

Deniz Taşımacılığında Dekarbonizasyon Uygulamalarının Kaynak Temelli Görüş Bağlamında Alternatif Yakıtlar Açısından Değerlendirilmesi

Murat Bayraktar¹, Umur Bucak², Hakan Demirel³

¹ Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

² Denizcilik İşletmeleri Yönetimi Bölümü, Denizcilik Fakültesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye

³ Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Denizcilik Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹ bayraktarmurat@beun.edu.tr, 0000-0001-7252-4776

² (sorumlu yazar), bucak.umur@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5112-8133

³ hdemirel@itu.edu.tr, 0000-0002-7579-7064

ÖZET

Tonaj ve değer olarak küresel ticaretin taşınmasında en büyük paya sahip olan denizyolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonların dünya toplamı içindeki payı günden güne artmaktadır. Uluslararası Denizcilik Örgütü, bu gidişatı engellemek adına gemilerden kaynaklı emisyonların azaltılmasına yönelik regülasyonlar yayınlamıştır. Bu regülasyonlara göre gemilerden kaynaklı çeşitli zararlı gazlara ait emisyon oranları yıllar içerisinde daha da azaltılacaktır. Bu çerçevede denizcilik işletmeleri arasında hali hazırda üst seviyede seyreden rekabet sahası genişleyecektir. Bu kapsamda işletmelerin kendi kaynaklarını geliştirerek rekabetçi avantaj yakalayabileceğini savunan kaynak temelli bakış açısı yakıt teknolojisinin gelişimine uyum açısından denizcilik işletmelerine rehber olabilecektir. Bu çalışmada IMO 2050 kuralları kapsamında karbonu sıfırlayan alternatif gemi yakıtları çeşitli yönlerden değerlendirilmiştir. Alternatif yakıtlar içerisinde doğalgaz, metanol, amonyak, dizel, hidrojen sıvı ve hidrojen ele alınmış, teknik, ekonomik, lojistik vb. özellikleri detaylandırılmıştır. Değerlendirme kapsamında alternatiflerin teknik, ekonomik, lojistik vs. açılarından güçlü ve zayıf yönleri ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra ilgili yakıtlar bazı teknik özellikler kapsamında TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre Dizel yakıtın teknik açıdan gemiler için en iyi seçenek olduğu, bu yakıtı hidrojen ve doğalgazın izlediği ortaya konulmuştur. Hidrojenin teknik açıdan neredeyse dizel kadar etkili olması geleceğin karbonsuz yakıtının tespiti için önemli bir gelişme sunmaktadır. Bu bağlamda alternatif gemi yakıtları hem teknik özellikler hem de rekabetçi avantaj bağlamında ele alınarak teoriye katkı sağlanmıştır. Alternatif yakıtların kullanımı, tedariği, depolanması gibi konularda bilgi verilmesi ile uygulayıcılara bir bilişsel çerçeve sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alternatif yakıtlar, denizyolu taşımacılığı, kaynak temelli görüş, dekarbonizasyon

Makale geçmişi: Geliş 25/03/2022 – Kabul 22/07/2022

<https://doi.org/10.54926/gdt.1093206>

Evaluation of Decarbonization Applications in Maritime Transportation in Terms of Alternative Fuels in the Context of Resource-Based View

Murat Bayraktar¹, Umur Bucak², Hakan Demirel³

¹Department of Marine Engineering, Maritime Faculty, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye

²Department of Maritime Business Administration, Maritime Faculty, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Türkiye

³Department of Marine Engineering, Maritime Faculty, İstanbul Technical University, İstanbul, Türkiye

¹ bayraktarmurat@beun.edu.tr, 0000-0001-7252-4776

² (corresponding author), bucak.umur@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5112-8133

³ hdemirel@itu.edu.tr, 0000-0002-7579-7064

ABSTRACT

The share of emissions originating from maritime transport, which has the largest share in the transportation of global trade in terms of tonnage and value, in the world total is increasing day by day. The International Maritime Organization has published regulations to reduce exhaust gas emissions from ships to prevent this trend. According to these regulations, the emission rates of various harmful gases originating from ships will be further reduced over the years. In this framework, currently, the intensely competitive field of the maritime transport market will expand. In this context, the resource-based view, which argued that businesses can gain a competitive advantage by developing their resources, can guide maritime enterprises in terms of adaptation to the development of fuel technology. In this study, alternative marine fuels that neutralize carbon within the scope of the IMO 2050 rules have been evaluated from various aspects. Among the alternative fuels, natural gas, methanol, ammonia, diesel, hydrogen liquid, and hydrogen were discussed and their features as technical, economic, logistics, etc. were detailed. Within the scope of the evaluation, the strengths and weaknesses of the alternatives were revealed from various perspectives. In addition, the related fuels are listed using the TOPSIS method within the scope of some technical specifications. According to the results of the study, it was revealed that diesel fuel is the best option for ships from a technical point of view, followed by hydrogen and natural gas. The fact that hydrogen is technically almost as effective as diesel offers an important advance for the detection of carbon-free ship fuel of the future. In this context, alternative ship fuels have been discussed in terms of both technical features and competitive advantage, contributing to the theory. A cognitive framework was presented to the practitioners by providing information on the use, supply, and storage of alternative fuels.

Keywords: Alternative fuels, maritime transportation, resource-based view, decarbonization

Article history: Received 25/03/2022 – Accepted 22/07/2022

1. Giriş

Deniz taşımacılığı dünya ticaretine konu olan yüklerin ulaştırmasında hem tonaj olarak hem de değer olarak en yüksek paya sahiptir. Öte yandan, deniz taşımacılığının yoğun olarak tercih edilmesi, dizel yakıt kullanarak taşımacılık faaliyetlerini gerçekleştirmesi sebebiyle çevresel bozulmalardaki sorumluluğunu artırmaktadır (Ren ve Lützen, 2017). Gemilerden kaynaklı CO₂ salınımlarının dünyadaki tüm CO₂ salınımları içindeki payı ortalama %2.6 olarak gerçekleşmektedir (Bucak vd., 2021: 22). Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gemilerden kaynaklı zararlı gazların salınımının azaltılması konusunda yıllar içerisinde sıkılaştırılacak şekilde çeşitli kısıtlamalara gitmiştir. En önemli düzenlemelerden biri, gemilerden kaynaklanan hava kirliliğini önlemek için ilk kez 1997 yılında kabul edilen ve 2005 yılında uygulanan Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme (MARPOL) Ek VI'dır (IMO, 2006). MARPOL Ek VI'da yer alan ve 'IMO 2020' olarak bilinen en son revizyon ile gemi sahiplerine gemilerin yakıtındaki kükürt seviyesini %3,50'dan %0,5'e düşürmeleri veya %3.50'a kadar kükürt içeren yakıt kullanılıyorsa emisyon kontrol cihazlarını donatmalarını tavsiye edilmiştir. IMO, 2050 yılına kadar denizcilikten kaynaklanan toplam yıllık sera gazı salınımlarının 2008 yılına kıyasla en az %50'sini azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca kuruluş, 2008 yılına kıyasla 2030 yılına kadar en az %40 oranında ve 2050 yılına kadar %70 oranında CO₂ salınımlarını da düşürmeyi planlamaktadır (IMO, 2018).

Literatürde IMO yönetmeliklerine uygun gemilerde alternatif yakıt seçimi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Andersson vd. (2020), hali hazırda ve gelecekte kullanılması muhtemel yakıt türlerini ekonomik, teknik, çevresel, güvenlik, etik, lojistik vb. açılardan değerlendirmiştir. Balcombe vd. (2019), deniz taşımacılığında kullanılan alternatif yakıtlar arasında yer alan Doğalgaz, Metanol, Biyoyakıtlar ve Elektrik avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak incelemiştir. Bazı çalışmalarda bu alternatif yakıtlardan deniz taşımacılığında en çok tercih edilenleri farklı yetkinlikler kapsamında değerlendirilmiştir. Hansson ve ark. (2019), 2030 yılında kullanılması muhtemel deniz yakıtlarının performansını gözden geçirmiştir. Buna göre, çeşitli yakıt performans göstergeleri dikkate alınarak yapılan önceliklendirme analizi sonucunda, 2030 yılında Doğalgazın en çok tercih edilen gemi yakıtı olacağı öngörülmüştür. Benzer şekilde Gilbert vd. (2018), mevcut düzenlemeler çerçevesinde Doğalgazın en çok tercih edilecek yakıt olarak belirtmiştir. Kim vd. (2020) fiyat-performans analizi yapmış ve Doğalgazın bu noktada da rekabet avantajına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Aksine Brahim vd. (2019), birçok çalışmada bahsedilen Doğalgazın rekabet avantajlarını eleştirmiş ve bu yakıt türünün kısa vadeli bir seçenek olabileceğini savunmuştur. Bouman vd. (2017) ve Noor vd. (2018), enerji performansında bir boşluk tespit ederken, biyoyakıtların azalan salınımlar açısından en yüksek etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Kesieme vd. (2019), denizcilik sektörü paydaşları tarafından geliştirilen etkin stratejiler sonucunda biyoyakıtların çok daha geniş bir kullanım yaygınlığına ulaşacağını öngörmüştür. Bazı araştırmalar gemilerin alternatif yakıtlarını sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirmiştir. Ren ve Liang (2017), Bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak Hidrojenin Doğalgaz ve Metanolden daha sürdürülebilir bir yakıt olduğu sonucuna varmıştır. Farklı olarak Ren ve Lützen (2017), Bulanık AHP yöntemini kullanarak henüz deniz taşımacılığında kullanılmayan nükleer gücün en sürdürülebilir gemi yakıtı olabileceğini öngörmüştür. Bu çalışmada çeşitli gemi yakıtları teknik açıdan TOPSIS yöntemiyle sıralanmış, alternatif yakıtların gemi makinelerinde kullanımı ise lojistik, teknik, ekonomik gibi çeşitli açılardan değerlendirilmiştir. Çalışma hem var olan yakıtları teknik boyutta sıralaması ve hem de gelecekte yaygın bir şekilde kullanılması muhtemel alternatif yakıtları farklı boyutlarıyla ele alması açısından orijinal bir çalışmadır.

Bu çalışmanın amacı IMO düzenlemelerine uyum sağlayacak şekilde gelişecek gemi yakıt teknolojisini ele almak ve alternatif yakıtları çeşitli açılardan değerlendirmektir. Bu amaç doğrultusunda günümüzde

ortaya konulan alternatif yakıtlar teknik özellikleri açısından çok kriterli karar verme yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, çalışmanın ilerleyen bölümlerinde deniz taşımacılığı şirketlerinin kaynak temelli görüş çerçevesinde yakıt teknolojisi tercihi, rekabetçiliklerinin sürdürülebilmesi açısından tartışılmıştır. Daha sonra gemi yakıtı olarak kullanılan ve kullanılacak alternatifler teknik, ekonomik, vb. çeşitli açılardan analiz edilmiştir. Son olarak, deniz taşımacılığı şirketlerine gemi yakıtı tercihi noktasında bazı önerilerde bulunulmuştur.

2. Kaynak Temelli Görüş Bağlamında Denizcilikte Sürdürülebilirlik Uygulamaları

Deniz taşımacılığı firmaları arasındaki rekabet bir yandan oldukça şiddetli bir şekilde hissedilmekte bir yandan da rekabetin kapsamı ve dolayısıyla rekabet alanları her geçen gün genişlemektedir. Deniz taşımacılığı firmaları, yük bulmak konusunda rekabet ettikleri kadar yükün tedariki açısından en uygun rotaları kapsayacak şekilde liman ağı yapılanması, terminal yatırımları, yakalanan ölçek ekonomisinin faydasını maksimize edecek şekilde mega gemi siparişi, hatta nihai müşteriye doğrudan ulaşmak adına tedarik zinciri eş bütünleşmesi konularında birbirleriyle rekabet etmektedirler. Rekabetin sürdürülmesi ve rakiplere göre rekabetçi avantaj yakalamak adına stratejik yönetim yazınında iki temel görüş bulunmaktadır. Bunlardan biri rekabetçi stratejileri dış faktör paradigması çerçevesinde değerlendiren pozisyon okulu, bir diğeri ise ilgili stratejileri iç faktör paradigması çerçevesinde ele alan kaynak temelli görüştür (Özdemir ve Taşçı, 2020: 1019; Chakravarthy ve Doz, 1992: 6; Montgomery vd., 1989:192). Şirketlerin sürdürülebilir rekabet avantajı yakalamak için sahip oldukları iç dinamiklerine yönelmeleri gerektiğini savunan kaynak temelli görüşün temellerini Penrose (1959) oluşturmuştur. Daha sonra ilgili teoriye katkılar Ansoff (1965), Andrews (1971), Selznick (1975) ve Wernerfelt (1984) tarafından olmuştur (Bal, 2010: 269; Rangone, 1999: 233). Kaynak temelli görüş kapsamındaki kaynaklar, işletme tarafından kontrol edilen ve taklidi maddi veya manevi açıdan maliyetli olduğu için işletmelere rekabetçi avantaj sağlayan kaynaklardır (Karacaoğlu, 2006: 4). Bu çerçevede bakıldığında, denizcilik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin rekabetçiliğini sürdürebilmeleri açısından ellerinde bulunan kaynakları sürekli iyileştirmeleri, sürekli değişen rekabet koşulları göz önünde bulundurulduğunda elzemdir. Örneğin özellikle 2008 finansal krizinin ardından piyasada taşınan yüklerin ton-mil mesafesi uzadığından ölçek ekonomisinden daha fazla yararlanabilmek için mega gemiler inşa ettirilmiş ve işletilmiştir. Bu süreçte mega sınıfı gemilere sahip olmak ve bu gemilerin işletilmesi (alyans vasıtasıyla gemi üzerindeki yerlerin ortaklaşa doldurulması, optimum rota planlaması vs.) önemli birer kaynak olarak ön plana çıkmıştır. Şu an gelinen noktada ise ana liman-tali liman (hub-and-spoke) sistemi kapsamında mega gemilerle çalışan büyük şirketler kendi arasında rekabet etmekte, daha kısa mesafelerde besleme (feeder) gemi çalıştıran şirketler hem kendi aralarında hem de büyük şirketlerle rekabet etmektedir.

Dünya ticaretinin tonaj olarak yaklaşık %85'i denizyolu ile taşınmaktadır. Bu durum bir yandan denizyolu taşımacılığının ekonomik sürdürülebilirliğine katkı yaparken, çevresel etkiler kapsamında denizyolu taşımacılığına yönelik odağı artırmaktadır. Boru hattı taşımacılığı haricindeki tüm taşıma modları içerisinde en çevreci taşıma modu olan denizyolu taşımacılığında kaynaklı CO₂ salınımlarının dünya CO₂ salınımları içindeki payı %2.6 seviyesindedir (Bucak vd., 2021: 22). Bu oranın azaltılması amacıyla birçok düzenleme bulunmaktadır. Büyük denizcilik şirketlerinin temsilcilerinden oluşan World Shipping Council, Clean Cargo Working Group, Trident Alliance vb. kuruluşlar, çevresel etkileri azaltmak için çalışmaktadırlar (Vejvar vd., 2020). Bu endişeler, IMO 2020, Balast Suyu Sözleşmesi (Tran vd., 2020), Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi, Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı ve Balast Suyu Yönetim Sistemi (Yuen vd., 2017) gibi çeşitli düzenlemelerin sıklaştırılması veya uygulanması ile giderilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda denizcilik sektöründe geliştirilen ISO14000 Çevre Yönetim Sistemi,

ISO26000 Sosyal Sorumluluk Yönetim Sistemi, yavaş seyretme (slow steaming), sahil elektriği sağlama (cold ironing), biyosit içermeyen boya kullanımı ve yenilenebilir yakıt alternatifleri ile uyum gibi taktikler çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Yuen vd., 2017).

Sürdürülebilir denizcilik stratejilerinin başarılı olabilmesi için yeşil denizcilik ve sürdürülebilir denizcilik arasındaki belirsizliği ortadan kaldırmak ve salınımları azaltma hedefleri ile çevre yönetimini bütünleştirmek oldukça önemlidir (Wu vd., 2020). Salınımları azaltma hedefleri özellikle gemiler için oldukça önemli bir kaynak olan yakıt teknolojisinin geliştirilmesi ve alternatif yakıtların gemi yakıtı olarak kullanılabilmesi konularına odaklanmaktadır. Bu konu kaynak temelli görüş bağlamında denizcilik şirketlerinin gelecekteki rekabetçiliklerini oldukça derinden etkileyecek bir unsur olarak ön plana çıkmaktadır. Denizcilik şirketleri önümüzdeki on yıllarda bir yandan salınım kısıtlarına uyarak operasyonlarına devam etmeli bir yandan da kendi rekabetçiliklerini sürdürebilmeleri açısından en önemli iç unsurlardan (kaynaklardan) biri olan yakıt tedariklerinin en optimum şekilde gerçekleştirilmesine çalışmalıdır. Önümüzdeki yıllarda denizcilik sektörünün en önemli rekabet konularından biri olacak olan 'dekarbonizasyon (karbondan kaçınma)'nın başarılması için şirketlerin kendi kaynaklarına odaklanmaları, piyasada bir konum elde etmekten ziyade en önemli kaynaklarından biri olan yakıt maliyetleri ve tedariklerini rakiplerine göre daha etkili bir şekilde gerçekleştirmeleri oldukça önemli olacaktır. Bu bağlamda kaynak temelli görüş, şirketlere sürdürülebilir rekabetçi avantaj sağlayan kaynaklara odaklanmaktadır (Rangone, 1999). Denizcilik şirketlerinin dekarbonizasyon bağlamında sürdürülebilir bir rekabetçi avantaj yakalayabilmek için alternatif yakıtları, maliyet, erişilebilirlik, tedarik, ürün ömrü, yakıt kalitesi, depolama koşulları, sağladığı enerji gücü, üretim koşulları gibi teknik, lojistik ve ekonomik yönlerden ele almaları gerekmektedir. Bu bağlamda Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün 2030 ve 2050 yıllarında CO₂ ve GHG salım hedeflerini gerçekleştirmek adına gemilerde yakıt olarak sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), Amonyak, Hidrojen, Metanol ve Biyoyakıtlar ön plana çıkmaktadır. Buna karşın, alternatif yakıtlara ve bunlar üzerinde kullanılacak yeni teknolojilere geçilmesi için güvenilirlik, bilgi birikimi ve uluslararası düzenlemeleri karşılaması ve hususları en kritik noktaları oluşturmaktadır. Bu duruma ek olarak sürdürülebilir olması için üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve verimli operasyonların gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Konur vd., 2019).

3. Alternatif Yakıtların Gemi Makinelerinde Kullanılması

3.1. LNG'nin yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Doğalgazın -159°C ve -162°C arasında soğutulması ile elde edilen Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) kokusuz, berrak, renksiz, korozyona uğramayan ve toksik olmayan normal atmosfer basıncında kriyojenik bir sıvıdır (Bahadori, 2014; Mokhatab vd., 2013). Sıvı formda bulunan LNG patlayıcı bir yapıya sahip olmamakla birlikte sadece kapalı alanlarda %5 ila %15 aralığında yanıcı bir maddeyle birleştiğinde tutuşma olayı gerçekleşecektir. Diğer durumlarda zengin veya fakir karışım olacağından kaynaklı herhangi bir yanıcı ile birleşmesine rağmen tutuşma olmayacaktır (Bahadori, 2014). Dizel yakıtların yerine LNG yakıt kullanımı emisyonlar ve maliyet açısından önemli seviyede kazanım sağlayacaktır (Mokhatab vd., 2013). LNG yakıtla sevk edilecek gemiler için en önemli zorlukların başında tankların yerleştirilmesi için gereken yüksek hacimli bölgeler gerekmektedir. Çünkü LNG birim hacim başına geleneksel yakıtlara göre daha az enerji sağlamakta ayrıca tankların izolasyonları ve diğer ekipmanlar için ekstra çaba sarf etmek gerekmektedir (DNV, 2022). LNG artan yakıt talebini karşılamada, sürekli artan doğalgaz rezervlerinde göz önünde bulundurulduğunda, gelecek açısından önemli bir alternatif olarak kendisini güvence altına almaktadır (Tusiani ve Shearer, 2016). Son yıllık periyotlarda özellikle LNG ile sevk edilen gemilerin sayısının önemli artış yaşanmakta ve ayrıca yeni siparişler daha önceden

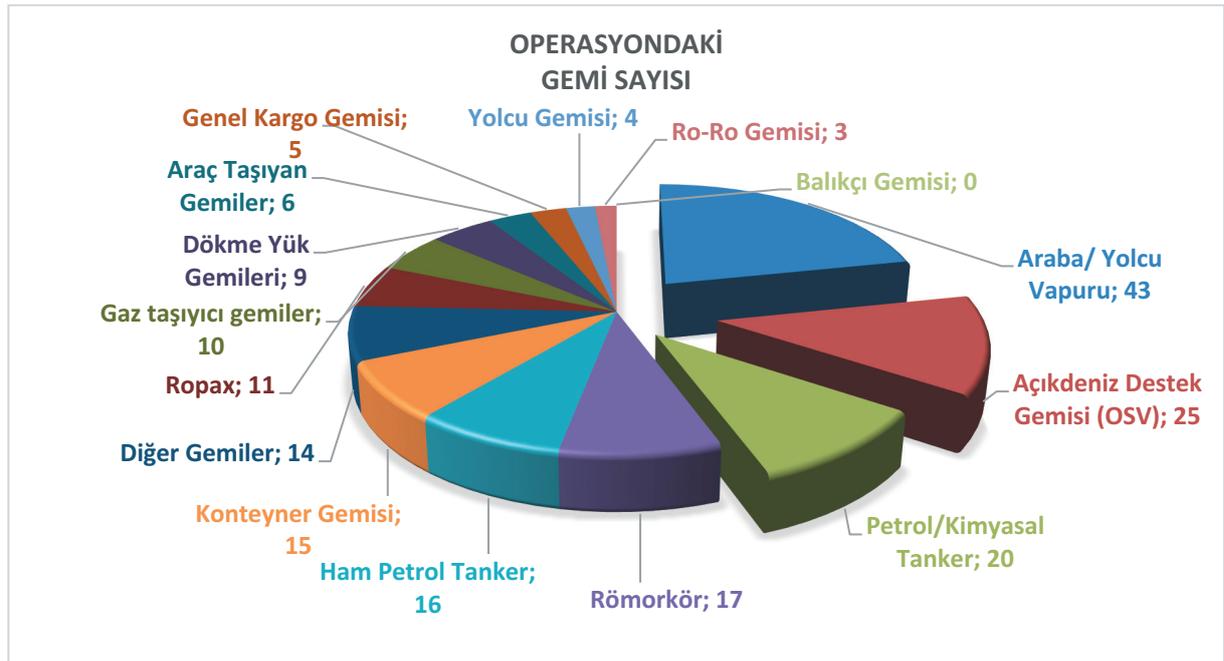
tahmin edilen seviyelerin üzerine çıkmaktadır. Yeni inşa gemiler ve sipariş edilen gemilerin yanı sıra, var olan gemiler üzerinde çeşitli modifikasyonlar “retrofitting” yapılarak LNG yakıtla sevk edilecek hale gelmektedir. LNG yakıtla sevk edilecek gemilerin sayısı ile ilgili detaylı bilgi Tablo 1’de ifade edilmektedir.

Tablo 1. Yıllar bazında LNG yakıtla sevk edilen, LNG yakıt kullanımına hazır ve LNG yakıtla sevk edilecek gemi siparişi sayısı

Yıl	Sevk Edilen Gemi Sayısı		LNG Yakıt Kullanıma Hazır Gemi S.		Sipariş Edilen Gemi Adedi	
	2020(Ekim)	2021(Mayıs)	2020(Ekim)	2021(Mayıs)	2020(Ekim)	2021(Mayıs)
2013	43	43	-	-	-	-
2014	53	53	-	-	-	-
2015	70	70	-	-	-	-
2016	88	89	34	34	-	-
2017	105	106	53	53	-	-
2018	130	131	80	80	-	-
2019	162	164	114	114	-	-
2020	173	191	126	118	57	-
2021	173	198	142	142	130	106

Kaynak: (DNV, 2021; DNV, 2022a; DNV, 2022b).

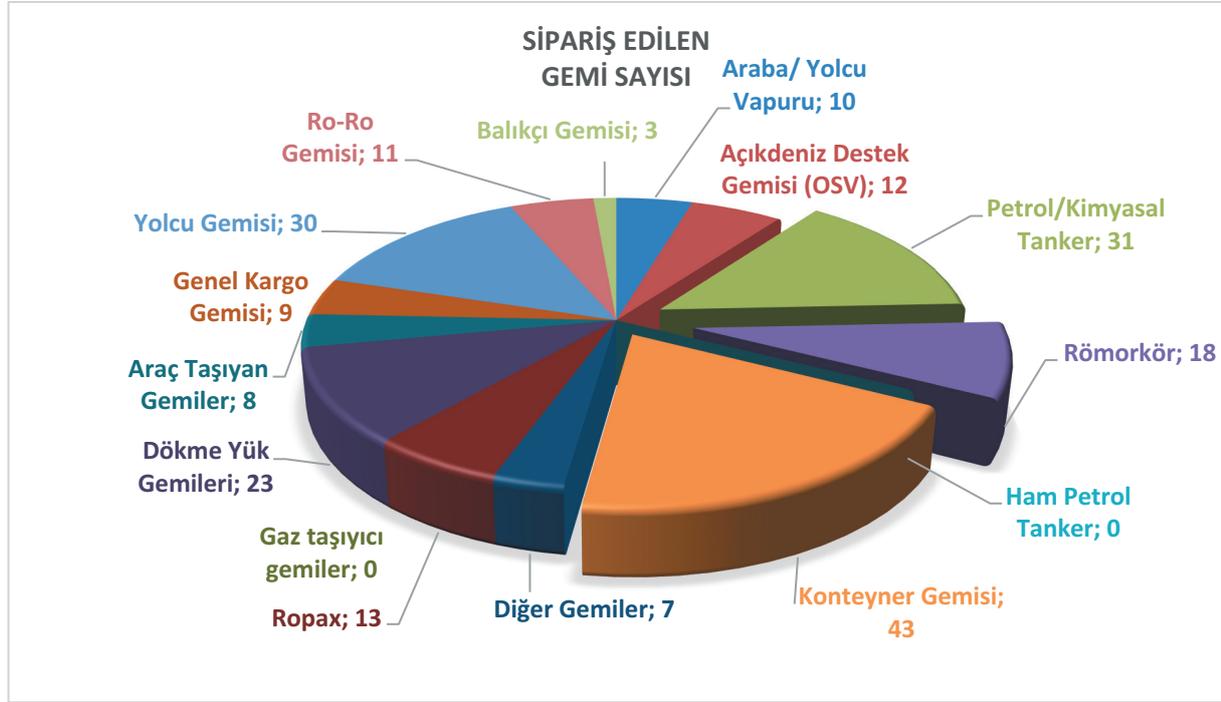
Tablo 2013-2021 yılları arasında LNG yakıt, LNG yakıt kullanımına hazır ve LNG yakıtla sevk edilecek gemi siparişi sayısı hakkında bilgi vermektedir. Düzenli olarak her yıl LNG yakıtla sevk edilen gemi sayısında artış yaşanmakta ve yeni sipariş edilen gemilerle birlikte artışını yıllar bazında koruyacaktır. 2021 Mayıs ayı itibarıyla 106 olan yeni gemi siparişi yıl sonunda toplamda 240’a ulaşmakta ve bu durum tüm yıllar arasında zirveyi oluşturmakla birlikte son 4 yılın toplamından fazlasını oluşturmaktadır (DNV, 2022; The Maritime Executive, 2022). 2021 Mayıs ayı itibarıyla operasyondaki gemi sayısı ve toplam gemi sayıları içindeki yüzdesi gemi tiplerine bağlı olarak detaylı bir biçimde Şekil 1’de ifade edilmektedir.



Şekil 1. Gemi türleri bazında LNG yakıtla sevk operasyondaki gemi sayısı ve oranı (DNV, 2022)

2021 Mayıs ayı itibarıyla sipariş edilen gemi sayısı gemi tiplerine göre detaylı olarak Şekil 2’de ifade

edilmektedir. Özellikle konteyner gemisi, ham petrol gemileri ve yolcu gemilerinin siparişindeki artış net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2. Gemi türleri bazında LNG yakıtla sevk edilecek sipariş edilen gemi sayısı ve oranı (DNV, 2022)

Sırasıyla LNG yakıtla işletilen gemiler en çok araba/yolcu vapuru, Açıkdeniz Destek Gemisi, Petrol/Kimyasal Tanker ve Römorkör olarak hizmet vermektedir. Özellikle vapurların belirli hatlarda çalışması, römorkörlerin tanımlanmış bölgelerde hizmet vermesi ve açık deniz destek gemilerinin üst yapıda LNG yakıt için uygun depolama alanların bulunması bu tip gemilerin sayısının artmasının önünü açmaktadır (Seddiek vd., 2015).

Gemi makinelerinde LNG'nin yakıt olarak kullanılması sonucunda partikül madde (PM) ve kükürt oksit (SO_x) emisyonları neredeyse tamamı eleminesiyle birlikte, azot oksit (NO_x) emisyonları açısından da IMO sınırlanmalarını karşılama ve enerji verimliliği sağlama amacıyla EGR ve SCR teknolojileri kullanılarak %80 oranında indirgenme sağlanmaktadır (DNV, 2021; 2022). Sera gazları emisyonları açısından bakıldığında 2 stroklu ve 4 stroklu makinelerde sırasıyla %23 ve %14 oranında kazanım elde edilmektedir. Düşük veya yüksek basınçlı makine olmalarına göre değişmesine rağmen, 4 stroklu makinelerde metan kayması 2 stroklu makinelere göre daha yüksektir. LNG kimyasını %85 ila %95 oranlarında metan oluşturduğundan, sera gazları kapsamında CO₂ çok daha fazla etkiye sahip olan metan (CH₄) gazının yanma sonrasında oluşumun minimize etmek gerekir (DNV, 2021; 2022).

LNG yakıtla sevk edilecek gemilerde kullanılan sistemler dış etkenlerden en az etkilenecek şekilde segregasyon işlemi uygulanmaktadır. Herhangi bir sızıntı durumunda kriyojenik sıvılardan kaynaklı oluşabilecek olumsuzlukları ortadan kaldırmak için çift cidarlı yapıların seçilmektedir. Mükemmel bir görüntüleme ve sensör sistemiyle sızıntı durumlarına acil bir şekilde müdahale imkânı sağlamaktadır. Ayrıca tankların maksimum doldurma limitleri göz önünde bulundurularak ona göre ikmal işlemleri gerçekleştirilmektedir (DNV, 2021). 2022 yılı itibarıyla 33 nokta LNG ikmal gerçekleştirilmekte ve gelecekte kurulması muhtemel bölgelerde bu sayının 75 olmasını hedeflenmektedir (SEA-LNG, 2022).

İstasyon ağlarının sayılarını artırana kadar operasyonel anlamda zorlukla karşılaşmamak adına çift

yakıtla sevk edilen makineler farklı gemi tiplerinde kullanılmaktadır. Buna karşın, ikmal alanlarına yakın bölgelerde hizmet eden vapur ve römorkör tipi gemilerde ikinci bir yakıt ihtiyacı duymadan işletilebilen LNG makineler kullanılmaktadır (Wartsila, 2021; MAN, 2022).

3.2. Amonyakın yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Günümüzde üretilen amonyakların çoğu fosil yakıt tabanlı hidrokarbonlardan üretilmektedir. Fosil yakıt tabanlı hidrokarbon dağılımında en yüksek payı %68 ile doğalgaz oluştururken, kalan kısmını %28 kömür ve %4 ham petrol olacak şekilde paylaşmaktadır. Amonyak farklı şekilde üretebilmekte fakat 2030 ile 2050 yıllarındaki sera gazları ve karbonsuzlaşma hedeflerini karşılama amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil amonyak daha ön plana çıkmaktadır. Küresel amonyağın %31'i Çin'de, %10'u Rusya'da, %8.9'u ABD'de ve %7.9'u Hindistan'da üretilmektedir. Bir asırdan fazladır en yaygın şekilde taşınan dökme yüklerden biri olan amonyak genellikle gübre olarak tarım alanında ve çeşitli kimyasal uygulamalarda kullanılmaktadır (Valera-Medina vd., 2018; DNV, 2022).

Depolama, taşıma ve dağıtım açısından diğer alternatif yakıtlara üstünlükleri bulunan amonyak, temiz alternatif yakıtların başında gelen hidrojenin yakıt olarak kullanılacağı sistemlerde önemli bir depolama kaynağı olarak kullanılabilir. Özellikle düşük basınçlarda sıvı formda bulunması ve içinde yüksek miktarda hidrojen bulunması, hidrojenin depolanma engelini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, düşük üretim maliyetleri ve yüksek enerji yoğunlukları bu yakıtları ön plana çıkarmaktadır (DNV, 2022; Valera-Medina vd, 2018). Amonyak renksiz bir gaz olmasına karşın, keskin ve boğucu bir kokuya sahip olması, toksik ve aşındırıcı özelliklerinin bulunması ve denizcilikte yakıt olarak kullanılması açısından fazla bir deneyime sahip olunmaması bu yakıtın kullanımındaki en büyük engelleri oluşturmaktadır (Cinti, 2014; Valera-Medina vd., 2018; DNV, 2022).

Amonyak yakıt olarak kazanlarda, türbinlerde, içten yanmalı makinelerde, yakıt pili sistemlerinde doğrudan ve dolaylı olarak kullanım potansiyeline sahip bir yapıdadır (Cinti, 2014). İlk aşamalarda daha çok geleneksel yakıtlarla birlikte karıştırılıp kullanılmakta; bu sayede yüksek basınç ve tutuşma sıcaklıkları gibi dezavantajlarının kolayca üstesinden gelinmektedir. Bu alanda yapılan uygulamalara göre %95'e kadar geleneksel yakıtlarla elde edilen karışımlarda makineler üzerinde başarılı çalışmalar ve veri seti elde edilmektedir (Dimitriou ve Javaid, 2020).

2024 yılının başlarında 2 stroklu amonyak yakıtla işletilecek makine üretimi planlanırken aynı zamanda gelecek yıllarda hali hazırda geleneksel yakıtlarla işletilen makineler üzerinde yapılacak işletmelerle birlikte amonyak kullanıma hazır hale getirilecektir (MAN, 2022). Amonyakın yakıt olarak kullanılması özellikle karbonsuzlaşma hedeflerini karşılamada önemli bir atılım olmasına karşın, yanma sonucu oluşacak NO_x ve yanmamış amonyakların indirgenmesi üzerinde ek çalışmaların yapılması gerekmektedir (Dimitriou ve Javaid, 2020).

3.3. Hidrojenin yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Hidrojen yakıt olarak, gemi sahipleri ve gemi işletmecileri için hem CO, HC ve CO₂ içermeyen hem de uluslararası emisyon limitleri karşılayan içten yanmalı makinelerde yakıt pillerinde kullanımı sağlayan alternatif temiz bir yakıttır. Hidrojen üretim şekilleri elde edilen emisyon miktarlarına göre 4 farklı şekilde incelenmektedir. Kömürden üretim kahverengi; fosil yakıtlarda ve doğalgazdan üretim gri; karbon indirgeme stratejileri gri üretim yöntemine uygulanırsa mavi; güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim gerçekleşirse yeşil olarak tanımlanmaktadır. Hidrojen elde etmede en büyük payı %75 ile gri hidrojen üretim metodu oluşturmakla birlikte, mavi ve yeşil hidrojen üretim metodlarının yüzdesi sırasıyla %23 ve %2'dir (Lamas, 2015; ABS, 2022).

Elektrik yükleri ve diğer potansiyel kıvılcım oluşturuç etmenler, hidrojenin yakıt olarak kullanılması sürecinde dikkate alınmalı ve bu konudaki belirlenmiş standartların takip edilmesi büyük olumsuzluklara sebep olmaması adına zorunluluk oluşturmaktadır. Özellikle sistem dizaynı sırasında tüm olasılıklar ve potansiyel tehlikeler göz önünde bulundurulmalı; havalandırma sistemleri ile birlikte yakıt tedarik hattının sürekli temizlenmesi gerekmektedir. Hidrojen yakıt olarak kullanıldığında karbon ve sülfür oluşumunu neredeyse tamamen ortadan kaldırmasının yanısıra, havadan daha hafif olduğu için herhangi bir sızıntı durumunda kirliliğe neden olmamaktadır. Özellikle, çok çeşitli kaynakları ve farklı üretim tekniklerinin hidrojen yakıtlar üzerinde kullanılmasıyla ileride artan talebi karşılama önemli bir potansiyel olacaktır (ABS, 2022).

İçten yanmalı makinelerde hidrojenin yakıt olarak kullanılması sonucu NO_x oluşumu gözlenmesine rağmen, yakıt pillerinde kullanımında sadece su buharı oluşmakta, bu anlamda partikül maddeler, zararlı ve sera etkisi oluşturan gazlarının emisyonları sıfırlanmaktadır. Krijonejik sıcaklıklarda ve kapalı alanlarda depolanması çeşitli önlemlerin alınması gerektirmekte bu durumlar ek maliyet oluşturmaktadır. Ayrıca alternatif yakıtlara yeni yeni geçişlerin olduğu bu dönemlerde yakıtların kullanımı ile deneyim az olması, birim başına üretim maliyetlerin yüksek olması, düşük yoğunluk değeri ve dizel yakıtta %47, hidrojen yakıtta yaklaşık olarak %30 olan termal verimlilik, depolama ve güvenlik problemleri bu yakıt üzerindeki başlıca engelleri oluşturmaktadır. Özellikle düşük yoğunluk dizel yakıt tanklarının neredeyse iki katında daha fazla depolama alanına ihtiyaç duyulmasını sağlamak ve bu durum geminin kargo kapasitesini yani işletilmesi durumunda elde edilecek kar miktarını azaltmaktadır (Lamas, 2015; Seddiek vd., 2015; ABS, 2022).

RO/RO gemisinin sahip olduğu ana makinede hidrojen yakıtın kullanılması temel alınarak gerçekleştirilen analize göre daha düşük termal verimliliğin yanında, daha düşük MEP (ortalama efektif basınç) ve yakıt tüketim değerleri elde edilmektedir (Seddiek vd., 2015). 2021 yılının son çeyreğinde dünyanın ilk yakıt pili ile işletilen katamaran yolcu gemisi denize indirilmiştir. Yaklaşık 22 metre uzunluğundaki bu teknede yakıt pili olarak PEM tipi yakıt pilleri kullanılmaktadır. 2 gün boyunca sürekli işletilmeyi ve yüksek yükleri karşılama amaçlı 100kWh enerjiye sahip bataryalarla donatılmıştır. "Hydroville" adlı gemi 2017 yılında çift yakıtla sevk edilen makine ile donatılmış ve hidrojen-dizel yakıt ile işletilebilmektedir. Emisyonları elemine etmek amaçlı SCR sistemi kullanılmakta bu sayede gelecek hedeflerini karşılama önemli bir adım atılmaktadır. Daha uzun menzilli operasyonlar gerçekleştirmek amacıyla, hidrojenin depolanması için gerekli olan tank kapasitesi en çok üzerinde çalışması gereken noktaların başında gelmektedir.

2021 yılında denize indirilen "Hyro Bingo" adlı gemi 441kW güce sahip çift yakıtla sevk edilebilen iki adet ana makinesiyle 23 kn hızlara ulaşabilmesinin yanı sıra tam yüklü halinde 80 yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Hidrojen/dizel yakıt kombinasyonunda 120 km menzile sahip olmasının yanı sıra sadece dizel yakıtla 780 km menzile ulaşabilmektedir. Yüzer rüzgâr türbinlerine servis sağlayan Hydrocat toplamda 1498 kW güç çıkışı sağlayan CPP pervane sistemine sahip, 30 knots servis hızlarına ulaşan bununla birlikte 12.8 ton itme gücüne ve 25 metre uzunluğa sahiptir. "Hydrotug" ise dünyanın ilk hidrojen yakıtla sevk edilecek römorkörü olma özelliği taşıyacak ve Antwerp limanında hizmette bulunacaktır. Bu römorkörde 405.5 kg hidrojen depolama kapasitesinin yanında 2000 kW güç çıkışı sağlayan orta devirli çift yakıtla sevk edilebilen ana makinelere sahip olmaktadır. Ek olarak SCR ve partikül maddeler için filtre sistemi kurulmakta bu sayede uluslararası hedefleri karşılanmaktadır (Windcatworkboats, 2022; CMBTECH, 2022).

3.4. Metanolun yakıt olarak gemi makinelerinde kullanılması

Emniyetli yapısı, kurulu üretim ağı ve ekonomik oluşunun yanında üretim ve kullanım aşamasında oldukça düşük miktarlarda oluşan kükürt emisyonu; uluslararası sınırlamalarını karşılamada, metanolün gemi makinelerinde yakıt olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır (Wang vd., 2020; Fridell vd., 2021). Düşük enerji yoğunluğu ve bu amaçla geleneksel yakıtlara göre daha fazla yer kaplaması kargo kapasitesini azaltmakta aynı zamanda ikmal aralıklarını artırmaktadır. Metanol yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimi sağlandığında önemli ölçüde zararlı gazlarının emisyonlarını ortadan kaldırmaktadır (Methanex, 2021). Ortam koşullarında sıvı formda olan Metanolün ikmalı ve depolanması var olan sistemlerde küçük değişiklikler yapılarak gerçekleştirilebilmekte ve gaz halindeki yakıtlara kıyaslandığında karmaşık olmayan bir yapıya sahip olmaktadır (MAN, 2022). Yakıt olarak metanol kullanılması diğer bazı alternatif yakıtlar gibi egzoz gazı temizleme işlemlerine tabi tutulmadan oldukça düşük seviyelerde emisyon azalımı sağlamaktadır (Methanex, 2012)

Metanolün 100 yılı aşkı süredir deniz taşımacılığında var olması ve farklı alanlarda kullanılması, bu yakıtın gemi makinelerinde kullanılması önündeki risk faktörlerini karşılamada önemli bir deneyim sağlamaktadır. Ayrıca ağır yakıtlara ve denizcilikte kullanılan gaz yakıtlara göre suda yaşayan organizmalar açısından daha az tehlikeye sahiptir (Methanex, 2021; MAN, 2022) Suda hızlı çözünen ve biyo-bozunur özelliğe sahip, temiz renksiz bir sıvı olan metanol, petrol sızıntısına göre oluşturacağı tahribat oldukça düşük seviyelerdedir (Methanex, 2021).

Metanol genellikle doğalgazdan üretilmesine rağmen yenilenebilir kaynaklardan olan biyo-yakıtlardan, geri kazanılmış karbondioksitten elde edilmektedir. Karbondioksit ve hidrojenin sentezinden elde edilecek yeşil amonyak IMO 2030 ve 2050 hedeflerini karşılamada önemli bir potansiyeldir (Fridell vd., 2021; MAN, 2022). Konteyner gemilerinde, feribotlarda, balıkçı gemilerinde, yolcu gemilerinde ve ayrıca açık deniz uygulamalarında 4 stroklu makinelerde metanol yakıt kullanıma potansiyeline sahiptir (MAN, 2022). 4 stroklu makinelerde metanol yakıtın kullanımı üzerine alt yapı çalışmaları yapılmakta ve geliştirilecek modifikasyonlarla birlikte 2024 yılından sonra dönüşüm uygulamaları başlayacaktır (MAN, 2022). 2022 yılının ortasında ise 4 stroklu çift yakıt konseptli yüksek esnekliğe sahip makine pazarda yerini alması planlanmaktadır (MAN, 2022). Metanol ile ilgili en büyük engelleri yakıt ve enjeksiyon sistemlerindeki değişimler ile, yanma sürecinde geliştirilmesi gereken durumlar oluşturmaktadır (MAN, 2022). 4 stroklu makinelerden 2430 kW güç kışı sağlayan, 750 rpm devre sahip ve silindir çapı daha büyük olanlar üzerinde yapılan sayısal analizler temelinde ateşleme zamanında ve hava-yakıt karışımlarında yapılan optimizasyonlar sayesinde metanolün tek başına yakıt olarak kullanılması sonucu "Tier III" limitlerini karşılayacak şekilde sonuçlar elde edilmektedir. Hava-yakıt oranında hava miktarı arttıkça NO_x emisyonlarında düzenli azalım sağlanırken, CO ve diğer hidro-karbonların değeri λ 2.4 değerinin üstüne çıkınca düzenli olarak artış göstermektedir. Benzer şekilde yanmamış metanol miktarında da yükselme gözlenmektedir (Leng vd., 2022). 2100 rpm devre ve 49 kW çıkış gücüne sahip makinede, düşük devirlerde (800 rpm) ve yüklerde (%10-25) metanolün yakıt olarak kullanılması sonucunda CO₂ emisyonları açısından MGO "marine gas oil" yakıtlara göre oldukça düşük değerlere ulaşılmaktadır. Bu duruma ek olarak 2 ila 3.4 g/kWh arasında değişen NO_x Tier III sınırlamalarını elde ettikleri 0.3-1.4 g/kWh değişen değerlerle karşılamaktadırlar. Yanma sırasında oluşan, Kükürt ve partikül madde emisyonlarını tamamen ortadan kaldırdıkları için, emisyon kontrol bölgelerinde karşılaştıkları SO_x ve PM sınırlamalarını da karşılamaktadır (Zincir vd., 2019).

Denizcilik alanında çevresel performansa yönelik çalışma yapmak adına doğalgazdan üretilen metanolün yakıt olarak kullanımı ön plana çıkmaktadır. Özellikle biyo-metanolün yakıt olarak kullanılması küresel ısınmayı azaltma açısından oldukça büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle karbonsuzlaşma çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda ileride yenilenebilir enerji kaynaklarından

üretim ön plan çıkmaktadır (Brynnolf vd., 2014).

Çift yakıtlı gemi makinelerinde yakıt olarak metanol kullanımı vapurlar açısından değerlendirilmektedir. Partikül madde emisyonları açısından LNG yakıtın kullanımına benzer değerler edilirken, NO_x emisyonları denizcilikte kullanılan gaz yakıtlara göre daha azdır. Genel anlamda değerlendirildiğinde hava kirleticiler ve sera gazları açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. NO_x ölçümleri MGO ölçümlerine kıyasla daha az olmasına elde edilen değerler 13,3 ila 6,5 g/kWh arasında değişmektedir. Fakat bu değer makine devrine göre yaklaşık olarak %2,0 ila %3,4 arasında değişen Tier III limitlerinin üzerindedir. Bu değerlere ulaşmak için “*after-treatment system*” egzoz aşamasında emisyon azalımı sağlayan sistemlerin kullanılması gerekir (Fridell vd., 2021).

Methanol yakıt dizel yakıtla ortalama %54.1 karıştırılarak farklı yüklemelerde gemi makineleri üzerinde yapılan uygulamada, yanma sonucu oluşan emisyonları azaltmak amacıyla kullanılan dizel oksidasyon katalizörü ile neredeyse CO, HC ve metanol emisyonları ortadan kaldırılmakta, ayrıca CO, HC+NO_x, PM için birim enerji başına sırasıyla 5, 5.8 ve 0.12 olan China II sınırlamalarını fazlasıyla karşılamakta ve oldukça düşük değerler elde etmektedir. Ayrıca metanolün yanma odasına enjeksiyon edilmesi sonucu artan termal verimlilik yakıt tüketiminin azalmasını sağlamaktadır. Buna karşın PM emisyonları konusunda artış meydana gelmektedir (Wang vd., 2020).

Tüm bilgilerin ışığında Tabloda denizcilikte kullanılan ve gelecekte muhtemel kullanılması gereken yakıtların kimyasal formülleri, depolama şekilleri, yoğunlukları, üst ve alt ısı değerleri, enerji yoğunlukları, depolama sıcaklıkları ve basınçları, kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları, parlama noktası, kaynama ve donma noktası, oktan değerleri, tutuşma limitleri Tablo 2’de ifade edilmektedir.

Tablo 2. Alternatif yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

	LNG	Amonyak	Hidrojen	Hidrojen	Metanol	Dizel
Kimyasal Formül	CH ₄	NH ₃	H ₂	H ₂	CH ₃ OH	C ₁₀₋₁₅ H ₂₀₋₂₈
Depolama Şekli	Sıvı	Sıvı	Sıkıştırılmış Gaz	Sıvılaştırılmış	Sıvı	Sıvı
Yoğunluk [kg/m ³]	420-480	602.8	17.5	71.1	786-796	838.8
Üst ısı değeri [Mj/kg]	55.18	22.5	141.91	140	18.18	38.623
Alt ısı değeri [Mj/kg]	49.40	18.6	119.98	120	15.96	35.73
Enerji Yoğunluğu [Gj/m ³]	21-24	13.6	2.101	8.539	11.4	36.403
Depolama sıcaklığı [K]	110.15	298	298	20	298	298
Depolama Basıncı [kPA]	101.3	1030	~24821	102	1030	101.3
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı [K]	>752	924	844	844	~753	503
Parlama Noktası	85.37	240.15	~20.15	-	284.26-288.75	325.15
Oktan Değeri	>120	110	>130	>130	112	<20
Tutuşma Limitleri (%)	5-15	16-25	4-75	4-75	5.5-36.5	0.6-7.5

Kaynak: (EERE, 2001; Engineeringtoolbox, 2003; Mørch vd., 2011; Reiter ve Kong, 2011; Methanol Institute, 2016; Erdemir ve Dinçer, 2021; Elgas, 2022).

Dizel yakıt genellikle kimyasal formülleri (C₁₀H₂₀–C₁₅H₂₈) olan alifatik hidrokarbonlardan yaklaşık %75 ve yaklaşık %25 aromatik hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Yakıtın kütle oranında karbon %14 oranında hidrojen oluşturmakta ve ham petrol kaynağına bağlı olarak belirli miktar kükürt oluşmaktadır (Huth ve Heilos, 2013). Literatürde de belirtildiği gibi, buna karşın alternatif yakıtlar özellikle kükürt ve karbon açısından önemli miktarda indirgeme sağlamakta ancak özellikle NO_x emisyonlarındaki

sınırlamaları karşılaması için egzoz sonrası indirgenme sistemlerinin kurulumu önerilmektedir. Birim hacim açısından en yüksek enerji yoğunluğuna geleneksel dizel yakıt sahip olmasına karşın, birim ağırlık açısından en yüksek enerji yoğunluğuna hidrojen yakıt sahiptir. Alternatif yakıtların kendiliğinden tutuşma sıcaklıkları geleneksel yakıtlara göre daha yüksek seviyelerde olması sebebiyle, yanma olayının gerçekleştirmek adına dizel yakıt ile karıştırılmaktadır. Sıvılaştırılmış hidrojen ve LNG kriyojenik sıvılar olduğundan depolanma işlemi çok düşük sıcaklıklara indirgenme ile gerçekleşme, buna karşın etanol ve amonyak ortam koşullarda sıvı formda depolanabilme potansiyeline sahiptir. Bu sayede, kriyojenik durumdan kaynaklı prosedürlere ihtiyaç kalmadan ticarileştirme işlemi tamamlandıktan sonra gemilerde yakıt olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir. LNG yakıt ile amonyağın düşük tutuşma aralıkları herhangi bir yangın olayının gerçekleşme olasılığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sayede gemide emniyetli operasyonların uygulanması konusunda şüpheler giderilmektedir.

4. Yöntem

Alternatif yakıtlarla birlikte geleneksel yakıtları kıyaslamak adına, fiziksel ve kimyasal özellikler TOPSIS yönteminde temel alınarak çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmaktadır. TOPSIS (Techniques for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ilk olarak *Hwang and Yoon* (1981) tarafından çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Yöntemin teorik çerçevesinde en iyi alternatif, pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme ise en uzak olandır. TOPSIS yönteminin uygulama adımları aşağıdaki gibi gösterilmiştir:

Adım 1: Karar matrisi 1. Denklem ile normalize edilir:

$$r_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J w_{ij}^2}}, j = 1,2,3, \dots, J, i = 1,2,3, \dots, n \quad (1)$$

Adım 2: Her bir alternatifin pozitif ideal çözüme (PIS d_i^+) ve negative ideal çözüme (NIS d_i^-) uzaklığı 2. Denklem ve 3. Denklem ile hesaplanmıştır:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, j = 1,2, \dots, J \quad (2)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1,2, \dots, J \quad (3)$$

Adım 3: İkinci adımdan sonra, her bir alternatifin Yakınlık Katsayısı (CC_i) 4. Denklem aracılığıyla tespit edilmiştir:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i = 1,2, \dots, J \quad (4)$$

Adım 4: Alternatiflerin sıralaması Yakınlık Katsayılarının (CC_i) karşılaştırılması ile belirlenmiştir.

4.1. Alternatif Yakıtlar Üzerine Çok Kriterli Karar Verme Uygulaması

Literatür kısmında elde edilen alternatif yakıtlardan fiziksel ve kimyasal özelliklerinden ısı değeri, enerji yoğunluğu, depolama sıcaklığı, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, depolama basıncı ve oktan değeri temelinde en iyi alternatifi belirlemek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS uygulanmıştır. Çalışma kapsamında alternatifleri sıralamak üzere ele alınan kriterler ağırlıklandırılmaksızın kullanılmıştır. Çalışmada ele alınan kriterler bazında alternatiflere ait değerler literatürden elde edilmiştir (Huth ve Heilos, 2013),

4.2. Bulgular

Çalışmada alternatif gemi yakıtları ele alınmış, olumlu ve olumsuz tarafları teknik, ekonomik, çevresel açıdan değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında alternatif yakıtların ısı değeri, enerji yoğunluğu, depolama sıcaklığı, kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, depolama basıncı ve oktan değeri gibi teknik özellikleri incelenerek ilgili yakıtların sıralaması yapılmıştır. Yapılan sıralama Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Alternatif Yakıtların Sıralaması

Alternatif	Si+	Si-	Puan	Derece
LNG	0.6003	0.6282	0.5114	3
Amonyak	0.7762	0.6560	0.4580	5
Hidrojen	1.2447	1.3149	0.5137	2
Hidrojen Sıvı	0.7688	0.7373	0.4895	4
Metanol	0.7985	0.6189	0.4367	6
Dizel	0.6256	0.8658	0.5805	1

Tablo 3'e göre Dizel yakıtın 0.5805 değeri ile ilgili kriterler baz alındığında en iyi seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Derecelendirmede Hidrojen yakıtının 0.5137 değeri ile Dizel yakıtın hemen ardından geldiği görülmektedir. Öte yandan bu çalışma ile Metanol yakıtının ilgili kriterler bazında en zayıf teknik özelliklere sahip olduğu gözler önüne serilmiştir.

5. Sonuç ve Tartışma

Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün 2008 yılına göre CO₂ emisyonlarını 2030 yılı itibarıyla %40, sera gazları ve CO₂ emisyonlarını ise 2050 yılı itibarıyla sırasıyla %50 ve %70 oranında azaltmayı hedeflediği bilinmektedir. Bu amaç, Avrupa Birliği'nin de 2030 yılında sera gazlarını 1990 yılına göre %55 oranında azaltma hedefiyle örtüşmektedir. Buna göre denizcilik sektöründe geleneksel yakıtlarla sevk edilen makinelerin hem yanma hem de yanma sonrasında oluşan emisyonlarını önlemek amacıyla yapılacak uygulamalar dışında, gemi sahipleri ve denizcilik işletmelerinin alternatif yakıtlara yöneldiği görülmektedir. Bu yakıtların başlıcalarını LNG, metanol, hidrojen, amonyak gibi yakıtlar oluşturmaktadır, her bir yakıtın kendi içinde diğerlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, geleceğin denizciliğinde en önemli rekabet sahalarından biri olan dekarbonizasyon kapsamında alternatif yakıt seçenekleri kaynak temelli görüş bağlamında değerlendirilmiştir.

Özellikle hidrojenin kimyasal açıdan karbon atomlarını içermemesi ve yanma sonucu oluşan egzoz ürünlerde herhangi bir indirgenme yöntemi uygulamadan limitleri ve hedefleri sağlaması önemli bir avantaj olarak öne çıkarken, depolama maliyetlerinin ve büyük ölçekli gemilerde kurulum maliyetlerinin fazla olması bu yakıtın kullanım alanını kısıtlamaktadır. Amonyak ise yakıt olarak depolanma açısından önemli kazanımları olmasına rağmen, yanma sonucu oluşan NO_x indirgenmesi için ekstra çaba harcanması gerekmektedir. LNG'nin gemi makinelerinde yakıt olarak kullanıldığı uygulamalar diğer alternatif yakıtlara göre daha fazla olmasına karşın, yakıt tanklarının gemi içindeki yerleşimi önemli miktarda yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Metanolün saf yakıt olarak kullanılması çalışmalarının halen devam etmesinin yanı sıra, çeşitli yakıtlarla karışım yapılarak gemi makinelerinde kullanımı da gerçekleşmektedir. LNG kullanımında önemli oranlarda bazı emisyonların azalmasına rağmen, PM emisyonlarında artış gözlenmektedir.

Çalışma kapsamında gemi yakıtları üzerine yapılan teknik değerlendirmede dizel yakıtın en iyi seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan değerlendirmeye göre dizel yakıtı hidrojen ve LNG yakıtları izlemiştir. Bu yakıtlar içerisinde hidrojenin sıfır karbon salınımına sahip olması ve en az diğerleri kadar iyi teknik özelliklere sahip olması geleceğin denizyolu taşımacılığında yaygın olarak kullanılan gemi yakıtı olabilme potansiyelini gözler önüne sermektedir. Hidrojen yakıtının çalışma kapsamında yapılan değerlendirmede çeşitli sorunları olmakla birlikte özellikle hidrojenin üretilmesi konusundaki sıkıntılar tartışmaya açıktır.

Alternatif yakıtlara geçişlerin gündeme geldiği bu dönemde hangi yakıt türünün denizcilik alanında daha fazla uygulanacağı, o yakıtlarla çevre, maliyet ve teknik açıdan gerçekleştirilecek başarılı performanslar belirleyecektir. Bu çalışma özellikle alternatif yakıtlar üzerine çalışacak akademisyenler, sektör paydaşları açısından önemli bir kaynak oluşturmaktadır ve yeni yapılacak çalışmalar ile karşılaştırma yapılma imkânı sağlamaktadır.

Referanslar

ABS, (2021). Sustainability Whitepaper Hydrogen as Marine Fuel, <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf> [Online] [Erişim 21.03.2022].

ABS, (2022). Hydrogen as Marine Fuel Whitepaper, <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/hydrogen-as-marine-fuel-whitepaper> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Advanced Motor Fuels, (2015). Ammonia, https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/ammonia [Online] [Erişim 21.03.2022].

Andersson, K., Brynolf, S., Hansson, J., & Grahn, M. (2020). Criteria and Decision Support for A Sustainable Choice of Alternative Marine Fuels. *Sustainability*, 12(9), 3623.

Bahadori, A. (2014). *Natural gas processing: technology and engineering design*. Gulf Professional Publishing.

Bal, Y. (2010). Rekabet Avantajı Yaratmada Kaynak Temelli Yaklaşım Bağlamında İnsan Kaynaklarının Rolü. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 10(20), 267-278.

Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy conversion and management*, 182, 72-88.

Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421.

Brahim, B. T., Wiese, F., & Münster, M. (2019). Pathways to climate-neutral shipping: A Danish case study. *Energy*, 188, 116009.

Brynolf, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of cleaner production*, 74, 86-95.

Bucak, U., Arslan, T., Demirel, H., & Balın, A. (2021). Analysis of Strategies to Reduce Air Pollution from Vessels: A Case for the Strait of Istanbul. *Journal of ETA Maritime Science*, 9(1), 22-30.

Chakravarthy, Balaji; Doz, Yves (1992), "Strategy Process Research: Focusing on Corporate Self-Renewal", *Strategic Management Journal*, C. 13: 5-14.

Cinti, G., Desideri, U., Penchini, D., & Discepoli, G. (2014). Experimental analysis of SOFC fuelled by ammonia. *Fuel Cells*, 14(2), 221-230.

CMBTECH, (2022). Hydrotug <https://cmb.tech/divisions/marine/hydrotug> [Online] [Erişim 21.03.2022].

Dimitriou, P., & Javaid, R. (2020). A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 7098-7118.

DNV. (2021). LNG as ship fuel, <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/environmental-performance.html> [Online] [Erişim 21.01.2022].

DNV. (2022a). LNG as marine fuel, <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/technologies.html> [Online] [Erişim 21.02.2022].

DNV. (2022b). Ammonia has attracted wide interest as a source of zero emission fuel for shipping, <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Elgas. (2022). Energy Content of LNG - Energy Density of LNG, <http://lng.elgas.com.au/energy-content-lng> [Online] [Erişim 21.03.2022].

Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). (2001). Hydrogenproperties, https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf [Online] [Erişim 21.03.2022].

Engineeringtoolbox. (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html [Online] [Erişim 21.03.2022].

Erdemir, D., & Dincer, I. (2021). A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: challenges and solutions. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 4827-4834.

Fridell, E., Salberg, H., & Salo, K. (2021). Measurements of Emissions to Air from a Marine Engine Fueled by Methanol. *Journal of Marine Science and Application*, 20(1), 138-143.

Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesime, U., Pazouki, K., & Murphy, A. (2018). Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production*, 172, 855-866.

Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy*, 126, 159-173.

Huth, M., & Heilos, A. (2013). Fuel flexibility in gas turbine systems: impact on burner design and performance. In *Modern Gas Turbine Systems* (pp. 635-684). Woodhead Publishing.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981), "Methods for multiple attribute decision making" In *Multiple attribute decision making*, pp. 58-191, Springer, Berlin, Heidelberg., https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3

International Labour Organization (ILO). (2022). Diesel Fuel, https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=1561&p_version=2 [Online] [Erişim 21.03.2022].

- International Labour Organization (ILO). (2022). Diesel Fuel, https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=1561&p_version=2 [Online] [Erişim 21.03.2022].
- IMO. (2018). "Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector," London, UK: IMO Publishing.
- Karacaoğlu, K. (2006). İşletmelerin rekabet üstünlüğü anlayışlarını etkileyen ögelerin endüstri temelli ve kaynak temelli bakış açısına göre belirlenmesi: Kayseri ilinde bir araştırma. Çukurova Üniversitesi İİBF Dergisi, 10(2), 1-22.
- Kesieme, U., Pazouki, K., Murphy, A., & Chrysanthou, A. (2019). Biofuel as an alternative shipping fuel: technological, environmental and economic assessment. *Sustainable Energy & Fuels*, 3(4), 899-909.
- Kim, H., Koo, K. Y., & Joung, T. H. (2020). A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 4(2), 26-31.
- Konur, O., Bayraktar, M., Pamik, M., Kuleyin, B., & Nuran, M. (2019). The energy efficiency gap in Turkish maritime transportation. *Polish Maritime Research*.
- Lamas, M. I., Rodríguez, C. G., Telmo, J., & Rodríguez, J. D. (2015). Numerical analysis of emissions from marine engines using alternative fuels. *Polish Maritime Research*, (4), 48-52.
- Leng Leng, X., Deng, Y., He, D., Wei, S., He, Z., Wang, Q., ... & Zhu, S. (2022). A preliminary numerical study on the use of methanol as a Mono-Fuel for a large bore marine engine. *Fuel*, 310, 122309.
- MAN. (2022). Leading experts in dual-fuel solutions, <https://www.man-es.com/marine/products/megi-mega> [Online] [Erişim 21.02.2022].
- MAN. (2022). Methanol for the maritime energy transition, <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/methanol> [Online] [Erişim 21.02.2022].
- MAN. (2022). Unlocking ammonia's potential for shipping, <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine> [Online] [Erişim 21.02.2022].
- Methanex. (2021). Methanol as a Marine Fuel. https://www.methanex.com/sites/default/files/methanex_brochure_marinefuel_final2_032521.pdf. [Online] [Erişim 21.02.2022].
- Methanol Institute. (2016). Physical Properties of Pure Methanol. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Physical-Properties-of-Pure-Methanol.pdf> [Online] [Erişim 21.03.2022].
- Mokhatab, S., Mak, J. Y., Valappil, J., & Wood, D. A. (2013). Handbook of liquefied natural gas. Gulf Professional Publishing.
- Montgomery, Cynthia; Wernerfelt, Birger; Balakrishnan, Srinivasan (1989), "Strategy Content and the Research Process: A Critique and Commentary", *Strategic Management Journal*, C. 10, S. 2: 189-197.
- Mørch, C. S., Bjerre, A., Gøttrup, M. P., Sorenson, S. C., & Schramm, J. (2011). Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system. *fuel*, 90(2), 854-864.
- Noor, C. M., Noor, M. M., & Mamat, R. (2018). Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *renewable and sustainable energy reviews*, 94, 127-142.

Özdemir, B. & Taşçı, D. (2020). Kaynak Temelli Görüş Ekseninde Örgütsel Kaynakların Rekabet Stratejileri Üzerindeki Etkisi: Türkiye'nin İlk 1000 Büyük Sanayi Kuruluşu'nda Bir Araştırma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 15(3), 1019-1042.

Rangone, A. (1999). A resource-based approach to strategy analysis in small-medium sized enterprises. *Small business economics*, 12(3), 233-248.

Reiter, A. J., & Kong, S. C. (2011). Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel. *Fuel*, 90(1), 87-97.

Ren, J., & Liang, H. (2017). Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 12-29.

Ren, J., & Lützen, M. (2017). Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1003-1019.

Roth, (2019). Safety data sheet. https://www.carlroth.com/downloads/sdb/en/7/SDB_7918_GB_EN.pdf [Online] [Erişim 21.03.2022].

Sarvan, F., Arıcı, E. D., Özen, J., Özdemir, B., & İçgen, E. T. (2003). On stratejik yönetim okulu: Biçimleşme okulunun bütünleştirici çerçevesi. *Akdeniz İİ BF Dergisi*, 6, 73-122.

SEA-LNG. (2022). LNG – A FUEL IN TRANSITION, <https://sea-lng.org/reports/sea-lng-2021-22-a-view-from-the-bridge/> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Seddiek, I. S., Elgohary, M. M., & Ammar, N. R. (2015). The hydrogen-fuelled internal combustion engines for marine applications with a case study. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 66(1), 23-38.

The Maritime Executive, (2022). Shipowners Ordered Record Number of LNG-Fueled Vessels in 2021, <https://www.maritime-executive.com/article/shipowners-ordered-record-number-of-lng-fueled-vessels-in-2021> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Tran, T. M. T., Yuen, K. F., Li, K. X., Balci, G., & Ma, F. (2020). A theory-driven identification and ranking of the critical success factors of sustainable shipping management. *Journal of Cleaner Production*, 243, 1-14.

Tusiani, M. D., & Shearer, G. (2016). LNG: Fuel for a Changing World—A Nontechnical Guide. PennWell Books, LLC.

Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and combustion science*, 69, 63-102.

Vejvar, M., Lai, K. H., & Lo, C. K. (2020). A citation network analysis of sustainability development in liner shipping management: a review of the literature and policy implications. *Maritime Policy & Management*, 47(1), 1-26.

Wang, H., Yao, A., Yao, C., Wang, B., Wu, T., & Chen, C. (2020). Investigation to meet China II emission legislation for marine diesel engine with diesel methanol compound combustion technology. *Journal of Environmental Sciences*, 96, 99-108.

Wartsila. (2021). Wärtsilä's LNG experience key to multi-engine order for new Italian ferry, <https://www.wartsila.com/media/news/13-07-2021-wartsila-s-lng-experience-key-to-multi-engine-order-for-new-italian-ferry-2947069> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Wexler, P., Anderson, B. D., Gad, S. C., Hakkinen, P. B., Kamrin, M., De Peyster, A., ... & Shugart, L. R. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of toxicology* (Vol. 1). Academic Press.

Windcatworkboats, (2022) Hydrocat MK3.5 H2, <https://www.windcatworkboats.com/portfolio/hydrocat-mk3-5-h2/> [Online] [Erişim 21.02.2022].

Wu, X., Zhang, L., & Luo, M. (2020). Discerning sustainability approaches in shipping. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 5169–5184.

Yuen, K. F., Wang, X., Wong, Y. D., & Zhou, Q. (2017). Antecedents and outcomes of sustainable shipping practices: The integration of stakeholder and behavioural theories. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 108, 18-35.

Zincir, B., Deniz, C., & Tunér, M. (2019). Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1006-1019.