–Pavli kıyılarının gemi inşa bölgesi olarak planlara işlenmesiyle bölgenin stratejik önemi artmış; 1970'li yılların sonuna gelindiğinde gerek hukuki–idarî hazırlıklar gerek mekânsal planlama açısından büyük bir tersane tesisinin kurulmasına uygun, stratejik nitelikte bir alan hâline gelmiştir. 1970'li yılların sonunda artan bakım-onarım ihtiyacı ve yeni nesil platformların yerli imkânlarla inşa edilebilmesi hedefi doğrultusunda İstanbul'daki mevcut tersanelerin kapasitesini tamamlayıcı nitelikte yeni bir tesis kurulması kararı alınmış; bu doğrultuda Pendik bölgesi hem coğrafi konumu hem ulaşım erişilebilirliği hem de sahile bitişik geniş alan yapısı nedeniyle tercih edilmiştir. 1980'lerin sonuna gelindiğinde ise kuru havuzları, ana tesisleri ve geniş üretim alanıyla modern muharip gemi inşasına uygun büyük ölçekli bir tersane altyapısı oluşturulmuştur (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, n.b.).

Özellikle 1990'lı yıllarda fırkateyn ve yardımcı sınıf askerî gemilerin inşası ile denizaltı modernizasyon projelerinde aktif sorumluluk almıştır. 2000'li yıllarda Savunma Sanayii Başkanlığı ile koordineli yürütülen projeler kapsamında lojistik destek gemileri, çıkarma gemileri ve yeni nesil karakol botları gibi çeşitli platformların üretimiyle birlikte Pendik, Deniz Kuvvetleri Dizayn Proje Ofisi ve Araştırma Merkezi Komutanlığı gibi teknik kuruluşları çevresine ve bünyesine toplayarak millî savaş gemisi projelerinin (MİLGEM) stratejik merkezlerinden biri hâline gelmiştir. Bugün Pendik Tersanesi, İstanbul Tersanesi Komutanlığının ana unsurlarından biri olarak hem bakım-onarım hem yeni inşa kabiliyetleriyle Mavi Vatan konseptinin altyapısını oluşturan kritik tesisler arasında yer almaktadır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, n.b.).

Günümüzde Marmara Bölgesindeki iki büyük askerî tersanenin ortak sorunu, şehirleşmenin baskısı altında kalmalarıdır. Gölcük ve Pendik tersaneleri, kuruluş dönemlerinde sahip oldukları stratejik avantajlara karşın bugün yoğun yerleşim alanlarıyla çevrili durumdadır. Bu yapı, büyük ebatlı askerî teçhizatın taşınması, gizliliği yüksek üretim süreçlerinin korunması ve fiziksel güvenlik gibi askerî gereklilikler açısından ciddi kısıtlar yaratmaktadır. Gölcük Tersanesi genişleme potansiyelinden tamamen yoksun, demiryolu–havayolu bağlantılarından mahrum ve yerleşim dokusu içinde sıkışmış bir yapıya bürünmüş; Pendik Tersanesi ise İstanbul metropolünün genişlemesi nedeniyle benzer bir kısıtlılık yaşamaya başlamıştır (Afacan & Arıcan, 2025). Bu durum literatürde “metropol risk yoğunlaşması” olarak adlandırılan kırılganlık türüyle de örtüşmektedir (Galderisi & Limongi, 2021; Gencer, 2013; Bansal ve ark., 2013).

Tersanenin, bölgedeki özel tersanelerle (Tuzla ve Pendik) oluşturduğu endüstriyel kümelenme avantajı (Kılıç, 2002), gemi inşa ekosistemi açısından güçlü bir destek sağlasa da, artan kent yoğunluğu ve sınırlı genişleme alanı nedeniyle tersanenin yeni nesil millî projelerin kapasite ihtiyacını karşılamadaki sürdürülebilirliği açısından olumsuz etkilendiği değerlendirilmektedir. Ayrıca, şehrin içindeki konumu nedeniyle gemi bloklarının, kızak elemanlarının ve oversize askerî komponentlerin nakli sırasında trafiğe bağlı sınırlamalar oluşmakta; bu da hem maliyet hem de operasyonel gizlilik açısından risk teşkil etmektedir. Yerinde yapılan gözlemler de yüksek hacimli sevkiyatların şehir içi trafiğinde ciddi yük oluşturduğunu ve bu durumun tersanelerin performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir (Afacan & Arıcan, 2025).

Bu gerçekler bir arada değerlendirildiğinde, mevcut askerî tersanelerin hem stratejik gizlilik hem de operasyonel verimlilik açısından orta ve uzun vadede sürdürülebilir olmadığı

görülmektedir. Özellikle MİLGEM, denizaltı modernizasyonu, milli karakol gemileri ve ileri sensör entegrasyonları gibi hassas projelerde, üretim süreçlerinin yüksek derecede gizlilik gerektirdiği düşünüldüğünde mevcut konumların, yetersizliği daha da belirgin hale gelmektedir (Afacan & Arıcan, 2025).

Marmara'da yoğunlaşmış ve yerleşmiş mevcut endüstriyel birikiminden uzaklaşmadan, yine bu bölge içinde ancak mevcut askerî tersanelerin ilk kuruldukları dönem gösterilen hassasiyete uygun olarak yerleşimlerden belirli bir tampon mesafe ile ayrılmış, örneğin çevresinde en az 2 km yarıçaplı bir sivil yerleşim yasağı uygulanabilecek, stratejik açıdan korunaklı ve lojistik açıdan erişilebilir yeni bir tersane sahasının belirlenmesi bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Böyle bir tesis, hem Gölcük Tersanesinin bakım-onarım ağırlıklı yapısının tüm fonksiyonlarını üstlenecek hem de Pendik Tersanesinin yeni nesil milli projelerde karşılaştığı kapasite ve gizlilik yükünü paylaşarak savunma sanayimizin uzun vadeli hedefleriyle uyumlu bir yüksek güvenli modern gemi inşa merkezi oluşturulması mümkün olacaktır.

Anadolu hinterlandına yaslanan ve doğal deniz yolları ile (Ç.kale ve İstanbul Boğazları) ana kıta savunma ve lojistik hattı içinde kalan Güney Marmara kıyılarının yeni bir askerî tersane için doğal aday bölgelerden biri olarak değerlendirilmesinin ardında yalnızca coğrafi ve jeostratejik koşullar değil, aynı zamanda bölgenin tarihsel olarak gemi inşa, bakım-onarım ve çekek faaliyetleri için kullanılan bir kıyı şeridi olması da önemli bir rol oynamaktadır (Özen, 2014; Zorlu, 2004; Koday & Baki, 2014; Koldemir & Kahraman 2020). Güney Marmara kıyılarının tarihsel denizcilik faaliyetleri, jeostratejik konumu, deprem riski ve nüfus yoğunluğu bakımından nispeten daha uygun yapısı, yeni bir askerî tersane için hem tarihsel süreklilik hem modern gereklilikler açısından güçlü bir aday bölge olarak öne çıkmasına nedeniyle, bölgesel ve çok kriterli bir analiz çerçevesinde Güney

Marmara kıyılarında yeni bir askerî tersane yer seçimi yapılmasının hem stratejik hem de operasyonel açıdan zorunlu hâle geldiği değerlendirilmektedir (Afacan & Arıcan, 2025).

3. TERSANE VE LİMAN YER SEÇİMİ LİTERATÜRÜNE GENEL BAKIŞ

3.1. Tesis/Yer Seçiminin Tersane İşletmeciliği Açısından Önemi

Bir işletmenin kuruluş yeri, üretim teknolojisinden maliyet yapısına, rekabet gücünden uzun dönemli büyüme kapasitesine kadar tüm stratejik sonuçları belirleyen temel bir karardır. Alfred Marshall’a göre üretimin nerede konumlandığı; işgücünün niteliğini, ulaşım maliyetlerini, bilgi akışını ve yenilik kapasitesini şekillendirerek işletmenin “büyüme yörüngesi”nin başlangıcını oluşturur (Marshall, 1964). Marshall’ın dışsal ekonomiler ve “endüstriyel atmosfer” kavramları, uygun bölgelerde uzmanlaşmış işgücü havuzunun oluştuğunu, ara malı sağlayıcılarının çoğaldığını, teknik bilginin hızla yayıldığını ve inovasyon döngüsünün hızlandığını gösterir; bu yığılma ekonomileri, coğrafi yakınlıkla güçlenen görünmez bir üretim faktörü yaratır (Türko & Ersungur, 2014). *Industry and Trade* eserinde Marshall, sanayinin gelişimi, ticaret yollarının şekillenmesi ve bölgesel refahın yükselmesinin işletmelerin mekânsal dağılımıyla doğrudan ilişkili olduğunu; stratejik sektörlerin doğru coğrafyalarda kök salmasının bir ülkenin rekabet kapasitesini ve uzun dönemli büyüme eğilimlerini belirleyen kritik bir unsur olduğunu vurgular (Marshall, 1920).

Yanlış veya kısa vadeli gerekçelerle yapılan yer seçimleri ise işletmeleri verimsizlik sarmalına sürükleyebilir. Uygun olmayan bölgelerde kurulan tesisler ölçek büyütemez, nitelikli işgücü çekemez, lojistik maliyetlerini düşüremez ve yenilikçi ekosistemlerden uzak kalır. Günümüzde endüstriyel bölgeler

tesadüfen değil, dışsal ekonomileri maksimize eden mekânsal tercihlerle oluşmakta; doğru yer seçimi işletmenin verimliliğini artırırken, bölgenin rekabetçiliğini de güçlendirmektedir (Türko & Ersungur, 2014).

Tersaneler, yüksek sermaye gerektiren sabit tesislere, ağır makinelere ve büyük ölçekli üretim altyapılarına dayanan stratejik sanayi yatırımlarıdır. Gemi inşa tesislerinin kurulumu; kuru havuzlar, kızak sistemleri, vinç parkları, geniş depolama sahaları ve ağır imalat atölyeleri gibi yerinden taşınması neredeyse imkânsız, yüksek maliyetli yapıları içerir. Bu nedenle tersane yatırımları, yanlış yer seçiminin geri döndürülemediği ve büyük ekonomik kayıplara yol açtığı endüstriyel kararlardır (Güneri ve ark., 2009; Alnıpak & Yorulmaz, 2019). Literatürde tersane kuruluş yeri seçim sürecinin çok sayıda çevresel, teknik ve sosyal kriter nedeniyle kritik olduğu ve bu tesislerin, büyük ölçekli endüstriyel ürünlerin bir araya geldiği stratejik üretim merkezleri olarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Güneri ve ark., 2009; Caner & Aydın, 2021; Parkhan ve ark., 2018; Sukisno & Singgih, 2019; Türk & Özkök, 2020). Ayrıca tersaneler, yoğun emek gerektiren üretim süreçlerine sahiptir ve kaynakçılardan boru imalatçılarına, çelik konstrüksiyon uzmanlarından bakım-onarım ekiplerine kadar yüzlerce farklı uzmanlık alanını barındıran geniş bir işgücü tabanına dayanır. Bu durum, tersane yer seçiminde yalnızca coğrafi ve fiziki uygunluğun değil, aynı zamanda bölgenin nitelikli işgücü potansiyelinin ve yan sanayi birikiminin de belirleyici olduğunu göstermektedir. Hammaddede tedariki, ara malı üretimi, lojistik bağlantılar ve teknik hizmet sağlayıcıların yakınlığı gibi unsurlar, gemi inşa tesislerinin sürdürülebilir ve rekabetçi bir şekilde çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir (Ünsan ve ark., 2007; Caner & Aydın, 2021; Alnıpak & Yorulmaz, 2019; Türk & Özkök, 2020). Dolayısıyla tersane yatırımlarının doğru bölgede konumlandırılması hem operasyonel maliyetleri düşüren hem de

üretim verimliliğini artıran stratejik bir yer seçimi sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.2. Tesis / Yer Seçimi ve Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımları

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), karar vericilerin birden fazla ve çoğu zaman birbirleriyle çelişen kriteri aynı anda değerlendirmesini sağlayan analitik bir yaklaşımdır. Cengiz ve Güneri (2007), karar süreçlerinde “sezgisel ve parçalı değerlendirme” eğiliminin karmaşık problemlerde yetersiz kaldığını, bu nedenle kriterlerin sistematik olarak yapılandırılmasını sağlayan yöntemlerin önem kazandığını vurgulamaktadır. Broekhuizen ve arkadaşları (2015) da modern ÇKKV yaklaşımlarının özellikle 1970’lerden itibaren çok boyutlu karar problemlerinde şeffaflık, ölçülebilirlik ve tutarlılık sağladığını ifade eder. Bu yaklaşımların temel amacı, karar vericinin önüne gelen seçenekleri yalnızca tek bir ölçüte göre değil; maliyet, güvenlik, erişilebilirlik, sürdürülebilirlik veya teknik yeterlilik gibi farklı kriterlere göre bütüncül bir çerçevede değerlendirebilmesine olanak tanımaktır. Yer seçimi, yatırım planlama ve altyapı geliştirme gibi konular ÇKKV’nin en yaygın uygulama alanları arasında yer alır. Çünkü bu tür kararlar çoğu zaman hem nicel hem nitel değişkenleri içerir; örneğin bir tesisin konumu belirlenirken fiziki uygunluk, arazi özellikleri, lojistik bağlantılar, çevresel sınırlamalar, ekonomik maliyetler ve toplumsal etkiler aynı anda göz önünde bulundurulmak zorundadır. ÇKKV yöntemleri bu tür karmaşık karar ortamlarında “kriterler arası göreceli önemleri sayısallaştırma yeteneği” sayesinde yüksek bir analitik değer sunabilmektedir (Ayan ve ark., 2023; Broekhuizen ve ark., 2015; Uludağ, n.d.). Bu nedenle AHP, Bulanık AHP, ANP, TOPSIS ve PROMETHEE gibi yöntemler, çeşitli kriterler arasında denge kurmayı ve alternatiflerin rasyonel bir sıralamasını oluşturmayı mümkün kılar.

Özellikle tersane, liman veya büyük ölçekli endüstriyel tesis yatırımlarında ÇKKV'nin önemi daha da belirginleşir. Çünkü bu tür tesisler geniş arazi kullanımına, yüksek sermaye yoğunluğuna ve karmaşık yan sanayi ilişkilerine dayanır; yanlış konumlandırılmış bir tesisin düzeltilmesi çoğu zaman mümkün değildir. Bu bağlamda ÇKKV yöntemleri, karmaşık bir yer seçimi problemini hiyerarşik ve ölçülebilir bir yapıya dönüştürerek karar vericinin karşısına “en yüksek toplam faydayı sağlayan alternatifin seçilmesi” yönünde sistematik bir çerçeve sunar. Güncel literatür, çok kriterli değerlendirme modellerinin özellikle stratejik altyapı yatırımlarında karar süreçlerinin hem nesnelliğini hem de doğruluğunu artırdığını göstermektedir.

3.3. Tersane Yer Seçiminde Kullanılmış Analitik Yöntemler (AHP, ANP, DELPHİ, TOPSİS vs.)

3.3.1.AHP Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytic Hierarchy Process) ve Bulanık AHP (Fuzzy AHP)

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), çok kriterli karar problemlerinin hiyerarşik bir yapı altında çözümlenmesini sağlayan ve alternatifleri ikili karşılaştırmalar yoluyla değerlendiren bir yöntemdir (Saaty, 1980). Tersane ve liman yer seçimi gibi teknik, ekonomik ve çevresel boyutların iç içe geçtiği karmaşık problemlerde AHP'nin sistematik yapısı önemli avantaj sunar. Nitel ve nicel kriterlerin uzman görüşleriyle ölçülebilir hâle getirilmesi, yöntemin literatürde yaygın kullanılmasının başlıca nedenidir (Ziakas, 2019). Tersane çalışmalarında lojistik erişim, güvenlik, genişleme potansiyeli ve işgücü profili gibi stratejik değişkenlerin hiyerarşik bir çerçevede karşılaştırılabilmesi karar sürecinin tutarlılığını artırmaktadır (Yalova - Altınova Tersane Girişimcileri Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2006; Ford, 2007). Bununla birlikte AHP çoğu zaman bütünleşik modellerin ilk aşamasını oluşturur; kriter ağırlıkları

belirlendikten sonra TOPSIS, VIKOR veya PROMETHEE gibi yöntemlerle alternatiflerin nihai sıralaması yapılır (Sukisno & Singgih, 2019).

AHP'nin sınırlılıklarını aşmak ve uzman değerlendirmelerindeki belirsizliği daha sağlıklı biçimde modele aktarmak üzere geliştirilen Bulanık AHP (Fuzzy AHP), sözel ifadeleri üçgensel veya yamuksal bulanık sayılarla temsil ederek karar sürecinde esneklik ve gerçekçilik sağlar (Caner & Aydın, 2021). Liman ve tersane yer seçimi literatüründe bu yaklaşımın giderek öne çıkmasının temel nedeni, çevresel kısıtlar, jeolojik riskler, işgücü niteliği, güvenlik düzeyi ve tedarik zinciri yapısı gibi pek çok kriterin doğası gereği belirsizlik içermesidir. Hem Ziakas (2019) hem de Sukisno & Singgih (2019), bulanık AHP'nin özellikle veri kısıtının bulunduğu stratejik yatırımlarda karar kalitesini artırdığını göstermektedir. Dolayısıyla AHP ve Bulanık AHP, tersane ve liman yer seçimi araştırmalarında hem kriter belirleme hem de ağırlıklandırma süreçlerinin temelini oluşturan yöntemlerdir ve çoğu zaman diğer ÇKKV teknikleriyle bütünleşik biçimde kullanılmaktadır.

3.3.2. TOPSIS ve Bulanık TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), alternatiflerin “ideal çözüme yakınlığı” ve “ideal olmayan çözümden uzaklığı” esasına dayanan çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Yer seçimi problemlerinde farklı ölçeklerdeki kriterlerin normalize edilerek karşılaştırılabilmesi, yöntemin pratik kullanım alanını genişletmektedir. Tersane yer seçimi literatüründe TOPSIS; genişleme kapasitesi, lojistik altyapı, işgücü erişimi ve tedarik zinciri uygunluğu gibi birbiriyle ilişkili kriterlerin aynı karar yapısında değerlendirilmesine imkân tanıdığı için sıklıkla tercih edilmektedir (Sukisno & Singgih, 2019). Bu özellik, yöntemi özellikle çok boyutlu altyapı yatırımlarında güçlü bir sıralama aracı hâline getirmektedir.

Bununla birlikte yer seçimi problemlerinde karar vericilerin değerlendirmeleri çoğu zaman sözel, belirsiz ve kesin olmayan yargılara dayanır. Bu nedenle TOPSIS'in bulanık mantık ile bütünleştirildiği Bulanık TOPSIS (Fuzzy TOPSIS) yaklaşımı liman ve tersane çalışmalarında yaygınlaşmıştır. Bulanık TOPSIS, kriter değerlerini üçgensel veya yamuksal bulanık sayılarla ifade ederek belirsizliği modele daha gerçekçi biçimde yansıtır ve çevresel risk, güvenlik hassasiyeti, toplumsal kabul veya genişleme potansiyeli gibi nitel kriterlerin değerlendirilmesinde önemli bir avantaj sağlar (Caner & Aydın, 2021). Literatürde AHP veya Bulanık AHP ile belirlenen kriter ağırlıklarının TOPSIS veya Bulanık TOPSIS ile bütünleştirilmesi yaygın olup, bu hibrit yapı hem liman hem tersane yer seçiminde karar kalitesini artıran tamamlayıcı bir analitik yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Ziakas, 2019; Sukisno & Singgih, 2019).

3.3.3.DELPHI ve Bulanık DELPHI

Delphi yöntemi, uzman görüşlerini anonim ve sistematik biçimde derlemeye yönelik, özellikle belirsizlik barındıran problemlerde fikir yakınsaması sağlamayı amaçlayan bir grup karar verme tekniğidir. Linstone ve Turoff'un (1975) geliştirdiği bu yaklaşım (Brady, ve ark.,2016), uzmanlara birden fazla turda yöneltilen yapılandırılmış sorular aracılığıyla görüşlerin giderek netleşmesi esasına dayanır. Kimlik ve pozisyon etkisini ortadan kaldırması, bireysel önyargıları azaltması ve teknik konularda kolektif bir uzlaşa üretmesi nedeniyle altyapı planlaması, risk değerlendirmesi ve stratejik yer seçimi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Tersane ve liman yer seçimi literatüründe Delphi'nin önemli bir yer tutmasının nedeni, bu tür problemlerde teknik, ekonomik, çevresel ve güvenlik boyutlarının çoğu zaman doğrudan ölçülememesi ve dolayısıyla uzman değerlendirmelerinin kritik rol üstlenmesidir (Ziakas, 2019).

Klasik Delphi yöntemi güçlü yapısına rağmen uzmanların çoğu zaman değerlendirmelerini keskin sayılar yerine belirsizlik içeren sözel ifadelerle aktarması nedeniyle sınırlılıklar taşır. Bu tür dilsel değerlendirmelerin “çok önemli”, “orta”, “daha az kritik” gibi bulanık yapısı, sayısal karşılıklara dönüştürüldüğünde bilgi kaybına yol açabilir. Bu nedenle bulanık mantığın sunduğu üçgensel bulanık sayılar, sözel ifadelerin karar modeline daha gerçekçi biçimde aktarılmasını mümkün kılar. Fuzzy Delphi (Bulanık Delphi), klasik Delphi’nin anonim ve çok turlu yapısını korurken uzman görüşlerindeki belirsizliği bulanık kümelerle modele entegre ederek yöntemin hassasiyetini artırır. Bu yönüyle Delphi ve Fuzzy Delphi, tersane yer seçimi gibi teknik–stratejik bileşenlerin iç içe geçtiği ortamlarda kriter belirleme sürecine analitik bir temel sağlayan tamamlayıcı yöntemler hâline gelmektedir.

3.3.4. PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)

PROMETHEE, çok kriterli karar verme problemlerinde alternatiflerin birbirlerine göre üstünlük düzeylerini “outsranking” (baskınlık) yaklaşımı ile değerlendiren bir yöntemdir. Brans ve Vincke’nin (1985) geliştirdiği bu yapı, her kriter için ayrı tercih fonksiyonları tanımlayarak alternatiflerin birbirlerine hangi ölçüde tercih edildiğini nicel biçimde ortaya koyar. Bu sayede hem nicel hem nitel kriterlerin aynı model içerisinde ele alınmasını mümkün kılar. Tersane ve liman yer seçimi gibi teknik, çevresel ve ekonomik unsurların birlikte değerlendirildiği çok boyutlu problemlerde PROMETHEE’nin sağladığı esneklik ve karşılaştırma gücü önemli bir avantaj sunar. Kriterlere ilişkin eşik değerleri, tercih seviyeleri ve ağırlıkların ayrı ayrı tanımlanabilmesi, karmaşık altyapı kararlarında karar vericinin tercih davranışını doğrudan modele yansıtmasına imkân tanır.

Liman ve kuru liman yer seçimi çalışmalarında PROMETHEE'nin öne çıkmasının temel nedeni, farklı ölçeklerdeki kriterleri kıyaslamayı kolaylaştırması ve uygun olmayan alternatifleri süreç içinde aşamalı olarak dışlayabilmesidir. Ziakas'ın (2019) analizlerinde görüldüğü üzere yöntem; su derinliği, hinterlant erişimi, maliyet, çevresel risk ve altyapı uygunluğu gibi heterojen kriterleri güçlü biçimde yönetir. Tersane yer seçimi literatüründe ise PROMETHEE, özellikle AHP veya Bulanık AHP ile belirlenen kriter ağırlıklarıyla birlikte kullanıldığında yüksek duyarlılığa sahip sıralama sonuçları üretmesi sayesinde giderek daha fazla tercih edilmektedir (Sukisno & Singgih, 2019). Bu nedenle PROMETHEE, tersane ve liman yer seçimi araştırmalarında bütünleşik modellerin kritik bileşenlerinden biri hâline gelmiş, karar vericilere yalnızca nihai sıralama değil, aynı zamanda her alternatifin hangi kriter altında ne ölçüde güçlü veya zayıf olduğunu ayrıntılı biçimde analiz etme imkânı sağlamıştır.

4. ASKERİ TERSANE KURULUŞ YERİ SEÇİMİ KRİTERLERİNİ BELİRLEMEDE YOL HARİTASI

4.1. Literatür Kaynaklı Tersane Yer Seçimi Kriterleri

Tersane kuruluş yeri seçimi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, bu alanda özellikle Türkçe akademik üretimin sınırlı bir çerçevede kaldığı ve çoğunlukla belirli bölgesel incelemelere odaklandığı görülmektedir. Tersane odaklı incelemeler sırasında alanyazında rastlanan liman ve kuru liman (dry port) tesisleri üzerine gerçekleştirilen çalışmaların ürettiği kriterler ile tersane yeri kriterleri arasında yoğun benzeşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum “Literatür Kaynaklı Tersane ve Liman Yeri Seçim Kriterleri” başlıklı Tablo-1’de sıralanan kriterlerin ilk 10’u için tam benzerlik ifade etmektedir. Tablo-1

ile sunulan kriterler, iki (liman-tersane) literatürün kesişim alanlarını daha görünür kılmak amacıyla geliştirilmiş kapsamlı bir sınıflandırma işlevi taşımaktadır.

Liman ve kuru liman literatürü incelendiğinde, yer seçimi çalışmalarında 20 ila 50 arasında değişen kapsamlı kriter setlerine ulaşıldığı görülmektedir. Tersane literatüründe kriter üretimi açısından öne çıkan çalışmaların başında Saraçoğlu, İnsel ve Helvacıoğlu (2008; 2009) gelmektedir. Bu araştırmacılar hem yeni gemi inşa hem de bakım-onarım tersanelerine yönelik kapsamlı incelemelerde bulunmuş ve uzman görüşlerine dayalı olarak 70'in üzerinde alt kriter belirlemişlerdir. Güneri, Cengiz ve Şeker (2009) tarafından yürütülen Fuzzy ANP çalışması, kriterler arasındaki bağımlılık ilişkilerini değerlendirmesi bakımından literatüre önemli bir metodolojik katkı sunarken; Alnıpak ve Yorulmaz (2019) ise literatürde sık tekrarlanan unsurları 14 ana kriter altında derleyerek bölgesel bir değerlendirme gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalar, Tablo-1'de yer alan ortak kriterlerin şekillenmesinde merkezi bir rol oynamaktadır.

Liman, kuru liman ve tersane literatürlerinin bir arada değerlendirilmesi, her iki alanda da benzer karar değişkenlerinin belirleyici olduğunu göstermektedir. Tablo-1'de ayrıntılı biçimde sunulan ortak kriterler incelendiğinde; karayolu bağlantısı, deniz ulaşımı ve su derinliği, yan sanayi ve tedarik zincirine yakınlık, çevresel uyum, arazi/alan büyüklüğü, altyapı maliyetleri, deprem ve zemin koşulları, enerji altyapısı ve işgücü bulunabilirliği gibi unsurların hem liman hem de tersane çalışmalarında en baskın kriterler olduğu görülmektedir.

Dikkat çekici bir bulgu, Tablo-1'de yer alan konsolide kriter setinin, Afacan & Arıcan (2025) tarafından askerî tersane kuruluş yeri seçimine yönelik çalışmada literatür taraması yoluyla türetilen 19 kriter ile büyük ölçüde örtüşmesidir (Afacan &

Arıcan, 2025). Bu çalışmada tanımlanan stratejik konum, ulaşım bağlantıları, nitelikli işgücü temini, jeolojik uygunluk, çevresel hassasiyet, hammadde ve enerji kaynaklarına yakınlık, mülkiyet koşulları ve yerleşim baskısı gibi unsurların, Tablo-1’de yer alan geniş kapsamlı kriter setinin temel bileşenleri arasında bulunması, askerî tersanelere özgü gereksinimlerin literatürde yer bulan genel kriter yapısıyla büyük ölçüde uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Literatür Kaynaklı Konsolide Tersane ve Liman Yeri Seçim Kriterleri

Sıra	Ortak Kriter	Açıklama
1	Karayolu bağlantısı	Ağır yük taşımacılığı ve ana arterlere erişim
2	Deniz ulaşımı / derinlik	Gemi kabul kapasitesi ve yaklaşım emniyeti
3	Hammaddeye yakınlık	Sac, çelik ve donanım tedarikine erişim
4	Tedarik zinciri / yan sanayi varlığı	Lojistik firmaları, bakım-onarım ve sanayi desteği
5	Demiryolu bağlantısı	Multimodal taşımacılık ve ağır blok transferi
6	Arazi/Alan büyüklüğü	Genişleme kapasitesi ve yerleşim düzeni
7	Çevresel etkiler	Gürültü, kirlilik, hassas alanlar
8	Deprem / sismik risk	Fay hatlarına yakınlık ve yapısal güvenlik
9	Topografya / eğim	Arazi uygunluğu ve inşaa kolaylığı
10	Liman/tersanelere yakınlık	Rekabet ve kümelenme avantajı
11	Enerji altyapısı	Yüksek kapasiteli elektrik ihtiyacı
12	Atık yönetimi	IMO/çevre uyumlu atık kontrolü
13	İşgücü bulunabilirliği	Nitelikli mavi yaka ve mühendis erişimi
14	Havayolu erişimi	Yönetmel/lojistik akış
15	Mülkiyet durumu / kamulaştırma	Hukuki uygunluk ve maliyet etkisi
16	Arazi / altyapı maliyeti	Dalgakıran, iskele ve enerji yatırımları
17	Sosyal kabul / toplumsal etki	Yerel halkın yaklaşımı ve sosyal baskı
18	Genişleme potansiyeli	Uzun vadeli kapasite artışı
19	Nüfus yoğunluğu / yerleşime mesafe	Gürültü ve çevresel etki azaltımı
20	Doğal liman / korunaklılık	Rüzgâr-dalga koşullarına uygunluk
21	Teşvikler / politika uyumu	Devlet destekleri ve yatırım kolaylıkları
22	Ulusal/uluslararası standartlara uyum	IMO, ILO, ISO gereklilikleri
23	Yatırım geri dönüşü	Ekonomik fizibilite
24	Bölgesel rekabet	Alternatif liman ve tersanelerle rekabet
25	Kıyı uzunluğu / kıyı tipi	Rıhtım ve havuz planlaması
26	Sit alanları / koruma alanları	Ekosistem hassasiyeti

4.2. Askerî Tersane Yer Seçimi Süreci ve Askerî Tersane Kriterleri

Afacan ve Arıcan (2025)'ın yaptıkları çalışmada askerî tersane kuruluş yeri seçimine yönelik ilk kriter havuzu, kapsamlı literatür taraması sonucunda belirlenen 19 kriter üzerinden oluşturulmuştur. Bunlar: K1 Stratejik Konum, K2 Ulaşım Modlarına Erişim, K3 Karayolu Bağlantıları, K4 Demiryolu Bağlantısı, K5 Deniz Ulaşımı ve Derinlik, K6 Nitelikli İşgücüne Erişim, K7 Yan Sanayi ve Tedarik Zinciri Yakınlığı, K8 Hammadde Kaynaklarına Yakınlık, K9 Enerji Temin Kolaylığı, K10 Jeolojik ve Topoğrafik Uygunluk, K11 Çevresel Hassasiyetler, K12 Yerleşim Baskısı ve Gürültü Etkisi, K13 Mülkiyet ve Kamulaştırma Durumu, K14 Arazi/Arsa Büyüklüğü, K15 Altyapı ve Yatırım Maliyetleri, K16 Kamu Tesis ve Hizmetlerine Yakınlık, K17 Mevcut Tersaneler ile Kümelenme Olanakları, K18 Liman/Ticari Merkezlere Yakınlık ve K19 Kurumsal/Uygulanabilirlik Koşulları olarak sıralanmıştır. Literatürden türetilen bu 19 kriter, sivil tersane yeri seçim çalışmalarında sıklıkla karşılaşılan karar değişkenlerini vurgulamaktadır. Askerî tersane yer seçimi için kullanılan kriterlerin belirlenmesi süreci, denizcilik, gemi inşa, bakım-onarım ve lojistik alanlarında 11 ile 23 yıl arasında değişen hizmet sürelerine sahip 12 deneyimli askerî uzmanın katılımıyla yürütülmüştür. Uzman grubu; fırkateyn ve lojistik gemi komutanları, başçarkçılar, askerî fabrikalarda mühendis/müdür olarak görev yapan subaylar ve iş güvenliği uzmanlarından oluşmakta olup büyük bir kısmı Deniz Harp Okulu mezunu ve teknik alanlarda çift dal lisans derecesine sahip bu uzmanlar 19 kriterli geniş çerçeveyi askerî açıdan ele almışlar ve her birinden istedikleri sayıda askerî odaklı kriter önermeleri talep edilmiştir. İlk olarak, literatürde yer alan kriterler uzmanlara sunulmuş, ardından uzmanların tecrübesine dayanarak askerî gereksinimleri karşılamadığı düşünülen unsurlar için beyin fırtınası yapılmıştır.

Bu aşamada literatürde bulunmayan ancak askerî açıdan kritik olarak değerlendirilen; diğer askerî birliklere mesafe, geniş dış çeper arazi ihtiyacı, kamu arazisi ölçeği ve yerleşim baskısından uzaklık gibi yeni kriterler yine beyin fırtınası yöntemi kullanılarak uzmanlar tarafından önerilmiştir. Daha sonra tüm kriterler anket formunda yeniden düzenlenmiş ve uzmanlardan bu kriterleri “çok yüksek”ten “çok düşük”e uzanan beşli ölçekte değerlendirmeleri istenmiştir. Bir kriterin nihai listeye girebilmesi için uzmanların en az %50’sinden “çok yüksek” düzeyinde önem değerlendirmesi alması şart koşulmuştur. Bu eleme süreci sonunda, askerî tersane gereksinimlerini temsil eden ve Tablo-2’de sıralanan ve 12 kriterden oluşan sadeleştirilmiş nihai set ortaya çıkmıştır. Bu set; stratejik ve korunaklı coğrafi konum, ulaşım modlarının çeşitliliği, ağır sanayiye yakınlık, nitelikli işgücü, jeolojik yapı ve çevresel etkiler gibi literatürle uyumlu kriterlerin yanı sıra, uzmanların doğrudan sahadaki tecrübelerine dayanarak eklediği askerî özgü kriterleri de içermektedir. Böylece ortaya çıkan nihai yapı hem akademik literatüre dayanan hem de operasyonel askerî ihtiyaçlara karşılık veren bütünlük bir değerlendirme çerçevesi niteliği taşımaktadır.

Tablo 2. Askerî Alan Uzmanları Tarafından Derecelendirme Sonrası Sadeleştirilmiş Kriterler (Afacan & Arıcan, 2025)

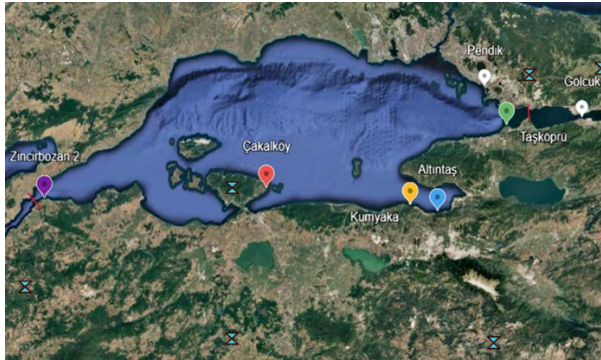
Sıra	Kodu	Kriter Açıklaması
1.	K15	Stratejik ve Korunaklı Coğrafi Konum
2.	K7	Diğer Ağır Sanayi Kuruluşları ve Tedarikçilere Mesafe
3.	K8	Ulaşım Modlarının Çeşitliliği
4.	K3	Ham Madde ve Enerji Kaynakları
5.	K16	Diğer Tersane ve Askerî Birimlerle Mesafe*
6.	K1	Nitelikli İşçilik
7.	K18	Yerleşime ve İşletime Kapalı Dış Çeper Arazi İmkânı*
8.	K19	Yerleşim Yerlerine Mesafe*
9.	K17	Kamu Arazisi Ölçeği ve Kamulaştırma Kapasitesi*
10.	K9	Jeolojik Yapı
11.	K10	Hoşgörülü Sosyo-kültürel Yapı
12.	K2	Çevresel Etkiler

(*) Askerî uzmanlar tarafından teklif edilen ilave kriterler.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Afacan ve Arıcan (2025)'ın yaptıkları çalışmada, Marmara Bölgesi'nde askerî tersane kuruluş yeri seçimine yönelik olarak Şekil-1 üzerinde gösterilen A- Zincirbozan-Lapseki/Çanakkale, B-Çakalköy-Bandırma/Balıkesir C- Kumyaka-Mudanya/Bursa, D- Altıntaş-Gemlik/Bursa, E- Taşköprü/Yalova olmak üzere beş potansiyel nokta, literatürden türetilen 19 kriter doğrultusunda değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, stratejik konum, ulaşım bağlantıları, ağır sanayi kapasitesi ve askerî entegrasyon olanakları açısından en yüksek uygunluk düzeyine sahip bölgelerin Gemlik Körfezi ve Yalova–Altınova olduğu belirlenmiştir. Alternatiflerin genel sıralaması Tablo-3'te sunulmuş olup sonuçlar literatürle yüksek uyum göstermektedir. Bununla birlikte, çalışmada ağırlıklandırma ve karşılaştırma için çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanılmamış olması, daha gelişmiş bir karar altyapısına ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Literatürde tersane ve liman yeri seçimi için kullanılan ÇKKV yöntemleri, bu tür karar problemlerini sistematik ve kantitatif biçimde ele alma kapasitesine sahiptir. Bu nedenle mevcut sonuçların, ileride ÇKKV yöntemleriyle desteklenerek doğrulanması ve geliştirilmesi önem taşımaktadır.

Şekil 1. Güney Marmara Kıyısında Askeri Uzmanlara Önerilen 5 Alternatif Lokasyon (Afacan & Arıcan, 2025)



Tablo 3. Askerî Alan Uzmanları Tarafından (Afacan & Arıcan, 2025)

Sıra	Alternatif Konum	Skor Puanı
1	Altıntaş-Gemlik/Bursa	121
2	Taşköprü/Yalova	118
3	Kumyaka-Mudanya/Bursa	111
4	Çakalköy-Bandırma/Balıkesir	90
5	Zincirbozan-Lapseki/Çanakkale	59

Ayrıca bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen geniş literatür taraması, liman ve tersane kriterleri arasında güçlü bir örtüşme olduğunu göstermiş; gelecekte kullanılmak üzere daha kapsamlı ve esnek bir kriter havuzu oluşturulabileceğine işaret etmiştir. Askerî uzmanların sahadan aktardığı tecrübelerle zenginleştirilen bu yaklaşım, gelecekte geliştirilecek modeller için literatür temelli ve operasyon odaklı bütünlüklü bir ÇKKV çerçevesi kurulmasına olanak sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- Afacan, İ. & Arıcan, O. H. (2025). Askerî Tersane Kuruluş Yeri Seçimi Üzerine Bir Araştırma. *Woscon Kongreleri, Türkiye*. <https://www.wosconkongreleri.com/>.
- Aliefendioğlu, Y. ve Sağır, N. (2015) Tersane Yatırımları İçin Kuruluş Yeri Seçimi: Yalova- Altınova Tersane Girişimcileri Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi Örneği, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3 (2015), 592-612.
- Alnıpak, S., ve Yorulmaz, M. (2019). Tersane Yöneticilerinin Bakış Açısından Bütünleştirilmiş Ahs-Topsis Ve Ahs-Moorra Yöntemleri İle Tersane Kuruluş Yeri Seçimi: Akdeniz Bölgesi Örneği. *Beykoz Akademi Dergisi*, 7(2), 106-125.
<https://doi.org/10.14514/byk.m.26515393.2019.7/2.106-125>.
- Ayan, B., Abacıoğlu, S., & Basilio, M. P. (2023). A comprehensive review of the novel weighting methods for multi-criteria decision-making. *International Journal of Research Publications*, 148(1), 1–15.
- Bakır, N. (2024), Milli Gelirde Bölgeler Arası uçurum, 18.02.2025 tarihinde Dünya Gazetesi: <https://www.dunya.com/kose-yazisi/milli-gelirde-bolgeler-arasi-ucurum/756912?form=MG0AV3> adresinden alındı.
- Bansal, N., Mukherjee, M., & Gairola, A. (2013, February). Urban risk management. In *International Conference on Challenges in Disaster Mitigation and Management (Vol. 15, p. 17February)*.

- Baykal, R. (2015, 11 Aralık). Tersâne-i Âmire'nin Tarihçesi, İdari Yapısı ve Personeli [sunum bildirisi]. Gemi Mühendisleri Odası.
- Broekhuizen, H., Groothuis-Oudshoorn, C. G. M., Hoefman, R. J., Al, M. J., & van Til, J. A. (2015). A review and classification of approaches for dealing with uncertainty in multi-criteria decision analysis for healthcare decisions. *Value in Health*, 18(5), 833-844. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2015.04.010>
- Brady, S. R., Jason, L. A., & Glenwick, D. S. (2016). The delphi method. *Handbook of methodological approaches to community-based research: Qualitative, quantitative, and mixed methods*, 61-67.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management science*, 31(6), 647-656.
- Caner, H. I., & Aydin, C. C. (2021). Shipyard site selection by raster calculation method and AHP in GIS environment, İskenderun, Turkey. *Marine Policy*, 127, 104439.
- Cengiz, M. ve Güneri A.F., (2007). Türkiye' deki Mevcut Koşulların Bulanık Analitik Ağ Süreciyle Değerlendirilerek Uygun Tersane Yeri Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ferrari, E., Christidis, P., & Bolsi, P. (2023). The impact of rising maritime transport costs on international trade: Estimation using a multi-region general equilibrium model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 22, 100985.
- Ford, B. (2007). Down by the water's edge: Modelling shipyard locations in Maryland, USA. *The International Journal of*

Nautical Archaeology, 36(1), 125–137.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-9270.2006.00129.x>

- Galderisi, A., & Limongi, G. (2021). A comprehensive assessment of exposure and vulnerabilities in multi-hazard urban environments: A key tool for risk-informed planning strategies. *Sustainability*, 13(16), 9055.
- Gencer, E. A. (2013). The interplay between urban development, vulnerability, and risk management: A case study of the Istanbul metropolitan area (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- Güneri A.F., Cengiz, M. ve Şeker, Ş. (2009) A Fuzzy ANP Approach To Shipyard Location Selection, *Expert Systems with Applications* 36, 7992–7999.
- Kılıç, M. (2002). Yeni Türk Devletinin Kurumsal Yapılanmasında İktisadi Gücün Oluşumu ve Diğer Ulusal Güç Unsurlarıyla Etkileşimi (Doctoral dissertation, Ankara Üniversitesi (Turkey)).
- Koday, S., & Baki, G. (2014). Gemlik Limanları. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(3), 431-454.
- Koldemir, B., & Kahraman, C. (2020). Ulaşım ve Ticaret Coğrafyası Açısından İstanbul Limanları. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(76), 1931-1949.
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). The Delphi method: Techniques and applications. Reading MA: Addison-Wesley.
- Marshall, A. (1920). *Industry and Trade* [Endüstri ve Ticaret] (3rd edition). London: Macmillan.
- Marshall, A. (1964). *Principles of Economics* [Ekonominin Temelleri] (8th edition). London: Macmillan.

- Özen, E. S. (2014). Liman kentlerinde koruma ve yaşatma prensipleriyle değerlendirilen gemi inşa endüstrisi yapıları: Tersane-i Amire üzerine yeni bir senaryo “Haliç Tersanesi bilinç platformu”.
- Parkhan, A., Vatimbing, A.D. ve Widodo, İ.D. (2018). Integration AHP and TOPSIS in shipyard location selection, 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications, 2018, 11-16.
- Saaty, T. L., & Wind, Y. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. Management science, 26(7), 641-658.
- Sukisno, A., & Singgih, M. L. (2019). Location selection analysis for new shipyard using integration of DEMATEL and ANP: A case study (PT IKI). In Proceedings of the International Conference on Industrial and System Engineering (ISIEM) (pp. 18–29).
- T.C. Ticaret Bakanlığı, (2023), İhracat Genel Müdürlüğü, Gemi İnşa Sanayii Sektör Notu 2023, Erişim tarihi: 18.09.2025, <https://www.ticaret.gov.tr/ihracat/sektorler/Sanayi%20ve%20Hizmetler>.
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (n.b.). Tersaneler ve Gemi Geri Dönüşüm Tarihçesi. Tersaneler ve Kıyı Yapıları Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: <https://tkygm.uab.gov.tr/tersaneler-ve-gemi-geri-donusum-tarihcesi>
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2025a). 2025 Yılı Tersane Sayısı – Tersaneler ve Kıyı Yapıları İstatistikleri. Retrieved from <https://tkygmistatistikleri.uab.gov.tr/2025-yili-tersane-sayisi>

- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, (2025b). Tersaneler ve Kıyı Yapıları Genel Müdürlüğü, Faal tersaneler [Excel dosyası]. Erişim adresi: <https://tkygm.uab.gov.tr/tersaneler-daire-baskanligi>
- Türk, A., & Özkök, M. (2020). Shipyard location selection based on fuzzy AHP and TOPSIS. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 39(3), 4557–4576. <https://doi.org/10.3233/JIFS-200522P>
- Türko, E. S., & Ersungur, Ş. M. (2014). Marshall Tipi Dışsal Ekonomiler, Endüstriyel Bölgeler ve Çağdaş Yaklaşımlar. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(3), 253-270.
- Uludağ, A. S. (n.d.). Çok kriterli karar verme: AHP, ÇKKV, TOPSIS, VIKOR [PDF]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Ulugün, F. Y., & Gezen, F. (Yıl yok). Donanma ve Gölçük Tersanesi'nin Tarihi [PDF]. Academia.edu. https://www.academia.edu/7563279/DONANMA_VE_G%C3%96LC%C3%9CK_TERSANES%C4%B0N%C4%B0N_TAR%C4%B0H%C4%B0?source=swp_share
- United Nations Conference on Trade and Development. (2021). Review of maritime transport 2021. UNCTAD. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en.pdf (Aktaran :Ferrari ve ark.,2023)
- United Nations Conference on Trade and Development. (2024). Review of maritime transport 2024. UNCTAD. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf
- Ünsan Y, İnsel M, Helvacıoğlu İH (2007) Tersane ve Gemi Söküm Yerlerinin Seçiminde Türkiye'ye Özgün Saptamalar. 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, pp 65–72

- Yalova-Altınova Tersane Girişimcileri Sanayi ve Ticaret A.Ş.
(2006). Tersane yatırımları için kuruluş yeri seçimi:
Yalova–Altınova örneği. Tersaneler Araştırma Projesi
(Tersaneler Deprem Çalıştayı Komisyonu Raporu).
- Ziakas, A. (2019). Dry port location selection: Freight village
location criteria and selection framework (MSc thesis).
University of Piraeus. Retrieved from
<https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/13925>
- Zorlu, T. (2004). Osmanlı deniz teknolojisi Üzerine. Türkiye
Araştırmaları Literatür Dergisi, (4), 297-354.

ASSESSING THE SLOW STEAMING IN SHIPPING UNDER INTERNATIONAL EMISSION REGULATIONS

Süleyman Doğan GENÇ¹

Osman ARSLAN²

1. INTRODUCTION

Maritime transportation is the most voluminous mode of transport among all modes. As of 1 January 2025, total maritime fleet of the world reached 112,500 active commercial ships, with a carrying capacity of 2.44 billion deadweight tons (UNCTAD, 2025). This rate of increase is consistent with the growth recorded in 2023 and corresponds to an annual rise of 3.4%. Although this figure remains below the mean annual rate of increase of 5.1% observed over the past two decades, it continues to exceed the overall growth of maritime trade. Although progress has been made in line with the International Maritime Organization's Greenhouse Gas (2023 IMO GHG) Strategy, this process is advancing gradually (UNCTAD 2025). As of May 2025, 8% of the gross tonnage of the active fleet and 53% of vessels under construction are designed for the use of alternative fuels. Moreover, the contraction in labor supply, technological transformation, emerging safety risks, and newly implemented as well as forthcoming regulations are making the structure of the maritime industry and its future outlook increasingly complex

¹ Kocaeli University, Institute of Science, Department of Maritime Transportation Engineering, ORCID: 0009-0005-8488-5049

² Assoc. Prof. Dr. Kocaeli University, Maritime Faculty, Department of Marine Engineering, ORCID: 0000-0003-4384-3510

(UNCTAD 2025). The growing demand for energy-efficient or carbon-neutral vessels is expected to provide a competitive advantage to shipowners who undertake fleet transformation at an early stage. Accordingly, the sector has begun to adopt methods that can offer rapid, short-term solutions for compliance with current emission regulations. Within this scope, route optimization enables ships to select the most suitable route based on meteorological and oceanographic conditions, thereby contributing to the mitigation of fuel-originated emissions. The harnessing of shore-based power allows auxiliary engines to be shut down during port stays, making it possible to significantly reduce CO₂ as well as SO_x and NO_x emissions. Furthermore, improved maintenance planning and hull cleaning enhance fuel efficiency by minimizing hull resistance. In addition to these operational measures, slow steaming stands out as a low-cost and quickly implementable method. By reducing vessel speed, fuel consumption is lowered, which in turn leads to notable decreases in both CO₂ emissions and operational costs. This study aims to examine the advantages and disadvantages of slow steaming, evaluate its applicability within the framework of emission regulations, and contribute to the existing literature.

2. LITERATURE REVIEW

During ship operations, the combustion of fuels in main engines, auxiliary engines, and boiler systems releases various pollutants into the atmosphere, including carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), sulfur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x), unburned hydrocarbons (HC), and particulate matter (PM). These emissions significantly contribute both to the deterioration of local air quality and to the accumulation of greenhouse gases that drive climate change on a worldwide scale

(Kotzampasakis, 2025). Research conducted particularly in areas close to port regions has demonstrated that elevated concentrations of NO_x, SO₂, and respirable particulate matter have serious adverse effects on human health. CO₂, on the other hand, is regarded as one of the primary contributors to global warming originating from maritime transport. Therefore, examining the environmental impacts of fuel consumption in the maritime sector is of fundamental significance for the improvement of sustainable transport policies and robust emission-mitigation strategies (Kotzampasakis, 2025). Against this background, the IMO developed a strategy in 2018 to reduce greenhouse gas emissions in alignment with the goals of the Paris Agreement and subsequently revised this strategy in 2023 with more ambitious targets. Similarly, the European Union has implemented regulations targeting significantly alleviation the greenhouse gas intensity of maritime fuels by 2050 (Arıcan, et al., 2025). Within this framework, technical and operational measures based on indicators for instance the Energy Efficiency Design Index (EEDI), Carbon Intensity Indicator (CII) and the the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) have been made mandatory in the maritime industry. These measures aim to reduce the industry's carbon footprint through fuel savings, speed optimization, the use of alternative fuels, and the adoption of energy efficiency enhancing technologies (Arıcan, et al., 2025). The 2023 IMO GHG Strategy aims to alleviate emissions by 20% by 2030 and by 70% by 2040, in comparison to 2008 rates, and to reach net-zero emissions by approximately 2050. The strategy is grounded in the Greenhouse Gas Fuel Intensity (GFI) metric, which is expressed as grams of CO₂ equivalent per megajoule (gCO₂eq/MJ) and computed on a well-to-wake (WtW) basis for the total energy used by ships over a calendar year. Beginning in 2028, progressively stricter GFI targets are planned to be implemented (DNV, 2025a). Under this framework, vessels exceeding GFI limits will incur penalties, while those using low-

GHG fuels or eligible technologies will receive incentives. The regulation promotes cleaner energy adoption, stimulates emission-reduction innovation, and advances sustainability in maritime transport (DNV 2025a). As a result of the measures introduced, an increase in freight rates within the maritime transport market is anticipated (Hilmola, 2015). To mitigate this increase, various approaches such as slow steaming, efficient route optimization, the use of scrubber systems, and a shift toward alternative fuels are being considered (Johansson et al., 2013). The IMO promotes emission reduction by introducing mandatory technical standards for new ships with operational measures for existing ships such as EEDI, SEEMP and EEXI. In this regard, companies engaged in maritime transport can enhance their competitiveness by improving energy efficiency and reducing operational costs (Özdağ et al., 2024). Trends that enhance energy efficiency and reduce carbon emissions contribute significantly to mitigating environmental impacts. The sector is expected to decrease CO₂ emissions per unit of transport work by 40% by 2030 relative to 2008 rates and to attain full decarbonization by 2050. Accordingly, various technological, operational, and market-based strategies have emerged in the maritime domain. Slow steaming is one of these strategies (Robalo-Cabrera et al., 2025). The practice of slow steaming contributes to both fuel savings and the reduction of emission levels in ships (Gospić et al., 2022). Another measure aimed at reducing emissions is enhanced hull maintenance and cleaning. Research indicates that vessels with clean hulls and optimized surface conditions that reduce water friction can achieve fuel savings of between 9% and 17%. This method provides an effective means of achieving emission reductions in a relatively short period (Adland et al., 2018). Although ship operators aim to reduce emissions, they may, under certain circumstances, be required to use high-sulfur fuels. Therefore, they must rely on route optimization to reduce SO_x and CO₂ emissions and to enhance energy efficiency. Within

the framework of emission control regulations, evaluating navigation both inside and outside Sulphur Emission Control Areas and selecting the optimal route accordingly constitutes one of the key operational strategies (Yu et al., 2021). Although the aforementioned measures primarily focus on reducing carbon emissions generated during a ship's voyage, it is well known that vessels continue to consume fuel and produce CO₂ emissions during berthing, departure maneuvers, and port stays. In this regard, shore based power has emerged in recent years as a widely studied method that supports carbon reduction in port operations and has become an internationally promoted emission-reduction strategy (Sun et al., 2022). Among these measures, slow steaming is a prompt and effective method in terms of applicability. It is one of the most practical approaches for companies seeking compliance with the “2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions.”

3. EMISSION REGULATIONS AND APPLICATIONS IN SHIPPING

While global transport generates substantial economic benefits, it simultaneously contributes to environmental pollution and global warming. To address the environmental impacts of industrialization, the United Nations introduced the Paris Agreement, a legally binding instrument on climate change. (UNFCCC, 2025b). In line with the Paris Agreement, 17 Sustainable Development Goals (SDGs) have been established. The SDGs provide a comprehensive framework aimed at strengthening environmental, social, and economic sustainability on a global scale. These goals focus on fundamental human needs such as the eradication of poverty and hunger, improvements in health and education, the achievement of gender equality, and

enhanced access to clean water. Also aiming to ensure sustainable economic growth through clean and affordable energy, decent work, industrial and infrastructural development (UNFCCC, 2025b). At the same time, the goals ensuring sustainable cities, responsible production and consumption, climate action, and the protection of terrestrial and marine ecosystems. They also include fostering peaceful and inclusive societies (UN, 2025). Through 17 SDG goals, global challenges are addressed comprehensively. In this regard, it is also necessary to tackle the environmental problems arising from global trade. Among all modes of transportation, the environmental impacts associated with maritime transport have become increasingly significant and can no longer be overlooked. Past maritime accidents that resulted in extensive environmental damage have underscored the need for more effective preventive measures at the international level. A major turning point in implementing global preventive measures against ship-sourced pollution was the implementation of the “International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)” by the IMO in 1973. The scope of MARPOL has since been expanded through the addition of various annexes, and its provisions are regularly revised in line with current needs, environmental concerns, and technological advancements, thereby enhancing its effectiveness in practice.

3.1. MARPOL Annex VI

This annex specifies caps on NO_x and SO_x emissions from ship exhaust, proscribes the intentional release of ozone-depleting compounds, and enforces more stringent standards within designated emission control areas. Furthermore, with the amendment endorsed in 2011, mandatory technical and operational energy-efficiency measures targeting reducing greenhouse gas emissions entered into force (IMO, 2025a). All ships of 400 gross tonnage and above, as well as all floating and

fixed drilling rigs or other platforms, are subject to MARPOL Annex VI (MARPOL,2022).

3.2. NOx Technical Code 2008

The NOx Technical Code (2008) is a technical implementation guideline developed by the IMO and incorporated under Annex VI of the MARPOL 73/78 Convention. The code sets out the technical requirements that must be met both during the manufacturing stage and throughout the operational life of diesel engines in order to limit NOx emissions (Chavando et al., 2024) Diesel engines in maritime transport emit high NOx levels, contributing to ozone formation, acid rain, and health impacts. IMO therefore regulates these emissions under MARPOL Annex VI, supported by a technical protocol that defines their measurement, documentation, and verification (Türk Loydu, 2015).

3.3. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions

In 2018, the IMO adopted its initial plan on the mitigation of GHG emissions from ships, thereby expressing its global commitment to reducing and ultimately eliminating emissions from international maritime transport. In the same year, during the MEPC 73 session held in October, a follow-up programme was approved to ensure progress in line with the strategy's timeline up to 2023. Accordingly, at the MEPC 80 session in July 2023, the 2023 IMO Strategy on the Reduction of GHG Emissions from Ships was adopted in accordance with the established action plan (IMO, 2023). The strategy adopted in 2023 is an updated and more ambitious version of the Initial IMO GHG Strategy introduced in 2018. While the 2018 strategy envisaged a 50% reduction in GHG by 2050, the 2023 strategy revised this target to achieving net-zero emissions by around 2050, or preferably earlier (Zhang et al., 2024). The guiding levels

of aspiration under the 2023 IMO GHG Strategy are structured into four phases. The first phase seeks to lower the carbon intensity of vessels by reviewing and strengthening design standards to enhance energy efficiency requirements for new vessels. The second phase aims a alleviation in the carbon intensity of international maritime transport, envisaging at least a 40% decrease in CO₂ emissions per transport work by 2030 compared to 2008 levels. The third phase aims to enhance the uptake of technologies, fuels, and energy sources that enable zero or near-zero greenhouse gas emissions (IMO MEPC.377(80), 2023). By 2030, it is planned that at least 5%, and ideally 10%, of the total energy used in international maritime transport will be supplied from such energy sources. Finally, the strategy aims for greenhouse gas emissions from international shipping to reach their top level as soon as possible and to accomplish net-zero emissions by approximately 2050, or earlier if feasible. This target has been set in line with the long-term global temperature target outlined in the Paris Agreement (IMO, 2023).

3.4. Energy Efficiency Design Index (EEDI)

EEDI is a performance-driven regulation aimed at reducing pollutant emissions by enhancing energy efficiency in new ship designs (Polakis et al., 2019). Effective from 1 January 2013, the EEDI tightens ship-type reference levels and mandates a 30% CO₂ reduction per ton-mile by 2025. It calculates energy efficiency through technical design parameters while allowing flexibility in technology choice (IMO, 2022).

3.5. Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)

SEEMP provides a structured mechanism for shipowners to monitor environmental performance, manage it effectively, and improve operational energy efficiency (DNV, 2025b). The overarching objectives of SEEMP are aligned with the goal of

reducing the carbon intensity of international maritime transport, as stipulated in Regulation 20 under Chapter 4 of MARPOL Annex VI. In this context, the plan requires companies to integrate actions aimed at improving energy efficiency into their ship operation and management processes (IMO MEPC.364(79), 2022). The SEEMP framework consists of three main components. The first component outlines the SEEMP aimed at improving vessel energy efficiency. The second component defines the Ship Fuel Oil Consumption Data Collection Plan; and the third component sets out the Ship Operational Carbon Intensity Management Plan (DNV, 2025b). SEEMP I is based on a four-stage management cycle designed to enhance energy efficiency. In the planning phase, the key elements include assessing the ship's current energy and carbon performance, selecting appropriate energy-saving and emission-reduction measures, setting specific targets, and evaluating the feasibility of proposed actions. During the implementation phase, the selected measures are systematically executed, responsibilities are clearly assigned, and continuous record-keeping is carried out to provide data for subsequent assessments (Karavoulias, 2025). The monitoring stage ensures that the effectiveness of implemented measures is tracked through quantitative indicators such as the Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) and carbon intensity metrics, enabling timely adjustments when necessary. The final stage, self-evaluation and improvement, involves reviewing the effectiveness of the plan and its implementation, and continuously refining energy-efficiency strategies in line with regulatory requirements, operational changes, and evolving environmental conditions (Ashry et al., 2024). SEEMP II outlines the methodologies for accurate data monitoring and reporting, stressing the systematic tracking of key indicators such as fuel consumption, distance travelled, and time underway for annual performance assessment (Karavoulias, 2025). SEEMP requires shipowners and operators to evaluate emerging technologies and

operational practices, and to implement them effectively in order to optimize vessel performance (DNV, 2025b).

3.6. Carbon Intensity Indicator (CII) and Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)

The EEXI quantifies a ship's energy performance by taking into account its design capabilities, energy consumption, and environmental impact. As an indicator that evaluates both the structural and operational characteristics of a vessel, it enables the monitoring of environmental sustainability within maritime transportation (Özdağ et al., 2024). The CII is an indicator that defines an annual reduction factor intended to ensure the continuous improvement of a vessel's operational carbon intensity within a specified rating range (IMO, 2025c). The annual operational CII value calculated for each ship is compared with the required annual operational CII and is subject to documentation and verification. This comparison enables the assessment of the vessel's operational performance, allowing the carbon-intensity rating to be determined objectively and facilitating the monitoring of the continuous improvement process toward energy-efficiency targets (Bayraktar & Yuksel, 2023). The EEXI is a technical regulation developed by the IMO to reduce greenhouse gas emissions from ships. As a technical indicator related to vessel design, the EEXI closely resembles the EEDI in its fundamental structure and methodology (Bayramoğlu, 2024). However, the key distinction between the two regulations is that the EEXI applies to existing ships, whereas the EEDI is applied to newly built ships (Simopoulos, 2024).

3.7. IMO Net-Zero Framework

The IMO Net-Zero Framework is a new regulation proposed to be incorporated as a fifth chapter into Annex VI of MARPOL. The primary objective of this new measure is to achieve the climate targets set out in the 2023 IMO Strategy on

the Reduction of GHG Emissions, accelerate the adoption of zero and near-zero GHG fuels, technologies, and energy sources (Dominioni, 2025). The NZF marks the beginning of a new era in the maritime sector as an innovative regulation that combines global technical requirements with a GHG pricing mechanism. This measure obliges ships to gradually transition from conventional fossil fuels to higher-cost, low-emission fuels or, alternatively, to make contribution payments to the IMO Net-Zero Fund (DNV, 2025a). The NZF determines the compliance balance of ships based on their annual GFI performance, allocating surplus compliance units to those below the target and assigning a compliance deficit to those exceeding it. Surplus units may be transferred or banked within defined limits, while ships with a compliance deficit may fulfil their obligations by using these units or by purchasing Remedial Units (RU). For the 2028–2030 period, RU prices are set at 100 USD/ton for Level 1 and 380 USD/ton for Level 2. All revenues collected are transferred to the IMO Net-Zero Fund (DNV, 2025a). It is of great importance that the NZF is designed in a way that supports the economic sustainability of high-emission-reduction options and directs incentives toward the most efficient solutions (Priyo, 2025).

3.8. The European Union Emissions Trading System (EU ETS)

EU ETS aims to reduce greenhouse gas emissions through a market-based mechanism built on the “cap-and-trade” principle. These allowances can be traded either through auctions or on the open market. Through carbon pricing, the EU ETS incentivizes the transition to low-carbon technologies and serves as one of the key policy instruments supporting the EU’s 2050 climate-neutrality objective (Trotignon, 2012). The inclusion of maritime transport within the scope of the EU ETS covers only the direct emissions generated from fuel consumption on board ships and

does not encompass upstream (well-to-tank) emissions arising from fuel production and supply. However, the upstream GHG emissions associated with marine fuels are indirectly integrated into the ETS through other sectors and activities that are part of the system (Flodén et al.,2024). The system sets an annual emissions cap that is gradually reduced over time and requires companies to hold emission allowances for every ton of CO₂ equivalent they emit (Ben-Hakoun et al., 2016). In the application of the EU ETS to maritime transport, emission costs are calculated based on the vessel's fuel consumption and the corresponding amount of CO₂ produced (European Commission, 2025a). In the final step, the adjusted CO₂ amount is multiplied by the prevailing carbon price to calculate the required emission cost. This structure ensures that operational decisions such as speed and distance, are directly reflected in the resulting carbon cost (European Commission, 2025a).

3.9. Fuel EU

The FuelEU Maritime Regulation is designed to accelerate decarbonization in the maritime sector by promoting the use of renewable and low-carbon fuels. Entering into force on 1 January 2025 (European Commission, 2025b). The regulation establishes upper limits on the annual average greenhouse gas intensity of fuel used by ships above 5,000 GT calling at European ports. The reduction target begins at 2% in 2025 and is projected to reach 80% by 2050. E-fuels, when supported by advanced combustion control technologies and enhanced monitoring systems, are considered strategic options that can substantially contribute to the sector's decarbonization process (Ingwersen et al., 2025). Combined with advances in alternative fuel technologies, the FuelEU Maritime measures will enable a sustainable, long-term transformation of the maritime sector in line with climate objectives (European Commission, 2025b).

3.10. EU Monitoring-Reporting-Verification (EU MRV)

This regulation covers GHG emissions from general cargo and offshore vessels between 400–5,000 GT, and from ships over 5,000 GT calling at EU ports. Under the EU MRV system, vessels must regularly monitor fuel consumption, emission factors, distance, and voyage data, and maintain an approved monitoring Plan. Annual emission reports are reviewed by independent verifiers, and vessels that successfully complete this process are issued a Certificate of Compliance. In cases of non-compliance, penalties may be imposed, and, where necessary, vessels may be subject to a port entry ban (EU, 2015). The FuelEU Maritime Regulation, on the other hand, aims to progressively reduce the greenhouse gas intensity of marine fuels. In this way, the MRV system reinforces the role of the maritime sector in the decarbonization process and supports the EU's climate policy instruments within a coherent and comprehensive framework (Karavoulas, 2025). The monitoring and reporting system not only enhances data transparency within the sector but also provides a framework compatible with emissions trading mechanisms, thereby supporting the integration of the maritime industry into EU climate policies (European Commission, 2025c).

4. OPERATIONAL EFFICIENCY APPROACHES FOR SHIP-SOURCED EMISSION REDUCTION

Ship operators have increasingly sought new and practical solutions to meet the regulatory obligations arising from the IMO's progressively stricter emission regulations. In this regard, operational methods that deliver rapid and measurable emission reductions have come to the forefront. In the sector, approaches such as efficient route optimization, shore-based power, improved maintenance and hull cleaning, and slow steaming

stand out as key short-term operational optimization strategies for reducing emission levels and ensuring compliance with the IMO's GHG reduction strategy. The systematic and integrated implementation of these methods enables both the mitigation of ship-related environmental impacts and the reduction of vessel operating costs. As a result of enhanced maintenance and hull cleaning, it has been observed that reducing hull friction resistance in water lowers fuel consumption. This reduction directly corresponds to decreased CO₂, SO_x, and NO_x emissions. The greater efficiency gains achieved particularly after dry-docking demonstrate that a clean hull significantly improves energy use. Moreover, the more pronounced fuel savings recorded during laden voyages indicate that hull cleaning contributes more substantially to emission reduction during periods of intensive commercial operations (Adland et al., 2018). Emission-focused advanced hull maintenance and cleaning play a critical role among operational emission-reduction strategies. Another key option is route optimization. Route optimization is an operational strategy that enables ships to select the most efficient route by considering factors such as weather conditions, traffic density, and port operating hours. Without compromising safety or the agreed transport time, this approach significantly reduces fuel consumption and emissions while also delivering economic benefits (Andersson, & Ivehammar, 2016). In addition to emission-reducing measures applied during voyage, shore based power represents another operational strategy aimed at lowering emissions generated during port stays and berthing–unberthing operations. Although this method is an important practice from a sustainability perspective, its overall emission-reduction effectiveness largely depends on the cleanliness of the electricity generation source. For shore power to deliver meaningful GHG reductions, the supplying port must provide electricity generated from sustainable, low-carbon energy sources (Sun et al., 2022). Studies conducted at ports that provide suitable

low-carbon energy sources indicate that the use of shore-based power significantly reduces NO_x emissions (Sun et al., 2022; He et al., 2020). When the appropriate conditions are met, the use of shore based power is a highly effective measure for reducing SO_x, NO_x, and CO₂ emissions. However, it is not suitable for ports whose electricity supply is not aligned with low-carbon or clean energy requirements (Sun et al., 2022; Dai et al., 2020). Furthermore, slow steaming constitutes an additional operational measure. Slow steaming involves reducing a vessel's speed, while accounting for fuel-related emissions, voyage duration, and navigational safety, to operate at an optimal level. It is a rapid and effective method of reducing emissions. Examining the advantages and disadvantages of slow steaming, as well as assessing its operational applicability under current emission regulations, is important for contributing to the literature.

4.1. Slow Steaming

Following the adoption of MARPOL Annex VI, efforts to identify new emission-reduction methods intensified. One of the approaches developed as a result of this process is the concept of "slow steaming." Adjusting a vessel's speed in accordance with slow steaming has, in recent years, become a more preferable practice for complying with emission requirements rather than operating under the principle of "utmost dispatch." Moreover, slow steaming has become increasingly widespread as a means of enhancing fuel efficiency in ships (Maloni, Paul & Gligor, 2013). Slow steaming refers to operating a vessel at approximately 15% below its full-speed capability (Gurning, Busse, & Lubnan, 2017). Since slow steaming reduces fuel consumption, it also lowers GHG emissions and fuel costs (Maloni et al., 2013). The literature review indicates that the emission reduction achieved through the application of slow steaming ranges approximately between 20% and 27% (Robalo-Cabrera et al., 2025; Karountzos et al., 2024; Pelić et al., 2023; Gospić et al., 2022; Finnsgård et

al., 2020; Maloni et al., 2013). This rate demonstrates that slow steaming is an efficient method for emission reduction. An oversupply in fleet capacity, rising bunker prices, and the compliance process associated with regulations aimed at reducing ship-sourced emissions emerge as the three primary factors driving the adoption of slow steaming in maritime transportation (Yin et al., 2013).

4.2. Advantages and Disadvantages of Slow Steaming

Research has shown that, following the entry into force of the Paris Agreement and the subsequent tightening of GHG reduction targets under the IMO's first mandatory energy-efficiency requirements introduced in 2011, the Initial GHG Strategy adopted in 2018, and its updated version, the 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, slow steaming has become a fast and effective compliance tool preferred by ship operators. The primary advantage of slow steaming is the substantial reduction in fuel consumption achieved by lowering the vessel's sailing speed between two designated destinations. This reduction also leads to significant decreases in CO₂, SO_x, and NO_x emissions, depending on the type of fuel used. As a result, the practice helps relieve the financial pressure caused by rising fuel prices and facilitates compliance with the energy-efficiency and emission-reduction requirements established to meet the IMO's 2050 targets. Slow steaming also serves as a strategic tool for managing carbon-related costs by helping reduce the financial obligations arising from regulations such as the EU ETS and emerging global carbon-pricing mechanisms. Considering the historical trend of increasingly stringent emission regulations, slow steaming is regarded as a key transitional strategy that provides ship operators with advantages in meeting short-term compliance requirements and progressing toward the IMO's net-zero emission target for 2050. Despite its advantages, slow steaming also has certain

disadvantages. The reduction in sailing speed leads to longer voyage durations, an increase in route-based operational costs, and a decrease in the number of voyages a vessel can complete annually (Degiuli et al., 2021). Given these considerations, the potential reduction in the number of voyages a vessel can complete in the long term may lead to a decline in the ship's overall revenue. This situation makes the continuous use of slow steaming less advantageous. Before adopting this practice, companies are required to carry out detailed feasibility analyses, which increases the need for qualified personnel and imposes an additional operational burden on ship operators. The decrease in voyage frequency and the extension of transit time also raise the demand for safety stock, which may negatively influence freight rates. Operating the vessel at reduced speeds can furthermore heighten the likelihood of hull fouling over time due to diminished water flow along the hull, thereby increasing the frequency and cost of hull maintenance. In addition, depending on the specific provisions of charter party agreements, slow steaming may not be feasible when contractual delivery schedules do not allow for reduced speeds. For these reasons, slow steaming cannot be regarded as an emission-reduction strategy that is universally applicable under all operational and commercial conditions.

4.3. Operational Feasibility of Slow Steaming

Considering the historical evolution of international emission regulations, slow steaming emerges as a practical and effective compliance tool for ship operators in both the IMO framework and the EU climate regime in the short and medium term. The technical and operational requirements that began with MARPOL ANNEX VI and have progressively tightened through the EEDI, EEXI, CII, the 2023 IMO GHG Reduction Strategy, and the NZF obligate ships to systematically reduce their energy consumption and carbon intensity per transport work. Studies in

the literature indicate that vessels operating at speeds approximately 15% below full speed achieve average reductions of 20–27% in fuel consumption and associated CO₂ emissions. This level of reduction makes slow steaming a strong compliance option, particularly in terms of improving CII ratings and meeting greenhouse gas reduction targets. Within the framework of EU climate policies, the progressively tightening EU MRV, EU ETS, and FuelEU Maritime regulations also enhance the attractiveness of slow steaming as a compliance option. Under the EU ETS, the direct conversion of fuel-consumption-based CO₂ emissions into financial costs turns the fuel savings achieved through slow steaming into a corresponding reduction in carbon expenses. Given that the widespread adoption of alternative fuels (such as LNG and e-fuels) across fleets will take time and entail high investment costs, slow steaming provides a practical and low-capital operational solution that enables rapid regulatory compliance and effective cost management during the transition period. Nevertheless, slow steaming is not a universal solution that can be applied without limitation across all routes and vessel types. Longer voyage durations, a reduction in the annual number of sailings, increased safety stock requirements, and the risk of delays in the supply chain define the boundaries of its applicability, particularly for time-sensitive cargoes and competitive liner shipping markets. In addition, time constraints, speed commitments, and service-quality expectations embedded in charter party agreements may restrict the adoption of slow steaming from both commercial and legal perspectives. Despite these limitations, in an environment where emission regulations are tightening and the financial pressure of the EU ETS and similar carbon-pricing mechanisms is increasing, slow steaming, when integrated with other measures such as route optimization, hull cleaning, the use of shore-based power, and the adoption of alternative fuels, represents a practical operational strategy with considerable potential to reduce both operating costs and

emissions, particularly in the medium term. In this respect, although slow steaming alone is not sufficient to achieve net-zero targets, it stands out as one of the most rational and accessible compliance tools during the transition period.

5. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

This study has highlighted the importance of operational strategies in the maritime transport sector, where international emission-reduction policies are becoming increasingly stringent, and has provided a comprehensive assessment of the feasibility of slow steaming in this context. International regulations, including the SO_x and NO_x limits under MARPOL Annex VI, the carbon-intensity reduction targets set within the IMO's GHG Reduction Strategy, and the EU's EU MRV, EU ETS, and FuelEU Maritime measures, are directing ship operators toward operational methods that are low-cost, rapidly implementable, and effective. In this regard, while operational practices such as efficient route optimization, shore-based power, and improved maintenance and hull cleaning are important, slow steaming has been examined in greater detail within the scope of this study, and its strategic relevance for the sector has been demonstrated. The findings clearly indicate, however, that slow steaming is not an unrestricted solution. The extension of voyage durations, the reduction in the annual number of sailings, and the potential impact on supply chain performance necessitate a holistic assessment of the practice within technical, economic, and contractual constraints. Therefore, slow steaming becomes a sustainable practice only when supported by detailed operational analyses and cost-effectiveness evaluations. In conclusion, although slow steaming alone is not sufficient for the sector to achieve net-zero emission targets, it stands as one of the most rational, low-cost, and practically applicable operational

strategies during the current period of rapidly tightening emission regulations. When integrated with other emission-reduction measures, it offers significant advantages in reducing carbon emissions and in managing operating costs. For this reason, slow steaming will remain central to medium-term compliance strategies aligned with the IMO's 2050 vision and will continue to gain strategic importance for ship operations.

REFERENCES

- Adland, R., Cariou, P., Jia, H., & Wolff, F. C. (2018). The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 178, 1-13.
- Andersson, P., & Ivehammar, P. (2016). Cost benefit analysis of dynamic route planning at sea. *Transportation Research Procedia*, 14, 193-202.
- 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.
- Ashry, T. A., Nasr, N. A., Fahim, N. S., & Marey, N. A. (2024). A field study onboard VLCCs for CO2 emission reduction considering EEDI and SEEMP. *Alexandria Engineering Journal*, 108, 662-675.
- Bayraktar, M., & Yuksel, O. (2023). A scenario-based assessment of the energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity indicator (CII) regulations. *Ocean Engineering*, 278, 114295.
- Bayramoğlu, K. (2024). The effects of alternative fuels, cruising duration and variable generators combination on exhaust emissions, energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity rating (CII). *Ocean Engineering*, 302, 117723.
- Ben-Hakoun, E., Shechter, M., & Hayuth, Y. (2016). Economic evaluation of the environmental impact of shipping from the perspective of CO2 emissions. *Journal of Shipping and Trade*, 1(1), 5.
- Chavando, A., Silva, V., Cardoso, J., & Eusebio, D. (2024). Advancements and challenges of ammonia as a

- sustainable fuel for the maritime industry. *Energies*, 17(13), 3183.
- Dai, L., Hu, H., Wang, Z., Shi, Y., & Ding, W. (2019). An environmental and techno-economic analysis of shore side electricity. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 223-235.
- Degiuli, N., Martić, I., Farkas, A., & Gospić, I. (2021). The impact of slow steaming on reducing CO2 emissions in the Mediterranean Sea. *Energy Reports*, 7, 8131-8141.
- Dominioni, G. (2025). Revenue Distribution in the IMO Net-Zero Framework. *Available at SSRN 5347655*.
- EU (2015), Regulation (EU) 2015/757 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of greenhouse gas emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance, Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02015R0757-20240101> Retrieved date: 12.11.2025
- European Commission (2025a), About the EU ETS , Retrieved from: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets/about-eu-ets_en Retrieved date: 5-11-2025
- European Commission (2025b). Decarbonising maritime transport – FuelEU Maritime. Retrieved from: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en Retrieved date: 11.11.2025
- European Commission (2025c), Guidance Document: The EU ETS and MRV Maritime – General guidance for shipping

- companies, Retrieved from: https://climate.ec.europa.eu/document/download/31875b4f-39b9-4cde-a4e2-fbb8f65ee703_en Retrieved date: 10-11-2025
- Finnsigård, C., Kalantari, J., Roso, V., & Woxenius, J. (2020). The Shipper's perspective on slow steaming—Study of Six Swedish companies. *Transport Policy*, 86, 44-49.
- Flodén, J., Zetterberg, L., Christodoulou, A., Parsmo, R., Fridell, E., Hansson, J., ... & Woxenius, J. (2024). Shipping in the EU emissions trading system: implications for mitigation, costs and modal split. *Climate Policy*, 24(7), 969-987.
- Gospić, I., Martić, I., Degiuli, N., & Farkas, A. (2022). Energetic and ecological effects of the slow steaming application and gasification of container ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 703.
- Gurning, R. S., Busse, W., & Lubnan, M. (2017). Decision making of full speed, slow steaming, extra slow steaming and super slow steaming using TOP-SIS. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 2(1). DOI: <http://dx.doi.org/10.12962%2Fj25481479.v2i1.2605>
- He, W., Chen, R., Li, T., Hu, B., Tian, Y., & Meng, W. (2020). Comparative study on environmental benefits of using low-sulphur oil and shore power technology for ship berthing. *E3S Web of Conferences*, 145, 02010.
- Hilmola, O. P. (2015). Shipping sulphur regulation, freight transportation prices and diesel markets in the Baltic Sea region. *International Journal of Energy Sector Management*, 9(1), 120-132.
- Ingwersen, A., Menacho, A. J. H., Pfister, S., Peel, J. N., Sacchi, R., & Moretti, C. (2025). Prospective life cycle

assessment of pathways for achieving the FuelEU Maritime Regulation targets. Science of the Total Environment, 958, 177880.

IMO (2022) Improving the energy efficiency of ships, Retrieved from:

<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx> retrieved date: 29-10-2025

IMO (2023) 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, Retrieved from:

<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx> Retrieved date: 5-11-2025

IMO (2025a), International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) Retrieved from:

[https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx) Retrieved date: 26-10-2025.

IMO (2025c), EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system, Retrieved from:

<https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx> Retrieved date: 30-10-2025.

IMO MEPC.364(79) (2022). Guidelines on the calculation of the attained EEDI for new ships. Retrieved from:

<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364%2879%29.pdf> retrieved date: 20.11.2025.

IMO MEPC.377(80) (2023), MEPC, R. (2023). 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships.fuel eu.

- MARPOL 73/78 (2022), International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, ISBN 978-92-801-1743-1, London, U.K.
- Johansson, L., Jalkanen, J. P., Kalli, J., & Kukkonen, J. (2013). The evolution of shipping emissions and the costs of regulation changes in the northern EU area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(22), 11375-11389.
- Karavoulas, G. (2025). Implications of Fuel EU on the shipping industry, University of Piraeus School of Industry and Shipping, Department of Maritime Studies, Programme MSC Sustainability and Quality in The Marine Industry (Master's thesis).
- Karountzos, O., Kagkelis, G., Iliopoulou, C., & Kepaptsoglou, K. (2024). GIS-based analysis of CO₂ emissions and slow steaming effectiveness in coastal shipping. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17(3), 661-680.
- Kotzampasakis, M. (2025). Maritime emissions trading in the EU: Systematic literature review and policy assessment. *Transport Policy*.
- Maloni, M., Paul, J. A., & Gligor, D. M. (2013). Slow steaming impacts on ocean carriers and shippers. *Maritime Economics & Logistics*, 15(2), 151-171.
- DNV (2025a), Maritime Forecast to 2050.
- DNV (2025b), Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), Retrieved from: <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/key-drivers/regulations/imo-regulations/seemp/> Retrieved date: 30-10-2025.
- Özdağ, M., Ozbey, S., & Tıkız, İ. (2024). Çıkarma Gemilerinin EEDI Performansının Analizi. *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*, 3(5), 28-41.

- Pelić, V., Bukovac, O., Radonja, R., & Degiuli, N. (2023). The impact of slow steaming on fuel consumption and CO₂ emissions of a container ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 675.
- Polakis, M., Zachariadis, P., & de Kat, J. O. (2019). The energy efficiency design index (EEDI). In *Sustainable shipping: A cross-disciplinary view* (pp. 93-135). Cham: Springer International Publishing.
- Priyo, V. N. Cost-Effective Fuel Pathways for Tankers under the IMO Net-Zero Framework.
- Robalo-Cabrera, I., Alcayde, A., Filgueira-Vizoso, A., Castro-Santos, L., García-Diez, A. I., & Manzano-Agugliaro, F. (2025). Shipping sector decarbonisation measures: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 82, 104549.
- Simopoulos, P. (2024), Carbon intensity indicator (CII) modelling, National Technical University of Athens School of Naval Architecture and Marine Engineering Division of Marine Mechanical Engineering (Master's thesis).
- Sun, L., Ding, P., Xiong, Y., Liu, W., & Hu, Z. (2022). Carbon emission reduction from shore power in China. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1077289.
- Trotignon, R. (2012). Combining cap-and-trade with offsets: lessons from the EU-ETS. *Climate policy*, 12(3), 273-287.
- Türk Loydu, (2015). Unified Interpretations* For The Implementation of MARPOL Annex VI And Nox Technical Code 2015, retrieved from; <https://turkloydu.org/pdf-files/turk-loydu-kurallari/ek->

kurallar/implementation-MARPOL-annex-VI-and-nox-technical-code.pdf retrieved date: 22.11.2025.

UN (2025), Do you know all 17 SDGs? Retrieved from: <https://sdgs.un.org/goals> Retrieved date: 20.11.2025.

UNFCCC (2025a) Action on Climate and SDGs, Retrieved from: <https://unfccc.int/topics/cooperative-activities-and-sdgs/action-on-climate-and-sdgs> Retrieved date: 20.11.2025.

UNFCCC (2025b), Paris Agreement. Retrieved from: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> Retrieved date: 20.11.2025.

UNCTAD (2025), 2025 Review of Maritime Transport, Retrieved from: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025overview_en.pdf Retrieved date: 26-10-2025.

Yin, J., Fan, L., Yang, Z., & Li, K. X. (2013). Slow steaming of liner trade: economic and environmental impacts. *Maritime Policy & Management*, 41(2), 149–158.

Yu, H., Fang, Z., Fu, X., Liu, J., & Chen, J. (2021). Literature review on emission-control-based ship voyage optimization. *Transportation Research Part D*, 93, 102768.

Zhang, C., Zhu, J., Guo, H., Xue, S., Wang, X., Wang, Z., ... & Su, P. (2024). Technical requirements for 2023 IMO GHG strategy. *Sustainability*, 16(7), 2766.

DENİZDE İLETİŞİM, KARAR VERME VE LİDERLİK: TEKNİK OLMAYAN YETKİNLİKLER VE ARAŞTIRMA GÜNDEMİ

Serkan KARAKAŞ¹

1. GİRİŞ

Uluslararası ticaretin önemli bir bölümü deniz taşımacılığı üzerinden gerçekleştirilmekte olup, ticari işlem gören eşyanın hacimce 80%'ından fazlası denizyolu ile nakledilmektedir (UNCTAD, 2024). Bu doğrultuda, ticari gemilere küresel ticaretin itici gücü demek abartı olmayacaktır. Uluslararası sularda görev yapan gemi personeli ise bu sistemin işlemlerini sağlayan anahtar öneme sahip unsurlardır (Doumbia-Henry, 2020).

Denizcilik mesleği yeterlilik gereksinimleri uluslararası standartlar ile belirlenmiş olup (Yi vd., 2025), doğası gereği teknik yeterlilikler — Technical Skills (TS) yönünden talepkârdır. Teknik yeterlilikler, belirli görevlerin icrasına yönelik somut bilgi ve becerileri kapsar ve görece kolay tanımlanır (Notteboom vd., 2019). Gemi operasyonları bağlamında güvenli seyir, makine ve sevk sistemlerinin etkin kullanımı, yük işlemleri ve denizde emniyet konularındaki yetkinlik setleri bu kapsamda değerlendirilebilir. Örneğin, harita okuma ve elektronik seyir bilgisi eksik bir güverte zabitanının etkin bir seyir planlaması yapması ve emniyetli vardiya tutması beklenemez. Benzer şekilde, köprü üstünde bulunan haberleşme

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Bilgi Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Lojistik Yönetimi Bölümü, ORCID: 0000-0001-9323-5025.

cihazlarını etkin olarak kullanamayan bir personel, emniyetli seyri ve acil durum iletişimini olumsuz yönde etkileyebilir.

Ticari bir gemi, insan, makine, prosedür ve teknolojinin bir arada var olduğu karmaşık bir çalışma ortamı sunmaktadır (Karakas, 2025). Bu kompleks ve sınırlı sosyo-teknik sistemin etkin ve emniyetli işleyişi teknik becerilerden fazlasını gerektirmektedir. Gemi zabiti yeterliliğindeki bir güverte amirinin, yük işlemleri ile hesap ve uygulamaları emniyetli ve aynı zamanda ticari açıdan kabul edilebilir bir seviyede yapması — doğal olarak — beklenmektedir. Ancak, yük operasyonu süresince meydana gelen bir aksaklık hızlı çözüm sunmayı gerektirebilir, ki bu durum teknik yetkinliklerin yanı sıra durumsal farkındalık, iletişim ve karar verme becerilerini de gerektirmektedir.

Bu bağlamda, teknik olmayan yetkinlikler — Non-Technical Skills (NTS) durumsal farkındalık, karar verme ve planlama gibi bilişsel yetkinlikler ile liderlik ve iletişim gibi kişilerarası yetkinlikleri tanımlamaktadır (Fletcher vd., 2002). Denizcilikte teknik olmayan yetkinlikler, operasyonel emniyet ve etkinliğin sağlanmasında önemli bir rol oynamakla birlikte (Barnett vd., 2006) konu akademik bağlamda sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır (örn. Fjeld vd., 2018; Kuzu & Taç, 2025; Saeed vd., 2017; Tavacıoğlu vd., 2020; Wahl & Kongsvik, 2018). Bu çalışmada, sosyal bilimler bağlamında mevcut araştırma eksikliğini gidermek deniz işletmeciliği literatürüne katkı sağlamak amacıyla, *denizcilikte teknik olmayan yetkinlikler* konusu ele alınmaktadır.

Çalışma, araştırma amacına uygun nitel bir araştırma tasarımına sahip olup, araştırmanın devam eden aşamaları şu şekilde planlanmıştır: İkinci bölümde Ekip Kaynak Yönetimi'nin havacılık sektöründe ortaya çıkışı tartışılmakta ve denizcilikteki uygulamalarına değinilmektedir. Üçüncü bölümde denizcilik

sektöründe otomasyonun teknik olmayan yetkinlikler üzerindeki dönüştürücü etkisi üzerinden bir araştırma gündemi önerilmektedir. Dördüncü bölüm sonuç ve önerilere ayrılmıştır.

2. EKİP KAYNAK YÖNETİMİ VE TEKNİK OLMAYAN YETKİNLİKLER

1972 yılında Eastern Air Lines'in 401 sefer sayılı uçuşunda, uçuş ekibinin tüm dikkatinin iniş takımlarının durumunu gösteren ikaz ışığına aşırı odaklanması, asıl sorun olan irtifa kaybının fark edilememesine yol açmıştır (Mengenci, 2014). Kazada, yolcular ve uçuş ekibi dahil 112 kişi hayatını kaybetmiştir (Federal Aviation Administration, 2022). Bu kaza ile bağlantılı olarak, Ekip Kaynak Yönetimi (CRM), takip eden yıllarda havacılık sektöründe insan kaynaklı kazaların azaltılmasına yönelik olarak ortaya atılmış bir eğitim konsepti olup, uçuş mürettebatının karar verme ve durumsal farkındalık gibi yetkinliklerinin artırılması amaçlanmıştır (Wahl & Kongsvik, 2018). Bu doğrultuda, CRM kapsamındaki ilk eğitim 1981 yılında United Airlines tarafından uygulanmış; daha sonra farklı endüstrilerde de benimsenmiştir (O'Connor, 2011).

Takip eden yıllarda CRM konsepti yumuşak yetkinlikler soft skills olarak adlandırılmıştır. Ancak bunlardan bahsetmeden önce, teknik ve teknik olmayan yetkinliklerin farklarının kısaca incelenmesi faydalı olacaktır. Teknik yetkinlikler, genel bir tabirle, ekipmanların etkin kullanımı ve operasyonel süreçlerin yönetilmesine yönelik bilgi ve uygulama yetkinliğini kapsamaktadır (ARPANSA, 2025). Teknik olmayan yetkinlikler ise, teknik yetkinlik gerektiren görev ve süreçlerdeki yumuşak yetkinlikleri tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır (Ceken, 2024). NTS terimi, ilk kez avrupa sivil havacılık otoritesi tarafından havayolu pilotlarının davranışlarını değerlendirme kapsamında kullanılmıştır (Flin & Maran, 2015).

Ticari bir havayolu pilotu kokpit düzeni içerisinde hız, irtifa, istikamet ve yakıt durumu dâhil olmak üzere birçok uçuş parametresini eşzamanlı izlemektedir. Ek olarak, hava sahası trafiği ve diğer uçakların göreceli konumları takip edilmekte olup kokpit içindeki iletişim kesintisiz devam etmektedir. Ticari bir geminin köprüüstünde de durum çok farklı değildir. Radar ve görsel gözlemlerle deniz üzerindeki gemi trafiği anlık izlenmekte ve geminin deniz üzerindeki konumu düzenli olarak kontrol edilmektedir. Ayrıca görevli zabıt, köprüüstü iletişim ekipmanlarından gelen sesli bildirimler ile köprüüstündeki diğer görsel ve işitsel uyarıları yönetirken geminin çevresindeki gelişmelere de dikkat etmek durumundadır.

Bu noktada, disiplinler arası benzerliklerden hareketle, CRM eğitiminin denizcilik sektörüne uyarlanması, insan kaynaklı kazalar nedeniyle 1990'lı yıllarda gerçekleşmiştir; ancak ekip kaynak yönetiminin havacılık sektöründen denizcilik sektörüne uyarlanırken sektöre özgü şartların göz ardı edildiği eleştirisi yapılmaktadır (Wahl & Kongsvik, 2018). Bu doğrultuda, bir sonraki bölümde ekip kaynak yönetimi denizcilik bağlamında ele alınmaktadır. Devam etmeden önce bir hususun altını çizmek gerekir: Riem vd. (2012), sağlık alanındaki çalışmalarında, kriz yönetimi kapsamında teknik yetkinliklerin teknik olmayan yetkinliklerle ilişkili olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Dolayısıyla, teknik ve teknik olmayan yetkinlikler birbirinin yerine geçmez; ancak birbirini tamamlayıcı niteliktedir (Fjeld vd., 2018).

2.1. Denizcilik Sektöründe Ekip Kaynak Yönetimi

1995 yılında IMO tarafından “köprüüstündeki tüm kaynakların etkin kullanımı ve tahsisi” olarak tanımlanan Köprüüstü Kaynak Yönetimi (Bridge Resource Management — BRM) (Praetorius vd., 2020), havacılık endüstrisi çıkışlı CRM'nin denizcilik endüstrisi karşılığı olarak ifade edilebilir

(Hetherington vd., 2006; O'Connor, 2011). BRM, takip eden süreçte, deniz kazalarının sadece köprüüstü süreçlerinden kaynaklanmadığı görüşünden hareketle Denizcilik Kaynak Yönetimi (Maritime Resource Management — MRM) adı altında köprüüstü ve makine ekibinin haricinde kılavuz kaptanlar ve kıyı çalışanları gibi farklı paydaş gruplarını da içerek şekilde genişletildi (Griffioen vd., 2021).

NTS kapsamında değerlendirilen çevresel farkındalık, liderlik ve takım çalışması gibi eğitimler Gemi Adamlarının Eğitim, Belgelendirme ve Vardiya Tutma Standartları (STCW) kodu hakkındaki 2010 Manila Değişiklikleri 1 Ocak 2012 itibari ile yürürlüğe girmiştir (IMO, 2017). Bununla birlikte, IMO tarafından CRM kapsamındaki eğitimlerin gemi zabıtları için zorunlu hale getirilmesi ve denizcilik eğitimi veren kurumların müfredatına dahil edilmesi şartı getirilmesine rağmen, bu eğitimlerin nasıl en etkin şekilde verileceğine dair ayrıntılı rehberlik eksikliği dile getirilmektedir (Griffioen vd., 2021). Tablo 1’de denizcilik literatüründe genel olarak yer alan teknik olmayan yetkinlikler ana hatlarıyla listelenmektedir. Tabloyu takiben, seçilen yetkinlikler ayrıntılı biçimde ele alınmaktadır.

Tablo 1. Denizcilikte teknik olmayan yetkinlikler (NTS), türleri ve örnek kaynaklar

NTS Yetkinliği	Tür	Kaynak
Durumsal farkındalık	Bilişsel	Fjeld vd. (2018); Kuzu (2025); Wahl & Kongsvik (2018)
Karar verme	Bilişsel	Fjeld vd. (2018); Kuzu (2025); Wahl & Kongsvik (2018)
İş yükü yönetimi	Bilişsel	Fjeld vd. (2018); Saeed vd. (2017)
Liderlik	Kişilerarası	Fjeld vd. (2018); Kuzu (2025); Tavacıoğlu vd. (2020); Wahl & Kongsvik (2018)
İletişim	Kişilerarası	Fjeld vd. (2018); Kuzu (2025); Tavacıoğlu vd. (2020); Wahl & Kongsvik (2018)
Takım çalışması	Kişilerarası	Kuzu (2025); Saeed vd. (2017)

Durumsal farkındalık: Durumsal farkındalık, kişinin stres düzeyi, yorgunluk, sağlık durumu gibi diğer faktörlerle

etkileşim içinde olan bir kavram olup, denizcilik bağlamında çevreyi ve geminin etrafında gelişen olayları anlamak ve bunların gemiyi nasıl etkileyeceğinin bilincinde olmak şeklinde açıklanabilir (Melnik vd., 2022). Organizasyonel, insan ve teknolojik faktörlerin iç içe geçtiği bir dinamik sosyo-teknik bir sistem olarak gemide bu faktörlerden kaynaklı bir kaza olması ihtimal dışı değildir (Sanfilippo, 2017). Bu nedenle durumsal farkındalık hem havacılık hem de denizcilik endüstrisinde, ekip yönetimi ve köprüüstü kaynak yönetimi uygulamalarının önemli bir bileşeni olarak ele alınmaktadır.

İletişim yetkinliği: İletişim, deniz kazalarının önlenmesinde önemli bir faktördür. Hanjin Dampier gemisinin, 2002 yılında jeneratör arızası nedeniyle meydana gelen güç kaybı sonucu karaya oturması, gemide ciddi olmayan bir hasar oluşmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, jeneratör arızasından haberdar olan baş mühendisin durumu gemi kaptanına etkin bir şekilde iletememiş olması, kazanın nedenlerinden biri olarak ifade edilmekte ve etkin iletişimin denizcilik emniyetinin sağlanması konusundaki önemini göstermektedir (Barnett vd., 2006). İzleyen yıllarda denizcilikte BRM uygulamaları köprüüstündeki iletişimi iyileştirmiş; ancak iletişim sorunları henüz ortadan kalkmamıştır (Gommosani vd., 2021).

İş yükü yönetimi, görev önceliklendirmesi ve karar verme: Deniz kazaları çoğunlukla, karar verme sürecinin hayati öneme sahip bileşenlerinden en az birinin eksikliği nedeniyle bozulmasıyla ilişkilidir (Özdemir & GÜNEROĞLU, 2015). Bu bileşenler, gözlemsel ve işitsel girdiler gibi algıya ilişkin unsurlardan kaynaklanabileceği gibi; iş yükü, yorgunluk, ekip koordinasyonundaki eksiklik gibi koşullarla da ilişkili olabilir. Çeşitli etmenlerden kaynaklanan yorgunluk, gemi zabıtlarının çalışma koşulları bağlamında sıklıkla tartışılmaktadır (Deng vd., 2025; Divine Caesar vd., 2021). Ticari bir gemide görevli bir

güverte zabitanın tanımlı görevleri arasında seyir planlarının hazırlanması ve seyir vardiyası tutma, emniyet teçhizatının kontrolü ve emniyet süreçlerine ilişkin dokümantasyonun yürütülmesi, uydu ve telsiz iletişimine yönelik prosedürlerin uygulanması, liman prosedürlerinin takibi ve limanda yük vardiyasının tutulması gibi farklı görevler yer alır.

Bu doğrultuda, artan zihinsel iş yükü ile hata yapma olasılığı da artmakta; mevcut görevler ise öngörülenden daha uzun sürede tamamlanmaktadır (Hung & Chang, 2025; Yan vd., 2022). İş yükü yönetimi (Wahl & Kongsvik, 2018), görev önceliklendirmesi (Saeed vd., 2017) ve baskı altında sakin kalabilme (O'Connor & Long, 2011) zihinsel iş yükünün yüksek olduğu ve kişinin çoklu uyaranlara tepki vermesi gereken durumlarda kritik liderlik yetkinlikleri olarak öne çıkmaktadır. Son olarak, Hanjin Dampier kazası ile ilgili tartışmalarda da ele alındığı üzere, etkili iletişim ve bilgi aktarımı da kazaların önlenmesinde hayati öneme sahiptir (Barnett vd., 2006).

3. TARTIŞMA: SORUNLAR, EKSİKLİKLER VE FIRSATLAR

Denizcilikte güncel konulardan birisi otonomi olup hem akademi hem de sektörün yoğun ilgisine maruz kalmaktadır. Otonom gemilerin güvenlik (Madsen vd., 2022), enerji etkinliği (Alamouch & Ölçer, 2025) ve operasyon maliyetlerinde azalma (Li & Fung, 2019) sağlaması öngörülmektedir. Bununla birlikte, otonom ve yarı-otonom gemiler, IMO'nun tanımladığı haliyle dört kategoriye ayrılmaktadırlar (IMO, 2024):

- a. Birinci derece: Gemi personeli gemide ve günlük operasyonları yönetmektedir. Gemi fonksiyonlarından bazıları herhangi bir problemde insan kullanıcının kontrolüne verilmek üzere otonomiye devredilir.

- b. İkinci derece: Gemi, uzaktaki bir kontrol merkezinden yönetilmektedir. Gemi personeli herhangi bir problemde kontrolü almak üzere gemide bulunmaktadır.
- c. Üçüncü derece: Gemi uzaktaki bir komuta merkezinden yönetilmekte olup, gemide personel bulunmamaktadır.
- d. Dördüncü derece: Gemi tam otomasyona tabi olup, geminin işleyişi ile ilgili kararlar geminin işletme sistemi tarafından alınmakta ve uygulanmaktadır.

IMO tarafından belirlenen bu sınıflandırmadan hareketle, ikinci ve üçüncü derecedeki otonom gemilerin uzaktan kontrol merkezinden (remote control centre, RCC) veya uzaktan operasyon merkezinden (remote operation centre, ROC) yönetilmesi planlanmaktadır. Ek olarak, dördüncü derece otonom gemiler her ne kadar yapay zekâ (YZ) destekli sistemler tarafından insan kullanıcı desteği olmadan işletilse de RCC’de gerektiğinde kontrolü devralmak üzere bir operatörün bulunması oldukça muhtemeldir. RCC, anlaşılacağı gibi, ticari bir geminin operasyonlarını uzaktan izleme ve yönetme ve gerektiğinde devralma imkanını sağlayacak yazılım ve donanıma sahip kara konuşlu bir kontrol merkezidir (Kongsberg, 2025).

RCC/ROC’da görev alacak operatörlerin, günümüz koşullarına göre eğitim almakta olan denizcilerden farklı bir iş ortamına ve yeterliliklere sahip olacağı öngörülmektedir (Belabyad vd., 2025). Bu doğrultuda, standartlar ve mevzuat her ne kadar günümüz denizcilerinin sahip olması gereken teknik olmayan yetkinlikleri içerecek şekilde genişletilmiş olsa da (Fjeld vd., 2018), bu yetkinliklerin mevcut denizcilik eğitimi aracılığıyla denizcilere ne ölçüde kazandırıldığı tartışmaya açıktır. Ek olarak, geleceğin denizci-operatörlerinin sahip olması gereken yetkinlik setlerinin ne olması gerektiği konusu oldukça güncel bir araştırma sorusu olarak durmaktadır. Bu noktadan hareketle, aşağıdaki araştırma gündemi önerilmektedir:

- Köprüüstü zabitleri, makine zabitleri ve kaptanlar emniyetli ve etkili denizcilik operasyonlarının gerektirdiği tüm bilişsel ve kişilerarası teknik olmayan yetkinliklere (NTS) yeterli düzeyde sahip midir? Bu yetkinliklerin taksonomisi ve davranış göstergeleri alan yazında yeterince tanımlanmış mıdır?
- Günümüzde bir denizcinin sahip olması beklenen NTS profili, otonom gemiler (MASS) dönemi ile birlikte değişecek roller ile ne ölçüde uyumludur?

Önerilen araştırma gündemi, mevcut denizcilik eğitiminin köprüüstü kaynak yönetimi kapsamında sağlamış olduğu teknik olmayan yetkinliklerin kapsayıcılığını sorgularken, bu yetkinlikler bağlamında otonom gemiler dönemine ilişkin gelecekteki araştırma önceliğini de vurgulamaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ticari bir geminin köprüüstü, insan, teknoloji, şirket prosedürleri ile denizde emniyet ve iletişim sağlanmasına yönelik uluslararası denizcilik kurallarının bir arada bulunduğu özel bir sosyo-teknik sistemdir (Karakas, 2025). Bu sistem içerisindeki kaynakların etkin kullanımı için ortaya atılan köprüüstü kaynak yönetimi (BRM), esasen havacılık sektöründe doğmuş ekip kaynak yönetimi (CRM)'nin denizcilik endüstrisine uyarlanmış karşılığıdır (Hetherington vd., 2006; O'Connor, 2011). Bu kaynakların etkin yönetimi ise köprüüstü ekipmanlarının kullanımı ve denizde emniyetli seyir gibi teknik yetkinlikler ile birlikte, ekip yönetimi, iletişim, durumsal farkındalık gibi bilişsel ve kişilerarası yetkinliklere sahip olunmasını gerektirmektedir.

Tablo 1'de gösterildiği üzere denizcilik bağlamında teknik olmayan yetkinliklere ait yerleşik taksonomiler mevcuttur (Fjeld vd., 2018; Kuzu, 2025; Saeed vd., 2017; Tavacıoğlu vd.,

2020; Wahl & Kongsvik, 2018). Bununla birlikte mevcut denizcilik eğitiminin bu kritik yetkinlikleri nasıl tasarlayıp aktardığı ve köprüüstü/makine zabitlerinin bu yetkinliklere ne ölçüde sahip olduğu soruları güncel bir araştırma gündemi oluşturmaktadır. Diğer bir konu ise, teknik olmayan yetkinliklerin denizcilikte devam eden dijital dönüşüm ve artması öngörülen otonomi ile birlikte yeniden gözden geçirilmesi gerekliliğidir. Sosyo-teknik sistemler teorisi (Trist & Bamforth, 1951) böyle bir çalışma için sağlam bir teorik zemin sağlayabilir.

Bu araştırmanın birtakım sınırlılıkları bulunmaktadır. Denizcilik yazınında köprüüstü kaynak yönetimi (BRM), köprüüstü ekip yönetimi (BTM), denizcilik kaynak yönetimi (MRM) ve ekip kaynak yönetimi (CRM) terimlerinin zaman zaman örtüşen ve tutarsız şekilde kullanımı teknik olmayan yetkinliklere (NTS) ait sınıflandırma sürecinde zorluk yaratabilmektedir. Araştırmanın bir diğer sınırı ise odağının ticari gemi operasyonları üzerine olmasıdır, askeri gemi operasyonları ve ticari yat işletmeciliği kapsam dışı bırakılmıştır.

KAYNAKÇA

- Alamouh, A. S., & Ölçer, A. I. (2025). Maritime autonomous surface ships: architecture for autonomous navigation systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 122.
- ARPANSA. (2025). *Non-technical Skills*. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. [https://www.arpansa.gov.au/regulation-and-licensing/safety-security-transport/holistic-safety/non-technical-skills#:~:text=Non%2DTechnical%20Skills%20\('NTS,%3B%20and%20situation%2Dawareness%20skills.](https://www.arpansa.gov.au/regulation-and-licensing/safety-security-transport/holistic-safety/non-technical-skills#:~:text=Non%2DTechnical%20Skills%20('NTS,%3B%20and%20situation%2Dawareness%20skills.)
- Barnett, M., Gatfield, D., & Pekcan, C. (2006). Non-technical skills: the vital ingredient in world maritime technology. *Proceedings of the International Conference on world maritime technology*.
- Belabyad, M., Kontovas, C., Pyne, R., & Chang, C.-H. (2025). Skills and competencies for operating maritime autonomous surface ships (MASS): a systematic review and bibliometric analysis. *Maritime Policy & Management*, 1-26.
- Ceken, S. (2024). Non-technical skills proficiency in aviation pilots: A systematic review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 11(3), 7.
- Deng, J., Huang, X., Guan, H., Wang, R., Liu, S., & Xie, C. (2025). Research on Navigation Risks in Waterway Tunnels Based on Measurement of the Cognitive Load of Ship Officers. *Applied Sciences*, 15(18), 10014.
- Divine Caesar, L., Cahoon, S., Fei, J., & Sallah, C. A. (2021). Exploring the antecedents of high mobility among ship

- officers: empirical evidence from Australia. *Maritime Policy & Management*, 48(1), 109-128.
- Doumbia-Henry, C. (2020). Shipping and COVID-19: protecting seafarers as frontline workers. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 19(3), 279-293.
- Federal Aviation Administration. (2022, Aralık 20). *Lockheed Model L-1011: Eastern Airlines Flight 401, N310EA*. https://www.faa.gov/lessons_learned/transport_airplane/accidents/N310EA
- Fjeld, G. P., Tvedt, S. D., & Olstedal, H. (2018). Bridge officers' non-technical skills: a literature review. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(4), 475-495.
- Fletcher, G. C. L., McGeorge, P., Flin, R. H., Glavin, R. J., & Maran, N. J. (2002). The role of non-technical skills in anaesthesia: a review of current literature. *British journal of anaesthesia*, 88(3), 418-429.
- Flin, R., & Maran, N. (2015). Basic concepts for crew resource management and non-technical skills. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 29(1), 27-39.
- Gommosani, M., Turan, O., & Kurt, R. (2021). Analysis of maritime accidents due to poor situational awareness. *1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles*.
- Griffioen, J., van der Drift, M., & van den Broek, H. (2021). Enhancing maritime crew resource management training by applying resilience engineering: A case study of the bachelor maritime officer training programme in Rotterdam. *Education Sciences*, 11(8), 378.
- Hetherington, C., Flin, R., & Mearns, K. (2006). Safety in shipping: The human element. *Journal of safety research*, 37(4), 401-411.

- Hung, T.-E., & Chang, C.-C. (2025). Evaluating the mental workload of watch officers during maritime navigation training courses. *Applied Ergonomics*, 128, 104560.
- IMO. (2017). *STCW International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers: Including 2010 Manila Amendments : STCW Convention Ans STCW Code: International Maritime Organization*.
- IMO. (2024). *Autonomous shipping*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>
- Karakas, S. (2025). Exploring the key enablers of robotic process automation in the maritime industry: S. Karakas. *Maritime Economics & Logistics*, 1-38.
- Kongsberg. (2025). *Key technologies: The Remote Operating Centre*. <https://www.kongsberg.com/maritime/ship-types/autonomous-ships/>
- Kuzu, A. C. (2025). A Study On The Assessment Criteria Of Seafarers'non-Technical Skills. *International Maritime Studies and Research Journal*, 1(1), 13-20.
- Kuzu, A. C., & Taç, U. (2025). AHP-Based Evaluation of Core Non-Technical Skills for Seafarers in Maritime Operations. *Turkish Journal of Maritime and Marine Sciences*, 11(3), 216-228.
- Li, S., & Fung, K. S. (2019). Maritime autonomous surface ships (MASS): implementation and legal issues. *Maritime Business Review*, 4(4), 330-339.
- Madsen, A. N., Aarset, M. V., & Alsos, O. A. (2022). Safe and efficient maneuvering of a Maritime Autonomous Surface Ship (MASS) during encounters at sea: A novel approach. *Maritime Transport Research*, 3, 100077.

- Melnyk, O., Bychkovsky, Y., & Voloshyn, A. (2022). Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska*.
- Mengenci, C. (2014). Ekip kaynak yönetimi ve sivil havayolu kazaları: Türkiye örneği. *Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1(2), 44-61.
- Notteboom, T., Parola, F., Satta, G., & Torre, T. (2019). The Role of Skills and Competences in the Maritime Logistics Industry. *Impresa Progetto-Electronic Journal of Management*, 3.
- O'Connor, P. (2011). Assessing the effectiveness of bridge resource management training. *The International Journal of Aviation Psychology*, 21(4), 357-374.
- O'Connor, P., & Long, W. M. (2011). The development of a prototype behavioral marker system for US Navy officers of the deck. *Safety science*, 49(10), 1381-1387.
- Özdemir, Ü., & GÜNEROĞLU, A. (2015). Strategic approach model for investigating the cause of maritime accidents. *PROMET-Traffic&Transportation*, 27(2), 113-123.
- Praetorius, G., Hult, C., & Österman, C. (2020). Maritime resource management: current training approaches and potential improvements. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14(3), 573-584.
- Riem, N., Boet, S., Bould, M. D., Tavares, W., & Naik, V. N. (2012). Do technical skills correlate with non-technical skills in crisis resource management: a simulation study. *British journal of anaesthesia*, 109(5), 723-728.
- Saeed, F., Wall, A., Roberts, C., Riahi, R., & Bury, A. (2017). A proposed quantitative methodology for the evaluation of

- the effectiveness of Human Element, Leadership and Management (HELM) training in the UK. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 16(1), 115-138.
- Sanfilippo, F. (2017). A multi-sensor fusion framework for improving situational awareness in demanding maritime training. *Reliability Engineering & System Safety*, 161, 12-24.
- Tavacıoğlu, L., Eski, Ö., Demir, B., Gökmen, N., & Algan, M. (2020). The non-technical skills of bridge officers on ship navigation: An assessment in terms of interpersonal skills. *Indian journal of science and technology*, 13(46), 4587-4594.
- Trist, E. L., & Bamforth, K. W. (1951). Some social and psychological consequences of the longwall method of coal-getting: An examination of the psychological situation and defences of a work group in relation to the social structure and technological content of the work system. *Human relations*, 4(1), 3-38.
- UNCTAD. (2024). *Review of Maritime Transport 2024: Navigating maritime chokepoints*. <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024>
- Wahl, A. M., & Kongsvik, T. (2018). Crew resource management training in the maritime industry: a literature review. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(3), 377-396.
- Yan, S., Wei, Y., Li, F., & Tran, C. C. (2022). Constructing a Model to Discriminate the Workload Level of Ship Interface Operators. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1098.
- Yi, S.-Y., Jung, M., & Lee, S.-I. (2025). Adapting to change: International maritime education and training for future

seafarers—focusing on the comprehensive review of the STCW convention and code of the 10th session of the IMO HTW. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 2464486.

LNG YAKITLI GEMİLERİN DENİZ TAŞIMACILIĞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ¹

Orçun TOPRAKÇI²

1. GİRİŞ

Denizyolu taşımacılığı çevre açısından diğer ulaştırma türlerine göre daha avantajlı görülse de, artan gemi trafiği nedeniyle oluşan emisyonlar hava kalitesinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır (Peng vd., 2021). Motor kaynaklı NO_x, SO_x, PM ve sera gazları hem bölgesel hem küresel ölçekte hava kirliliğini artırarak asit yağmurları, küresel ısınma ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır (Pekşen ve Alkan, 2015). Bu çerçevede IMO, MARPOL 73/78 Ek-VI kapsamında egzoz emisyonlarını sınırlandıran düzenlemeler getirmiş; IMO ve AB ise 2030 yılına kadar karbon salımının %40 azaltılmasını hedefleyen politikalar uygulamaya başlamıştır (Dereli, 2018; He vd., 2024).

Bu sıkılaştıran kurallar, gemi sahiplerini ve işletmecileri alternatif yakıt ve teknolojilere yöneltmiştir. Yakıt kalitesinin artırılması (MGO, MDO, LSD, ULSD) veya scrubber sistemlerinin kullanılması mevcut başlıca seçeneklerdir (Parfomak vd., 2019). Ancak yüksek maliyetler, tedarik belirsizlikleri ve NO_x azaltımındaki yetersizlikler bu çözümlerin sınırlılıklarını ortaya koymaktadır (Stewart ve Wolosz, 2015). Bu nedenle, SO_x, NO_x, PM ve CO₂ emisyonlarını aynı anda

¹ Bu çalışma, yazarın hazırladığı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Kocaeli Üniversitesi Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0004-0491-5133.

düşürebilen LNG, önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Tekeli vd., 2024).

Bununla birlikte LNG; altyapı eksiklikleri (Peng vd., 2021), küresel iklim ağının yetersizliği (He vd., 2024), yüksek depolama hacmi gereksinimi (Salarkia ve Golabi, 2023) ve metan sızıntısı gibi (Comer vd., 2024) önemli dezavantajlar barındırmaktadır. Ayrıca fiyat dalgalanmaları ve güvenlik endişeleri, sektör için ek belirsizlikler yaratmaktadır (Schinas ve Butler, 2016).

Biyoyakıtlar, hidrojen, metanol ve nükleer enerji gibi diğer düşük karbonlu alternatifler potansiyel taşısa da, teknik ve ekonomik kısıtlar nedeniyle kısa vadede yaygınlaşması beklenmemektedir (Ramsay vd., 2023; Wang ve Notteboom, 2014).

LNG yakıtı nihai çözüm olarak görülme de, emisyonların azaltılmasında geçiş niteliği taşıyan bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Baresic ve Rehmatulla, 2024). Ancak metan kayıpları nedeniyle LNG filolarının IMO'nun uzun vadeli sera gazı hedeflerini karşılamada belirleyici bir engel oluşturabileceği de belirtilmektedir (Pavlenko vd., 2020).

Bu bağlamda, LNG yakıtlı gemilerin çevresel, ekonomik, teknolojik, ticari, yasal ve sosyal açılardan deniz taşımacılığı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi önem taşımaktadır. Mevcut literatürde LNG'nin avantaj ve dezavantajlarına dair çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, sıkılaşan IMO düzenlemeleri karşısında LNG'nin çok boyutlu etkilerini ve bu faktörler arası ilişkileri bir arada inceleyen bütüncül bir değerlendirmenin eksik olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, literatürde belirlenen etki faktörlerinin LNG yakıtlı gemilere ilişkin uzman görüşleriyle Bulanık Delphi yöntemi kullanılarak değerlendirilmesi ve söz konusu faktörler arasındaki etkileşimlerin Bulanık DEMATEL

yöntemiyle analiz edilmesidir. Elde edilecek bulguların, LNG filolarının geleceği ve alternatif yakıt yatırımları konusunda denizcilik işletmeleri ve gemi sahipleri için yol gösterici bir kaynak oluşturması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Wang ve Notteboom (2014) LNG'nin gemi yakıtı olarak kullanımına ilişkin 33 çalışmayı sistematik olarak incelemiş ve LNG'nin küresel ölçekte benimsenmesinin yakıt fiyat farkı, emisyon düzenlemeleri ve ikmal altyapısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Herdzik (2013) LNG'nin yakıt olarak kullanımının özellikle altyapı geliştikçe hızla yaygınlaşacağını, mevcut durumda en büyük sınırlılığın ikmal altyapısının yetersizliği olduğunu vurgulamıştır.

Salarkia ve Golabi (2023) SWOT analizi ile LNG'nin çevresel ve ekonomik açıdan güçlü yönlerini incelemiş ve IMO 2020 koşullarına en uygun yakıtın LNG olduğunu ortaya koymuştur. Balcombe vd. (2021) LNG'yi HFO, MDO ve alternatif yakıtlarla yaşam döngüsü ve maliyet açısından karşılaştırmış; LNG'nin hava kalitesini iyileştirdiğini ancak bazı motorlarda metan kaybı nedeniyle iklim faydasının sınırlı kaldığını belirtmiştir. Moreira (2016) SCR'li HFO, SCR'li MGO ve LNG modellerini karşılaştırmış ve LNG'nin hem ekonomik hem çevresel açıdan en avantajlı seçenek olduğunu göstermiştir.

Dereli (2018) denizcilik kaynaklı egzoz emisyonlarını, sınır değerleri ve azaltım yöntemlerini detaylı incelemiş ve dizel makinelerin LNG'ye dönüştürülmesine ilişkin teknik bilgiler sunmuştur. Lindstad vd. (2020) LNG'nin ancak modern dizel çift yakıtlı motorlarla kullanıldığında geçiş yakıtı olarak iklim açısından anlamlı fayda sağlayabileceğini belirtmiştir.

Baumgart ve Olsen (2010) Norveç kıyı taşımacılığında NBD analizleri yaparak LNG'nin çevresel açıdan avantajlı ve belirli yakıt fiyatlarında ekonomik olarak rekabetçi olduğunu göstermiştir. Pekşen ve Alkan (2015) farklı makine güçlerinde alternatif yakıtların maliyet ve emisyon performansını karşılaştırmış ve LNG'yi en verimli seçenek olarak belirlemiştir. Bayraktar (2016) bir yolcu gemisinin çift yakıt sistemine dönüşümünün yaklaşık 10 yılda kendini amorti edeceğini ve ECA gerekliliklerini karşılayacağını ortaya koymuştur. Wang vd. (2021) Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi ile LNG yakıtlı konteyner gemilerini değerlendirmiş ve LNG'nin uygun maliyetli olsa da mevcut belirsizlikler nedeniyle yatırım açısından çekim gücünün sınırlı olduğunu belirtmiştir.

He vd. (2024) LNG yakıtlı düzensiz hat gemileri için rota, hız ve ikmal optimizasyonu modeli geliştirmiş ve uygun liman seçiminin maliyetleri önemli ölçüde azaltabileceğini göstermiştir.

Jasper Faber (2017) LNG'nin benimsenmesinde çevresel düzenlemeler ve fiyat farkının temel itici güçler olduğunu; altyapı, teknik standartlar ve ikinci el değer belirsizliğinin ise başlıca engeller olduğunu belirlemiş ve AB için 2030'a yönelik pazar senaryoları geliştirmiştir. Schinas ve Butler (2016) LNG'nin yaygınlaşması için gereken ticari teşvikleri analiz etmiş ve benimsenmeyi sınırlayan düzenleyici, operasyonel ve ekonomik engelleri ortaya koymuştur.

Burel vd. (2013) dünya gemi trafiği verilerini analiz ederek LNG kullanımına en uygun gemi tiplerinin RoRo ve tankerler olduğunu; 33.000 DWT tanker için LNG'nin maliyet ve emisyonlarda ciddi düşüş sağladığını göstermiştir. Chen vd. (2018) stokastik yatırım modeliyle LNG'li gemilere yatırım kararını analiz etmiş ve LNG'nin ekonomik avantajının fiyat farkları, operasyon oranı ve ikmal maliyetleri gibi değişkenlere bağlı olduğunu belirtmiştir.

Yapılan literatür taraması, LNG yakıtlı gemilerin avantaj–dezavantajları ile benimsenme süreçlerine ilişkin çok sayıda çalışma bulunduğunu, ancak sıkılaştıran ve kapsamı genişleyen IMO emisyon düzenlemeleri karşısında LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığı üzerindeki etkilerini bütüncül bir çerçevede ve faktörler arası ilişkilerle birlikte ele alan bir araştırmanın eksik olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, 2010’lu yıllardan günümüze gelişen LNG filolarının söz konusu düzenlemeler karşısındaki etkilerini uzman görüşlerine dayalı olarak analiz ederek bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda araştırmanın amacı, kapsamlı literatür araştırması sonucu belirlenen çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal faktörlerin LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etkilerini Bulanık Delphi yöntemiyle ortaya koymak ve bu faktörler arasındaki ilişkileri Bulanık DEMATEL yöntemiyle incelemektir. Elde edilecek sonuçların, denizcilik işletmeleri ve LNG yatırımcıları için karar destek sağlayan bir kaynak niteliği taşıması beklenmektedir.

3. METODOLOJİ

Delphi yöntemi, gizlilik, ardışık anketler, fikir birliğinin sağlanması ve nitel verilerin nicel verilere dönüştürülmesi uygulamalarını içerdiğinden uzman görüşlerinin sistematik ve kapsamlı bir şekilde toplanmasını sağlar (Toprakçı ve Arıcan, 2025). DEMATEL yöntemi faktörler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini görselleştirerek kritik itici güçleri veya engelleri belirler. Görselleştirme ve önceliklendirme ile analiz sonuçlarının değerini artırır ve daha anlaşılır hale getirir. Hem Delphi’nin uzman odaklı fikir birliği sağlaması hem de DEMATEL’in nedensellik analizi çalışmayı daha sağlam ve stratejik kararlar almak adına güçlendirir. Özellikle LNG yakıtlı gemiler gibi sektörde az sayıda bulunan, yeni ve karmaşık alanlarda

belirsizliği azaltarak daha güncel ve net bir yol haritası çizer (Singh vd.,2024).

Özetle; Delphi-DEMATEL yöntemi, uzmanlardan alınan görüşleri sistematik ve yapılandırılmış bir süreçle toplayıp olgunlaştırır, ardından bu görüşleri kullanarak kriterler arasındaki ilişkileri analiz eder. Bu yöntem, hem niteliksel hem de niceliksel açıdan güçlü bir yaklaşım sunarak, belirsizlik ortamlarında stratejik karar almayı destekler (Gupta ve Gupta, 2025; Arıcan vd., 2025).

Uzmanların cevaplarındaki küçük farklılıkları kompanse etmek, belirsiz ve tereddütlü düşünceleri sonuca daha uygun bir şekilde dahil etmek, daha sağlam bir fikir birliği sağlamak ve belirsizlikleri ortadan kaldırmak için de bulanık tabanlı yöntem tercih edilmiştir (Bavarsad vd.,2016; Sahoo ve Thakur, 2024).

Shanta vd. (2024) ve Ruano vd. (2023), özellikle kriterlerin belirlenmesi, ölçülmesi ve etki değerlerinin analizinde birlikte kullanıldığında, Bulanık Delphi ve Bulanık DEMATEL yöntemlerinin çok kriterli karar verme teknikleri arasında daha etkili olduğunu belirtmiştir. *Bu iki yöntemin bir arada kullanılması, her adımın sistematik ve bilimsel bir analiz yöntemine dayanması ve birbirini desteklemesi, çalışmanın metodolojisini güçlendirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada her iki yöntem birlikte kullanılmıştır.*

Bu çalışmanın evrenini, araştırma problemine en geniş düzeyde etki eden denizyolu taşımacılığı faaliyetindeki denizcilik işletmeleri oluşturmaktadır. Örneklem ise, LNG yakıtlı gemilerle deniz taşımacılığı yapan ve araştırma problemini en doğru biçimde yansıtabilecek uzman ve tecrübeli personelden seçilmiştir. Anket sorularının uzmanlık gerektirmesi nedeniyle güdümlü örnekleme yöntemi tercih edilmiş; LNG yakıtlı veya diğer gaz yakıtlı/gaz taşıyıcı gemilerde görev yapan kaptan, başmühendis, operasyon müdürü gibi en az 10 yıl deneyime sahip

personel ile bu konuda akademik veya sektörel uzmanlığı bulunan kişiler örnekleme dâhil edilmiştir. Bu katılımcıların, LNG yakıtlı gemilerin operasyonel, teknik, çevresel, ekonomik ve yasal etkilerini kendi görev alanlarına dayalı olarak değerlendirebilecek bilgi birikimine sahip olmaları, araştırmanın amacına ulaşması açısından kritik görülmüştür. Böylece örneklem, LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığına etkilerini çok boyutlu etki faktörleri çerçevesinde yorumlayabilecek nitelikli kişilerden oluşturulmuştur.

4. BULGULAR

4.1. Ana ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi

LNG yakıtlı gemilerin deniz ticaretine etkileyen faktörlerini belirlemek amacıyla kapsamlı bir literatür taraması yapılmış ve bu faktörler çevresel, teknolojik, ekonomik, ticari, yasal ve sosyal olmak üzere altı grupta sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgularla 35 alt faktör tanımlanmış ve Tablo 1’de sunulmuştur.

Konuyla ilgili literatür Scopus, WOS (Web Of Science), Science Direct, SOBIAD, Emerald, EBSCO, Proquest gibi akademik veri tabanlarından ve IMO, SEA-LNG, DNV, ABS (American Bureau of Shipping), Türk Loydu, Rystad-Energy, Avrupa Komisyonu, EPA (Environmental Protection Agency), Offshore-Energy gibi sektörel bilgi sitelerinden kapsamlı ve sistematik bir şekilde toplanmıştır.

Tablo 1. Literatür Araştırmasına Göre Belirlenen Ana ve Alt Faktörler

ANA FAKTÖRLER	KODU	ALT FAKTÖRLER	AÇIKLAMA
Çevresel	C1	Egzoz Emisyonu (NO _x , SO _x , PM, CO ₂)	Gemilerde yakıtın yanmasıyla açığa çıkan gazlar, sera gazları, hava kirleticileri
	C2	Hava Kirliliği	İnsan sağlığı ve çevreye verilen zararları
	C3	Küresel Isınma	Sera gazı seviyelerindeki artış, iklim deseni, iklim değişikliği
	C4	LNG Kazalarından Doğan Çevre Kirliliği	Gemi kazaları sonucu LNG sızıntıları, LNG yakıtının kimyasal özellikleri
Teknolojik	C5	Gemi Dizaynı	LNG depolama tanklarının gemideki mevkisi, kapladığı alan
	C6	Makine Tipi	LNG yakıtlı makineler, tipi, modelleri ve gemi tipine uygunluğu
	C7	Yanmamış Metan Gazı	LNG yakıtlı makinelerden sızan yanmamış metan gazı ve küresel ısınmaya etkisi
	C8	Kapasite Kayıp Oranı	LNG yakıtlı gemilerde depolama tanklarının gemide kapladığı alandan dolayı kaybedilen kargo depolama alanı, yaşam mahali kayıp oranı vb.
	C9	Emniyet Konuları	LNG yakıtının kriyojenik, tutuşma özellikleri, sızma ve patlama riskleri, risk analizi
	C10	Güvenlik Konuları	LNG yakıtı kimyasal özellikleri sebebiyle sabotaj ve terörist saldırı riski
	C11	Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi	LNG yakıtlı makinelerin yakıt ve yağlama yağı tüketim oranları
	C12	İyileştirme Eğilimi	Bir ticari geminin LNG yakıtlı gemiye dönüştürme uygunluğu ve maliyeti, çift yakıtlı makineye dönüşüm yatkınlığı
	C13	Karbon Azaltım Sistemi Gerekсинimi	SCR, EGR ve Scrubber gibi egzoz temizleme sistemlerine ihtiyacı
Ekonomik	C14	LNG Yakıtı Sermaye Maliyeti	LNG üretim maliyeti, gaz fiyatları ve bölgesel farklılıklar
	C15	LNG Yakıt Satış Fiyatı	LNG takıtı bölgesel farklılıkları ve diğer yakıtlara göre fiyat durumu
	C16	Operasyon Maliyeti	LNG yakıtlı ticari gemilerde navlun fiyatları, operasyonel masraflar ve maliyetler
	C17	Olası Çevresel Maliyet	LNG yakıtından kaynaklı kazalardan oluşan çevre kirliliği ve cezasal masrafları

	C18	Yakıt Tasarrufu	LNG yakıtlı makinelerin yakıt tüketim oranı ve maliyetlere etkisi
	C19	Altyapı	LNG üretim ve taşıma altyapısı, gaz sahası, sıvılaştırma tesisleri, depolama alanları
	C20	Bakım Maliyeti	LNG yakıtlı makinelerin periyodik bakım masrafları ve etkileri
Ticari	C21	Sefer ve Rota Planlaması	LNG yakıtlı gemilerin yakıt ihtiyaçlarını karşılayabileceği rotalar ve operasyonel düzenlemeler
	C22	Yakıt İkmal Ağı	LNG yakıtlı gemilerin LNG transferi yapabileceği bölgeler, limanlar, rıhtımlar, iskeleler ve LNG transfer gemisi çalıştıran limanlar
	C23	LNG Dağıtım Ağı	LNG nin üretim sahasından LNG yakıtlı gemilere taşınımı, bölgesel ihtiyaçların karşılanması
	C24	LNG Kaynağı	LNG üretim sahaları, gaz sahaları, limanlara uzaklığı, bölgesel yeterliliği
	C25	Gemi Tiplerine Uygunluğu	LNG yakıtlı makinelerin kruvaziyer, konteyner gibi gemi tipleri için uygunluğu, kullanılması durumunda avantajları
	C26	Yük Alanı Kaybı	LNG yakıtlı gemilerde LNG depolama tanklarının gemide kapladığı alandan dolayı yük ve kargo kaybı, navlun ve taşımacılık fiyatlarına etkisi
	C27	Operasyon Standartları	LNG yakıtlı ticari gemilerde diğer ticari gemilerin operasyonel kurallarına göre değişiklikler
	C28	Rekabet	LNG yakıtlı gemi sektörü, LNG yakıtlı makine üreticileri arasındaki teknolojik rekabet
Yasal	C29	Emisyon Kuralları	MARPOL Annex VI Emsiyon Kuralları, EU ETS and FuelEU Denizcilik Kuralları
	C30	LNG Yakıt Transferi Kuralları	IGF Code yakıt ikmali, yakıt devreleri koruma ve lokasyon kuralları vb.
	C31	Gaz Yakıt Kullanım Kuralları	IGF Code tank lokalizasyon kuralları, gemi dizaynı ve düzenlemeleri, yakıt sistemleri vb.
	C32	Mevzuattaki Boşluk	LNG yakıt kullanımında gerekli kurallardaki yetersizlik
Sosyal	C33	Sosyal Farkındalık	Gerekli altyapının teşviki, avantajlarının yayılması ve çevresel öneminin aktarılması
	C34	Toplum Algısı	Tavuk-yumurta ikilemi, tehlikeli yakıt algısı vb.
	C35	Bayrak Devlet Katkısı	Hükümetler, bölgesel düzenleyici kuruluşlar tarafından sübvansiyonlar, finansman, vergi indirimleri vb.

4.2. Bulanık Delphi Yönteminin Uygulanması

Delphi yönteminin ilk adımı olarak 5'li likert anket uzmanlara elektronik ortamda ulaştırılmış ve veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplanan ham veriler dilsel değişken olarak toplanmıştır.

Nicel veri toplama yöntemine ek olarak, katılımcılara kararlarının ardındaki mantığı belirlemek ve literatür araştırması sonucunda belirlenen kriterlerin kapsamını güçlendirmek için ek kriterler eklemek amacıyla sorular da sorulmuştur.

Bu aşamada, kapsamlı literatür araştırması sonucu tespit edilen 35 adet kriterin en önemlileri Alqahtani vd. (2023), Mohammadfam vd. (2022), Rafieyan vd. (2022) Yusof vd. (2022), Alghawli vd. (2022) çalışmalarında kullanılmış Bulanık Delphi Yöntemine ait formüller ile hesaplanarak tespit edilmiştir. Bulunan en önemli 18 adet faktör Bulanık DEMATEL çalışması için tekrardan sıralanarak (F1, F2, F3..... F_n) Tablo 2'de gösterilmiştir.

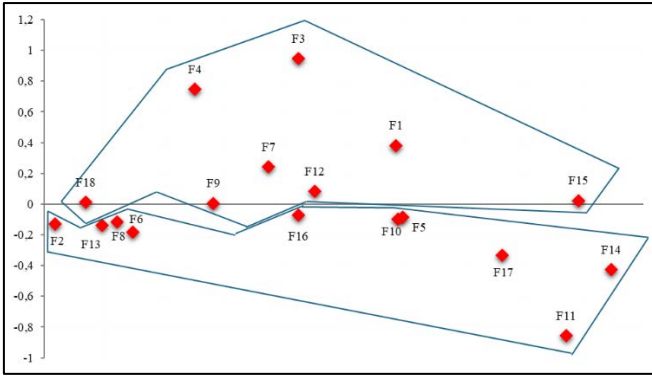
Tablo 2. Delphi Yöntemiyle Tespit Edilen En Önemli Faktörler

Kodu	Kriter Adı	S_j (Önem Göstergesi)	EA_j (Mutabakat Göstergesi)
F1	Egzoz Emisyonu (NO _x , SO _x , PM, CO ₂)	0,82	88%
F2	Hava Kirliliği	0,75	88%
F3	Makine Tipi	0,71	88%
F4	Yanmamış Metan Gazı	0,73	75%
F5	Emniyet Konuları	0,84	88%
F6	Güvenlik Konuları	0,73	88%
F7	Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi	0,73	75%
F8	Egzoz Temizleme Sistemi Gereksinimi	0,71	88%
F9	LNG Yakıtı Sermaye Maliyeti	0,73	88%
F10	LNG Yakıt Satış Fiyatı	0,73	75%
F11	Operasyon Maliyeti	0,78	88%
F12	Maliyet Tasarrufu	0,71	88%
F13	Bakım Maliyeti	0,73	75%
F14	Sefer ve Rota Planlaması	0,73	75%
F15	Yakıt İkmal Ağı	0,73	75%
F16	Operasyon Standartları	0,77	75%
F17	Rekabet	0,75	75%
F18	LNG Yakıt Transferi Kuralları	0,78	88%

4.3. Bulanık DEMATEL Yönteminin Uygulanması

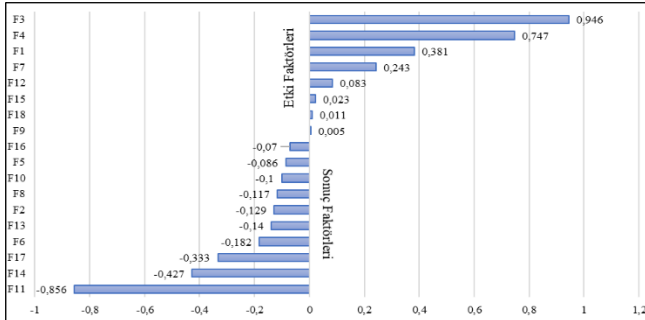
DEMATEL yönteminde, Delphi analizinde bulunan faktörler için uzmanlardan anket yoluyla toplanan dilsel değerler ile “OnlineOutput MCDM Yazılımı” kullanılarak hesaplama yapılmış, faktörler arasındaki etki-ilişki haritası Şekil 1’de, birbirini etikleme şiddetleri Şekil 2’de, ağırlıklandırma sıralaması Şekil 3’te sunulmuştur.

Şekil 1. Bulanık DEMATEL Yöntemiyle Bulunan Etki-İlişki Haritası



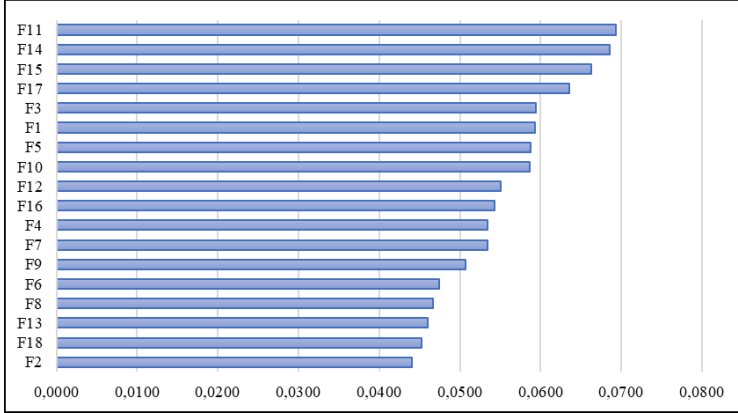
Bulanık DEMATEL hesaplamalarına göre, F1, F3, F4, F7, F9, F12, F15, F18 **etki** değişkeni olarak değerlendirilirken, F2, F5, F6, F8, F10, F11, F13, F14, F16, F17 **sonuç** değişkeni olarak kabul edilmiştir.

Şekil 2. Etki ve Sonuç Faktörlerinin Ağırlıklandırılması



F3, F4, F1 ve F7 en çok etkileyen neden değişkeni, F11, F14, F17, F6, F13, F2, F8 ve F10 en çok etkilenen sonuç değişkeni olarak bulunmuştur.

Şekil 3. Faktör Ağırlıklarının Sıralaması



Bu sıralamaya göre, F11, F14, F15, F17, F3, F1, F5 ve F10, LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığı üzerindeki etkisinde en önemli faktörler olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma, 2010'lu yıllarda sınırlı sayıda gemiyle başlayan ve giderek sıkılaştan emisyon düzenlemeleri doğrultusunda gelişen LNG yakıtlı gemi filolarının deniz taşımacılığı üzerindeki etkilerini uzman görüşlerine dayalı olarak analiz etmiş; özellikle çevresel, ekonomik ve ticari boyutlarda anlamlı bulgular elde etmiştir. Bulgular, faktör ağırlıklandırması sonucunda F11, F14, F15, F17, F3, F1, F5 ve F10'un LNG yakıtlı gemilerin deniz taşımacılığı üzerindeki en belirleyici etki unsurları olduğunu göstermektedir.

Yapılan etki-ilişki hesaplamalarında, F3, F4, F1 ve F7 faktörlerinin en çok etkileyen nedensel değişkenler olması bu

faktörlerin etki grubu faktörleri üzerinde güçlü bir yönlendirme etkisine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, LNG yakıtlı gemilerin artan çevresel düzenlemeler karşısındaki performansını değerlendirmiş ve özellikle yanmamış metan salınımı, makine tipi, emisyon düzeyleri ve yakıt–yağ tüketimi gibi teknik değişkenlerin deniz taşımacılığı üzerindeki belirleyici etkilerini ortaya koymuştur. Literatürde de vurgulandığı üzere (Comer vd., 2024; Karatug vd., 2023), LNG motorlarındaki yüksek metan kaçağı, AB’nin FuelEU Maritime (2025) ve AB-ETS (2026) düzenlemeleriyle birlikte çevresel kazanımları kısmen nötrleyebilmektedir. Bununla birlikte LNG’nin NO_x, SO_x, PM ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltması, ECA bölgelerinde operasyonel avantaj sağlamaktadır (Herdzik, 2013; Wang ve Notteboom, 2014). Daha yüksek motor verimliliği ve düşük yakıt–yağlama yağı tüketimi de maliyetleri azaltmakta ve bakım gereksinimlerini düşürmektedir (Moreira, 2016; Merien-Paul vd., 2019).

Analiz sonuçlarına göre F3 (Makine Tipi), F4 (Yanmamış Metan), F1 (Egzoz Emisyonları) ve F7 (Yakıt ve Yağlama Yağı Tüketimi) faktörleri, operasyon bölgeleri, maliyet yapısı ve navlun fiyatları üzerinde en etkili değişkenlerdir. Etki-ilişki değerlendirmesi ise F11 (Operasyon Maliyeti), F14 (Sefer ve Rota Planlaması) ve F13 (Bakım Maliyeti) faktörlerinin en çok etkilenen sonuç değişkenleri olduğunu göstermekte; bu durum, teknik ve çevresel faktörlerdeki değişimlerin operasyonel süreçlere doğrudan yansıdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca F17 (Rekabet), sıkılaştıran emisyon kuralları, motor teknolojilerine yönelik iyileştirme çalışmaları ve LNG kullanımındaki artış nedeniyle sektörde giderek önem kazanmaktadır (Wang vd., 2021; Yao vd., 2024).

LNG yakıt ikmal ağının önemi literatürle de uyumludur (Peng vd., 2021; He vd., 2024); çalışmada en kritik faktörlerden

biri olarak bulunması, operasyonel esneklik ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından belirleyici rolünü doğrulamaktadır. LNG fiyatlarındaki dalgalanmalar da özellikle Rusya–Ukrayna çatışmasının etkisiyle (Bruzzzone ve Sciomachen, 2023) sektörde önemli belirsizlikler yaratmakta ve bulgulara öne çıkan F10 (LNG Yakıt Fiyatı) değişkenini açıklamaktadır.

Son olarak, LNG’nin kriyojenik ve fiziksel özelliklerinden kaynaklanan emniyet ve güvenlik gereksinimleri, literatürde de vurgulandığı gibi (Molitor vd., 2012), F5 (Emniyet) ve F6 (Güvenlik) faktörlerinin önemini artırmaktadır.

Genel olarak çalışma, LNG yakıtlı gemilerin etkilerini güncel IMO ve AB düzenlemeleri kapsamında, uzman görüşlerine dayalı bütüncül bir analizle ele alması bakımından literatüre farklı bir katkı sunmaktadır.

Araştırma bulguları, LNG yakıtlı gemilerin operasyonel verimlilik ve çevresel performans açısından dikkate değer avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Coğrafi koşullar ve işletme–bakım maliyetlerindeki farklılıklara rağmen LNG, genel olarak maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamakta ve düşük emisyon seviyeleri sayesinde çevresel sürdürülebilirliği desteklemektedir. Sıkı IMO ve AB emisyon standartları karşısında, uygun makine tipleriyle donatılmış LNG yakıtlı gemiler özellikle ECA bölgelerinde rekabet gücünü artırmaktadır. Orta vadede LNG’nin, sektörün sıfır karbon hedeflerine geçişinde önemli bir ara yakıt işlevi görmesi beklenmekle birlikte, hidrojen, amonyak ve biyoyakıtlar gibi alternatiflerle karşılaştırmalı değerlendirmelerin artırılması gerekmektedir. LNG kullanımı, sektörde yasal uyumu kolaylaştırmanın yanı sıra deniz ekosistemlerinin korunmasına da katkıda bulunarak küresel sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet etmektedir.

Bu çalışma, emisyon düzenlemeleri, yeşil yakıtlar ve LNG teknolojilerindeki gelişmeler doğrultusunda gelecekte yapılacak

araştırmalar için yön gösterici niteliktedir. Sıfır karbon hedefleri çerçevesinde IMO ve AB politikaları doğrultusunda armatörler ile denizcilik işletmecilerine stratejik bir yol haritası sunmakta; LNG yakıtlı gemilerin uygulanması ve yaygınlaştırılmasında kritik unsurların belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca elde edilen bulgular, çevresel düzenlemeler bağlamında politika yapıcılara karar alma süreçlerinde destek sağlayabilecek temel göstergeler sunmaktadır.

Bulgular doğrultusunda, LNG yakıtlı gemilerin etkin kullanımını desteklemek amacıyla politika yapıcıların metan emisyonlarını dikkate alan, uygulanabilir ve aşamalı düzenlemeler geliştirmesi; denizcilik şirketlerinin LNG ikmal altyapısını göz önünde bulundurarak operasyonel verimlilik ve emisyon azaltımına yönelik stratejiler uygulaması; liman işletmelerinin güvenli ve uluslararası standartlarla uyumlu LNG ikmal tesislerini yaygınlaştırması; üreticilerin verimliliği artıran ve metan kaçaklarını azaltan teknolojilere odaklanması; akademi ve araştırma kuruluşlarının ise LNG ve alternatif yakıtları karşılaştıran kapsamlı çalışmalar yürütmesi önerilmektedir.

Bu çerçeve, LNG'nin sürdürülebilir deniz taşımacılığında kısa ve orta vadede önemli bir geçiş yakıtı olarak rolünü güçlendirmektedir. Bununla birlikte, bölgesel farklılıklar, düzenleyici belirsizlikler ve uzman görüşlerine dayanan sınırlı örneklem çalışmanın genellenebilirliğini kısıtlamaktadır; bu nedenle gelecekte daha geniş katılımcı gruplarıyla, tamamlayıcı yöntemlerin kullanıldığı ve farklı gemi/kargo türlerini kapsayan araştırmaların yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKÇA

- Alghawli, A. S. A., Al-khulaidi, A. A., Nasser, A. A., AL-Khulaidi, N. A., & Abass, F. A. (2022). Application of the fuzzy Delphi method to identify and prioritize the social-health family disintegration indicators in Yemen. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(5), 680-691.
- Alqahtani, F. M., Noman, M. A., Alabdulkarim, S. A., Alharkan, I., Alhaag, M. H., & Alessa, F. M. (2023). A New Model for Determining Factors Affecting Human Errors in Manual Assembly Processes Using Fuzzy Delphi and DEMATEL Methods. *Symmetry*, 15(11), 1967
- 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.
- Balcombe, P., Staffell, I., Kerdan, I. G., Speirs, J. F., Brandon, N. P., & Hawkes, A. D. (2021). How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy*, 227, 120462
- Baresic, D., & Rehmatulla, N. (2024). Exploring the Factors Leading to Diffusion of Alternative Fuels Using a Socio-Technical Transition Approach—A Case Study of LNG as a Marine Fuel in Norway. *Fuels*, 5(4), 574-606.
- Bavarsad, P., Jamshidi, S., & Jamshidi, Z. (2016). Application of Fuzzy Dematel Model to identify and analyze the relationship between factors affecting port privatization in Iran. *Journal of oceanography*, 7(25), 23-31.
- Bayraktar, M. (2016). Hizmetteki bir Geminin Sıvılaştırılmış Doğalgaz (LNG) Yakıtlı bir Gemi Makinesiyle

Donatılmasının Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi.

- Bruzzzone, A., & Sciomachen, A. (2023). Simulating Operating Performance of Alternative Configurations of LNG Bunkering Stations. *Sustainability*, 15(13), 9940.
- Burel, F., Taccani, R., & Zuliani, N. (2013). Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*, 57, 412-420.
- Chen, S., Zheng, S., & Zhang, Q. (2018). Investment decisions under uncertainty on LNG-powered vessels for environmental compliance. *Journal of Shipping and Trade*, 3, 1-19.
- Comer, B., Beecken, J., Vermeulen, R., Sturup, E., Paschinger, P., Osipova, L., ... & Verbeek, R. (2024). Fugitive and unburned methane emissions from ships (FUMES). In *Technical Report*. ICCT.
- Dereli, D.2018.LNG applications in marine transport. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.Haziran 2018
- Faber, J.2017.*Analysis Of The LNG Market Development In The EU*. https://transport.ec.europa.eu/document/download/6d764330-ca1a-43b3-ab9d_3ac9ee3d24d7_en?filename=2015-12-lng-lot3.pdf. Erişim Tarihi: 22 Ocak 2025
- Gupta, S., & Gupta, N. (2025). Enhancing freight logistics: overcoming barriers and driving sustainable growth with an integrated grey Delphi DEMATEL approach. *Benchmarking: An International Journal*.
- He, P., Jin, J. G., Pan, W., & Chen, J. (2024). Route, speed, and bunkering optimization for LNG-fueled tramp ship with alternative bunkering ports. *Ocean Engineering*, 305, 117957.

- Herdzik, J. (2013). Consequences of using LNG as a marine fuel. *Journal of KONES*, 20(2), 159-166
- Karatuğ, Ç., Ceylan, B. O., Ejder, E., & Arslanoğlu, Y. (2023). Investigation and examination of LNG, methanol, and ammonia usage on marine vessels. In *Decarbonization of Maritime Transport* (pp. 65-85). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Lindstad, E., Eskeland, G. S., Rialland, A., & Valland, A. (2020). Decarbonizing maritime transport: The importance of engine technology and regulations for LNG to serve as a transition fuel. *Sustainability*, 12(21), 8793.4
- Merien-Paul, R. H., Enshaei, H., & Jayasinghe, S. G. (2019). Effects of fuel-specific energy and operational demands on cost/emission estimates: A case study on heavy fuel-oil vs liquefied natural gas. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 77-89.
- Mohammadfam, I., Khajevandi, A. A., Dehghani, H., Babamiri, M., & Farhadian, M. (2022). Analysis of factors affecting human reliability in the mining process design using Fuzzy Delphi and DEMATEL methods. *Sustainability*, 14(13), 8168.
- Molitor, E., Bakosch, A., & Forsman, B. (2012). Feasibility Study on LNG Fuelled Short Sea and Coastal Shipping in the Wider Caribbean Region. *SSPA SWEDE N AB: London, UK*.
- Moreira, P. (2016). Liquefied natural gas as an alternative fuel: a voyage-based model. *Transport, Logistics: Int. J.*
- Olsen, J. H. B., & Baumgart, M. (2010). *LNG-fueled vessels in the Norwegian short-sea market: a cost-effective response to environmental regulation* (Master's thesis).

- Parfomak, P. W., Frittelli, J., Lattanzio, R. K., & Ratner, M. (2019). LNG as a maritime fuel: prospects and policy. *Congressional Research Service: Washington, DC, USA*.
- Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., & Rutherford, D. (2020). The climate implications of using LNG as a marine fuel. *Swedish Environmental Protection Agency: Stockholm, Sweden*.
- Pekşen, D. Y., & Alkan, G. (2015). Alternatif Gemi Yakıtı Lng; Net Bugünkü Değer Yöntemiyle Değerlendirilmesi. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deniz Ulaştırma İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı. İstanbul.
- Peng, Y., Zhao, X., Zuo, T., Wang, W., & Song, X. (2021). A systematic literature review on port LNG bunkering station. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102704.
- Rafieyan, A., Sarvari, H., Beer, M., & Chan, D. W. (2024). Determining the effective factors leading to incidence of human error accidents in industrial parks construction projects: Results of a fuzzy Delphi survey. *International Journal of Construction Management*, 24(7), 748-760.
- 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
- Ruano, M., Huang, C. Y., Nguyen, P. H., Nguyen, L. A. T., Le, H. Q., & Tran, L. C. (2023). Enhancing sustainability in Belize's ecotourism sector: A fuzzy Delphi and fuzzy DEMATEL Investigation of Key Indicators. *Mathematics*, 11(13), 2816

- Sahoo, P. B. B., & Thakur, V. (2024). The factors obstructing the blockchain adoption in supply chain finance: a hybrid fuzzy DELPHI-AHP-DEMATEL approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 41(9), 2292-2310.
- Salarkia, M., & Golabi, S. I. (2023). Liquefied Natural Gas (LNG): Alternative Marine Fuel Restriction and Regulation Considerations, Environmental and Economic Assessment. *Energy Engineering and Management*, 10(4), 44-59.
- Schinas, O., & Butler, M. (2016). Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships. *Ocean Engineering*, 122, 84-96.
- Shanta, M. H., Choudhury, I. A., & Salman, S. (2024). Municipal solid waste management: Identification and analysis of technology selection criteria using Fuzzy Delphi and Fuzzy DEMATEL technique. *Heliyon*, 10(1).
- Singh, S., Chakraborty, K., Pratap, S., Singh, M., & Zhou, F. (2024). Analysing factors influencing the adoption of blockchain technology in maritime freight enterprises. *Enterprise Information Systems*, 18(4), 2326676.
- Stewart, R. D., & Wolosz, C. J. (2015). Development of the Adoption of Liquefied Natural Gas as a Fuel for Shipping on the Great Lakes. *Transportation Research Record*, 2479(1), 1-8.
- Tekeli, M. M., Arici, S. S., Sezer, S. I., Akyuz, E., & Gardoni, P. (2024). Predicting Human Reliability for Shore-based LNG Bunkering Operation Process on Tanker Ships Using SLIM and Improved Z-numbers. *Journal of Marine Science and Application*, 1-13

- Toprakçı, O., & Arıcan, O. Z. A. N. (2025). A Fuzzy-Based Assessment of LNG-Fuelled Ships' Impact on Maritime Logistics. *Balkan and Near Eastern Journal of Social Sciences (BNEJSS)*, 11(1).
- Wang, S., & Notteboom, T. (2014). The adoption of liquefied natural gas as a ship fuel: A systematic review of perspectives and challenges. *Transport Reviews*, 34(6), 749-774.
- Wang, Y., Wright, L., & Zhang, P. (2021). Economic feasibility of LNG fuel for trans ocean-going ships: A case study of container ships. *Maritime Technology and Research*, 3(2), 202-222.
- Yao, A. F., Sèbe, M., Virto, L. R., Nassiri, A., & Dumez, H. (2024). The effect of LNG bunkering on port competitiveness using multilevel data analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 132, 104240.
- Yusof, N., Hashim, N. L., & Hussain, A. (2022, August). A review of fuzzy Delphi method application in human-computer interaction studies. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2472, No. 1). AIP Publishing.

PETROL TANKERLERİNDE YANGIN VE PATLAMA: RİSKLER, MEKANİZMALAR, ÖNLEME STRATEJİLERİ VE KAZA ANALİZLERİ

Sercan İNFAL¹

1. GİRİŞ

Petrol tankerleri, küresel enerji tedarik zincirinin en kritik bileşenlerinden biri olarak deniz taşımacılığında stratejik bir role sahiptir. Ancak bu gemiler, taşıdıkları yüksek uçuculuğa sahip hidrokarbon yükleri nedeniyle tarihsel olarak en yüksek yangın ve patlama riskine sahip deniz platformları arasında yer almaktadır (Uğurlu et al., 2018; OCIMF, 2018). Tanker yangınları, yalnızca gemi personeli ve yük güvenliği açısından değil, aynı zamanda çevresel etkileri ve uluslararası deniz ticaretinin sürekliliği açısından da büyük ölçekli sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle tankerlerde yangın güvenliği, hem teknik sistemlerin işlevselliği hem de operasyonel süreçlerin bütünlüğü açısından bütüncül bir yaklaşım gerektirmektedir.

Yangın güvenliği kavramı; yangının oluşmasını engelleme, ortaya çıkan yangının sınırlandırılması ve etkilerinin azaltılması yönünde çok katmanlı stratejileri içerirken (SOLAS, 2020; ISGOTT, 2022), patlama mekanizmaları ise özellikle hidrokarbon buharlarının LEL ve UEL aralıklarında oluşturduğu tutuşabilir atmosferler üzerinden şekillenmektedir (Li et al., 2020). Bu atmosferler içinde gerçekleşen ateşleme, buhar bulutu patlaması veya tank içi patlama gibi yüksek enerjili reaksiyonlara

¹ Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü.

yol açabilmektedir (Min & Kang, 2024). Tarihsel tanker kazalarının incelendiği çalışmalar, bu mekanizmaların büyük ölçüde yükün fiziksel özellikleri, tank atmosferinin kimyasal bileşenleri ve operasyonel süreçlerdeki hatalarla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır (Lavender & Higgins, 2019; Santos & Ribeiro, 2022).

Bununla birlikte insan faktörü, tanker yangınlarında en belirleyici bileşenlerden biri olarak literatürde geniş biçimde ele alınmaktadır. HFACS temelli çalışmalar, insan hatalarının tanker kazalarında %70–80 oranında paya sahip olduğunu göstermektedir (Uğurlu et al., 2018; Chauhan & Bhattacharya, 2021). Yanlış karar verme, iletişim eksiklikleri, prosedür dışı uygulamalar ve durumsal farkındalık kaybı, yangın ve patlama risklerini büyük ölçüde artırmaktadır. Çevresel faktörler — özellikle dar su yolları, yüksek trafik yoğunluğu ve akıntı koşulları — bu riskleri çarpan etkisiyle büyötmektedir (EMSA, 2023; Tan & Lee, 2021). Son yıllarda yapılan çalışmalarda, özellikle risk değerlendirme modellerinde insan, ekipman ve çevresel faktörlerin birlikte modellenmesinin güvenlik performansını artırdığı ortaya konmuştur. LPG/LNG operasyon süreçlerinde yapılan risk analizleri de benzer şekilde insan hatası, ekipman arızası ve çevresel parametrelerin kritik önem taşıdığını göstermektedir (Arıcan & Ünal, 2025).

Yeni teknolojilere ilişkin araştırmalar, yangın algılama sistemlerinde yapay zekâ destekli çözümlerin, çoklu sensör füzyonunun ve termal görüntüleme tabanlı erken uyarı mekanizmalarının risk azaltma süreçlerinde giderek daha kritik hâle geldiğini göstermektedir (Deng et al., 2023; Singh et al., 2023). Aynı şekilde çevresel sürdürülebilirlik açısından fluorine-free (F3) köpük teknolojileri ve biyotabanlı söndürme maddeleri, güncel çalışmalarda önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır (Morales & Chen, 2023; Bello, 2025).

Bu kitap bölümü, tanker yangınlarını kavramsal çerçeve, yangın dinamiği, teknik sistemler, insan faktörü, çevresel koşullar, mevzuat, tarihsel vaka analizleri ve güncel teknolojik gelişmeler üzerinden bütüncül bir biçimde incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, tanker yangınlarıyla ilgili mevcut bilgi birikimini analiz ederek, teknik ve operasyonel açıdan uygulanabilir sonuçlar ortaya koymaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Petrol tankerlerinde yangın güvenliği alanında yapılan akademik çalışmalar, operasyonel güvenlik, insan faktörleri, teknolojik gelişmeler ve düzenleyici çerçeveler olmak üzere dört temel ekseninde yoğunlaşmaktadır. Literatür, özellikle yangıcı sıvıların taşındığı kapalı tanklarda oluşabilecek yangın ve patlama risklerinin, hem kimyasal hem de operasyonel değişkenlerin ortak etkisiyle ortaya çıktığını göstermektedir.

Yangın güvenliği üzerine yapılan çalışmaların önemli bir bölümü, petrol türevi ürünlerin yanma karakteristiklerini ve buhar davranışlarını incelemektedir. Bryn (2020), hidrokarbon buharlarının alt ve üst patlama limitlerini sistematik olarak analiz ederek, tank atmosferindeki küçük sıcaklık değişimlerinin dahi patlayıcı karışım sınırlarını etkileyebileceğini vurgulamıştır. Bu çalışma, özellikle LEL/UEL kontrolünün tanker güvenliğinde neden zorunlu bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır.

Operasyonel güvenlik açısından literatür, inert gaz sistemlerinin etkinliği üzerinde yoğunlaşmaktadır. OCIMF'in (2018) kapsamlı kılavuzunda inert gazın tank atmosferindeki oksijen seviyesini düşürerek patlama riskini minimize ettiği, ancak sistemin bakım eksiklikleri veya yanlış operasyonel prosedürler nedeniyle etkisiz kalabileceği belirtilmektedir. ICS (2020) tarafından hazırlanan Tanker Safety Guide da inert gaz

sistemlerinin uluslararası güvenli operasyonlarda merkezi bir role sahip olduğunu göstermektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar risk değerlendirme modellerinin bütüncül yöntemlerle gerçekleştirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Özellikle Fuzzy Delphi, Fuzzy DEMATEL ve Fault Tree Analysis (FTA) yöntemlerinin entegrasyonu LPG/LNG operasyon süreçlerindeki kritik risklerin sistematik olarak belirlenebildiği gösterilmiştir (Ünal & Arıcan, 2025). Bu çalışma sonuçları, tanker yangın riskinin yalnız teknik sistemlerle değil, insan faktörleri ve çevresel değişkenlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha doğrulamaktadır.

Yangınlara neden olan operasyonel hatalar üzerine yapılan çalışmalar, insan faktörünün belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Uğurlu, Yıldırım & Wang (2018), denizcilik kazalarını HFACS yöntemiyle analiz etmiş ve yangın/patlama olaylarının büyük bölümünde durumsal farkındalık eksikliği, hatalı karar verme ve prosedürlere uyumsuzluk gibi insan kaynaklı hataların rol oynadığını tespit etmiştir. Bu sonuç, tanker yangın riskinin yalnız teknik sistemlerle değil, insan davranışıyla da yakından ilişkili olduğunu göstermektedir.

Tanker yangınlarının çevresel etkileri üzerine yapılan çalışmalar da literatürde önemli yer tutar. EMSA (2023), Avrupa denizlerinde meydana gelen büyük ölçekli tanker yangınlarının uzun vadeli ekolojik zararlarını incelemiş ve petrol kirliliğinin deniz ekosistemlerinde kalıcı biyolojik bozulmalara yol açtığını ortaya koymuştur. Özellikle Independenta ve Nassia kazaları gibi büyük olaylar, literatürde yüksek etki alanına sahip örnekler olarak değerlendirilmektedir.

Yangın söndürme teknolojileri konusunda yapılan araştırmalar, köpük sistemlerinin performansını değerlendirmektedir. Lavender & Higgins (2019), AFFF ve diğer köpük türlerinin denizcilik uygulamalarındaki etkinliğini

karşılaştırmış ve özellikle düşük genleşmeli köpüklerin akaryakıt yangınlarında üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Literatür ayrıca, kısıtlı su yollarında gerçekleştirilen tanker operasyonlarının sistematik risklerini de ele almaktadır. Chauhan & Bhattacharya (2021), dar su yollarında manevra kabiliyetinin sınırlı olması, trafik yoğunluğu ve akıntı kombinasyonlarının yangın ve çarpışma riskini artırdığını belirtmiştir. Bu bulgu, İstanbul Boğazı gibi kritik bölgelerde yaşanan tarihsel kazalarla da uyumludur.

Genel olarak literatür, tanker yangın riskinin çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ve teknik sistemler, insan faktörleri, çevresel koşullar ve düzenleyici standartların birbiriyle etkileşim içinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

3. YANMA VE PATLAMA MEKANİZMALARI

Petrol tankerlerinde meydana gelen yangın ve patlamalar, hidrokarbonların fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak gelişen karmaşık süreçlerdir. Bu bölüm, yanma davranışının temel prensiplerini ve tanker ortamında patlama oluşumuna yol açan mekanizmaları bilimsel çerçevede ele almaktadır.

Yanma, oksijen, yanıcı madde ve ısı olmak üzere üç temel unsurun uygun koşullarda bir araya gelmesiyle gerçekleşir. Bu üç unsurun birleşimini ifade eden yangın üçgeni, özellikle kapalı tank atmosferlerinde daha da kritik hale gelir. Hidrokarbon buharlarının havadan daha ağır olması, buharın tank diplerinde birikmesine ve minimum bir tutuşturma kaynağıyla ani alevlenmeye yol açmasına neden olur (Bryn, 2020).

Yangın güvenliği, gemilerde yangının ortaya çıkmasını önleme, kontrol altına alma ve etkilerini azaltmaya yönelik tüm teknik, operasyonel ve organizasyonel stratejileri kapsar. Petrol tankerlerinde yangın güvenliği, hidrokarbonların yüksek

uçuculuğu ve geniş tutuşabilirlik aralıkları nedeniyle SOLAS, ISGOTT ve FSS Code gibi uluslararası standartlarla sıkı şekilde düzenlenmiştir.

Tanker patlamalarının temelinde hidrokarbon buharlarının LEL (Lower Explosive Limit) ve UEL (Upper Explosive Limit) arasında bulunan karışımlar oluşturması yatar. Bu aralıkta bir atmosfer ateşleme kaynağıyla temas ettiğinde; buhar bulutu patlaması, tank içi patlama veya şok dalgası yaratan hızlı yanma reaksiyonları ortaya çıkar. Patlama mekanizmaları sıcaklık, basınç ve karışım oranlarına son derece duyarlıdır.

İnsan faktörü, tanker kazalarının en belirleyici bileşenlerinden biridir. HFACS modeli, insan hatalarını operasyonel hatalar, denetim eksiklikleri, organizasyonel etkiler ve çevresel/situasyonel faktörler olmak üzere dört temel kategoride inceler. Tarihsel tanker kazaları, yanlış karar verme, iletişim eksiklikleri ve prosedür dışı uygulamaların yangınların büyümesine katkı sağladığını göstermektedir.

Patlamaların temelini oluşturan Alt Patlama Limiti (LEL) ve Üst Patlama Limiti (UEL), hidrokarbon-hava karışımının tutuşabilir olduğu konsantrasyon aralığını tanımlar. LEL'in altında karışım çok fakir, UEL'in üzerinde ise çok zengin olduğu için yanma gerçekleşmez. Ancak bu aralık içinde kalan atmosfer, tankerler için en kritik tehlikeyi oluşturur. Literatürde, özellikle benzin ve hafif petrol türevlerinde bu aralığın oldukça geniş olduğu ve sıcaklık artışlarının LEL değerini önemli ölçüde düşürdüğü gösterilmiştir (Bryn, 2020; OCIMF, 2018).

Tanker operasyonlarında karşılaşılan en tehlikeli mekanizmalardan biri buhar bulutu patlamalarıdır (VCE – Vapour Cloud Explosion). Yük operasyonları sırasında tank havalandırma sistemindeki arızalar, statik elektrik birikimi veya ani buhar salınımları sonucunda geniş bir alana yayılan hidrokarbon bulutları oluşabilir. Bu bulut, bir ateşleme

kaynağıyla temas ettiğinde büyük ölçekli patlamalara yol açabilir. ICS (2020), bu tür patlamaların enerji seviyelerinin, bir geminin yapısal bütünlüğünü tamamen bozabilecek düzeyde olabileceğini vurgulamaktadır.

Sıcak yüzeylerle temas da ciddi bir tutuşma kaynağıdır. Makine dairesi gibi kapalı alanlarda bulunan 220 °C'nin üzerindeki yüzeyler, yağ buharlarının kendiliğinden tutuşma sıcaklıklarına ulaşmasına neden olabilir. Özellikle turboşarjer yüzeyleri, egzoz manifoldları ve gres biriken mekanik aksamalar kritik risk noktalarıdır (Lavender & Higgins, 2019).

Tankerlerde görülen bir diğer önemli mekanizma statik elektrik kaynaklı tutuşmalardır. Yükleme ve boşaltma sırasında yüksek akış hızları nedeniyle hortum ve boru hatlarında statik elektrik birikebilir. OCIMF (2018), özellikle arıtılmış ve düşük iletkenliğe sahip petrol ürünlerinde statik elektriğin çok daha hızlı birikme eğiliminde olduğunu ifade etmektedir.

Ayrıca, kendiliğinden ısınma ve spontan tutuşma fenomeni özellikle yağlı paçavralar, filtreler ve organik artıkların bulunduğu alanlarda görülmektedir. Bu maddeler, oksidasyon reaksiyonları sonucu ısı üretir ve kapalı bir ortamda birikerek kendi kendine tutuşma sıcaklıklarına ulaşabilir.

Tanker yangın ve patlamalarının altında yatan mekanizmalar yalnızca kimyasal veya fiziksel değil; aynı zamanda operasyonel süreçlerin güvenliği ve ekipmanların teknik yeterliliği ile de yakından ilişkilidir. Bu nedenle gemi tasarımından operasyon prosedürlerine kadar tüm süreçlerin bilimsel temellere dayalı şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.

4. YANGIN SINIFLARI VE SÖNDÜRME PRENSİPLERİ

Petrol tankerlerinde meydana gelebilecek yangınların doğru şekilde sınıflandırılması, uygun söndürme maddesinin seçilmesi ve etkin müdahale stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Uluslararası standartlara göre yangınlar; yanıcı maddenin fiziksel hâline ve reaksiyon karakteristiğine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma hem IMO tarafından kabul edilmekte hem de EN 2 ve TS EN 2 standartlarıyla uyumluluk göstermektedir.

4.1. A Sınıfı Yangınlar: Katı Madde Yangınları

Organik esaslı katı maddelerin (ahşap, tekstil, kauçuk vb.) yanmasıyla oluşur. Tankerlerde daha çok yaşam mahalleri, ambalaj malzemeleri ve depo alanlarında görülür.

Temel söndürme prensibi: Soğutma

En etkili söndürme maddesi: Su

Alternatif seçenekler: Kuru kimyasal toz, CO₂ (sınırlı etki)

4.2. B Sınıfı Yangınlar: Sıvı ve Sıvılaştırılabilir Katı Yangınları

Petrol tankerleri için en kritik yangın sınıfıdır. Benzin, dizel, jet yakıtı, ham petrol ve solventler bu sınıfa girer. Hidrokarbonların buharlaşma eğilimi ve düşük parlama noktaları nedeniyle yangın hızla yayılabilir.

Temel söndürme prensibi: Boğma ve oksijen kesme

En etkili söndürme maddesi: Köpük (özellikle AFFF)

Neden su kullanılmaz? Su, akaryakıttan ağır olduğu için yüzeye çökerek yangını yayabilir.

Literatürde, düşük genleşmeli AFFF köpüklerinin akaryakıt havuz yangınlarında en yüksek başarı oranına sahip olduğu gösterilmiştir (Lavender & Higgins, 2019).

4.3. C Sınıfı Yangınlar: Gaz Yangınları

Gemilerde LPG/LNG tüpleri, teknik gazlar ve kaçak gaz hatları nedeniyle ortaya çıkabilir.

Temel prensip: Gaz akışının kesilmesi

Söndürme maddeleri: BC tipi kuru kimyasal toz, CO₂

Not: Gaz kesilmeden hiçbir söndürme işlemi kalıcı değildir.

4.4. D Sınıfı Yangınlar: Metal Yangınları

Potasyum, magnezyum, sodyum gibi reaktif metallerin yanmasıyla oluşur. Tankerlerde nadir görülmekle birlikte özellikle tersane bakım süreçlerinde ortaya çıkabilir.

Söndürme maddesi: Özel D tipi kuru kimyasal toz

Kesinlikle kullanılmamalıdır: Su, köpük, CO₂

4.5. F Sınıfı Yangınlar: Yağ ve Pişirme Alanı Yangınları

Yaşam mahallerindeki mutfak ve pişirme alanlarında görülür.

Söndürme maddesi: Isı emici ıslak kimyasal çözeltiler (Potasyum asetat vb.)

4.6. E Sınıfı (Elektrik) Yangınları Tartışması

Elektrik yangınları bazı kaynaklarda “E sınıfı” olarak adlandırılmasına rağmen, uluslararası standartlarda ayrı bir sınıf olarak tanımlanmamıştır. Elektrik akımı kesildikten sonra yangın, malzeme türüne göre gerçek sınıfına dâhil edilir.

4.7. Tankerlerde Yangın Sınıflarının Pratik Önemi

Tankerlerde özellikle B sınıfı yangınlar en yüksek risk grubunu oluşturmakta olup:

Havuz tipi yangınlara dönüşebilir,

Patlama potansiyeli taşır,

Köpük sistemleri olmadan müdahale edilemez.

Ayrıca makine dairesinde A ve B sınıfı yangınların birleşimi görülebilir. Bu karmaşık yapı nedeniyle gemilerde çoklu söndürme sistemleri (CO₂, su sisi, köpük, kuru toz) kullanılmaktadır.

5. TANKERLERDE YANGIN EMNİYET SİSTEMLERİ

Tankerlerde yangın riskinin yüksek olması nedeniyle, uluslararası denizcilik düzenlemeleri (SOLAS, IMO FSS Code) kapsamlı yangın önleme, algılama ve söndürme sistemlerinin zorunlu olarak gemilerde bulunmasını şart koşturmaktadır. Bu sistemler hem yapısal hem de operasyonel güvenliği kapsamakta olup; kargo tankları, makine dairesi ve yaşam mahalleri için farklı teknolojileri içermektedir.

Bu bölümde tankerlerde kullanılan başlıca yangın emniyet sistemleri teknik açıdan açıklanmakta ve modern uygulamalar literatürle desteklenmektedir.

5.1. İnert Gaz Sistemi (IGS)

İnert gaz sistemi, petrol tankerlerinde yangın ve patlamayı önlemede en kritik güvenlik bileşenidir. Sistem, kargo tanklarının atmosferindeki oksijen seviyesini %21'den %8'in altına düşürerek tutuşabilir karışım oluşumunu engeller (OCIMF, 2018).

Çalışma Prensipleri

- Kazan bacasından veya özel inert gaz jeneratöründen alınan egzoz gazı, soğutulur ve arıtılır.
- Ardından gaz, kargo tanklarına kontrollü şekilde basılır.
- Tank içindeki oksijen seviyesi sürekli izlenir.

Avantajları

- LEL/UEL aralığında tutuşabilir atmosfer oluşumunu engeller.
- Yük operasyonları boyunca tank atmosferini kararlı tutar.
- Riskler ve Arıza Senaryoları
- Fan arızası veya scrubber sisteminin devre dışı kalması
- Oksijen analiz cihazının yanlış ölçüm yapması
- Tank basıncının kontrolsüz yükselmesi
- ICS (2020), IGS arızalarının tanker kazalarının %14'ünde doğrudan etkili olduğunu belirtmektedir.

5.2. Sabit Köpük Söndürme Sistemleri

Kargo tanklarında ve pompa dairelerinde meydana gelebilecek B sınıfı yangınlara karşı en etkili söndürme yöntemi sabit köpük sistemleridir. Lavender & Higgins (2019) çalışmalarında düşük genleşmeli AFFF köpüklerinin akaryakıt yangınlarında hızlı örtme ve soğutma performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Temel Bileşenler

- Köpük konsantre tankı
- Proportioner (karıştırıcı)

- Deniz suyu hattı
- Köpük monitörleri ve nozullar

Çalışma Prensipleri

- Köpük konsantresi suyla belirli oranda karıştırılır ve nozullar aracılığıyla yanıcı sıvının yüzeyine yayılır. Köpük tabakası:

- Oksijen transferini keser,
- Yakıt buharlaşmasını engeller,
- Yüzey soğutması sağlar.

5.3. CO₂ Sabit Söndürme Sistemleri

Makine dairesi yangınlarında kullanılan CO₂ sistemleri, yüksek hacimli kapalı alanlarda etkili gazlı söndürme sağlayan kritik bir güvenlik sistemidir.

Avantajları

- Oksijen seviyesini hızla düşürerek yanmayı durdurur.
- Elektrik ekipmanlarına zarar vermez.
- Riskler
- Personel için ölümcül boğulma riski.
- Kapının açılması durumunda sistem etkisinin kaybolması.

Bu nedenle SOLAS gereği CO₂ odaları özel kilitleme sistemleri ve ikaz alarmı ile donatılmaktadır.

5.4. Su Sisi (Water Mist) Sistemleri

Water mist sistemleri, mikro damlacıklar sayesinde hem soğutma hem de buharlaşma yoluyla oksijen konsantrasyonunu azaltma prensibine dayanır.

Lavender & Higgins (2019) su sisi sistemlerinin özellikle makine dairesi yangınlarında geleneksel sprinkler sistemlerine kıyasla daha hızlı soğutma sağladığını belirtmektedir.

5.5. Kuru Kimyasal Toz (Dry Powder) Sistemleri

Özellikle LNG/LPG tankerlerinde kritik öneme sahiptir. Reaktif metan ve propan bulutlarının hızlı şekilde bastırılmasında etkilidir.

Kullanım Alanları

- Manifold bölgeleri
- Bunkering operasyonları
- Kargo güvertesi

5.6. Yangın Algılama, Alarm ve İzleme Sistemleri

Modern tankerlerde yangın algılama teknolojileri, çoklu sensör tabanlı sistemler üzerine kuruludur.

Yaygın Algılama Teknolojileri

- Alev dedektörleri (IR/UV sensörler)
- Duman dedektörleri
- Isı artış hızı sensörleri
- Gaz algılama sistemleri (LEL sensörleri)

EMSA (2023) verilerine göre modern sensör teknolojilerinin kullanımı, müdahale süresini ortalama %37 kısaltmaktadır.

5.7. Yapısal Yangın Emniyeti

Tanker tasarımında yangın dayanımı yüksek malzemelerin kullanılması zorunludur.

Yapısal Güvenlik Unsurları

- Yangına dayanıklı bölmeler (A-60 standardı)

- Isı yalıtımlı kablo ve boru geçişleri
- Yangına dayanıklı kapılar

SOLAS gereği yaşam mahalleri ve makine dairesi arasında en az "A-60" yangın dayanım standardı bulunmalıdır.

5.8. Emniyet Yönetim Sistemleri (SMS) ve Eğitim

Yangın sistemleri yalnızca teknik unsurlar değildir; insan faktörü ile beraber çalışır.

Kritik Alanlar

- Personelin yangın eğitimi
- Acil durum tatbikatları
- Bakım kayıtlarının tutulması
- ISM Code uyumluluğu

Uğurlu et al. (2018) tanker kazalarında insan faktörünün belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

6. TARİHSEL TANKER YANGINLARI: VAKA ANALİZLERİ

Bu bölümde petrol tankerlerinde meydana gelen önemli tarihsel yangın ve patlama vakaları teknik, operasyonel ve insan faktörü temelli nedenleriyle birlikte değerlendirilmekte; her olayın uluslararası denizcilik güvenliği literatürüne katkısı ortaya konulmaktadır.

6.1. Peter Zoranic – World Harmony Çarpışması (1960)

14 Aralık 1960'ta İstanbul Boğazı'nda meydana gelen bu çarpışma, akıntılar, dar seyir alanı ve yetersiz iletişim gibi çevresel ve operasyonel faktörlerin birleştiği tipik bir büyük kaza örneğidir. Yugoslav tankeri Peter Zoranic taşıdığı 12.000 ton

benzin ve 10.000 ton petrol nedeniyle yüksek patlama potansiyeline sahipti.

Teknik ve Operasyonel Bulgular

- İki gemi arasında yapılan düdük sinyalleri yanlış yorumlanmıştır.
- Gemilerin nispi manevra kabiliyeti dar su yolunda ciddi şekilde kısıtlanmıştır.
- Taşınan yükün yüksek volatilitesi, yangının hızla yayılmasına neden olmuştur.

Yangının Seyri

Çarpışmanın hemen ardından tanklarda sızıntı ve buhar bulutu oluşmuş, buharın tutuşmasıyla her iki gemi büyük alev toplarıyla çevrilmiştir. Yangın yakınındaki Tarsus gemisine de sıçramış, olay zincirleme reaksiyona dönüşmüştür.

6.2. Independenta Kazası (1979)

15 Kasım 1979’da Romen tankeri MT Independenta ile Yunan şilebi Evrialy’nin çarpışması, İstanbul Boğazı’nın tarihindeki en büyük deniz felaketlerinden biri olarak kabul edilmektedir.

Nedenler

- Evrialy’nin seyir kurallarına aykırı rota seçmesi
- Manevra işaretlerinin yanlış yorumlanması
- Çarpışma anında yüksek hız

Yangının Gelişimi

- Yaklaşık 94.600 ton ham petrol yükü nedeniyle yangın 27 gün boyunca sönmemiştir.
- Çarpışmanın ardından dakikalar içinde geniş ölçekli buhar bulutu patlaması oluşmuştur.

- Patlama etkisi kıyıdaki yapılara kadar ulaşmış, binlerce cam kırılmıştır.

Uluslararası Literatüre Katkısı

Bu olay, IMO'nun Boğazlarda kılavuz kaptan gerekliliği, tanker trafiği düzenlemeleri ve büyük ölçekli yangınlara müdahale stratejileri üzerine yaptığı reformların temel referanslarından biri haline gelmiştir.

6.3. Nassia Tankeri Yangını (1994)

13 Mart 1994'te meydana gelen Nassia–Shipbroker kazası, İstanbul Boğazı'nda yoğun trafik risklerinin tekrar görünür olmasına neden olmuştur.

Öne Çıkan Bulgular

- Çarpışma, akıntı ve trafik yönetimi eksikliklerinin birlikte görüldüğü klasik bir risk örneğidir.
- 98.600 ton ham petrol taşıyan tankerin üç tankı alev almıştır.
- Yangın, Independenta kazasından çıkarılan dersler sayesinde daha kısa sürede kontrol altına alınmıştır.

Risk Analizi Bağlantıları

Chauhan & Bhattacharya (2021), dar su yollarında tanker kazalarının yoğunlaşma sebeplerini akıntı-asimetri dinamikleri ve manevra sınırlamaları üzerinden açıklamaktadır; Nassia vakası bu teorik çerçeveye örtüşmektedir.

6.4. TPAO Tankeri Yangını (1997)

Gemsan Tersanesi'nde bakım sırasında meydana gelen bu yangın, sıcak çalışma faaliyetlerinin tankerler üzerindeki risklerini göstermektedir.

Nedenler

- Kaynak sırasında kıvılcımların tank içindeki gazla temas etmesi
- Yetersiz gaz ölçümü
- Personel gözetim eksikliği

Sonuçlar

- Çoklu patlamalar
- Birden fazla gemiye yangının sıçraması
- Çevrede yapısal hasarlar

Bu olay, tersane güvenlik prosedürlerinin uluslararası alanda yeniden düzenlenmesine katkı sağlamıştır.

6.5. MV Stena Immaculate (2025)

Yakın dönem tanker kazalarından biri olan MV Stena Immaculate, modern tankerlerde dahi çarpışma sonrası domino etkisiyle büyük yangınların oluşabileceğini göstermiştir.

Teknik Bulgular

- Jet-A1 yükü taşıyan bir kargo tankının çarpışma sonucu yırtılması
- Yakıt sızıntısının ardından çoklu patlamalar
- Yüksek ısı yayılımı nedeniyle yangının kontrol altına alınmasının zorlaşması

Literatür Açısından Önemi

Bu vaka, modern petrol tankerlerinde bile yapısal zafiyetlerin çarpışma senaryolarında nasıl kritik hale geldiğini ortaya koymuştur.

6.6. Vaka Karşılaştırmalı Analiz Tablosu (Metinsel Taslak)

Vaka Tanımları

Bu analizde ele alınan Peter Zoranic, Independenta, Nassia, TPAO tanker yangını ve MV Stena Immaculate yangını vakaları; deniz taşımacılığında özellikle tehlikeli yük taşıyan gemilerde yangın, patlama ve çevresel riskleri ortaya koyan kritik örneklerdir. Vakalar, farklı zamanlarda ve farklı coğrafyalarda meydana gelmiş olsa da, benzer operasyonel ve yönetsel zafiyetleri yansıtmaktadır.

Kaza Türü ve Gemilerin Özellikleri

Peter Zoranic vakası, kuru yük gemilerinde seyir emniyeti sorunlarını temsil ederken; Independenta, Nassia, TPAO tankeri ve MV Stena Immaculate vakaları, petrol ve kimyasal tankerlerde yangın ve patlama riskinin ne denli yüksek olduğunu göstermektedir. Tankerlerin büyük tonajı ve taşıdıkları yanıcı yük, kazaların etkisini ciddi biçimde artırmıştır.

Kaza Nedenleri Açısından Karşılaştırma

Peter Zoranic kazasında temel nedenler seyir hatası, manevra yetersizliği ve trafik yoğunluğu olarak öne çıkmaktadır. Independenta ve Nassia kazalarında ise çarpışma ana tetikleyici unsur olmuş, bu çarpışmalar ham petrol yükü nedeniyle büyük yangınlara dönüşmüştür. TPAO tanker yangınında operasyonel eksiklikler, bakım ve güvenlik prosedürlerindeki yetersizlikler etkili olurken; MV Stena Immaculate yangınında yük güvenliği, teknik arıza ve acil durum yönetimi eksiklikleri belirleyici olmuştur.

Yangın ve Patlama Dinamikleri

Peter Zoranic vakasında yangın etkisi sınırlı kalmıştır. Buna karşılık Independenta kazasında meydana gelen büyük patlama sonrası yangın haftalarca sürmüş ve kontrol altına

alınması son derece güç olmuştur. Nassia tankerinde daha kısa süreli ancak yoğun bir yangın yaşanmıştır. TPAO tanker yangını, kapalı alanlarda yangınla mücadelenin zorluklarını ortaya koyarken; MV Stena Immaculate yangını, modern tankerlerde dahi yangın riskinin tamamen ortadan kaldırılamadığını göstermiştir.

Can Kaybı ve Çevresel Etkiler

Can kaybı ve çevresel etki bakımından en ağır sonuçlar Independenta ve Nassia kazalarında görülmüştür. Her iki vakada da çok sayıda denizci hayatını kaybetmiş, ciddi miktarda petrol denize yayılmıştır. TPAO tanker yangını ve MV Stena Immaculate vakalarında çevresel etki görece daha sınırlı olsa da, yangının kontrol altına alınamaması halinde büyük felaketlere dönüşebilecek potansiyel taşıdığı anlaşılmıştır. Peter Zoranic kazasında ise bu etkiler daha düşük düzeyde kalmıştır.

Müdahale Süreçlerinin Karşılaştırılması

Peter Zoranic kazasında müdahale, dönemin teknik kapasitesiyle sınırlı kalmıştır. Independenta kazasında patlama riski, yüksek sıcaklık ve ekipman yetersizliği nedeniyle müdahale büyük ölçüde pasif ve kontrollü yanma esaslı olmuştur. Nassia tankerinde denizden ve karadan eş zamanlı müdahale gerçekleştirilmiş, ancak boğazın dar yapısı süreci zorlaştırmıştır. TPAO tanker yangınında kurum içi acil durum planları ve destek ekipleri devreye girerken; MV Stena Immaculate yangınında modern yangın söndürme sistemleri kullanılmasına rağmen müdahale süresi uzamıştır.

Hukuki ve Kurumsal Sonuçlar

Peter Zoranic kazası daha çok yerel düzeyde farkındalık yaratmıştır. Independenta ve Nassia kazaları ise Türk Boğazları'nda gemi trafiği yönetimi, tanker geçişleri ve acil müdahale planlarının geliştirilmesi açısından dönüm noktası

olmuştur. TPAO tanker yangını, kurumsal güvenlik ve bakım prosedürlerinin gözden geçirilmesine yol açarken; MV Stena Immaculate yangını, uluslararası tanker güvenliği standartlarının ve yangınla mücadele sistemlerinin yeniden değerlendirilmesine katkı sağlamıştır.

Genel Değerlendirme ve Çıkarımlar

Beş vakanın birlikte değerlendirilmesi, tehlikeli yük taşıyan tankerlerde küçük operasyonel hataların dahi büyük ölçekli felaketlere yol açabileceğini göstermektedir. Karşılaştırmalı analiz, deniz trafiği yönetimi, gemi teknik bakımı, mürettebat eğitimi ve acil durum müdahale kapasitesinin entegre bir sistem olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

7. TARTIŞMA

Bu çalışmanın bulguları, tanker yangınlarının temel olarak çok katmanlı bir risk yapısına sahip olduğunu, teknik sistem performansı, insan faktörü, operasyonel süreçlerin bütünlüğü ve çevresel koşullar arasında karmaşık bir etkileşim bulunduğunu ortaya koymaktadır. Literatürden elde edilen veriler, yangın güvenliğinin yalnızca yangın söndürme sistemlerinin kapasitesi ile değil, aynı zamanda organizasyonel kültür, eğitim düzeyi, bakım süreçlerinin sürdürülebilirliği ve gerçek zamanlı karar verme mekanizmalarıyla şekillendiğini göstermektedir (Chauhan & Bhattacharya, 2021; Zaib, 2022).

Vaka analizleri, özellikle inert gaz sisteminin devre dışı kaldığı durumlarda tank atmosferinin hızla tutuşabilir karışım aralıklarına girdiğini göstermiştir. Bu bulgu, OCIMF (2018) ve Li et al. (2020) tarafından yapılan çalışmaları doğrular niteliktedir. Aynı zamanda rahatsız edici biçimde, birçok büyük ölçekli kazada teknik sistemlerin işlevsel olmasına rağmen insan faktörü kaynaklı hatalar nedeniyle devreye sokulamadığı tespit edilmiştir.

Bu durum HFACS temelli analizlerde belirgin olan “operasyonel yetersizlik” ve “prosedür ihlali” temalarıyla örtüşmektedir (Santos & Ribeiro, 2022).

Dar su yolları, özellikle İstanbul Boğazı gibi kritik geçitlerde riskin çarpan etkisiyle arttığını göstermiştir. EMSA (2023) ve Özkan (2022) tarafından ortaya konan bulgular, çevresel faktörlerin tanker yangınlarında bağımsız bir değişken olarak değil, risk artırıcı bir katalizör olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, yangın dinamiği ile çevresel koşullar arasındaki bu ilişkiyi doğrulayan ek örnekler sunmaktadır.

İnsan faktörünün tanker yangınları üzerindeki belirleyici etkisi, yalnızca operasyonel hatalarla sınırlı olmayıp aynı zamanda sosyal sürdürülebilirlik, iş gücü kapasitesi, örgütsel yapı ve çalışan refahı gibi daha geniş bir çerçevede ele alınmalıdır. Arslan, Keçeci, Solmaz ve Usluer (2023), denizcilik iş gücü için geliştirdikleri sosyal sürdürülebilirlik modelinde, personel yetkinliği, iş yükü dengesi, örgütsel destek ve karar verme süreçlerinin operasyonel riskler üzerindeki kritik etkisini göstermiştir. Bu bulgular, tanker yangınlarında insan faktörü analizlerinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyal ve örgütsel boyutlarıyla değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir.

Teknolojik gelişmelerin önleyici güvenlik kapasitesini artırdığı açıktır. Yapay zekâ tabanlı algılama sistemlerinin yanlış alarm oranlarını düşürdüğü; sensör füzyonunun, özellikle tank atmosferi değişimlerini daha doğru izlemede kritik olduğu bulunmuştur (Singh et al., 2023; Deng et al., 2023). Ancak bu sistemlerin etkinliği, uygun bakım, kalibrasyon ve kullanıcı kompetansı sağlanmadığında sınırlı kalmaktadır. Bu bulgu, teknolojinin tek başına yeterli olmadığı, güvenlik kültürünün ve

insan faktörünün bütünleşik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Çevresel sürdürülebilirlik bağlamında F3 ve biyotabanlı köpüklerle ilgili bulgular umut vericidir; ancak AFFF köpükler kadar yüksek enerji yoğunluklu yangınlarda performans farklılıkları hâlen tartışılmaktadır (Morales & Chen, 2023; Bello, 2025). Bu nedenle geçiş süreci, hem çevresel hem de operasyonel riskler dikkate alınarak kademeli biçimde yürütülmelidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu çalışma tanker yangınlarının yalnızca teknik değil, aynı zamanda operasyonel ve insan merkezli bir sorun olduğunu göstermektedir. Literatür, teknoloji ve tarihsel vaka analizleri uyumlu bir biçimde tanker yangınlarının önlenabilir felaketler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda güvenlik yönetimi yaklaşımının teknik sistemlerin ötesine geçirilmesi, bütüncül, proaktif ve veri temelli bir yaklaşımla yeniden yapılandırılması gerektiği sonucuna ulaşılmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kitap bölümü, petrol tankerlerinde meydana gelen yangın ve patlama risklerinin teknik, operasyonel ve insan faktörü temelli çok boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan teorik çerçeveler, yangın ve patlama mekanizmalarının büyük ölçüde hidrokarbon buharlarının davranışı, tank atmosferinin kimyasal özellikleri ve operasyonel süreçlerin güvenliği ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Tarihsel tanker yangınları — Peter Zoranic, Independenta, Nassia, TPAO ve Stena Immaculate — bu mekanizmaların gerçek dünyadaki etkilerini dramatik biçimde doğrulamıştır.

Analiz edilen vakalar, yangınların çoğunlukla insan kaynaklı hatalar, yanlış operasyonel uygulamalar, çevresel koşulların yanlış yönetimi ve teknik sistem arızaları ile tetiklendiğini göstermektedir. Özellikle inert gaz sistemi arızaları, sıcak çalışma süreçlerindeki denetimsizlik, statik elektrik birikimi, yanlış karar verme ve yetersiz gözetim gibi unsurlar, yangın ve patlama risklerini çarpan etkisiyle büyötmüştür. Bu durum, tanker operasyonlarında insan faktörünün teknik sistemlerden daha kritik bir belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Teknik açıdan değerlendirildiğinde, yangın emniyet sistemlerinin (IGS, sabit köpük sistemleri, CO₂ sistemleri, su sisi sistemleri ve kuru kimyasal toz uygulamaları) yangın mekanizmalarıyla uyumlu bir şekilde tasarlandığı görölmektedir. Ancak bu sistemlerin etkinliği büyük ölçüde bakım kalitesi, doğru kullanım, gerçek zamanlı izleme ve personel yetkinliği ile sınırlanmaktadır. Bu nedenle teknolojik donanımın tek başına yeterli olmadığı, insan-makine-etkileşimi temelli bir güvenlik kültürünün zorunlu olduğu anlaşılmaktadır.

Mevzuat açısından SOLAS, MARPOL, ISGOTT, FSS Code ve OCIMF kılavuzları kapsamlı bir çerçeve sunmasına karşın; uygulamada denetim eksiklikleri, uluslararası uyumsuzluklar ve gemilere özgü bakım farklılıkları nedeniyle ciddi açıklar oluşmaktadır. Trafik ayırım düzenleri, dar su yolu işletmeciliği ve gemi seyir güvenliği uygulamalarındaki yetersizlikler, özellikle Independenta ve Nassia gibi büyük ölçekli kazalardan çıkarılan derslerin hâlâ tam olarak hayata geçirilmediğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, petrol tankerlerinde yangın güvenliği; teknik sistem performansı, insan faktörü, organizasyonel kapasite, eğitim düzeyi, çevresel faktörler ve düzenleyici çerçeve arasındaki çok boyutlu bir etkileşimin

sonucudur. Bu çalışma, tanker güvenliğinin etkin şekilde sağlanabilmesi için teknik inovasyonların, insan faktörü analizlerinin, politika iyileştirmelerinin ve operasyonel disiplinin birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, uygun teknolojilerin kullanımı, güçlü bir güvenlik kültürü, nitelikli eğitim programları, gerçek zamanlı izleme sistemleri ve uluslararası mevzuata tam uyum sağlanması halinde petrol tankerlerinde yangın ve patlama riskleri önemli ölçüde azaltılabilir. Gerek literatürün sunduğu bulgular gerekse tarihsel kazaların analizleri, tanker yangınlarının önlenabilir felaketler olduğunu; bütüncül, proaktif ve bilimsel temelli bir güvenlik yaklaşımının ise bu amaca ulaşmanın en etkili yolu olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Arıcan, O. H. & Ünal, A. U., (2025). *Risk assessment in LPG and LNG operation processes in maritime transport: Delphi and fault tree analysis approach*. Processes, 13(4), 1136. <https://doi.org/10.3390/pr13041136>
- Arslan, O., Keçeci, T., Solmaz, M. S., & Usluer, H. B. (2023). *A social sustainability model for maritime labour force based on card sorting, fuzzy AHP & QFD method*. Research in Transportation Business & Management, 49, 101018. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101018>
- Bello, A., Graber, J. M., Ranganathan, S., Oates, J., Hubbard, L., Campbell, R., Ojo, A., & Bello, D. (2025). Incentives and Barriers to Adopting Fluorine-Free Foams (FFFs) in Fire Training Facilities: Results of the First North American Survey. Fire, 8(12), 452. <https://doi.org/10.3390/fire8120452>
- Bryn, P. (2020). Explosion limits and combustion behaviour of hydrocarbon vapours in marine tanks. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 68, 104133. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104133>
- Chauhan, P., & Bhattacharya, S. (2021). Fire safety risk management in oil tanker operations: A systematic review. Journal of Marine Science and Engineering, 9(11), 1264. <https://doi.org/10.3390/jmse9111264>
- Deng, X., Shi, X., Wang, H., Wang, Q., Bao, J., & Chen, Z. (2023). An Indoor Fire Detection Method Based on Multi-Sensor Fusion and a Lightweight Convolutional Neural Network. Sensors, 23(24), 9689. <https://doi.org/10.3390/s23249689>
- EMSA. (2023). Annual overview of marine casualties and incidents. European Maritime Safety Agency.

- Lavender, S., & Higgins, R. (2019). Advances in foam fire suppression for marine applications. *Fire Technology*, 55, 789–812. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0786-0>
- Li, Z., Chen, Y., & Huang, H. (2020). Explosion characteristics of hydrocarbon vapors under varying oxygen concentrations. *Fuel*, 279, 118506. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118506>
- Min, H., & Kang, H. (2024). Prediction of a Hydrogen Vapor Cloud Explosion with a Barrier Wall Using Various Machine Learning Methods. *Processes*, 12(12), 2946. <https://doi.org/10.3390/pr12122946>
- Morales, J., & Chen, R. (2023). Environmental performance of fluorine-free firefighting foams in maritime applications. *Marine Pollution Bulletin*, 190, 115927. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115927>
- OCIMF. (2018). *Inert Gas Systems: A Guide to Safe Operation*. Oil Companies International Marine Forum.
- Özkan, S. (2022). Navigational and environmental risk assessment in constrained waterways: A case study of the Istanbul Strait. *Journal of Navigation*, 75(3), 589–604. <https://doi.org/10.1017/S0373463321000684>
- Santos, M., & Ribeiro, P. (2022). Human factors in tanker accidents: A review based on HFACS. *Safety Science*, 150, 105708. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105708>
- Singh, R., Patel, K., & Verma, S. (2023). Multi-sensor fusion for early fire detection in maritime environments. *Sensors*, 23(4), 2145. <https://doi.org/10.3390/s23042145>
- Uğurlu, Ö., Yıldırım, U., & Wang, J. (2018). Analysis of marine accidents using Human Factors Analysis and Classification System (HFACS). *Safety Science*, 110, 512–528. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.04.021>

- Ünal, A. U., & Arıcan, O. H. (2025). *Accident risk analysis of gas tankers in maritime transport using an integrated fuzzy approach*. *Applied Sciences*, 15(11), 6008. <https://doi.org/10.3390/app15116008>
- Zaib, A., Yin, J., & Khan, R. U. (2022). Determining role of human factors in maritime transportation accidents by fuzzy fault tree analysis (FFTA). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 381. <https://doi.org/10.3390/jmse10030381>

DENİZCİLİK COĞRAFYASI RİSKLERİ VE DENİZ KAZALARINA TÜRKİYE PERSPEKTİFİNDEN BAKIŞ

Ergün KARSLI¹

Gönül KAYA ÖZBAĞ²

1. GİRİŞ

Türkiye, Asya ve Avrupa kıtaları arasında bir köprü vazifesi gören jeopolitik konumunun yanı sıra üç tarafını çevreleyen denizler ve stratejik su yollarına sahip olmanın bir yansıması olarak tarih boyunca küresel denizcilik faaliyetlerinin odak noktası olmuştur. Özellikle İstanbul ve Çanakkale Boğazları, Karadeniz havzasındaki ülkeleri dünya denizlerine bağlayan tek doğal su yolu olması nedeniyle büyük bir stratejik ayrıcalık sunarken, aynı zamanda yoğun uluslararası trafikten kaynaklanan ciddi güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir.

Her geçen gün büyük bir ivmeyle artan küresel ticaretin temel taşıyıcısı konumunda olan deniz taşımacılığı gerek bölgesel gerekse bölgelerarası tehditlerin gölgesi altında kesintisiz sürdürülmeye çalışılmaktadır. Küresel arz ve talep dengesinin korunması ve sürdürülebilir ekonomik faaliyetlerin devamlılığı açısından deniz taşımacılığına yönelik önemli risk faktörlerinin başında seyir emniyeti ve deniz kazaları gelmektedir.

¹ Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü.

² Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler, Enstitüsü Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü.

Deniz kazaları, yalnızca can ve mal kaybına değil aynı zamanda ulusal ve uluslararası boyutta geri döndürülemez çevre felaketlerine yol açabilen yıkıcı olaylardır. Çok uluslu deniz trafiğinin düğüm noktalarına ev sahipliği yapan Türkiye, ulusal perspektifte deniz kazalarını incelemek, proaktif yaklaşımlar geliştirerek küresel denizcilik pratiklerine yön vermek ve regüle edici mevzuatların entegrasyonunu en kısa sürede uygulamaya koymak zorundadır.

Buradan hareketle bu çalışma, kavramsal boyutta deniz kazalarına tamamlayıcı bir bakış kazandırmak, stratejik ve önemli su yolları ile bu yolların potansiyel risklerini değerlendirmek, etkileri itibarıyla derin izler bırakmış deniz kazalarını irdelemek, Türkiye coğrafyası ve risk alanlarına yönelik analitik bir yorum getirebilmek amacıyla hazırlanmıştır.

2. DENİZ KAZALARINA KAVRAMSAL BAKIŞ

İnsanoğlu, tarih boyunca farklı amaç ve yöntemlerle denizlerden istifade etmiş, en etkili ulaşım yollarının mavi sulardan geçtiğini öğrenerek bu ulaşım biçiminin geliştirilmesine yönelik çaba sarf etmiştir. Günümüzde deniz yolu taşımacılığı, sahip olduğu maliyet ekonomisi ve geniş kapasite gibi avantajlarıyla dünya ticari hayatının temel taşıma yöntemi halini almıştır (Arıcan, 2024).

Deniz yolu taşımacılığı ulaşımında kolaylığı ve en güvenli taşıma şekli olması, aynı anda fazla miktarda yükü taşıyabilme avantajları nedeniyle en popüler taşıma şekli olup küresel taşımacılığın büyük bir bölümünü kapsamaktadır. Öyle ki, dünya genelindeki yük ve malların büyük bir kısmı deniz taşımacılığı vasıtasıyla nakledilmektedir (Özbağ, Arıcan, & Aydın, 2023)

Ekonomik ve ticari faaliyetlerle doğru orantılı olarak artan ticari gemi trafiği, seyir güvenliği risklerini yükseltmekte, bu

durum başta can emniyeti olmak üzere, maddi ve çevresel hasarlar ile sonuçlanabilen deniz kazalarının yaşanmasına yol açmaktadır.

Deniz taşımacılığı sektöründe emniyet, çevresel koruma ve ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanması, geçmiş deneyimlerden öğrenme yeteneği ile ilişkilendirilebilir. Bu bağlamda deniz kazalarının kavramsal olarak irdelenmesi ve bu kazalardan alınacak derslerin belirlenerek uygulama pratiklerinin geliştirilmesi gerek seyrüsefer emniyeti gerekse de küresel tedarik zinciri ile ulusal ekonomi açısından önem taşımaktadır.

Uluslararası sularda seyrüsefer emniyetinin sağlanmasına yönelik ihtiyaç duyulan teknik ve idari tedbirleri almak, uluslararası normları belirlemek ve regüle etmek, deniz ticaretinin verimliliğini sağlamak, denizlerin gemiler tarafından kirletilmesinin önlenmesine yönelik olarak kural ve kaideleri belirlemek gibi misyonlar doğrultusunda Birleşmiş Milletler nezdinde görev yapmakta olan IMO, “deniz kazası; bir geminin operasyonlarıyla doğrudan bağlantılı olarak meydana gelen ve bir kişinin ölümü veya ciddi şekilde yaralanması, bir gemiden bir personelin kaybı, bir geminin kaybı, kaybının varsayılması veya terk edilmesi, bir gemiye maddi hasar verilmesi, bir geminin karaya oturması veya kullanılamaz hale gelmesi ya da bir geminin çarpışmaya karışması, geminin, başka bir geminin veya bir bireyin güvenliğini ciddi şekilde tehlikeye atabilecek maddi hasar görmesi veya bir geminin veya gemilerin hasar görmesi sonucu çevreye verilen ciddi zarar veya çevreye ciddi zarar verme potansiyeli oluşmasıyla sonuçlanacak olay yada olaylar silsilesidir” şeklinde tanımlamaktadır (IMO, 2008).

Etkileri bakımından, can ve mal emniyeti ya da çevresel açıdan önemli sonuçlar doğuran deniz kazaları çatma/çatışma, batma, sürüklenme, karaya oturma, yangın ve patlama gibi birden çok türe ayrılmaktadır (Yalçın, 2014).

Çatma/Çatışma; deniz sathı altında bulunan batmış durumdakiler hariç olmak üzere seyirde, demirli ya da herhangi bir objeye irtibatlı olduğuna bakılmaksızın bir geminin başka bir gemiye çarpması ya da başka bir gemi tarafından kendisine çarpılmasıdır. Seyir hâlindeki bir geminin demirde veya hareketsiz durumda bulunan bir gemiye çarpması durumunda ‘çatma’, her iki geminin de seyir hâlinde olduğu deniz kazalarında ise ‘çatışma’ terimi kullanılmaktadır.

Karaya oturma; bir geminin deniz tabanını meydana getiren doğal yapılar ya da cisimler üzerine, herhangi bir nedenle teması neticesinde seyrine devam etmesinin mümkün olmayacağı durumları ifade eder.

Batma; su alma, sızıntı, meteorolojik durumun kötüleşmesi, yükleme ve yük istif hataları, materyal yorgunluğu nedeniyle kırılma ve bunlara benzer sebeplerle geminin yüzmeye yeteneğini kaybederek negatif sepiye ye ulaşmasını tanımlar.

Sürüklenme; IMO tarafından, drift olarak ifade edilen ve tanımlanan bir kavram olup (IMO, 2002) Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Terimleri Sözlüğü bu kavramı, geminin kontrol dışı su sathında hareket etmesi olarak açıklamaktadır. (UAB, 2012) Tanımlardan yola çıkarak sürüklenmenin, geminin mürettebat kontrolünden çıkarak dışsal faktörlerin etkisiyle hareket etmesi şeklinde ifade edilmesi de mümkündür.

Yangın; kontrolsüz bir biçimde ortaya çıkan, gemide can ve mal emniyeti açısından tehlike yaratan durum olarak tanımlanan bir kavram olup, patlama ise yanıcı maddelerin yanma eylemi nedeniyle ortaya çıkardığı ani ve yüksek miktartlı enerji olarak ifade edilmektedir. (IMO, 1974)

Deniz kazaları; uluslararası literatürde Çok Ciddi Kaza (ÇCK), Ciddi Kaza (CK), Az Ciddi Kazalar (ACK) ve Deniz Olayı (DO) olarak dört farklı kategoride değerlendirilmektedir. (IMO, 2000) Bunun yanı sıra ülkemizde deniz kazalarının

araştırılması hususuna yönelik 2019 tarihli Deniz Kaza ve Olaylarını İnceleme Yönetmeliği, Çok Ciddi Kaza (ÇCK), Ciddi Kaza (CK) ve Deniz Olayı (DO) olarak deniz kazalarını üç gruba ayırmıştır. (Arıcan, 2024) Çok Ciddi Kaza, geminin tamamen kaybı, ölüm ya da önemli düzeyde çevresel kirlilik durumlarını ifade eder. Ciddi Kaza, ÇCK niteliğinde olmayan ancak farklı sebeplerden kaynaklanacak şekilde geminin seyre elverişsiz hale gelmesine sebebiyet verecek düzeyde yapısal hasarlar, kirlilik, yedi günden uzun iş gücü kaybı ve römorkör desteği gerektirecek şekilde hareketten sakıt kalmasıyla sonuçlanan olay olarak ifade edilmiştir. Deniz Olayı, ÇCK ve CK niteliğinde olmayan ancak sonuçları itibarıyla gemi ve/ veya kişileri tehlikeye sokacak ya da çevre sorunlarına yol açacak olaylar olarak kavramsallaştırılmıştır (Asyalı & Kızılcapan, 2012).

2.1. Deniz Kazalarının Araştırılması

Avrupa Deniz Güvenliği Ajansı (EMSA) tarafından yapılan bir çalışmada, 2014-2023 yılları arasında toplam 26595 deniz kazası yaşandığı, bu kazalardan 706'sının ÇCK statüsünde bulunduğu ve 200 gemi ile 650 insanın kazalarda kaybedildiğinin bildirilmesi (EMSA, 2025) deniz kazalarına yönelik risklerin günümüzde de devam ettiğinin bir göstergesidir. Yapılan çalışmalar kazaların coğrafi şartlar, insan faktörü, gemi tipi ve materyal düzeyi, teknik sorunlar ve çevresel değişkenler gibi farklı ana nedenlerle meydana geldiğini ortaya koymaktadır (Wang, Liu, Wang, Graham, & Wang, 2021).

Deniz kazalarına yönelik alınacak tedbirlerin niteliği ve kapsamı, kazaların engellenebilmesi veya olası etkilerinin düşürülmesi açısından büyük önem taşır (Genç & Arıcan, 2025). Bu çerçevede ülkemiz adına deniz kazalarının tanımlanması adına yasal dayanak olan 2019 tarihli ve 30961 sayılı Deniz Kaza ve Olaylarını İnceleme Yönetmeliği, kaza araştırma yetkisini Ulaştırma Emniyeti İnceleme Merkezi (UEİM)'e vermektedir.

Ulaştırma Emniyeti İnceleme Merkezi (UEİM) tarafından yapılan incelemeler raporlaştırılmakta, uluslararası kurum ve kuruluşlarla kazalara yönelik elde edilen bilgiler paylaşılmakta ve düzenlenen kaza analiz raporları gerekli tedbirlerin alınması maksadıyla yayımlanmaktadır.

2.2. Türkiye’de Deniz Kazaları

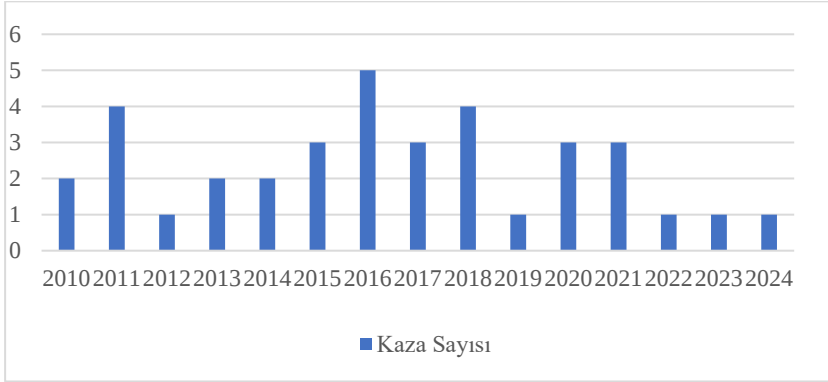
Türkiye, stratejik konumu nedeniyle dünya denizcilik sisteminde önemli bir aktördür. Karadeniz’i Akdeniz’e bağlayan yegâne doğal geçiş hattı olan boğazlar, yıllık yüz binlerce gemi geçişine ev sahipliği yapmakta ve yoğun taşımacılık faaliyetleri kaza risklerini artırmaktadır. Bu bağlamda Türkiye’de deniz kazaları yalnızca ulusal değil, uluslararası ticaret ve güvenlik açısından da önem taşımaktadır. Deniz kazalarının sayısı ve etkileri teknolojik gelişmelere rağmen navigasyon zorlukları, insan hataları, hava şartları ve çevresel faktörler nedeniyle devam etmektedir (Arıcan vd., 2023).

Küçükosmanoğlu&Küçükosmanoğlu tarafından 2024’de yapılan çalışmada, ülkemizin bölgesel bazda deniz kazası olasılığı incelenmiştir. Antalya, İstanbul, Mersin bölgesindeki kaza olasılığının yüksek seviyede seyrettiği tespit edilmiş olup sonuçların geçmiş dönemlere oranla değişiklik göstermediği görülmüştür (Küçükosmanoğlu & Küçükosmanoğlu, 2024). Gelişen teknolojiye rağmen kaza riskinin azalmaması, artan trafik yoğunluğu ile açıklanabilir. UEİM tarafından 2016-2024 yılları arasında tutulan kayıtlar ve deniz kazalarına yönelik bilgiler Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. 2020-2024 Yılları Deniz Kaza İstatistikleri

Yıl	Kaza / Olay Sayısı	Sağ Kurtarılan Kişi Sayısı	Ölü Olarak Bulunan Kişi Sayısı	Yaralı Sayısı	Kayıp Olan Kişi Sayısı
2024	379	899	45	32	12
2023	244	728	19	25	42
2022	250	1.036	23	19	34
2021	523	1.228	43	24	23
2020	594	1.411	122	16	40
2019	373	1.606	56	74	35
2018	111	444	19	13	22
2017	191	520	43	34	27
2016	24	11	25	4	1

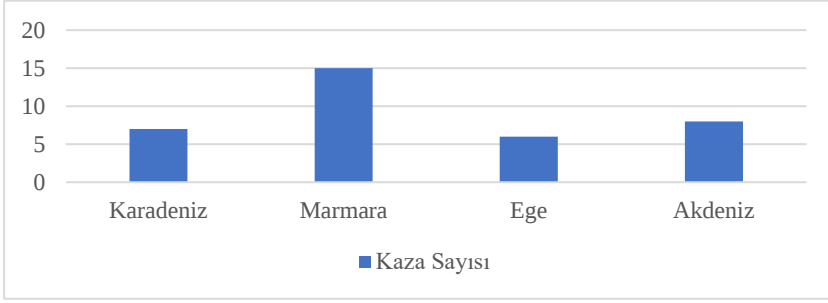
2010-2024 yılları arasında ve tamamı Türkiye Cumhuriyeti karasularında ÇCK kategorisinde gerçekleşmiş, farklı tip ve bayraklı gemilerin karıştığı 36 kaza ve bu kazalarda yer alan 51 geminin, Ulaştırma Emniyeti İnceleme Merkezi (UEİM) tarafından tanzim edilen raporlardan elde edilen verileri incelendiğinde (UEİM, 2025), kazaların yıllara göre dağılımı Grafik 1’de gösterilmiştir.



Grafik 1. Kazaların Yıllara Göre Dağılımı

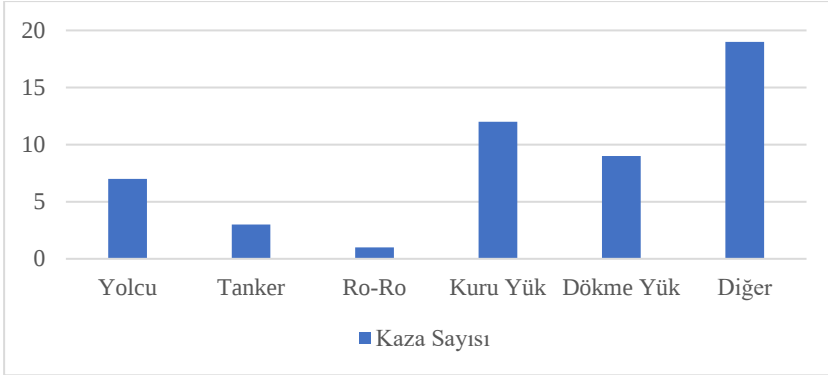
Meydana gelen kazalar coğrafik açıdan değerlendirildiğinde, Marmara Denizi’nin gerek yoğun trafik hatlarının barındırdığı potansiyel risk gerekse de sahip olduğu su yollarının fiziksel tehlikeleriyle öne çıktığı görülmektedir. ÇCK kategorisinde meydana gelen kazaların yaklaşık %42’sinin bu

bölgede yaşanması potansiyel risklerin tehlikesine yönelik önemli ip uçları vermektedir. Marmara Denizi'nin, Çanakkale ve İstanbul Boğazlarına ev sahipliği yapması, boğaz yaklaşma rotalarında mevcut yoğun deniz trafiğine ek olarak uzun bekleme süreleri de göz önüne alındığında risklerin arttığı görülmektedir.



Grafik 2. Kazaların Bölgelere Göre Dağılımı

UEİM tarafından raporlaştırılarak incelenen kazalara karıştığı tespit edilen gemiler tip bazında incelendiğinde, kategorize edilmiş gemi tipleri içerisinde en yüksek oranının kuru yük gemilerinde olduğu görülmektedir.



Grafik 3. Kazaların Gemi Tiplerine Göre Dağılımı

3. TÜRKİYE DENİZCİLİK COĞRAFYASI VE RİSK ALANLARI

Türkiye'nin denizciliğe dayalı stratejik değeri tarih boyunca önemini korumuştur. Tarihin her döneminde Karadeniz, Marmara, Ege ve Akdeniz'in birleştiği özel konumu Türkiye'yi hem bölgesel hem de küresel anlamda kilit bir aktör hâline getirmiştir. Ülke, uluslararası ticaretin yaklaşık %90'ının deniz yoluyla yapıldığı günümüzde bu potansiyeli hem ekonomik hem de jeopolitik açıdan değerlendirebilecek bir konumdadır. Ancak bu avantajlı coğrafya aynı zamanda çeşitli riskleri de beraberinde getirmektedir.

Uçarlı 2025'de yaptığı çalışmada; “Türkiye için mavi sular, yalnızca coğrafi bir gerçeklik değil, aynı zamanda tarih boyunca ekonomik, stratejik ve güvenlik açısından yaşamsal bir unsur olmuştur” (Uçarlı, 2025) tespitiyle Mavi Vatan konsepti üzerinden coğrafyayı okumanın öneminden bahsetmiştir.

Coğrafyayı çözümlemenin en kolay yollarından biri, sahip olduğumuz su yollarına jeostratejik bir çözümlemeyle bakmaktır. Bu bağlamda gerek denizlerimiz gerekse de boğazlarımızı inceleyecek olursak;

Karadeniz: Kapalı bir havza yapısına sahip olması ve Montrö Boğazlar Sözleşmesi'ne dayanan özel rejimi nedeniyle Türkiye için jeopolitik açıdan kritik bir bölgedir. Bulgaristan, Rusya, Ukrayna, Gürcistan ve Romanya gibi ülkelerle ticaret ve güvenlik ilişkilerinin merkezini oluşturur. Karadeniz'in son dönemde, hidrokarbon yataklarının keşfi, sondaj çalışmaları ve enerji nakil hatlarının varlığıyla önemi daha da artmıştır.

Marmara Denizi: Tamamen Türkiye sınırları içinde yer alan tek iç denizdir. İstanbul ve Çanakkale boğazlarını birbirine bağlaması nedeniyle dünya deniz taşımacılığında benzersiz bir konuma sahiptir. Bu özelliklerinin yanı sıra, stratejik kanallar ve boğazlar, yüksek trafik yoğunluğu ve karmaşık seyrüseferin kaza

ve deniz kirliliği olasılığını artırdığı hayati deniz koridorlarındandır (Arıcan, 2024). Marmara Denizi bu özelliklerinin yanı sıra önemli sanayi kuruluşları ve limanlara ev sahipliği yapmasıyla yüksek önem düzeyine sahip bir su kütesidir.

Ege Denizi: Adalar sorunu, kıta sahanlığı tartışmaları ve yoğun ticaret trafiği nedeniyle hem ekonomik hem de jeopolitik açıdan hassas bir bölgedir. Karadeniz’i dünyanın geri kalanına bağlayan su yolları ve stratejik kanalların intikal rotaları Ege Denizi’nden geçmekte olup bu açıdan gerek ülkemiz gerekse de Karadeniz’e kıyıdaş diğer ülkeler için önemli bir sahadır.

Akdeniz: Türkiye’nin Ortadoğu, Kuzey Afrika ve Avrupa’ya açılan kapısı olup enerji taşımacılığı bakımından stratejik öneme sahiptir. Özellikle, Doğu Akdeniz’e kıyısı olan ülkelerin siyasi ve askeri açıdan süregelen istikrarsızlıkları ülkemizin bu coğrafyada önemli bir aktör olmasına yol açmaktadır.

Türk boğazları: Yılda on binlerce geminin geçtiği hayati bir uluslararası su yolu niteliğindedir. İstanbul Boğazı’nın doğal bir kanal olması, keskin dönüşler ve akıntılar nedeniyle navigasyonu zorlaştırmaktadır. Çanakkale Boğazı ise hem askeri hem ticari açıdan stratejik bir geçiş noktasıdır. Her iki boğazdan 2008 ve 2024yılları arasında geçen gemi istatistikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. 2008-2024 Boğaz Geçiş İstatistikleri

İstanbul Boğazı			Çanakkale Boğazı	
Yıllar	Gemi	Gros Ton	Gemi	Gros Ton
2008	54.396	515.639.614	48.978	657.396.892
2009	51.422	514.656.446	49.453	667.412.661
2010	50.871	505.615.881	46.686	672.843.533
2011	49.798	523.543.509	45.379	705.412.518
2012	48.329	550.526.579	44.613	735.728.537
2013	46.532	551.771.780	43.889	745.567.671
2014	45.529	582.468.334	43.582	761.631.756
2015	43.544	565.216.784	43.230	777.989.382
2016	42.553	565.282.287	44.035	772.922.682
2017	42.978	599.324.748	44.615	823.460.636
2018	41.103	613.088.166	43.999	849.140.218
2019	41.112	638.892.062	43.759	872.312.222
2020	38.404	619.758.776	42.036	858.844.972
2021	38.551	631.920.375	43.342	898.473.519
2022	35.146	541.444.690	42.340	871.621.677
2023	39.000	621.638.378	44.892	941.519.970
2024	41.363	639.773.180	45.849	958.384.821

Taşlıgil 2002’de, Karadeniz’e kıyıdaş ve komşu ülkelerin Romanya, Rusya Federasyonu, Bulgaristan, Moldova, Ukrayna, Gürcistan hatta Hopa ve Trabzon Limanları aracılığıyla İran’ın denizlere açılan kapısının Türk Boğazları olduğunu ifade etmiş ve boğazların bizim olduğu kadar diğer ülkeler için de oldukça önemli olduğunu vurgulamıştır (Taşlıgil, 2004).

3.1. Ülke Denizciliği Etkileyen Başlıca Risk Alanları

Türkiye’nin denizcilik coğrafyasından kaynaklanan avantajları, aynı zamanda çok boyutlu risklerle iç içe geçmiştir. Bu riskler yalnızca ekonomik faaliyetleri değil ulusal güvenliği, çevresel sürdürülebilirliği, uluslararası ilişkileri ve deniz taşımacılığına yönelik emniyet boyutlarını da doğrudan etkilemektedir. Aşağıda Türk denizciliğini etkileyen temel risk alanları genişletilmiş biçimde ele alınmıştır.

3.1.1. Jeopolitik Riskler

Karadeniz’deki güç dengeleri: Rusya-Ukrayna çatışmaları, NATO’nun varlığı ve enerji güvenliği konuları Türkiye’nin boğazlar üzerindeki kontrolünü hassas hâle

getirmektedir. Montrö Boğazlar Sözleşmesi hükümlerinin uygulanması ve kıyıdaş ülkeler arası iş birliği anlaşmaları ile güven ortamı yüksek olan Karadeniz'in politik anlaşmazlıklardan kaynaklı çatışma ortamına evrilmesi olası riskleri ön görülemez düzeyde arttırmış ve seyrüsefer emniyetini büyük ölçüde etkilemiştir (Ünal vd., 2022).

Karadeniz'in kapalı deniz statüsü, barındırdığı hidrokarbon kaynaklar ile enerji nakil hatları, tahıl koridoru ve uluslararası ticaret rotalarına yönelik artan tehditler beraberinde güvenlik risklerinin artmasına neden olmakta, alternatiflerin kısıtlılığı ise bölgeye yönelik güvenlik ihtiyacının üst seviyede hissedilmesine neden olmaktadır.

Doğu Akdeniz enerji rekabeti: Bölgede paydaş sayısının fazla ancak resmi olarak yapılan anlaşmaların az oluşu, Doğu Akdeniz harekât sahasında uluslararası mutabakatın oluşmasını güçleştiren en temel potansiyel sorun sahası olarak görülmektedir. Bölgede son yıllarda artan hidrokarbon arama faaliyetleri ve ülkeler arası kıta sahanlığı anlaşmazlıkları bölgesel gerginlikleri artırmaktadır.

Uzak Doğu'nun Avrupa'ya açılan kapısı Süveyş Kanalı'nın da yer aldığı coğrafya birçok farklı ülkenin ortak paydası olmakla birlikte özellikle son dönemde artan istikrarsızlık bu sularda mevcut riskin katlanmasına neden olmaktadır.

Ege Denizi ihtilafları: Denizi paylaşan iki ülkenin farklı tezler ve argümanlarla yürüttükleri müzakerelerin nihai olarak sonuçlanmaması, gayri askeri statüde olması gereken adaların silahlandırılması, karasuları ve deniz yetki alanları gibi politik ve askeri konuların günümüzde halen çözülememiş olması adalar denizinde mevcut risklerin başında yer almaktadır.

Türk Boğazları: Alternatifsiz ve oldukça zorlu fiziksel koşullara sahip Çanakkale ve İstanbul Boğazlarının yoğun gemi trafiğine ev sahipliği yapması beraberinde yüksek riskin meydana

gelmesine neden olmaktadır. Dar ve yoğun trafiğe sahip bu su yollarında deniz emniyetini sağlamak, özellikle Türk Boğazları gibi stratejik düğüm noktalarında büyük bir zorluktur (Arıcan, 2025). Trafik akışında meydana gelebilecek olası aksamanın tolere edilebileceği başka su yollarının bulunmaması gerek Türkiye gerekse de Karadeniz’e kıyıdaş diğer ülkeler için en önemli risk faktörlerinin başında yer almaktadır.

3.1.2. Çevresel Riskler

Deniz kirliliği: Karadeniz’den ağırlıklı güney yönlü yoğun tanker trafiği ve petrol taşımacılığı, özellikle boğazlarda ciddi kaza riskleri ve çevresel tehditler oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, kimyasal ve tehlikeli diğer maddeleri taşıyan gemi trafiğinin yoğunluğu bölgesel açıdan bir diğer önemli risk faktörüdür.

İklim değişikliği: Küresel ısınma ve sera gazı seviyesinde yaşanan artış beraberinde deniz seviyesinde artışa neden olmaktadır. Su seviyesindeki yükselme, kıyı erozyonu ve balıkçılık üzerindeki diğer etkiler Türkiye’yi doğrudan tehdit eden önemli faktörler arasında yer almaktadır.

Müsilaj ve ekosistem bozulması: Özellikle Marmara Denizi’nde yoğun nüfus ve endüstriyel atıklar deniz ekosistemini tehdit etmektedir. Denizlere gerekli filtrasyon yapılmaksızın karışan inorganik maddeler deniz ekosistemi üzerinde geri döndürülmesi güç etkilere neden olmakta ve biyolojik çeşitlilik başta olmak üzere birçok risk faktörünü ortaya çıkarmaktadır.

Sismik ve Jeolojik Riskler: Türkiye’nin deprem kuşağında yer alması, kıyı şehirleri ile liman tesisleri açısından potansiyel bir tehlikedir. Marmara Denizinde mevcut fay hatları özellikle deniz taşımacılığı altyapısını tehdit eden başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Ayrıca Marmara Limanları hinterlandı göz önüne alındığında alternatiflerin sayıca azlığı

jeolojik risklerin olası sonuçlarının yıkıcı boyutlara ulaşmasına neden olma potansiyelini arttırmaktadır.

3.1.3. Ekonomik ve Lojistik Riskler

Küresel ticaret dalgalanmaları: Politik ve asimetrik krizler nedeniyle küresel piyasalardaki dalgalanmalar navlun piyasalarını doğrudan etkilemektedir. Üretimde arz talep dengesi ve lojistik faaliyetlerin sürekliliği göz önüne alındığında ticari dalgalanmaların ülke limanlarında elleçlenen yük hacimlerini doğrudan etkileyeceği anlaşılmaktadır.

Rekabet baskısı: Önemli su yolları üzerinde bulunan ülkemiz gibi yakın coğrafyalarda bulunan diğer ülke limanları da oldukça cazip fırsatlar sunmaktadır. Ülkemizin faaliyet gösterdiği coğrafya da faaliyet gösteren diğer limanların gelişimi ve sunduğu fırsatlar rekabet baskısı yaratmaktadır. Özellikle, Yunanistan ve Mısır limanları Doğu Akdeniz’de en ciddi rakiplerdir. Liman ve su yolu yatırımlarının rekabetçiliği artırıcı şekilde makro düzeyde bir planlamayla ele alınması ve fırsatların tespit edilerek proaktif bir yaklaşım sergilenmesi rekabet baskısının azaltılmasına yarar sağlayacaktır.

Altyapı ihtiyaçları: Günümüz deniz taşımacılığında temel amaç, gemilerin limanda süre açısından daha az kalarak daha çok seyir yapmaları, bu sayede gemilerin daha verimli bir şekilde kullanılması ve taşıma maliyetlerinin azaltılarak maksimum kar elde edilmesidir (Ünal, Arslan, & Arıcan, 2022). Artan rekabet ortamında küresel pazardan daha fazla pay alabilmenin bir diğer yolu da sunulan hizmet kalitesi ve iş süreçlerinin geliştirilmesidir. Liman kullanıcılarına sağlanacak hizmetin geliştirilebilmesi perspektifinde Türk limanlarının modernizasyon gereksinimleri rekabet gücünü sınırlayabilecek faktörlerin başında yer almaktadır.

4. SONUÇ

Türkiye'nin denizciliğe yönelik risk alanları, ülkenin sahip olduğu jeostratejik konumun hem avantaj hem de kırılganlık yaratmasıyla doğrudan ilişkilidir. Karadeniz, Ege ve Doğu Akdeniz gibi jeopolitik açıdan hassas deniz havzalarının kesişiminde yer almak, Türkiye'yi bölgesel güvenlik denkleminin merkezine yerleştirmektedir. Bu nedenle uluslararası krizler, güç mücadeleleri ve deniz yetki alanı anlaşmazlıkları Türkiye'nin deniz taşımacılığı, enerji güvenliği ve dış politika manevra alanını sürekli olarak etkilemektedir. Bu jeopolitik karmaşıklık, Türkiye'nin denizcilik politikalarını geleneksel güvenlik paradigmasının ötesine taşıyarak diplomasi, hukuk, enerji politikası ve askeri planlamanın eş zamanlı kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Çevresel ve jeolojik riskler ise Türkiye'nin denizcilik altyapısını hem kısa vadeli hem uzun vadeli tehditlerle karşı karşıya bırakmaktadır. Boğazlardan geçen yoğun tanker trafiği, tek bir kazanın bile çevresel ve ekonomik sonuçları yıllarca sürecektir felaketlere yol açabilme ihtimalini barındırmaktadır. Marmara Denizi'nin maruz kaldığı müsilaj ve kirlilik, sadece ekosistemi değil, aynı zamanda ticaret yolları, liman faaliyetleri ve turizm gibi sektörleri de zayıflatma potansiyeline sahiptir. Bunun yanında Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yer alan liman kentleri, olası büyük bir depremin lojistik zincirinde yaratacağı kesintiler nedeniyle ulusal ve uluslararası ticaret açısından ciddi bir kırılganlık yaratmaktadır.

Güvenlik, teknik ve operasyonel riskler Türkiye'nin denizcilik kapasitesinin sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir. İstanbul Boğazı gibi doğal su yollarında görülen navigasyon zorlukları, yoğun şehirleşme ile birleştiğinde deniz kazalarının olasılığını artırmaktadır. Ayrıca limanlarda yaşanan altyapı yetersizlikleri, gemi filosunun yaş ortalamasının

yüksekliği ve dijital dönüşüm sürecindeki eksiklikler Türkiye'nin uluslararası rekabet gücünü sınırlayabilmektedir. Siber güvenlik tehditlerinin artması hem liman otomasyon sistemlerini hem de gemi seyir teknolojilerini kırılgan hâle getirerek denizcilik operasyonlarının bütünlüğünü riske sokmaktadır.

Tüm bu riskler ışığında Türkiye'nin denizcilik alanında izlemesi gereken strateji, çok boyutlu ve entegre bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Jeopolitik krizlere karşı diplomatik kapasitenin güçlendirilmesi, çevresel tehditlere karşı bilimsel temelli politika ve yatırımların artırılması, liman ve filo altyapısının modernizasyonu, siber güvenliğin stratejik öncelik hâline getirilmesi ve deniz hukukunda etkin pozisyonların sürdürülmesi bu bağlamda kritik önem taşımaktadır. Türkiye, bu riskleri proaktif ve bütüncül şekilde yönetebildiği ölçüde hem deniz ticaretindeki rekabet gücünü artıracı olacak hem de sahip olduğu stratejik konumu sürdürülebilir bir avantaja dönüştürebilecektir.

KAYNAKÇA

- Arıcan, O. H. (2024). Stratejik su yollarında risk yönetimi için römorkör atamalarının optimize edilmesi: İstanbul Boğazı vaka çalışması. *Ships and Offshore Structures*.
- Arıcan, O. H. (2024). Türk karasularında gerçekleşen gemi kazalarının denizcilik sözleşmeleri ihlalleri üzerine araştırma. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, s. 75.
- Arıcan, O. H. (2025). Dar boğazlarda gemi güvenliği için en uygun römorkör yerleşimi: Çanakkale Boğazı'nda örneklediği gibi, Bulanık Delphi ve P-Medyan yaklaşımı. *Ships and Offshore Structures*, s. 1-13.
- Arıcan, O. H., Arslan, O., & Ünal, A. U., (2023). The Importance of CATZOC in Passage Planning and Prioritization of Strategies for Safe Navigation. *MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY BULLETIN* , vol.12, no.4, 445-458.
- Asyalı, E., & Kızılkapan, T. (2012). Türkiye Kıyılarında 2004-2008 Yıllarında Uluslararası Sefer Yapan Gemilerin Karıştığı Deniz Kazalarının Analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*, s. 28-29.
- Balık, İ., Aydın, S. Z., & Bitiktaş, F. (2022). Türk Boğazları trafik yoğunluğu, bekleme süreleri ve deniz kazaları. *Kent Akademisi*.
- Chen, J., Bian, W., Wan, Z., Wang, S., Zheng, H., & Cheng, C. (2020). Factor assessment of marine casualties caused by total loss. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, s. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101560>.
- Chen, J., Bian, W., Wan, Z., Yang, Z., Zheng, H., & Wang, P. (2019). Identifying factors influencing total-loss marine accidents in the world: Analysis and evaluation based on ship types and sea regions. *Ocean Engineering* .

- EMSA. (2025). *EMSA Outlook 2025*.
- Genç, S. D., & Arıcan, O. H. (2025). Türk karasularında gemi kazaları üzerine bir inceleme. *International Prizren Scientific Researches And Innovation Congress*.
- IMO. (1974). SOLAS.
- IMO. (2000). *Casualty-related matters reports on marine casualties and incidents*.
- IMO. (2002). Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability. 4.
- IMO. (2008). Adoption of the code of the international standards and recommended practices for a safety investigation into a marine casualty or marine incident (casualty investigation code).
- Küçükosmanoğlu, A., & Küçükosmanoğlu, Ö. A. (2024). Türkiye’de deniz kazası olasılığının incelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, s. 40.
- Özbağ, G. K., Arıcan, Ozan Hikmet & O. A. (2023). Gemi personelinin emniyet iklimi algısı üzerine bir araştırma. *İş’te Davranış Dergisi*, s. 21.
- Taşlıgil, N. (2004). İstanbul Boğazı’nın ulaşım coğrafyası açısından önemi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, s. 3.
- UAB. (2012). Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Terimleri Sözlüğü. 313.
- Uçarlı, B. Ş. (2025). Deniz hakimiyeti teorisi perspektifinden 21.yüzyılda Türkiye’nin deniz jeopolitiği. 162.
- UEİM. (2025). <https://ulasimemniyeti.uab.gov.tr/deniz> adresinden alındı

- Ünal, A. U., Arslan, O., & Arıcan, O. H. (2022). Türkiye’de Ro-Ro taşımacılığının önemi ve geleceği hakkında örnek bir çalışma. *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*, s. 61.
- Ünal, A. U., Arıcan, O. H., & Arslan, O., (2022). A Study On The Effects Of Clc 69 Convention and Clc 92 Protocol Applications On Ship Passage In Turkish Straits. *International Journal Of Afro-Eurasian Research (Ijar)* , Vol.7, No.13, 41-56.
- Wang, H., Liu, Z., Wang, X., Graham, T., & Wang, J. (2021). An analysis of factors affecting the severity of marine accidents. *Reliability Engineering and System Safety*, s. 7-9.
- Yalçın, T. (2014). Çatmalarda kusur oranlarının belirlenmesi, ulusal ve uluslararası düzeyde incelenerek bir model önerilmesi.

MACHINE LEARNING APPROACHES IN MARITIME TRANSPORTATION

Süleyman Doğan GENÇ¹

Osman ARSLAN²

1. INTRODUCTION

Maritime transportation is one of the most important activities in the global economy. Without maritime transportation, the world would not have been able to reach its current level of globalization and economic development (Fratila et al., 2021). Maritime transportation plays a decisive role in economic development as a fundamental component of global trade, due to its direct and indirect impacts on a wide range of sectors (Bai et al., 2021). Maritime transportation is a continuously evolving industry driven by the need to meet growing demands, and its improvement is closely associated with overall economic growth (Canbay, 2024). The economic strength induced by maritime transportation also enables the evolution of digitalization and artificial intelligence (AI) driven technologies and solutions (Gündoğan & Keçeci, 2024). At this point, the maritime industry, which fosters technological advancement, supports a new technological orientation known as Machine Learning. The concept of Machine Learning (ML) is an AI application that has been becoming more prevalent within the maritime industry. Rapid advancements in ML techniques have

¹ Kocaeli University, Institute of Science, Department of Maritime Transportation Engineering, ORCID: 0009-0005-8488-5049.

² Doç. Dr. Kocaeli University, Maritime Faculty, Department of Marine Engineering, ORCID: 0000-0003-4384-3510.

led to their expanding acceptance as they enhance operational efficiency, enable faster outcomes, and achieve higher predictive accuracy in estimating accident severity, anomaly detection, and related risk-oriented scenarios (Akyuz et al., 2019; Munim et al., 2024; Cao et al., 2025). This situation has given rise to the need to address the question of which ML applications are preferred within the maritime sector. Accordingly, this study has been designed to present an analysis of the areas in which ML has begun to be actively applied in maritime operations.

2. MACHINE LEARNING

Machine Learning can be defined as an algorithmic approach that enables software systems to perform predictive tasks through AI without the need for explicit pre-programming, while iteratively improving the accuracy of predictions over time (Akyuz et al., 2019). ML methods, which have begun to be applied across various industries, are commonly used in all areas of the logistics sector, a field that is at the forefront of technological advancements (Aylak et al., 2021). ML applications can be classified into three categories based on system input: Supervised Learning, Unsupervised Learning, and Reinforcement Learning.

2.1. Supervised Learning

This approach aims to enable the system to learn a function capable of predicting outputs for new inputs by using datasets in which the inputs and their corresponding outputs are known in advance, and it is employed to produce discrete outputs in classification problems and continuous-valued outputs in regression problems (Akyuz et al., 2019; Morales & Escalante, 2022). The Supervised Learning approach can be subdivided into Logic-Based Techniques, Perceptron-Based Techniques,

Statistical Learning Techniques, Support Vector Machines (SVM), and Instance-Based Learning (Soofi & Awan,2017).

2.2. Unsupervised learning

This approach is a ML paradigm that operates on datasets consisting solely of inputs without any labeled output information, with the aim of uncovering hidden patterns, similarities, and structural relationships within the data and grouping data points according to these structures. Clustering, Association, Anomaly Detection, and Autoencoders are among the main types of Unsupervised Learning (Naeem et al., 2023).

2.3. Reinforcement learning

This approach aims to learn a behavior policy that maximizes the expected cumulative reward through a trial-and-error process, in which a decision-making software system continuously interacts with its environment, selects appropriate actions in each state, and updates its policy based on reward or penalty feedback obtained as a result of those actions (Pendharkar & Cusatis, 2018; Morales & Escalante, 2022). A review of the literature indicates that the Reinforcement Learning (RL) approach encompasses several types, including Model-Based RL, Model-Free RL, Deep RL, Multi-Agent RL, Hierarchical RL, and POMDP-based RL.

3. MACHINE LEARNING BASED APPROACHES IN MARITIME TRANSPORTATION

Maritime transportation is the predominant mode of transport among logistics modes (Zhou et al., 2021; Akkan, 2022; Canbaz & Yorulmaz, 2023). Accordingly, ML has begun to be applied at critical points within maritime transportation. Based on literature searches conducted in the Scopus, Web of Science (WoS), and Google Scholar indexes, it is observed that ML-based

approaches in maritime transportation predominantly focus on areas such as maritime accident prediction, safety-related trends, behavioral interpretation of vessels, the integration of AIS and other navigational systems to develop efficiency-enhancing methods, fuel consumption forecasting, speed prediction under varying conditions, and the prediction and detection of anomalous situations. In order to identify trends in the ML methods preferred in maritime transportation, a total of ten selected academic studies from the literature were systematically examined, as presented in Table 1. Attention was paid to ensuring that these academic studies were up to date. Within this scope, the selected studies were evaluated in terms of their application domains, the ML algorithms employed, data structures, and research objectives. Accordingly, the study aims to identify which ML-based approaches are concentrated around specific methods in the field of maritime transportation, the purposes for which they are preferred, and the prominent methodological trends in the existing literature.

Table 1. A Literature Review of Machine Learning Applications in the Maritime Sector

N O	Article Title	Author(s)	Key Words	Field of Application	Yayın yılı	Machine Learning Methods
1	Development of an Interpretable Maritime Accident Prediction System Using Machine Learning Techniques	Gyeongho Kim; And Sunghoon Lim	Maritime accident, ocean engineering, accident prediction, interpretable machine learning.	Maritime accidents, safety management	2022	XGBoost, Random Forest, SVM, MLP
2	Improving maritime accident severity prediction accuracy:A holistic machine learning framework with data balancing and explainability techniques	Wenjie Cao; Xinjian Wang; Yuanjun Feng; Jingen Zhou; Zaili Yang	Maritime safety, Marine accidents, Machine learning, Explainable AI, SHAP, LIME.	Estimation of marine accident severity using ML	2026	LR, DT, RF, ET, NN, LightGBM, XGBoost, CatBoost

3	Predicting Vessel Speed Over Ground: A Machine Learning Approach for Enhancing Maritime Transport	Ismail Bourzak; Loubna Benabbou; Sara El Mekkaoui; Abdelaziz Berrado; Stéphane Caron	Maritime transport, vessel, speed over ground, machine learning, Data-driven decision-making	Estimation of ship speed (SOG) using ML	2025	MLP, CNN, LSTM, BiLSTM, RF, XGBoost, Transformer
4	Predictive Performance Assessment in Simulation Training using Machine Learning	Z.H. Munim; F. Kjeldsberg; M. Bustgaard; S. Bhagat; P. Haavardtun; T-E. Kim; E. Lindroos; H. Thorvaldsen; F. Nyairo; J. Lampiola	Simulator training, Training and assessment, Learning analytics, Artificial intelligence, Machine learning	Behavioural interpretation based on manoeuvring and speed control	2025	XGBoost, LightGBM, Random Forest, Decision Tree methods, Logistic Regression (L2), SGD Classifier
5	Unsupervised Port Berth Localization from Automatic Identification System Data	Hadjipieris, A.; Dimitriou, N.; Arandjelović, O.	Maritime, shipping, AIS, spatial clustering, machine learning, minimum description length, hyperparameter tuning	Port Operations, Spatial Data Analysis	2025	DBSCAN, GMM, MDL, TPE, KLD, MCI, SDA
6	Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning	Korupoju, A.K.; Kapadia, V.; Vilwathilakam, A.S.; Samanta, A.	Artificial Intelligence (AI) Automatic Identification System (AIS) Ship collision risk evaluation (SCRE) Deep learning (DL) Weather data Fuzzy logic Self-Attention and Intersample Attention Transformer (SAINT)	Predicting the risk of ship collision (ECRI-W) with high accuracy by integrating AIS and weather data	2025	SAINT, InfoNCE, MLP, Z-Normalization

7	A comprehensive survey on the applications of machine learning techniques on maritime surveillance to detect abnormal maritime vessel behaviors	Gamage, C, Dinalankara, R., Samarabandu, J., Subasinghe, A.	Maritime surveillance, Anomaly, detection, Deep learning	Classifying machine learning methods used in detecting abnormal ship behaviour and comparing their performance	2023	SVM / SVR, CNN / 1D-CNN, LSTM, HMM, RF, ANN
8	Predicting maritime accident risk using Automated Machine Learning	Ziaul Haque Munim, Michael Andre Sörli, Hyungju Kim, Ilan Alon	Maritime safety Maritime accident Machine learning Classification tree Artificial intelligence	Predicting types of maritime accidents with high accuracy using AutoML-based multi-class machine learning	2024	LightGBM, GBM, XGBoost, RF
9	Accident data-driven human fatigue analysis in maritime transport using machine learning	Shiqi Fan, Zaili Yang	Maritime safety Maritime transport Human factors Human fatigue Bayesian network	Analysing the contribution of human fatigue in maritime transport to maritime accidents based on accident data, using a machine learning-supported model without psychological data	2024	BN, TAN, Cross-Validation (6-fold), MIA
10	Maritime decarbonization through machine learning: A critical systematic review of fuel and power prediction models	Nguyen, S.; Gadel, M.; Wang, K.; Li, J.; Zhang, X.; Kong, S-C.; Fu, X.; Qin, Z.	Maritime transportation Maritime decarbonization Fuel consumption Power requirement Machine learning Literature review	Data, algorithm, validation and explainability of ML models used in estimating fuel consumption and propulsion power in maritime transport	2025	MLP, LSTM, Extreme Learning Machine, BLS, RF, XGBoost, LightGBM, CatBoost

Each study presented in this table is examined in detail in the following sections.

In their study, Kim and Lim (2022) focus on the prediction of maritime accidents and risk analysis within maritime transportation. Their research encompasses maritime accidents involving coastal and offshore operations, fishing vessels, maritime safety and security management, intelligent and data-driven maritime safety systems, as well as autonomous ship navigation and decision-support systems (Kim & Lim, 2022). The primary objective of the authors is to develop an ML based maritime accident prediction system that can forecast maritime accidents in advance, provide explainable prediction outcomes, and be operationally applicable. Among the ML methods, the Ordinary Least Squares (OLS) regression technique was employed for variable selection. The k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm was utilized for estimating missing risk variables and for the data imputation process. To identify the spatial concentration of maritime accidents, the DBSCAN method was applied to detect accident hotspots. XGBoost was selected as the primary model for predicting maritime accident severity. In order to compare model performance, Linear Regression, Support Vector Machines (SVM), Multilayer Perceptron (MLP), and Random Forest (RF) algorithms were also implemented. To ensure the explainability of the prediction results, LIME and SHAP methods were used. The findings indicate that the XGBoost model achieved the highest predictive performance compared to the other methods. Gross tonnage, water depth, wave height, and variables related to fishing activities were identified as critical risk factors in predicting maritime accident severity. Furthermore, DBSCAN analysis revealed that accidents are spatially concentrated in specific regions, while LIME and SHAP confirmed that the model outputs are both interpretable and consistent (Kim & Lim, 2022).

In their study, Cao et al. (2025) focus on the prediction of maritime accident severity and data-driven maritime safety risk

management within maritime transportation (Cao et al., 2025). The primary objective of the authors is to develop a comprehensive ML framework that enhances the prediction accuracy of maritime accident severity by mitigating issues arising from imbalanced datasets and by incorporating explainable artificial intelligence methods. In the study, eight different machine learning models were evaluated, and their performances were compared using cross-validation and hyperparameter optimization. To address the data imbalance problem, various data balancing techniques were applied, with Random Over Sampler being a primary method. Among the evaluated models, the CatBoost algorithm demonstrated the highest performance. To ensure the interpretability of prediction results, SHAP was employed for global feature contribution analysis, while LIME was used for local model explanations. The findings indicate that machine learning models supported by data balancing techniques significantly improve the performance of maritime accident severity prediction. In particular, the CatBoost model combined with Random Over Sampler achieved the highest accuracy, and SHAP and LIME analyses revealed that accident type, vessel type, engine power, and gross tonnage play a decisive role in accident severity (Cao et al., 2025).

In their study, Bourzak et al. (2025) focus on predicting vessels' speed over ground (SOG) in maritime transportation, with the aim of improving operational efficiency and supporting decision-making processes (Bourzak et al., 2025). The primary objective of the authors is to develop a framework that surpasses conventional speed prediction approaches by leveraging data-driven machine learning methods and that is capable of producing reliable and scalable SOG predictions across different vessel types and navigational conditions. In the study, various machine learning techniques were employed under both standard and sequential modeling approaches. Within the standard modeling

framework, Multilayer Perceptron (MLP), Convolutional Neural Networks (CNN), Random Forest (RF), and XGBoost algorithms were applied. For the sequential modeling approach, Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional LSTM (BiLSTM), and Transformer-based models were utilized to capture temporal and spatial dependencies. Model performance was comparatively evaluated against a traditional expert-based speed prediction approach. The findings indicate that machine learning models outperform conventional methods, with XGBoost and Transformer models demonstrating superior performance in SOG prediction (Bourzak et al., 2025).

In their study, Munim et al. (2024) focus on maritime accidents occurring in Norwegian coastal waters and address decision-support systems for accident type prediction within the context of maritime safety and operational risk analysis. The primary objective of the research is to develop a predictive framework that can accurately estimate the probability of different accident types using historical accident data and that enables the identification of the most suitable machine learning model through an AutoML approach (Munim et al., 2024). The study adopted an AutoML approach, and a total of 29 different classification algorithms were trained using the DataRobot platform. Within this framework, tree-based methods emerged as particularly prominent. Algorithms such as LightGBM, Gradient Boosted Trees, Random Forest, and XGBoost were comparatively evaluated. The findings indicate that tree-based machine learning models deliver superior performance in maritime accident type prediction, with the LightGBM model demonstrating the most favorable results (Munim et al., 2024).

In their study, Hadjipieris et al. (2025) focus on the problem of automatic berth identification in ports within maritime transportation. The application domain encompasses data-driven decision-support systems aimed at monitoring port operations,

conducting capacity analysis, identifying bottlenecks, and optimizing port logistics processes (Hadjipieris et al., 2025). The primary objective of the authors is to develop an automated method capable of accurately identifying berth locations from AIS data using unsupervised ML approaches in cases where port documentation is incomplete or erroneous. In this context, the study aims to establish a reliable berth localization framework that can be generalized across different port scales without requiring manual intervention. Accordingly, an unsupervised ML approach was adopted in the study. DBSCAN was employed to identify stationary vessel behaviors, while a Gaussian Mixture Model (GMM) was used to model berth structures. Model complexity was determined using the Minimum Description Length (MDL) principle, hyperparameter optimization was performed via Bayesian optimization, and performance evaluation relied on the Kullback–Leibler Divergence (KLD) and Bhattacharyya Distance metrics. The results demonstrate that the proposed method achieves higher accuracy and spatial consistency compared to existing berth detection approaches in the literature. In addition, the geohash-supported model was shown to reduce computational time and to be reliably applicable across ports of different scales (Hadjipieris et al., 2025).

In their study, Korupoju et al. (2025) focus on the assessment of ship collision risk in maritime transportation and present a data-driven approach that supports maritime safety through the integrated use of AIS and meteorological data in regions with dense maritime traffic (Korupoju et al., 2025). The primary objective of the authors is to develop a risk assessment framework capable of accurately predicting a comprehensive ship collision risk indicator, incorporating environmental conditions, through deep learning models. In the study, the SAINT model was employed due to its high performance on tabular data, and it was trained on AIS and meteorological datasets using self-supervised

pretraining followed by supervised fine-tuning. For performance comparison, SVM, Relevance Vector Machine (RVM), and Multilayer Perceptron (MLP) models were implemented, while a fuzzy logic approach was utilized to integrate multiple risk indicators. The findings demonstrate that the inclusion of environmental factors enhances collision risk prediction performance and that the SAINT model achieves the highest predictive accuracy (Korupoju et al., 2025).

In their study, Gamage et al. (2023) focus on the detection of anomalies in vessel behavior within the scope of maritime surveillance. The application domain encompasses decision-support and early warning systems aimed at identifying security threats such as illegal, unreported, and unregulated activities, smuggling, piracy, small vessel attacks, maritime accidents, and AIS signal manipulation (Gamage et al., 2023). The authors aim to systematically classify and compare the ML methods used for detecting anomalies in vessel behavior within the context of maritime security, to identify which learning approaches are more suitable for specific threat types, and to highlight future research trends. The study is a review in nature, examining machine learning methods applied in the existing literature. Within supervised ML, SVM, Random Forest (RF), Hidden Markov Models (HMM), Convolutional Neural Networks (CNN), and Long Short-Term Memory (LSTM) networks are prominently featured, while unsupervised ML approaches such as DBSCAN, One-Class SVM (OCSVM), Bayesian Networks (BN), Recurrent Neural Networks (RNN), Gaussian Mixture Models (GMM), and Markov chain-based methods are emphasized. The study particularly highlights the increasing adoption of deep learning techniques (Gamage et al., 2023).

In their study, Munim et al. (2025) aim to develop a framework for evaluating student performance in maritime simulation training using ML-based, objective, and data-driven

methods. The application domain involves Williamson Turn maneuvers performed within search and rescue (SAR) scenarios using desktop ship simulators, and the study contributes to data-driven performance assessment in maritime education through LAD-based learning analytics approaches (Munim et al., 2025). The study adopted an AutoML approach, and a total of 58 supervised ML models were trained using a cloud-based platform. The performances of algorithms such as Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM), Logistic Regression (LR), Artificial Neural Networks (ANN), LightGBM, and XGBoost were compared using Accuracy, AUC, and Log Loss metrics, with five-fold cross-validation applied. The results indicate that the XGBoost model achieved the highest predictive performance under both ballast and loaded vessel conditions. Feature importance analysis revealed that rudder angle and propeller revolutions are the primary determinants of student performance under ballast conditions, while propeller revolutions, speed over ground, and wind direction are the key variables under loaded conditions (Munim et al., 2025).

In their study, Fan and Yang (2024) examine the operational impact of human fatigue within the context of maritime safety and human factors, using maritime accidents reported by the Transportation Safety Board of Canada. The objective of the study is to develop a data-driven machine learning model capable of estimating the contribution of human fatigue to maritime accidents based on historical accident data. Within this framework, the study aims to identify critical risk factors influencing fatigue through objective variables contained in accident reports and to model the relationships among these factors (Fan & Yang, 2024). The study adopted a hybrid ML approach, employing LASSO for variable selection and a Bayesian Network (BN) structure based on the Tree-Augmented Naive Bayes (TAN) algorithm to model probabilistic and causal

relationships. The findings indicate that lighting conditions, accident type, operational area, visibility, and vessel damage are the most influential factors affecting human fatigue. Model complexity was reduced through LASSO, while the BN-TAN model reliably captured dependencies among risk factors. Furthermore, scenario and sensitivity analyses confirmed that the proposed framework provides an effective ML-based decision-support tool even under conditions of limited data availability (Fan & Yang, 2024).

In their study, Nguyen et al. (2025) focus on decarbonization and operational efficiency in maritime transportation through the estimation and prediction of vessels' fuel consumption and propulsion power requirements (Fuel and Power Estimation and Prediction – FEP). In particular, the role of ML-based models is examined within the framework of IMO-driven emission regulations and performance indicators such as the Carbon Intensity Indicator (CII) (Nguyen et al., 2025). The authors aim to systematically review ML-based fuel consumption and power prediction models developed between 2013 and 2024, evaluating them in terms of data structures, algorithms, performance, and practical applicability. Within this scope, the study identifies research gaps for reliable and certifiable ML solutions in the maritime sector by highlighting deficiencies related to data quality, comparability, explainability, and operational reliability in existing ML applications. The study adopts a systematic review approach and classifies the ML methods used in the literature. The reviewed studies predominantly feature ANN/MLP/LSTM architectures, tree-based algorithms (RF, GB, XGBoost, LightGBM, CatBoost), and SVM, while ensemble and hybrid approaches, Gaussian Process Regression (GPR), LASSO/Ridge, as well as AutoML and Bayesian optimization techniques are also widely employed. The findings indicate that ML-based FEP models offer higher

predictive accuracy than traditional physics-based approaches; however, limitations in data quality, evaluation standards, and explainability pose risks for practical implementation. Tree-based models are found to perform better on small- to medium-sized datasets, whereas deep learning models demonstrate superior performance with high-frequency sensor data. Beyond accuracy-oriented approaches, the study emphasizes the critical importance of data-centric ML frameworks that incorporate reliability, generalizability, and uncertainty analysis (Nguyen et al.,2025).

4. CONCLUSION

This study systematically reviews the literature to identify the current application areas and prominent methods of ML-based approaches in maritime transportation research. The findings indicate that ML applications primarily focus on predicting maritime accident types and severity, as well as on safety risk management and AIS-based navigation and operational analytics. In addition, there is a growing body of work addressing forward-looking predictive applications aligned with operational efficiency and decarbonization objectives, particularly through the detection of anomalous vessel behavior and the estimation of fuel consumption and propulsion power requirements. Methodological evaluations reveal that, in the maritime context, the balance between high predictive accuracy and operational applicability emerges as a decisive criterion. Accordingly, tree-based algorithms such as Random Forest, XGBoost, LightGBM, and CatBoost are widely preferred across different problem types, while deep learning models based on LSTM, BiLSTM, and Transformer architectures stand out in applications involving temporal dependencies and high-frequency data. This finding underscores the need for data-structure-sensitive model selection in the presence of heterogeneous maritime datasets, including

AIS, meteorological data, and accident records. One of the key contributions of ML to maritime transportation is its ability to enhance safety management by enabling early warning mechanisms and proactive risk mitigation, thereby improving predictive performance. The traceability and explainability of ML-based prediction outcomes for decision-makers further strengthen the reliability of decision-support systems. Nevertheless, the sustainable large-scale adoption of ML applications depends on improving data quality and representativeness, establishing comparable evaluation frameworks, and embracing data-centric approaches that jointly address explainability, reliability, and generalizability. Within this framework, ML emerges as a strategic tool in maritime transportation by strengthening safety and security, enabling data-driven optimization of operational performance, facilitating the quantitative analysis of human factors, providing more accurate predictive infrastructures for decarbonization targets, and increasing the foreseeability of potential hazards. From a future research perspective, directing attention to relatively underexplored areas—such as ML-based personnel assessment approaches, route and navigation optimization, and the optimization of the International Safety Management (ISM) System for maritime companies—is expected to broaden the scope of the literature and contribute to a more comprehensive and in-depth examination of maritime operations.

REFERENCES

- Akkan, M. M. (2022). Türkiye’de Denizyolu Taşımacılığının Performansını Etkileyen Faktörlerin Ağırlıklandırılmasına Yönelik Bir Analiz.
- Akyuz, E., Cicek, K., & Celik, M. (2019). A comparative research of machine learning impact to future of maritime transportation. *Procedia Computer Science*, 158, 275-280.
- Aylak, B., Oral, O., & Yazıcı, K. (2021). Using artificial intelligence and machine learning applications in logistics Yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin lojistik sektöründe kullanımı. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(1).
- Bai, X., Zhang, X., Li, K. X., Zhou, Y., & Yuen, K. F. (2021). Research topics and trends in the maritime transport: A structural topic model. *Transport Policy*, 102, 11-24.
- Bourzak, I., Benabbou, L., El Mekkaoui, S., Berrado, A., & Caron, S. (2025). Predicting vessel speed over ground: A machine learning approach for enhancing maritime transport. *IFAC-PapersOnLine*, 59(10), 1065-1070.
- Canbay, Ş. (2024). The analysis of relationships between global shipping networks and foreign trade volumes in developing countries. *Case Studies on Transport Policy*, 17, 101242.
- Canbaz, Ö., & Yorulmaz, M. (2023). Deniz taşımacılığı ve hizmet türleri. In *International Conference On Applied Engineering and Natural Sciences* (pp. 12-19).
- Cao, W., Wang, X., Feng, Y., Zhou, J., & Yang, Z. (2025). Improving maritime accident severity prediction accuracy: A holistic machine learning framework with

- data balancing and explainability techniques. *Reliability Engineering & System Safety*, 111648.
- Fan, S., & Yang, Z. (2024). Accident data-driven human fatigue analysis in maritime transport using machine learning. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109675.
- Fratila, A., Gavril, I. A., Nita, S. C., & Hrebenciuc, A. (2021). The importance of maritime transport for economic growth in the european union: A panel data analysis. *Sustainability*, 13(14), 7961.
- Gündoğan, O., & Keçeci, T. (2024). A TAM-Based Study on the Adoption of Digital Transformation in the Maritime Transportation Logistics Sector. *Journal of ETA Maritime Science*, 12(1).
- Gamage, C., Dinalankara, R., Samarabandu, J., & Subasinghe, A. (2023). A comprehensive survey on the applications of machine learning techniques on maritime surveillance to detect abnormal maritime vessel behaviors. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 22(4), 447-477.
- Hadjipieris, A., Dimitriou, N., & Arandjelović, O. (2025). Unsupervised port berth localization from automatic identification system data. *Sensors*, 25(22), 6845.
- Kim, G., & Lim, S. (2022). Development of an interpretable maritime accident prediction system using machine learning techniques. *IEEE Access*, 10, 41313-41329.
- Korupoju, A. K., Kapadia, V., Vilwathilakam, A. S., & Samanta, A. (2025). Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. *Ocean Engineering*, 318, 120116.
- Morales, E. F., & Escalante, H. J. (2022). A brief introduction to supervised, unsupervised, and reinforcement learning.

In Biosignal processing and classification using computational learning and intelligence (pp. 111-129). Academic Press.

Munim, Z. H., Kjeldsberg, F., Bustgaard, M., Bhagat, S., Haavardtun, P., Kim, T. E., ... & Lampiola, J. (2025). Predictive Performance Assessment in Simulation Training using Machine Learning. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 1-31.

Munim, Z. H., Sørli, M. A., Kim, H., & Alon, I. (2024). Predicting maritime accident risk using Automated Machine Learning. *Reliability Engineering & System Safety*, 248, 110148.

Naeem, S., Ali, A., Anam, S., & Ahmed, M. M. (2023). An unsupervised machine learning algorithms: Comprehensive review. *International Journal of Computing and Digital Systems*.

Nguyen, S., Gadel, M., Wang, K., Li, J., Zhang, X., Siang-Ching, K., ... & Qin, Z. (2025). Maritime decarbonization through machine learning: A critical systematic review of fuel and power prediction models. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 100210.

Pendharkar, P. C., & Cusatis, P. (2018). Trading financial indices with reinforcement learning agents. *Expert Systems with Applications*, 103, 1-13.

Soofi, A. A., & Awan, A. (2017). Classification techniques in machine learning: applications and issues. *Journal of basic & applied sciences*, 13, 459-465.

Zhou, C., Ma, N., Cao, X., Lee, L. H., & Chew, E. P. (2021). Classification and literature review on the integration of simulation and optimization in maritime logistics studies. *IIE Transactions*, 53(10), 1157-1176.

**MODERN DENİZCİLİKTE RİSK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK
ÜZERİNE ÇOK DİSİPLİNLİ YAKLAŞIMLAR**

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com