

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİ KAYNAKLI EGZOZ EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emir EJDER

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GEMİ KAYNAKLI EGZOZ EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Emir EJDER
(512171022)**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

HAZİRAN 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 512171022 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Emir EJDER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “GEMİ KAYNAKLI EGZOZ EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Tanzer SATIR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bora USLUER
Galatasaray Üniversitesi

Teslim Tarihi : 24 Mayıs 2020
Savunma Tarihi : 4 Haziran 2020





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında denizcilik sektörü açısından önemli bir problem olarak karşımıza çıkan, gemi kaynaklı hava kirliliğine neden olan emisyonlar ve bunları azaltma yöntemleri incelenmiş olup karşılaştırılmaları yapılmıştır. Bunlara ilave olarak yeni emisyon düzenlemesine uyum sürecinde sektörel açıdan durumun değerlendirilmesi için örnek olay incelemesi yapılmış olup bir gemi filosu için uygun azaltma yönteminin seçimi gerçekleştirilmiştir.

Tezin hazırlanması ve tamamlanması süresince kıymetli görüş ve tecrübelerinden yararlandığım, süreç boyunca bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Yasin Arslanoğlu'na ve çalışma süresince beni yönlendiren ve yardımlarını eksik etmeyen Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bora Usluer'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Tayfun Uyanık, Arş. Gör. Üstün Atak ve Arş. Gör. Gizem Elidolu'na teşekkür ederim.

Araştırma kapsamında ilgili sistemler konusunda bilgi ve tecrübelerini aktarmaktan çekinmeyen Uzakyol Başmühendisi Erdoğan Özmercan ve Gemi Makineleri İşletme Mühendisi Güfran Şan'a destekleri için teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca hep yanımda olan bana sabır gösteren ve desteğini eksik etmeyen arkadaşım Burcu Demirörs'e teşekkür ederim.

Tüm eğitim ve çalışma hayatım süresince maddi ve manevi olarak desteklerini ve hoşgörülerini esirgemeyen, çalışmalarımı tamamlayabilmem açısından her türlü kolaylığı sağlayan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2020

Emir Ejder
(Uzakyol Vardiya Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. GEMİ EGZOZ EMİSYONLARI VE İLGİLİ DÜZENLEMELER.....	5
2.1 Egzoz Emisyonları ve Emisyon Türleri	5
2.1.1 Kükürt oksit ve partikül madde emisyonları.....	6
2.1.2 Azot oksit emisyonu.....	8
2.1.3 Karbondioksit emisyonu	9
2.1.4 Karbonmonoksit emisyonu	12
2.1.5 Hidrokarbon emisyonu.....	12
2.2 Gemi Kaynaklı Hava Kirliliği İle İlgili Kurallar.....	12
2.2.1 Marpol 73/78 ve Sözleşme Ek VI - Gemilerden kaynaklı hava kirliliği .	12
2.3 Egzoz Emisyonlarının Çevreye ve İnsan Sağlığına Etkileri	13
3. GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİ	15
3.1 Alternatif Yakıtlar	15
3.1.1 Düşük kükürt oranına sahip deniz tipi yakıtlar	16
3.1.2 Sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG).....	17
3.1.3 Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)	18
3.1.4 Metanol	19
3.1.5 Biyoyakıtlar.....	20
3.2 Alternatif teknolojiler	21
3.2.1 Yakıt pili sistemleri (Fuel cells).....	22
3.2.2 Batarya sistemleri.....	23
3.3 Yardımcı Sistemler.....	25
3.3.1 Seçici katalitik indirgeme (Selective catalyst reduction).....	25
3.3.2 Egzoz gazı resirkülasyonu (Exhaust gas recirculation)	26
3.3.3 Egzoz gazı temizleme sistemleri (Scrubber).....	27
4. EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	31
4.1 Gemi Kaynaklı Emisyon Miktarlarının Tahminlenmesi	31
4.1.1 Yukarıdan aşağıya (top-down) yöntemi.....	31
4.1.2 Aşağıdan yukarıya (bottom-up) yöntemi	32
4.1.3 Emisyon faktörlerinin belirlenmesi.....	33
4.1.4 Gemi emisyonlarının çevresel maliyetinin değerlendirmesi.....	35
4.2 Emisyon Azaltma Yöntemleri Maliyetlerinin İncelenmesi.....	36
4.2.1 Mevcut yakıt seçeneklerinin maliyet açısından değerlendirilmesi	37

4.2.2 Egzoz gazı temizleme sistemleri kurulum ve operasyonel maliyetleri	38
4.2.3 Seçici katalitik indirgeme sistemi kurulum ve operasyonel maliyetleri ...	41
4.2.4 Çift yakıtlı makinelerin kurulum ve operasyonel maliyetleri	41
4.3 Emisyon Azaltma Önlemlerinin Fayda-Maliyet Analizi.....	43
4.4 Yatırımların Geri Ödeme Süresinin Hesaplanması	44
4.5 Gemilerin Enerji Verimliliğinin Hesaplanması.....	45
4.6 Bir Filoda Bulunan Geminin Emisyon Azaltma Seçeneğine Karar Verilmesi	47
4.6.1 Yıllık emisyon salınımı hesaplanması.....	48
4.6.2 Salınan emisyonların çevresel fayda ve maliyetlerinin değerlendirmesi ..	50
4.6.3 Emisyon azaltma yöntemlerinin fayda maliyet açısından incelenmesi.....	51
4.6.4 Emisyon azaltma yöntemlerinin geri ödeme sürelerinin karışaltırılması..	53
4.6.5 A gemisi için enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69



KISALTMALAR

BM	: Birleşmiş Milletler
BTU	: İngiliz Isı Birimi
CH₄	: Metan
CH₃OH	: Metanol
CO	: Karbonmonoksit
CO₂	: Karbondioksit
ECA	: Emisyon Kontrol Alanları
EEDI	: Enerji Verimliliği Dizayn İndeksi
EF	: Emisyon Faktörü
EGCS	: Egzoz Gazı Temizleme Sistemi (Scrubber)
EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyon Sistemi
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
GHG	: Sera Gazları
HC	: Hidrokarbon
HFO	: Deniz Tipi Ağır Yakıtlar
ICS	: Uluslararası Deniz Ticaret Odası
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
KW	: Kilowatt
LHV	: Alt Isıl Değer
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MDO/MGO	: Deniz Tipi Dizel Yakıtlar
MPEC	: Deniz Çevre Koruma Komitesi
NO_x	: Azot Oksit
O₂	: Oksijen
PM	: Partikül Madde
ppm	: Milyonda Bir Birim
SFOC	: Özgül Yakıt Tüketim

SO_x : Kükürt Oksit
USD : Amerikan Doları



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Azot oksit (NO _x) limit değerleri.	9
Çizelge 2.2 : 2007-2015 yılları arasındaki deniz yolu taşımacılığı CO ₂ salınımı.	11
Çizelge 3.1 : Diğer yakıtlar ile Metanol özelliklerinin kıyaslanması.	20
Çizelge 4.1 : IMO'nun 2014 yılında yayınladığı emisyon faktörleri.	34
Çizelge 4.2 : AÇA'nın belirlediği emisyon faktörleri.	35
Çizelge 4.3 : Atmosferik emisyonlar için ortalama çevresel maliyetler.	35
Çizelge 4.4 : Dünya genelinde limanlara göre değişen yakıt fiyatları (\$/mt).	38
Çizelge 4.5 : Scrubber sistemi finansal parametreleri.	39
Çizelge 4.6 : Scrubber işletme maliyetleri.	40
Çizelge 4.7 : SCR sistemi kurulum ve işletme maliyetleri.	41
Çizelge 4.8 : Çift yakıtlı makineler için ilk kurulum maliyetleri.	42
Çizelge 4.9 : A dökme yük gemisi özellikleri.	47
Çizelge 4.10 : Yıllık ortalama yakıt tüketim miktarları.	49
Çizelge 4.11 : Yıllık salınan emisyon miktarları.	49
Çizelge 4.12 : Azaltma yöntemlerinin emisyon miktarlarına etkisi.	49
Çizelge 4.13 : A Gemisi çevresel maliyetleri.	50
Çizelge 4.14 : Azaltma yöntemleri kullanılmasının çevresel maliyetlere etkisi.	50
Çizelge 4.15 : Emisyon azaltma seçenekleri ilk kurulum maliyetleri.	51
Çizelge 4.16 : A gemisi için yıllık yakıt maliyeti.	52
Çizelge 4.17 : Emisyon azaltma yöntemlerinin NPV ve EANB değerleri.	52
Çizelge 4.18 : Emisyon azaltma yöntemleri geri ödeme sürelerinin kıyaslanması.	53
Çizelge 4.19 : A gemisi MGO kullanımında enerji verimliliği hesaplanması.	53
Çizelge 4.20 : A gemisi LNG kullanımında enerji verimliliği hesaplanması.	54



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Reel yanma sonunda oluşan egzoz gazı bileşikleri.	6
Şekil 2.2 : Yıllara göre değişen kükürt limitleri.	7
Şekil 2.3 : Kükürt emisyonu kontrol alanları.	8
Şekil 3.1 : 2014-2018 yılları arasındaki yakıt fiyatları.	17
Şekil 3.2 : Seçici katalitik indirgeme sistemi bileşenleri.	26
Şekil 3.3 : İki zamanlı dizel makineleri için EGR sisteminin uygulanması.	27
Şekil 4.1 : 2014-2020 Yılları arası yakıt ve gaz fiyatları.	37
Şekil 4.2 : A gemisi yıllık çalışma periyodu.	48
Şekil 4.3 : A gemisi aylık ana makine ortalama yükleri.	48
Şekil 5.1 : A gemisi yıllık emisyon salınımı.	57
Şekil 5.2 : A gemisi çevresel maliyeti ve sistemlerin çevresel faydaları.	58
Şekil 5.3 : A gemisi için emisyon azaltma yöntemleri ilk kurulum maliyetleri.	59
Şekil 5.4 : A gemisi için EEDI karşılaştırması.	61



GEMİ KAYNAKLI EGZoz EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

ÖZET

Dünya ticaretinin ve uluslararası taşımacılığın büyüyüp gelişmesi ile birlikte taşımacılık sektörü kaynaklı hava kirliliğinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Ülkeler arası taşımacılıkta kritik konumda bulunan gemiler, özellikle son yıllarda gelişen ekonomi ile birlikte taşımacılık sektöründeki artan talebi karşılayabilmek için büyümeye gitmektedir. Bu büyüme, deniz yolu taşımacılığındaki yakıt tüketimini artırmaktadır. Bu tüketimin artması ve ilerleyen yıllarda da artacağı ön görülmesi dikkatleri gemi kaynaklı egzoz emisyonlarına çevirmiştir. Küresel iklim değişikliğine ve atmosferde ısı tutma etkisine sahip sera gazı salınımlarına ciddi oranda katkı sağlayan gemi kaynaklı egzoz gazlarının önemi resmi kurumlar tarafından yayımlanan raporlarda sıklıkla gündeme getirilmektedir.

Gemilerden kaynaklanan egzoz gazı bileşiklerinin başlıcaları CO₂, NO_x, SO_x, PM olarak belirtilmektedir. Alınan tedbirlerin ve yapılması planlanan düzenlemelerin öncelikli amacı bu bileşiklerin salınımını azaltmak üzerine kurulu olduğu görülmektedir. İlerleyen yıllarda sıfır emisyon prensibini benimsemek denizciliğinin önceliği durumundadır.

Atmosfere salınan egzoz gazları, çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri bulunmaktadır. İklim değişikliğine, asit yağmurlarına, yer seviyesi ozon tabakasının oluşmasına, hava kirliliğine neden olmakta ve erken ölümlere, solunum yolu hastalıklarına, kalp hastalıkları gibi rahatsızlıklara neden olarak insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir.

Emisyon Kontrol Alanlarına ek olarak IMO 2020 Kükürt Emisyonu düzenlemeleri ile birlikte denizlerde kullanılacak olan gemi tipi yakıtların kükürt içeriğinde üst limit %0,5 m/m olacak şekilde düzenlemeye gidilmiştir. Bu düzenlemeye uyulabilmesi açısından yeni yakıt türü olan düşük kükürt oranına sahip yakıtlar sektöre entegre edilmeye başlanmıştır. Bu seçeneğin yanında IMO'nun kabul ettiği alternatif emisyon azaltma seçenekleri (Scrubber, SCR, EGR vs.) de deniz ticaretinde aktif konumdaki firmalar tarafından değerlendirilmektedir. Bunlara ilave olarak teknolojinin gelişmesi ile birlikte alternatif yakıt ve sevk sistemleri de denizcilik sektöründe yatırımcıların ilgisi çekmekte ve hem doğaya hem de insan sağlığına olumlu yönde katkı yapmaktadır.

2020 yılı düzenlemelerinin hayata geçmesiyle yatırımcılar, mevcut seçenekler arasından sahip oldukları filo çerçevesinde hem bugünü hem de yarını düşünerek seçimlerini değerlendirmek durumunda kalmaktadırlar. Her işletme gibi öncelikli hesaplamalar fayda maliyet analizi çerçevesinde değerlendirilmesi ön görülmektedir. Bununla birlikte yatırımların sahip oldukları olumlu ve olumsuz etkileri de değerlendirilen seçenekler arasında bulunmaktadır.

Dünya ekonomisinin ve konjüktörünün dinamik bir yapıya sahip olması nedeniyle petrol fiyatlarında sürekli ve zaman zaman ani değişimler söz konusu olmaktadır. Yakıt fiyatlarının gemilerin en önemli gideri olarak değerlendirdiğimizde armatörler söz konusu giderleri minimum seviyede tutmak istemeleri doğal karşılanmaktadır. Düşük yakıt fiyat politikasına taraf olmak isteyen işletmeciler öncelikli olarak yakıt seçenekleri içerisinde en düşük fiyata sahip olan deniz tipi ağır yakıtların (Heavy Fuel Oil) kullanımına devam etmek istemekte ve bu nedenle gemilerine egzoz gazı temizleme ünitesi kurma seçeneğini çözüm olarak düşünmektedirler. Her ne kadar sektör, bir süre egzoz gazı temizleme seçeneğini analiz etse de yeni yakıt türünün değerlendirilmesi fikri firmalar tarafından kabul edilmeye başlanmıştır.

Mevcut sistemlerinin maliyetlerinin yanı sıra kendi içerisinde pozitif ve negatif etkileri mevcuttur. Yardımcı sistemlerin ilk kurulum ve işletmeye getirdiği ek maliyetler nedeniyle analizin iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Günümüzde popüler olarak görülmekte olan açık döngü scrubber sistemin tercih edilmesinin nedenlerinden bir tanesi hibrit scrubber sisteme göre fiyatının olmasıdır. Ancak incelendiğinde bir çok liman çevre kirliliğini önlemek amaçlı açık döngü scrubber sisteminin limanlarında kullanılmasını engelleyen düzenlemeleri hayata geçirmiştir ve her geçen gün bu limanların sayısında artış görülmektedir. Hibrit seçeneklerinde maliyetinin fazla olması derin ve teknik araştırma yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Yeni yakıt türü olan düşük kükürt oranına sahip yakıtların (VLSFO) değerlendirilmesi yapıldığında ise kullanımının yine birincil tüketiciler tarafından test edileceği ve bütün olumsuzluklar ile süreç içerisinde aktif kullanım sırasında birebir deneyimlenecek olması işletmeciler tarafından gemileri tedbirli davranmaya yöneltmektedir. Ancak klas kuruluşları tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda da görülmektedir ki yeni yakıtın yapısal özelliklerinin mevcut yakıtlarla kıyaslandığında farklılık gösterdiği ve bu farklılıkların sistemsel açıdan uyumluluk, akışkanlık, katalizör madde içeriği gibi konularda problemler meydana getireceğini ön görmektedir.

Çalışma kapsamında deniz ticaretinin içerisinde bulunan bir ticaret filosunun maliyet ve diğer yönleride ele alacak şekilde incelenerek en uygun seçim yapılamaya çalışılacaktır. Sektör içerisindeki fikirlere de önem vererek uzakyol ikinci mühendisler, uzakyol baş mühendisler ve yöneticilerin görüşlerine başvurularak tüm denizcilik piyasasının hangi yöne eğilimde olduğu incelenerek yatırım planı yapılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda örnek olay incelemesi için 2005 yılında inşa edilen A gemisi seçilmiştir. Türk Denizciliğinin sahip olduğu gemilerin yaşlarına bakıldığında mevcut filo durumuna ışık tutması açısından bu taşıma kapasitesine ve yaşa sahip bir gemi seçilerek yenileme yapılması veya yardımcı sistemlerle donatılması durumu üzerine bir çalışma yapılmıştır.

Değerlendirilen süreç içerisinde geminin çalıştığı bölgeler incelenerek yatırım kapsamında scrubber sistemlerinin kurulum maliyetlerinin tersane masrafları ile birlikte 2.500.000-3.500.000 USD arasında olması beklenmektedir. Bu maliyetin yanısıra bu süreç içerisinde scrubber sisteminin neden olabileceği işletme ek yükleri ve ülkelerin iç denizlerinde özellikle açık döngü scrubber sisteminin kullanmayı yasaklaması gibi nedenlerden dolayı firmalar diğer seçeneklere yönelmeye başlamışlardır.

Yapılan çalışmalarda da çok net görülmektedir ki LNG kullanımı emisyon azaltma yöntemleri arasında en etkili yöntem olarak karşımıza çıkmakta ve gelecek açısından en avantajlı yakıt konumunda bulunmaktadır. LNG kullanımının gün geçtikçe yaygınlaşacağı da dikkate alındığında uyumlaştırma süreci içerisinde LNG

yatırımlarına ağırlık vermek firmaları avantajlı konuma getirecektir. Sektör açısından firmaları ileriye taşıyacak olan bu yakıt türü, ilk kurulum maliyetlerinin çok yüksek olması, LNG ikmal noktalarının yaygınlığının az olması, yetkin personel eksikliği gibi nedenlerden dolayı gelişim sürecindeki bir sistem olarak görülmektedir. Maliyet problemlerinin çözülmesi ve denizcilik açısından dağıtım ağlarının geliştirilmesi ile birlikte firmalar bu yakıt türünü benimseyecek ve Türk denizciliğinde bir yeni bir geçiş dönemi yaşanacağı öngörülebilmektedir.

Tüm seçenekler değerlendirildiğinde IMO 2020 kükürt emisyonu düzenlemesi geçiş dönemi için sahip olunan filo verileri doğrultusunda ve sektöre yön veren firmaların süreci nasıl yönettiği de gözlemlenerek en doğru karar verilmeye çalışılmalıdır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda filo içerisinden seçilen gemi için gemi verileri dikkate alındığında MGO kullanmanın öncelikli seçenek olduğu ancak çalışma bölgesi değerlendirildiğinde VLSFO seçeneğinin ön plana çıktığı görülebilmektedir.





COMPARATIVE ANALYSIS OF SHIP-BASED EXHAUST EMISSIONS REDUCTION METHODS

SUMMARY

With the growth and development of world trade and international transportation, the importance of air pollution originating from the transportation sector is increasing day by day. Ships, which are in a critical position in international transportation, are growing to meet the increasing demand in the transportation sector, especially with the developing economy in recent years. This growth increases fuel consumption in maritime transport. Increasing this consumption and anticipating that it will increase in the coming years turned the attention to emissions from ships. The importance of exhaust gases from ships, which contribute significantly to global climate change and the greenhouse gas emissions that have the effect of heat retention in the atmosphere, is frequently raised in the reports published by official institutions.

The main exhaust gas compounds originating from ships are stated as CO₂, NO_x, SO_x, PM. It seems that the primary aim of the measures taken and the planned arrangements is to reduce the release of these compounds. Adopting the zero emission principle in the coming years is a priority for world shipping.

Exhaust gases released into the atmosphere have negative effects on the environment and human health. It causes climate change, acid rain, ground level ozone layer formation, air pollution and negatively affects human health by causing premature deaths, respiratory diseases, and diseases such as heart diseases.

In addition to the Emission Control Areas, with the IMO 2020 Sulfur Emission regulations, the upper limit in the sulfur content of the ship type fuels to be used in all the seas of the world has been regulated as 0.5% m/m. In order to comply with this regulation, fuels with low sulfur content, which is the new fuel type, started to be integrated into the sector. In addition to this option, alternative emission reduction options (Scrubber, SCR, EGR etc.) accepted by IMO are also evaluated by companies active in maritime trade. Additionally, with the development of technology, alternative fuel and propulsion systems attract investors in the maritime industry and contribute positively to both nature and human health.

With the implementation of 2020 regulations, investors have to evaluate their choices by considering both today and tomorrow within the framework of their fleet. Priority calculations like every business are foreseen to be evaluated within the framework of cost-benefit analysis. In addition, the positive and negative effects of investments are among the options evaluated.

Due to the dynamic nature of the world economy and its conjunctors, there are constant and occasional sudden changes in oil prices. When we consider fuel prices as the most important expense of ships, it is natural that ship owners want to keep these expenses to a minimum. The operators who want to be a party to the low fuel price policy are

primarily the first option to be asked to continue using heavy fuel oil which has the lowest price in the fuel options, and therefore see the option to install an exhaust gas cleaning unit for their ships. Although the sector has analyzed the exhaust gas cleaning option for a while, the idea of evaluating the new fuel type has started to be accepted by the companies.

Existing systems have positive and negative effects in addition to the costs. Auxiliary systems must be analyzed well due to the additional costs incurred by the initial installation and operation. One of the reasons why the open loop scrubber system, which is seen to be popular today, is preferred, is the price difference compared to the hybrid scrubber system. However, when examined, many ports in the world have implemented regulations that prevent the use of open loop scrubber system in the ports to prevent environmental pollution, and the number of these ports is increasing day by day. The high cost of hybrid options necessitates deep and technical research.

When evaluating the new fuel type, which has very low sulfur content (VLSFO), the usage will be tested by primary consumers and will be experienced during active use with all the negativities, and the ship's personnel and technical department are directed to act prudently. However, it is also seen in the studies carried out by the classification societies that the structural properties of the new fuel differ when compared to the existing fuels and these differences will cause problems such as systematic compatibility, viscosity, and catalyst content.

Within the scope of the study, it will be tried to make the most appropriate choice by examining the cost and other aspects of a sea trade fleet in the world trade. By paying attention to the ideas in the sector, the investment plan was tried to be made by examining the direction of the entire maritime market by seeking the opinions of the second engineers, chief engineers and managers. In this context, ship A which was built in 2005 has selected for case study. In view of the age of the ships owned by Turkish Shipping, a study has been conducted on the condition of renovating or equipping them with auxiliary systems by selecting a ship with this carrying capacity and age in order to shed light on the current fleet situation.

Within the process under consideration, the regions where the ship operates are examined and the installation costs of the scrubber systems are expected to be between 2.500.000-3.500.000 USD together with the shipyard costs. In addition to this cost, firms have begun to turn to other options due to the reasons such as business overheads that may be caused by the scrubber system and the prohibition of using open loop scrubber system in the inland seas of the countries.

It is clearly seen in the studies conducted that the use of LNG emerges as the most effective method among emission reduction methods and is the most advantageous fuel for the future. Considering that the use of LNG will become widespread day by day, focusing on LNG investments in the harmonization process will bring the companies to an advantageous position. If preferred, this type of fuel, which will carry the companies forward in terms of the sector, is seen as a system in the development process due to the very high initial installation costs, low prevalence of LNG supply points, and lack of competent personnel. With the solution of cost problems and the development of distribution networks in terms of maritime, firms will adopt this type of fuel and it is predicted that a new transition period will be experienced in Turkish Maritime.

When all options are evaluated, it should be tried to make the most correct decision for IMO 2020 sulfur emission regulation in line with the fleet data available for the transition period and by observing how the companies leading the sector are managing the process. As a result of the work carried out, it can be observed that considering the ship data for the ship selected from the fleet, using MGO is the primary option, but when the work area is evaluated, it comes to the fore in the VLSFO option.





1. GİRİŞ

Deniz taşımacılığı, uluslararası ticaretin %80-90'ını temsil eden küresel ekonominin önemli bir bileşenidir. Uluslararası Deniz Ticaret Odası'na göre, 2030'da yaklaşık 17 milyar ton yük taşınmasını öngörürken, yine aynı yıl deniz ticaret hacminin 9 milyar tondan yaklaşık 20 milyar tona çıkacağını tahmin etmektedir (ICS, 2014). Küresel ölçekteki bu artış beklentileri, hem deniz ticaretinde hem de deniz ticaretinde kullanılan filoların büyüklüğündeki artışın devam edeceğini göstermektedir. 2015 yılında, küresel deniz yolu taşımacılığında kullanılan yakıt tüketiminin (yaklaşık 300 Milyon Ton) %72'si deniz tipi ağır yakıtlar (Heavy Fuel Oil), %26'sı deniz tipi dizel yakıtlar (Marine Diesel Oil) ve %2'lik sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olarak karşımıza çıkmaktadır (Olmer ve diğ, 2017). Küresel deniz yolu taşımacılığındaki artış beklentileri deniz yakıtının tüketimini, bulunabilirliğini ve fiyatını etkileyeceği öngörülmektedir.

Denizcilik endüstrisindeki yakıt tüketimi, diğer sektörlerde olduğu gibi atmosferdeki emisyonlarla yakından ilgilidir. Uluslararası filonun küresel antropojenik emisyonlara önemli ölçüde katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Gemi kaynaklı egzoz emisyonları başlıca; karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), kükürt oksitler (SO_x) ve uçucu organik bileşikler (hidrokarbonlar) oluşturmaktadır. Denizcilik endüstrisi, yılda yaklaşık 938 milyon ton karbondioksit, 20,9 milyon ton azot oksit ve 11,3 milyon ton kükürt dioksit emisyonlarının salınımından sorumlu tutulmaktadır (Smith ve diğ, 2014). Egzoz emisyonları çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri bulunmaktadır. Hava kirliliğinin yanı sıra kalp hastalıkları, akciğer kanseri, astım gibi solunum yolu hastalıklarını tetikleyerek erken ölümleri meydana getiren olumsuz sağlık etkileri bulunmaktadır (Silva ve diğ, 2016). Dünya Sağlık Örgütü, yaklaşık 4,2 milyon erken ölümünün ortamdaki hava kirliliği ile ilgili olduğunu tahmin etmektedir (WHO, 2018). Deniz yolu taşımacılığı küresel kükürt oksit (SO_x) emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunduğundan, son tahminlere göre gemi kaynaklı sağlık etkileri nedeniyle yılda yaklaşık 400.000 prematüre ölümü temsil ettiğini göstermektedir (Sofiev ve diğ, 2018). Avrupa Çevre Ajansı (AÇA), Avrupa Birliği'ndeki (AB) kötü hava kalitesinin

yıllık yaklaşık yarım milyon erken ölüme neden olduğunu varsaymaktadır. Norveç'te her yıl 1500'e yakın kişinin aynı sebepten ötürü öldüğü tahmin edilmektedir (Mjelde ve diğ, 2019).

Deniz taşımacılığının çevresel etkilerinin en önemli sonucu ise küresel iklim değişikliğine olan etkisi gösterilebilir. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), BM'in gemilerin güvenliğini ve emniyetini sağlamaktan ve gemilerden kaynaklanan deniz kirliliğini önlemekten sorumlu uzmanlaşmış bir alt kuruluşudur. Başlıca rollerinden biri, denizcilik sektöründe uluslararası çevresel kaliteye ilişkin sözleşmelerin uygulanması ve gözden geçirilmesidir. Denizcilik sektöründe çevresel kaliteye ilişkin en önemli uluslararası sözleşme, Denizlerin Gemiler Tarafından Kirlenmesinin Önlenmesine Ait Uluslararası Sözleşme'dir (MARPOL). MARPOL gemi kaynaklı çevre kirliliğinin önüne geçilebilmesi adına 6 farklı alt düzenlemeyi içermektedir.

Hava kirliliğinin önlenmesi için yürürlükte olan MARPOL Ek VI, ilk olarak 1997 yılında kabul edilmiştir ancak yürürlüğe 19 Mayıs 2005 tarihinde girmiştir. SO_x, NO_x ve Ozon tabakasına zarar veren diğer gazlar için düzenlemeler getirilmiştir. Hava kirliliğinin azalmasını hedefleyerek bazı bölgeler için Emisyon Kontrol Alanları düzenlenmiş (ECA'lar) ve bu bölgeler içerisinde görev yapacak gemilerin uyması gereken katı emisyon kuralları getirmiştir. (Örneğin; Baltık Denizi Bölgesi, Kuzey Denizi Bölgesi, ABD Karayip Denizi Bölgesi, vb.) Kükürt oksit (SO_x) ve partikül madde (PM) emisyonları için emisyon kontrolleri, gemi makinelerinde, jeneratörlerde, kazanlarda ve inert gaz jeneratörlerinde kullanılan yakıtlar için geçerli olmaktadır (IMO, 2017a).

ECA'lar için SO_x ve PM limitleri 1 Ocak 2015'ten itibaren %0,10'a düşürülmüştür. MARPOL Ek VI tekrar gözden geçirilmiş ve Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından revize edilerek 1 Ocak 2020'den geçerli olmak üzere gemilerde kullanılacak yakıtların kükürt limitleri %0,5 m/m olacak şekilde düzenlenmiştir (IMO, 2017b). Denizcilik endüstrisi üzerinde büyük bir etkisi olacak olan bu önemli karar 2016 yılında IMO'nun Deniz Çevre Koruma Komitesi'nde (MEPC 70) alınmıştır. IMO, bu düzenlemelere ek olarak küresel deniz taşımacılığının karbondioksit salınımını 2050 yılına kadar 2008 yılı seviyeleriyle kıyaslandığında en az %50 oranında azaltmayı hedeflemiştir. Bu kapsamda Enerji Verimliliği Dizayn Endeksi (EEDI) ve Gemi Enerjisi Verimliliği Yönetim Planları'nın (SEEMP) tanıtımını gerçekleştirerek gemiler için enerji verimliliği iyileştirmeleri üzerinde

düzenlemeler yapılacağını açıklamıştır. Mevcut düzenlemelerle ve yeni emisyon azaltma teknolojilerinin uygulanması yoluyla gemilerden kaynaklanan emisyonların azaltılması amaçlanmaktadır. Sonuç olarak, denizcilik sektörü doğrudan emisyonları azaltarak iklim değişikliğinin azaltılmasına katkıda bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda düşük karbonlu yakıt altyapısının geliştirilmesini sağlayabilecektir. Diğer enerji sektörlerinin karbon salınımlarını azaltmasında referans alabileceği konuma gelerek yeniliklerin öncüsü olarak gösterilebilecektir.

Mevcut yakıt havuzuna bakıldığında yüksek kükürt oranına sahip (maksimum %3,50 m/m) deniz tipi ağır yakıtlar (Heavy Fuel Oil), deniz tipi dizel (Marine Diesel Oil) yakıtların yanı sıra %0,10 m/m kükürt oranına sahip ultra-düşük kükürtlü deniz tipi yakıtlar (Ultra Low Sulphur Fuel Oil) hakimdir. 2020 kükürt düzenlemeleri için yakıt üreticilerinin %0,50 m/m kükürt sınırını da karşılayabilen yakıt olan çok düşük kükürt oranına sahip (VLSFO) üretmesiyle birlikte kullanıcıların tercihleri de değişeceği öngörülmektedir. VLSFO, 2020 regülasyonuna uyumu için ortalama %20 HFO ve %80 MGO karışım oranına olduğunu varsayılmaktadır (Pavlenko ve diğ., 2020).

Emisyon kontrol alanlarında daha sıkı bir emisyon düzenlemesinin getirilmesiyle bugünkü yakıt fiyatlarının değişken niteliği göz önüne alındığında bir geminin işletmeciliği ile ilgili ekonomik risk gün geçtikçe artmaktadır. Yeni düzenlemeler bir yandan gemi emisyonlarının neden olduğu çevresel zararı önemli ölçüde azaltırken diğer yandan özellikle emisyon kontrol alanlarında çalışmak isteyen gemilere büyük maliyetler getirecektir. Düzenlemelerin nasıl ele alınacağına dair karar özel inisiyatiflere bırakılmıştır. Karar, birçok faktöre ilişkin olarak alınmalıdır. Artan yakıt tüketimi ve emisyonlar gibi ek etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kararlar genellikle önemli bir ilk kurulum veya başlangıç maliyeti olan geri dönüşü olmayan yatırımlar anlamına gelmektedir.

Denizcilik şirketleri düzenlemelere uyum sürecinde şirket içi politika oluşturma, uygulama açısından çevresel zararları, ek maliyetleri ve şirket içi gelir giderleri dengeleme gibi durumlarla karşılaşmaktadır. Bu düzenlemelerin uygulanması şirket için olumlu bir fayda gerektirir, bu da faydaların maliyetlerden ağır basması gerektiği anlamına gelmektedir. Faydaların bu düzenlemedeki maliyetlerden daha ağır basıp basmadığı da gemi sahipleri tarafından hangi indirgeme yönteminin seçildiğine bağlı olmaktadır. Yeni teknolojiler, operasyonel kontroller ve piyasaya dayalı stratejiler değerlendirildikten sonra gemi kaynaklı hava kirliliğinin önüne geçilebilmektedir.

Gemi işletmecileri, yeni emisyon azaltma sistemlerini benimseyerek veya düzenlemelere uygun deniz tipi yakıtlara (düşük kükürt oranına sahip yakıtlar) geçiş yaparak düzenlemelere uyabilir ya da eski makine sistemlerinin değiştirilmesi ve alternatif yakıt sistemlerinin tercih edilmesiyle bu geçiş sürecini tamamlayabilirler. Günümüzde alternatif yakıt seçenekleri içerisinde LNG kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşma başlamıştır. Gemilerin SO_x, NO_x ve PM için MARPOL Ek VI hedeflerine ulaşmasını sağlar. LNG, HFO ve MDO'ya kıyasla kükürt içermez ve yaklaşık %90 daha az NO_x içermektedir. Ancak güvenlik riskleri, düzenleme, altyapı eksikliği ve yatırım maliyeti nedeniyle gelişim sürecindedir (IMO, 2016).

Düşük kükürt oranına sahip deniz tipi yakıtlara geçiş ya da egzoz emisyonu azaltma yöntemlerinden olan seçici katalitik indirgeme (SCR) ve egzoz gazı temizleme sistemi (scrubber) kullanılarak gemi kaynaklı kirliliğe karşı gemilerin çevresel performansını iyileştirdiği kanıtlanmıştır. Bu sistemler birlikte kullanıldığında azot oksit (NO_x) emisyonlarını %90-95, kükürt oksit (SO_x) emisyonlarını ve partikül madde (PM) emisyonlarını %98 azaltıldığı belirtilmektedir (Walker ve diğ, 2019).

Dünya ticaretinde faaliyetlerine devam etmekte olan bir deniz ticaret filosunun durumunu değerlendirebilmek adına filo içerisinde bulunan gemilerin önemli bir kısmından çalışmanın analizi için veriler toplanmıştır. Denizcilik sektörünün önde gelen yöneticileri ile görüşmeler gerçekleştirilerek çok değerli uzman görüşlerine başvurulmuştur. Ülke sınırları içerisinde bulunan tersanelerde azaltma yöntemlerinin uygulanması açısından gerekli olan süre ve şartları hakkında görüşmeler gerçekleştirilmiştir. Sektörel açıdan durumun tespiti için birçok Uzakyol Baş Mühendisi ve Uzakyol İkinci Mühendisi ile görüşmeler yapılarak hem 2020 düzenlemeleri hem de emisyon azaltma seçenekleri hakkındaki görüş ve önerileri değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, gemilerden kaynaklı emisyon ve kirliliği azaltabilecek çeşitli önlemlerin detaylı bir analizini önermektedir. Çalışma kapsamında elde edilen tüm veriler, görüş ve öneriler değerlendirilerek bir örnek olay oluşturulmuştur. Bu örnek olayda ele alınan geminin mevcut seçeneklerine odaklanılırken düşük kükürtlü deniz tipi yakıtlara geçme, egzoz gazı temizleme sistemi kurma seçenekleri ya da çift yakıtlı makinelerin (LNG) kullanımı konusu değerlendirilmektedir. Böylece gemi sahipleri azaltma önlemlerini kullanmanın maliyetleri ve olası faydaları hakkında daha iyi bir anlayış kazanarak Türk denizcilik filolarının gelişiminde katkıda bulunabilirler.

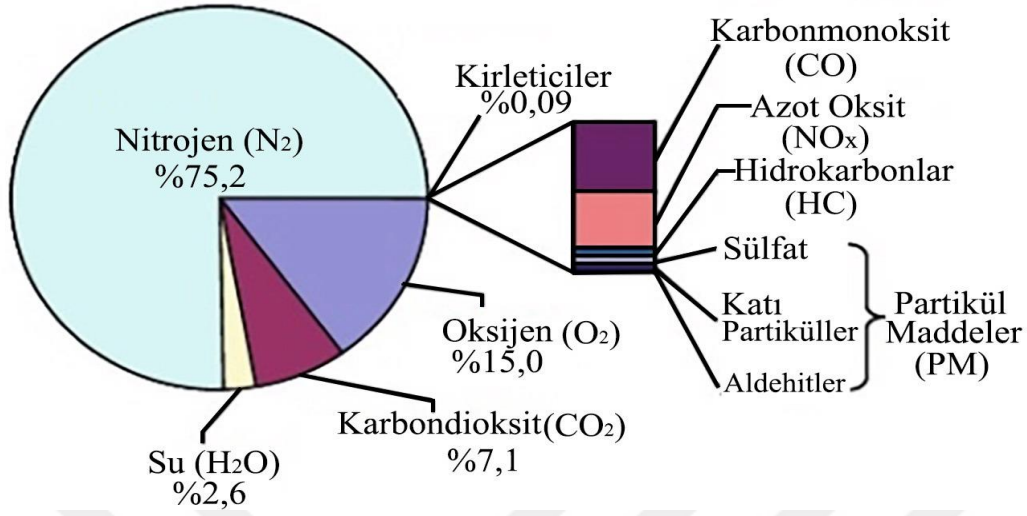
2. GEMİ EGZOZ EMİSYONLARI VE İLGİLİ DÜZENLEMELER

2.1 Egzoz Emisyonları ve Emisyon Türleri

Günümüzde gemilerin hareketi ve gemi bünyesindeki elektrik ihtyacının karşılanması için dizel makinelerin kullanılması yaygındır. Gemiler tarafından üretilen ve hava kirliliğine neden olan zararlı gazlar bu dizel makinelerin hareketi için kullanılan petrol türevi yakıtların yanması sonucu açığa çıkmaktadır.

Dizel motor, diğer içten yanmalı motorlar gibi, yakıtta bulunan kimyasal enerjiyi mekanik güce dönüştürür. Bunun için dizel motorlarda, silindire enjekte edilen yakıtın kendiliğinden tutuşmasını sağlamak amacıyla gerekli olan yüksek sıcaklıklara ulaşmak için hava sıkıştırılır. Dizel yakıt, ideal bir yanma işlemi sırasında sadece karbondioksit (CO_2) ve su buharı (H_2O) üretecek olan hidrokarbonların bir karışımıdır. Ancak yanma işlemi ideal ve tam bir işlem olmamakla birlikte gerçekte, dizel yakıt %100 hidrokarbon da değildir. Gerçek yanmada dizel motor egzoz emisyonları; CO_2 ve H_2O 'ya ek olarak, partikül madde (PM), hidrokarbonlar (HC), karbonmonoksit (CO), azot oksitleri (NO_x), kükürtdioksitleri (SO_2) ve diğer bileşikleri içermektedir (Wang, 2010). Şekil 2.1'de gerçek yanma sonunda meydana gelen bileşikler gösterilmiştir (Mollenhauer ve Tschöke, 2010). Oluşan bu yan ürünlerin çoğu; eksik yakıt yanması, yüksek sıcaklık ve basınç altındaki karışım bileşenleri ile aralarındaki reaksiyonlar, dizel motor yağlama yağının yanması ve yağ katkıları gibi yanma sırasında çeşitli, ideal olmayan işlemlerden kaynaklanmaktadır.

Olmer N ve diğerleri (2017) yaptığı çalışmada şuna değinmiştir; deniz yolu taşımacılığından kaynaklanan emisyonlar yakıtlara ve verimliliklere bağlıdır: farklı yakıtlar değişen CO_2 , SO_x , NO_x ve metan emisyonlarına sahiptir ve makine verimi düşük gemiler daha fazla yakıt harcamı yapmaktadır. İstatistiklere göre, emisyon bileşiklerin yaklaşık %40'ı sağlık ve çevre üzerinde olumsuz etkileri bulunan ve hava kirliliğine neden olan maddelerdir (Mauderly, 1992, ss. 119–155.).



Şekil 2.1 : Reel yanma sonunda oluşan egzoz gazı bileşikleri.

2.1.1 Kükürt oksit ve partikül madde emisyonları

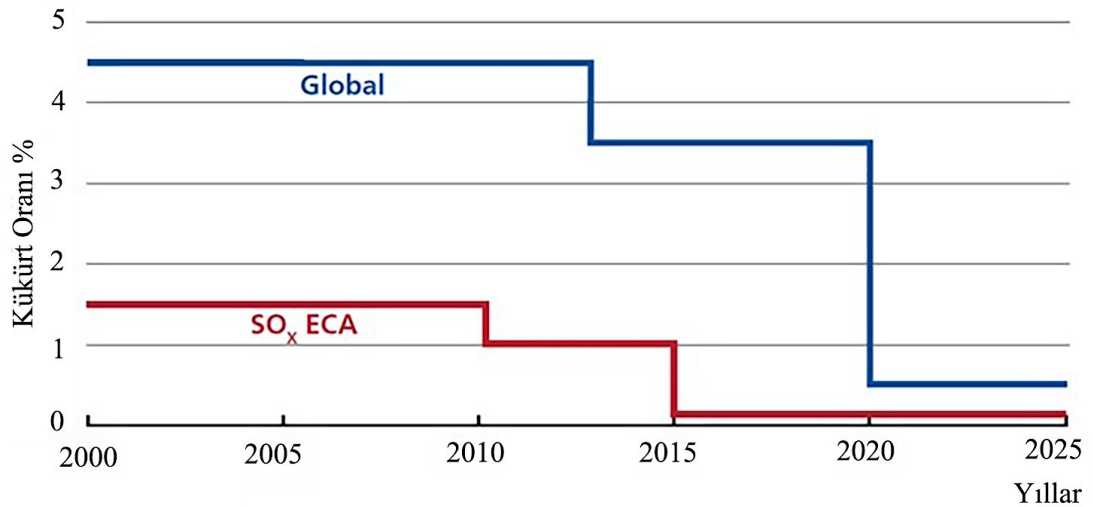
Kükürt oksit (SO_x) emisyonları doğrudan yakılan yakıtın kükürt içeriği ile ilişkilidir. Deniz tipi yakıtlardaki kükürt içeriği %0,1 ile 3,5 arasında iken, kara bazlı taşıma için kullanılan yakıtlarda %0,001 ile 0,005 (10-50 ppm) arasındadır (Styhre ve Winnes, 2019). Yakıtın hidrokarbonlarına bağlı kükürt, yanma sırasında oksijenle reaksiyona girmekte ve kükürt oksitler (SO_x) oluşmaktadır.

Kükürt dioksit (SO₂) hızla atmosferde sülfat parçacıkları oluşturur ve atmosferde uzun mesafeler taşınabilir. Normal olarak egzozda belli bir miktar kükürt dioksit (SO₂), kükürt trioksite (SO₃) dönüşmektedir. SO₃ egzoz sistemindeki istenmeyen bir bileşiktir çünkü, suyla temasta hızla aşındırıcı özelliği olan sülfirik asite (H₂SO₄) dönüşmektedir. SO₃ oluşumu; kükürt, yanma sıcaklığı, basıncı ve hava miktarı ile belirlenmektedir.

Partikül madde oluşumu ise hem yanma özelliklerine hem de yakıt tipine bağlıdır. Partikül madde emisyonu, içerik olarak; egzozda asılı olan çok sayıda karmaşık katı ve uçucu partiküllerin bir araya gelmesinden oluşur. Deniz tipi ağır yakıtlar (HFO) partikül oluşumunda merkezi rol oynayan yüksek seviyelerde kül ve yanmadan etkilenmeyen ve egzozda büyük parçacıklar olarak bulunan, karmaşık hidrokarbon molekülleri olan asfalten içermektedir. Bunlara ilave olarak yakıtlar, içerisindeki kükürt içeriği de oksitlenip kükürt oksit (SO_x) parçacıkları oluştururken, partikül madde emisyonları oluşmasında önemli bir etkiye sahiptir. Genel olarak deniz tipi

dizel yakıtları (MDO, MGO) deniz tipi ağır yakıtlardan (HFO) daha az partikül emisyonuna neden olmaktadır. Yakıtların yanması sırasında açığa çıkan katı ve sıvı parçacıklardan oluşan partikül maddeler, hava kirliliğine sebebiyet vererek insan sağlığını etkilemektedir. Parçacıklı maddenin bir bileşeni olan siyah karbon, CO₂ sonrası küresel ısınmaya en çok katkı yapan ikinci kaynak olarak gösterilmektedir.

MARPOL 73/78 Sözleşme Ek VI Düzenleme 14'e göre belirtilen kükürt oksit emisyonu kontrol alanlarına (SECA) getirilen limitler çerçevesinde, bu bölgelere çalışacak olan gemilerin kükürt oksit ve emisyon düzenlemesine uygun yakıt kullanımını gerçekleştirmektedir. Dünya genelinde belirlenen kükürt oksit emisyon limitlerinden farklı olarak kükürt emisyonu kontrol alanlarında (SECA) 1 Temmuz 2010 yılında üst kükürt limiti %1,50 m/m olarak düzenlenmiştir, sonrasında gerçekleştirilen değişiklik ile limit değeri 1 Temmuz 2010 ve 1 Ocak 2015 tarihleri arasında %1,00 m/m olarak şekillendirilmiştir. Düzenleme, 1 Ocak 2015 tarihinden itibaren üst limit %0,10 m/m belirlenmiş ve son halini almıştır. Şekil 2.2'de tarihsel olarak kükürt oranı değişimi gösterilmiştir (Schinas ve diğerleri, 2012).



Şekil 2.2 : Yıllara göre değişen kükürt limitleri.

Bu bölgelerde çalışacak olan gemiler düzenlemeleri yerine getirebilmek için farklı nitelikteki yakıtları tedarik etmek zorunda kalırlar. Kükürt emisyonu kontrol alanlarına (SECA) girmeden önce uyumlu yakıt kullanımı yönetmeliklere göre tamamen hazır olması ve gemide bu işlemin nasıl gerçekleştirileceğine ilişkin yazılı prosedürlerin uygulanması gerekmektedir. Kükürt oksit emisyon bölgelerini belirten harita Şekil 2.3'de verilmiştir (Url-1).



Şekil 2.3 : Kükürt emisyonu kontrol alanları.

2.1.2 Azot oksit emisyonu

Nitrik oksit (NO) ve nitrojen dioksit (NO₂) birlikte nitrojen oksitler (NO_x) olarak adlandırılmaktadır. Azot oksit (NO_x) emisyonları tüm içten yanmalı motorlardan kaynaklanan emisyonlarda bulunan kritik emisyonlardan biri olarak kabul edilmektedir. MARPOL Ek VI'nin 13. Yönetmeliğinin Azot oksit (NO_x) emisyon limitleri, bir gemiye kurulu 130 kW'dan daha fazla güçle çalışan her dizel motoruna uygulanmaktadır.

Azot oksit emisyon standartları genellikle Seviye (Tier) I,II, III standartları olarak adlandırılmıştır. Tier I standartları, Ek VI'nin 1997 versiyonunda tanımlanmış olup, Tier II / III standartları ise, 2008'de kabul edilen Ek VI düzenlemeler ile belirlenmiştir. Çizelge 2.1'de görülebileceği üzere dizel motorlarının maksimum devir sayısına ve geminin inşa edildiği yıla bağlı olarak oksit (NO_x) emisyon limitleri belirlenir. Tier I,II,III değerleri dizel motorları maksimum devir sayısına (n) göre olmak üzere 130 devir sayısından küçük, 130 ile 2000 devir sayısı aralığında ve 2000 devir sayısından yüksek olacak şekilde azot oksit limit değerleri yapım yıllarını da kapsayacak şekilde ayrılmıştır.

Çizelge 2.1 : Azot oksit (NO_x) limit değerleri.

Seviye (Tier)	Tarih	$n < 130$	$130 \leq n < 2000$	$n \geq 2000$
Seviye I (g/kWh)	2000	17.0	$45 \times n^{-0.2}$	9.8
Seviye II (g/kWh)	2011	14.4	$44 \times n^{-0.23}$	7.7
Seviye III (g/kWh)	2016	3.4	$9 \times n^{-0.2}$	1.96

Tier III kontrolleri, yalnızca NO_x emisyonlarını sınırlandırmak için kurulan Emisyon Kontrol Alanlarında (ECA) çalışırken, Seviye (Tier) II, kontrollerin uygulandığı alanların dışında belirtilen gemiler için geçerlidir. Gemi dizel motorların emisyon değeri, Tier II ve Tier III limitleri için “NO_x Technical Code 2008” uyarınca belirlenmelidir. Tier I motorlarının çoğu, MEPC.1 / Circ.679 uyarınca, 1 Ocak 2011'e kadar belirli durumlarda kullanılmaya devam edebilecek olan, NO_x Teknik Kodu'nun daha önceki sürümü olan 1997 sürümünde onaylanmıştır. 1997 NO_x Teknik Kodu, bu motorların kullanım ömrü boyunca geçerli olmaya devam edecektir.

2.1.3 Karbondioksit emisyonu

Gemilerden salınan başlıca sera gazı karbondioksittir (CO₂). Hidrokarbon yakıtların yanması kaçınılmaz olarak karbondioksit (CO₂) oluşumuna neden olmaktadır. Yanma verimi motorlar arasında farklı olduğu için, karbondioksitin (CO₂) spesifik emisyonları (g/kWh olarak ifade edilmektedir) motorlar arasında farklı olacaktır. Yakıt kaynaklı karbon ayrıca kurum, karbonmonoksit ve hidrokarbon bileşiklerini oluşturur; ancak bir karbon dengesi hesaplamasında karbon kaynaklı karbondioksit (CO₂) ile diğerleri karşılaştırıldığında miktarlar ihmal edilebilir düzeydedir.

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) 2014 yılında gerçekleştirdiği üçüncü IMO Sera Gazı Çalışması'nda uluslararası deniz taşımacılığının 2012 yılında toplam küresel antropojenik CO₂ emisyonlarının yaklaşık %2,5'ini oluşturduğu ve tahminen 940 milyon ton CO₂ salınımının meydana geldiğini belirtmiş olup ayrıca uluslararası deniz yolu taşımacılığından kaynaklanan CO₂ emisyonlarının, 2050 yılına kadar deniz ticaretinin büyümesi nedeniyle %50 ile %250 arasında artacağını öngörmektedir (Smith ve diğ., 2014). Çizelge 2.2'de IMO'nun 2007 ile 2012 yılları arasında ve ICCT'nin 2013 ile 2015 yılları arasında, deniz yolu taşımacılığından kaynaklanan karbondioksit (CO₂) salınımı ile ilgili yaptığı çalışmaların sonuçları milyon ton olarak gösterilmiştir.

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO)'nun Deniz Çevre Koruma Komitesi (MEPC), gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının kontrolüne göstermiş olduğu önem ile birlikte 2011 yılında MARPOL Ek VI, Bölüm 4, kapsamında yeni gemiler için teknik tedbirler paketi ve tüm gemiler için operasyonel sera gazı emisyonu azaltma önlemleri belirlemiş ve gemiler için bir enerji verimliliği standardı sağlamayı amaçlayan iki zorunlu düzenlemeyi hayata geçirmiştir;

- Şart koşulan minimum enerji verimliliği performans seviyelerine uygun, yeni gemiler gerektiren Enerji Verimliliği Dizayn İndeksi (EEDI)
- Hem yeni hem de mevcut gemilerin enerji verimliliğini artırmalarına yönelik operasyonel (trim ve draft düzenlemeleri, hız düzenlemeleri vb.) önlemleri olarak oluşturulan Gemi Enerji Verimliliği Planı (SEEMP).

IMO, 13 Nisan 2018'de, deniz yolu taşımacılığında kaynaklanan sera gazı salınımlarını azaltmak için belirlenen stratejiye göre; 2050 yılında deniz yolu taşımacılığında kaynaklanan toplam emisyonları %50 azaltmaktır. Karbon salınımları için belirlenen hedef ise; 2008 yılına kıyasla 2030 salınımı %40, 2050 yılı için ise %70 oranında azaltmak olarak belirlemiştir.

Çizelge 2.2 : 2007-2015 yılları arasındaki deniz yolu taşımacılığı CO₂ salınımı.

CO ₂ Salınımı	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Küresel CO ₂ Salınımı	31.959	32.133	31.822	33.661	34.726	34.968	35.672	36.084	36.062
Uluslararası Deniz Taşımacılığı	881	916	858	773	853	805	801	813	812
İç Hatlar	133	139	75	83	110	87	73	78	78
Balıkçılık	86	80	44	58	58	51	36	39	42
Toplam Deniz Yolu Taşımacılığı	1.100 %3,5	1.135 %3,5	977 %3,1	914 %2,7	1.021 %2,9	942 %2,6	910 %2,5	930 %2,6	932 %2,6

2.1.4 Karbonmonoksit emisyonu

Karbonmonoksit (CO), aşırı miktarda solunduğunda zararlı olabilecek renksiz, kokusuz bir gazdır. Dizel motorlarda, yanma işleminde oksijen eksikliği veya genişleme zamanı sonuna doğru nispeten düşük bir sıcaklık olduğunda, karbon, karbon dioksit tamamen dönüşmek yerine karbonmonoksit dönüşmektedir. Karbonmonoksit (CO), iklim değişikliğine neden olacak bir gaz olarak görülmemesine rağmen, atmosferik bileşiklerle reaksiyona girerek, sera gazı miktarını dolaylı olarak artırmaktadır.

2.1.5 Hidrokarbon emisyonu

Egzoz gazlarındaki yanmamış yakıt, hidrokarbon emisyonu olarak sınıflandırılır. Kazanlar gibi sabit yanma bulunan sistemlerde ateşleme başlangıcında veya soğuk koşullarda çalıştırılması sırasında ortaya çıkabilir. Dizel motorlar için ise motor yükünde veya turboşarj beslemesinde ani değişiklikler olması durumunda hidrokarbon emisyonu meydana gelebilmektedir.

2.2 Gemi Kaynaklı Hava Kirliliği İle İlgili Kurallar

2.2.1 Marpol 73/78 ve Sözleşme Ek VI - Gemilerden kaynaklı hava kirliliği

Gemiler tarafından denizlerin kirletilmesinin önüne geçebilmek için Birleşmiş Milletler'in kuruluşu olan Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından oluşturulmuş uluslararası bir sözleşmedir. MARPOL 73/78 sözleşmesi kapsamında;

Ek – I : Petrol kirliliği önleme,

Ek -II : Dökme halde taşınan zehirli sıvı maddelerden kaynaklanan kirliliğin önlenmesi,

Ek -III : Denizde paket halde taşınan zararlı maddelerden kaynaklanan kirliliğin önlenmesi,

Ek -IV : Gemilerden kaynaklanan pis su kirliliğinin önlenmesi,

Ek -V : Gemilerden kaynaklanan çöp kirliliğinin önlenmesi,

Ek -VI : Gemilerden kaynaklanan hava kirliliğinin önlenmesi,

kurallarını düzenlemektedir.

Gemilerden kaynaklanan emisyonların kontrolleri için gerekli olan düzenlemeler MARPOL 73/78 “Bölüm 3” altında incelenmiş olup bu düzenlemelerle birlikte uluslararası limitler belirlenmiştir. EK VI oluşturulduğunda genel kükürt üst limitleri 2012 yılına kadar %4,50 m/m iken 2012 ve 2020 yılları arasında bu oran %3,50 m/m ye indirilmiştir. IMO’nun Deniz Çevre Koruma Komitesi (MEPC 70) Ekim 2016’da 1 Ocak 2020’den itibaren üst limitin %0,50 m/m olarak uygulanacağına karar vermiştir. Genel limitlere ilave olarak Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO)’da yapılan anlaşma ve sonrasında Avrupa yasalarına dahil edilmesiyle, 2005 Mayıs ayında gemilerden kaynaklı emisyonları (azot oksit, kükürt oksit, partikül madde vb.) en aza indirilmesi amacıyla denetimlerin daha kapsamlı ve katı şekilde uygulanan deniz alanları belirtilmiştir. Bu bölgeler;

- Baltık Denizi (SOx: 1997’de kabul edildi / 2005’te yürürlüğe girdi; NOx: 2016/2021)
- Kuzey Denizi (SOx: 2005/2006; NOx: 2016/2021)
- ABD ve Kanada kıyılarının çoğunu içeren Kuzey Amerika ECA (NOx & SOx: 2010/2012).
- Porto Riko ve ABD Virjin Adaları dahil ABD Karayip ECA’sı (NOx ve SOx: 2011/2014).

olarak sınırlandırılmıştır.

2.3 Egzoz Emisyonlarının Çevreye ve İnsan Sağlığına Etkileri

Deniz taşımacılığı kaynaklı hava kirliliği, çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Dünya sağlık örgütünün araştırmalarına göre; global olarak tahmin edilen kalp hastalığı, felç, kronik obstrüktif akciğer hastalığı, akciğer kanseri ve çocuklarda akut solunum yolu enfeksiyonlarından kaynaklanan 4.2 milyon erken ölüm, çevre ve hava kirliliği ile bağlantılıdır (World Health Organization, 2018). İklim değişikliği ve insan sağlığına etki eden ve hava kirliliğine neden olan gemi kaynaklı emisyonlar arasında; karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NOx), kükürt oksitler (SOx) ve partikül madde bulunmaktadır. IMO’nun 2014 yılında küresel ölçekte, deniz yolu taşımacılığının insan kaynaklı toplam emisyonlarındaki payı karbondioksit (CO₂) için %2,5, azot oksit (NOx) için %15 ve kükürt oksit (SOx) için ise %13 olarak belirtilmiştir (Smith ve diğ, 2014).



3. GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARI AZALTMA YÖNTEMLERİ

Gemi kaynaklı egzoz emisyonlarının azaltılmasına yönelik uluslararası girişimler denizcilik endüstrisini, gemilerde kullanılan geleneksel petrol bazlı gemi yakıtlarına alternatif çözümler üretmeye ve yeni sistemler geliştirerek emisyonların azaltılması için çalışmalar yapmaya teşvik etmektedir. Emisyonların hedeflenen seviyelere çekilmesi için yakın gelecekte egzoz gazı temizleme sistemleri ve kükürt oranı düşük yakıtların kullanılmasına devam edilmesi öngörülmektedir. Ayrıca uzun vadeli bakıldığında, ileriye dönük gerçekleştirilen çalışmalarla küresel denizcilik filosu için çeşitli yakıt alternatiflerinin üretilmesi, farklı gemi tahrik çözümlerinin geliştirilmesi ve enerji verimliliğini ön plana çıkaran sistemlerin gemilere entegre edilmesiyle emisyon oranlarının düşürülmesi amaçlanmaktadır. Bu bölümde alternatif yakıtlar ve yeni teknolojiler ile egzoz emisyonlarının azaltılması için önerilen çözümler incelencektir.

3.1 Alternatif Yakıtlar

Denizcilik, 1920'lerde kömürden dizele ve dizelden 1950'lerde ağır akaryakıt (Heavy Fuel Oil/HFO) geçiş süreci yaşamıştır. Yaşanan bu süreç sonunda değişen düzenlemeler ile emisyonların insan sağlığına ve çevresel etkileri nedeniyle alternatif yakıtlara yönelim, emisyon oranlarının azaltılması için önemli bir seçenek haline gelmektedir. Alternatif yakıtlar; ekolojik açıdan pozitif etkileri, denizcilik endüstrisine entegrasyonu için gereken miktarlarda yakıt mevcudiyeti, yakıt maliyetleri ve gaz veya parlama noktası düşük diğer yakıtları kullanan gemiler için Uluslararası Emniyet Kodundaki (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels/IGF) uluslararası kurallara uygunluğu, kullanımları için tercih edilmesi açısından önemli kriterler olarak ön plana çıkmaktadır. Düzenlemelere uygunluğu açısından günümüzde gemilerde kullanılan düşük kükürt oranına sahip deniz tipi yakıtların yanı sıra gemilerde alternatif olarak kullanılabilecek yakıtları şöyle sıralayabiliriz;

- Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG)
- Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)
- Metanol
- Biyoyakıtlar
- Hidrojen

3.1.1 Düşük kükürt oranına sahip deniz tipi yakıtlar

Denizcilik endüstrisi 2020 yılına kadar belirlenmiş özel alanlar dışında kalan bölgelerde, deniz tipi ağır yakıt (HFO) ve deniz tipi dizel yakıtları (Marine Diesel Oil/MDO, Marine Gas Oil/MGO) kullanılmaktadır. Deniz tipi ağır yakıtlar (HFO) azami %3,5 m/m kükürt sınırına sahipken, rafinerilerde kalıntı yakıtlar ile harmanlanarak elde edilen deniz tipi yakıtları (MGO) %0.1 m/m veya daha az kükürt içermektedir. 2020 yılı düzenlemelerine uyulması açısından, ilk etapta Emisyon Kontrol Alanları'nda kullanılan yakıtlar gibi düşük kükürt içeriğine sahip harmanlanmış yakıtların yüksek oranda kullanılması beklenmektedir.

Gemilerde kullanılan yakıtların özellikleri Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO) tarafından belirlenmiştir. Bu standartlar teknik gereklilikleri, yakıtların çevresel ve emniyet yönlerini yansıtmaktadır ve ISO 8217'nin en son sürümünü kullanılması tavsiye edilmektedir. En son düzenlemeler 2017 yılında yapılmıştır ve ISO 8217:2017'de belirtilen standartlar 2020 yılından sonra da geçerliliğini korumaya devam edecektir.

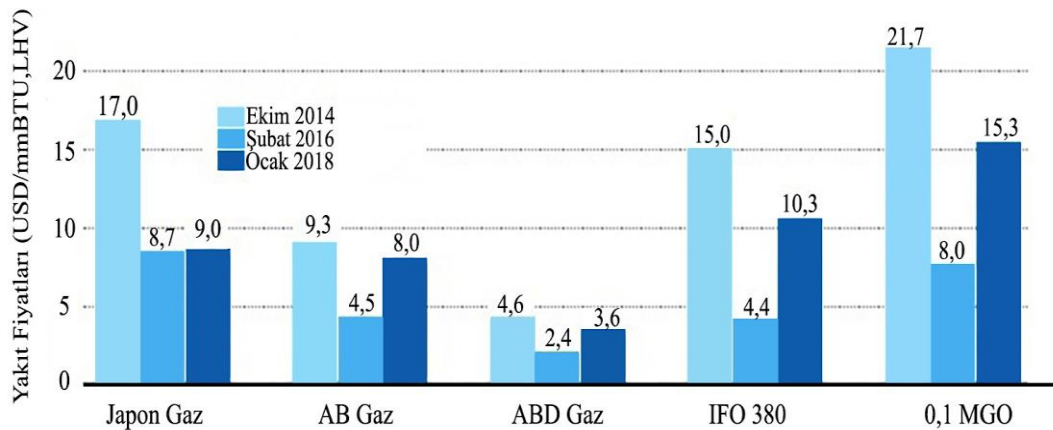
Düşük kükürt oranına sahip birçok yeni yakıt tipinin piyasaya sürülmesi ve gemideki yakıtın taşınmasını zorlaştırması düşünülmektedir. Bu zorlukların farkında olmak ve gemileri yakıtların ikmal, taşıma ve kullanımı gibi süreçlere hazırlamak önemlidir. Makine üreticilerinden olan MAN B&W %0,50 m/m kükürt limitlerindeki yakıtların işlem görmedeki başlıca zorluklarını şu şekilde sıralamıştır:

- Yakıt kalitesinde düzenleme önceki içeriklere göre; viskozite, cat-fine (Al+Si), yoğunluk, akma noktası ve uyumluluk özellikleri farklılıklar gösterecektir.
- Gemiye alınan yakıtlar farklılıklar gösterebilir ve bu farklı yakıt partilerinin birbirinden ayrı tutulması gerekir.
- Yakıtın serbestçe akmasını ve homojen olmasını sağlamak için yakıt sıcaklığı yeterince yüksek tutulmalıdır (MAN Energy Solutions, 2019).

3.1.2 Sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG)

Sıvılaştırılmış doğal gaz bugün mevcut olan en temiz fosil yakıt olarak görülmektedir. Sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) ana bileşeni metandır (CH_4), en düşük karbon içeriğine sahip hidrokarbon yakıttır ve dolayısıyla CO_2 emisyonlarını azaltma potansiyeli en yüksek alternatif yakıttır. LNG'nin üretim süreci sırasında karbondioksit, kükürt gibi bileşenlerden arındırıldığı için herhangi bir kükürt oksit emisyonu üretmemektedir. Ayrıca azot oksit emisyonları deniz tipi yakıtlara kıyasla (MGO veya HFO) daha düşüktür. Şu anda en yaygın olarak kullanılan yüksek kükürtlü yakıtlar ile karşılaştırıldığında, LNG'nin karbondioksit (CO_2) emisyonlarını yaklaşık %25 oranında düşürdüğü, azot oksitlerin (NO_x) %85-90 oranında azalttığı ve kükürt oksitlerin de %100'e yakın bir azalma sağladığı belirtilmektedir (Jafarzadeh ve diğ, 2017). LNG'nin kaynama noktası 1 bar mutlak basınçta yaklaşık olarak -163°C olduğundan, LNG yalıtımlı tanklarda depolanmalıdır. Deniz tipi ağır yakıtların (HFO) depolama tanklarına kıyasla, LNG tankları, daha küçük yoğunluk ve gerekli termal koruma nedeniyle yaklaşık 2,5-3 kat daha büyük olmalıdır.

DNV-GL'in 2018 yılında alternatif yakıtlar için hazırlamış olduğu bültende diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında, LNG tarihsel olarak en rekabetçi hammadde fiyat seviyesine ulaştığı belirtilmektedir. Şekil 3.1 incelendiğinde LNG şu anda, fiyat seviyesi MGO ile rekabet edebilir seviyelerde olduğu görülmekte ancak HFO ile doğrudan rekabet etmesinin yakın gelecekte zor olduğu gözlemlenebilmektedir (DNV GL, 2018).



Şekil 3.1 : 2014-2018 yılları arasındaki yakıt fiyatları.

LNG yakıtlı gemilerin siparişlerine paralel olarak, önümüzdeki yıllarda gemiler için LNG yakıt altyapısı, LNG bunkering ve dağıtımında önemli gelişmeler olacağı düşünülmektedir.

LNG yakıtlı gemiler, diğer gemiler gibi kendi durumlarını kapsayan hususlar ile ilgili düzenlemelere tabidir ve bu nedenle durum bazında değerlendirilmeleri gerekir. Gaz veya Parlama Noktası Düşük Diğer Yakıtları Kullanan Gemiler için Uluslararası Emniyet Kodu (IGF) 1 Ocak 2017'de yürürlüğe girerek, LNG yakıtlı gemilerin tasarımı ve inşası için uluslararası bir düzenleme temeli oluşturmaktadır.

Günümüzde LNG'yi gemi yakıtı olarak kullanmak için gereken teknoloji hazır durumdadır. Önde gelen makine üreticileri sistemlerini geliştirmeyi sürdürmekte ve denizcilik sektörüne daha uygun maddi koşullarda entegre edilmesi için çalışmalarına devam etmektedirler.

3.1.3 Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG)

Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), tanımı gereği sıvı formda çeşitli oranlarda propan ve bütan karışımıdır. İstenen doygunluk, basınç ve sıcaklık karakteristiklerini elde etmek için spesifik bütan ve propan karışımları kullanılmaktadır.

Propan, ortam koşullarında, kaynama noktası -42°C olan gazdır. Orta basınç uygulanarak sıvı olarak kullanılabilir (20°C 'de 8,4 bar). Bütan iki şekilde bulunabilir; n-bütan veya izo-bütan, sırasıyla $-0,5^{\circ}\text{C}$ ve -12°C kaynama noktasına sahiptir. Her iki izomer de propandan daha yüksek kaynama noktalarına sahip olduğundan, düşük basınçta sıvılaştırılabilirler. Arazi bazlı depolamaya ilişkin olarak, propan tankları basıncı 25 bar'ın altında tutmak için emniyet valfleri ile donatılmıştır. LPG yakıt depoları, LPG'nin düşük yoğunluğundan dolayı gemi bünyesindeki yakıt depolama tanklarından daha büyük olmaktadır.

Dünya LPG Birliği'ne göre, 2015 yılında küresel LPG üretimi 284 milyon ton olmuştur veya bir başka deyişle, petrol eşdeğeri olarak belirtmek gerekirse 310 milyon ton petrole eşdeğeri vardır. Üretim açısından bakıldığında son on yılda, yaklaşık olarak yılda %2 oranında artmaktadır (World LPG Association, 2015). Mevcut durumdaki dağıtım ve depolama tesisleri yardımıyla, LPG depolama noktalarında veya terminallerinde LPG bunkering veya dağıtımını konusunda altyapı geliştirmek alternatif yakıtların arasında bulunan LPG için önemli konuların başında gelmektedir.

LPG yandığında açığa çıkan CO₂ emisyonları, deniz tipi ağır yakıtından (HFO) yaklaşık %16 düşük olduğu belirtilmektedir (DNV GL, 2018). Sera gazı olarak propan ve bütanın küresel ısınma potansiyeli, CO₂'den üç ila dört kat daha yüksek olduğu bilinmektedir. Atmosfere kaçan yanmamış LPG konusunda bu etken dikkate alınmalıdır. Aynı zamanda, LPG kullanmak kükürt emisyonlarını neredeyse tamamen ortadan kaldırırken partikül madde emisyonlarının LPG'nin yapısı itibarıyla büyük ölçüde önüne geçmektedir. Makine üreticileri LPG tahrikini gemi bünyesinde kullanmak için sistemler geliştirmeye devam etmektedirler. MAN B&W 2017 yılında ME-LGI serisi makineyi gemiler için kullanıma sunmuş bulunmaktadır. İlerleyen çalışmalarla birlikte LPG teknolojisi daha fazla ön plana çıkacağı düşünülmektedir.

3.1.4 Metanol

CH₃OH kimyasal yapısına sahip olan metanol, düşük karbon ve yüksek hidrojen içeriği ile dikkat çekmektedir. Metanol, atmosferik basınçta -93°C ila + 65°C arasında bir sıvı halde bulunmaktadır.

Metanol, başta doğal gaz veya kömür olmak üzere birçok farklı hammadde kaynağından, aynı zamanda kağıt hamuru ve kâğıt değirmenlerinden, orman veya tarımsal atıklardan ve hatta enerji santrallerinden elde edilen atık karbondioksit (CO₂) gibi kaynaklardan üretilir (DNV GL, 2018). Doğalgazdan metanol kullanımı, önemli ölçüde daha düşük egzoz emisyonlarının oluşmasını sağlamaktadır (Balcombe ve diğ, 2019).

Metanol, ortam koşullarında kükürt içermeyen, toksik, aşındırıcı ve sıvı bir yakıttır. Çizelge 3.1'de görüleceği üzere yoğunluğu ve düşük ısıtma değeri (20,1 MJ/kg) nedeniyle, metanol yakıt tankları aynı enerji içeriği için depolama alanı olarak deniz tipi yakıt tanklarından yaklaşık 2,5 kat daha büyük bir boyuta sahiptir. Metanol 11°C'lik parlama noktasına sahiptir (Ammar, 2019). Ayrıca dizel motorlar için yakıt olarak kullanılabilecek dimetiletere (DME) dönüştürülebilir.

Çizelge 3.1 : Diğer yakıtlar ile Metanol özelliklerinin kıyaslanması.

Özellikler	Metanol	Etanol	Hidrojen	LNG	Dizel
Yoğunluk (kg/m ³)	798	794	0,0838	450	833-881
Karbon içeriği (wt %)	37,49	74,84	0	75	86,88
Kükürt içeriği (wt%)	0	0	0	0	Değişken
Net ısıtma değeri (mj/kg)	20,1	27	119,9	46-50,2	42,5
Hava yakıt oranı (stokiyometrik)	65	9,1	34,3	17,2	14,5
Parlama sıcaklığı °C	11	17,2	-253	-136	55
Alev sıcaklığı (°C) (1.0 bar'da)	1890	1920	2045	1960	2054

Gemiler için metanol yakıt olumlu yönleri nedeniyle dikkat çekmektedir ve şu anda metanol ile çalışabilen çift yakıtlı (dual fuel) makineler bulunmaktadır. Dünya'nın ilk methanol ile çalışan gemisi olan Stena Germanica'nın SO_x emisyonlarını %99, NO_x emisyonlarını %60, partikül maddeleri %95 ve (CO₂) salınımını %25 düşürdüğü, dolayısıyla Baltık Denizi güzergahındaki en son Egzoz Emisyon Kontrol Alanları (ECA) düzenlemelerine uygun olduğu belirtilmiştir (ETIP Bioenergy, 2016). 2018 yılı itibarıyla denizlerde metanol ile çalışan 7 gemi bulunmakta ve 2019 yılı itibarıyla 4 adet geminin daha hizmete girmesi planlanmaktadır (Methanex Corporation, 2018).

3.1.5 Biyoyakıtlar

Biyoyakıtlar, sıvı veya gazlı yakıtlara dönüştürülen birincil biyokütle kalıntılarından türetilir. Konvansiyonel (birinci nesil) ve ileri (ikinci ve üçüncü nesil) biyoyakıtların üretimi için besleme stokları ve dönüşümleri içeren çok çeşitli aşamalar mevcuttur.

Biyoyakıt üretimi yaygın olarak karbon kaynağına göre kategorize edilir:

1. Birinci nesil biyoyakıtlar: Doğrudan bitkilerden özütlenen şeker, nişasta veya lipit içerir.
2. İkinci nesil biyoyakıtlar: Odunsu mahsuller, amaca yönelik yetiştirilen gıda hammaddeleri ve atık / artıklardan elde edilir.
3. Üçüncü kuşak biyoyakıtlar: sucul ototrofik organizmalardan (örneğin; algler) elde edilir (DNV GL, 2018).

Geleneksel biyoyakıtlar deniz tipi yakıtları ile kıyaslandığında daha düşük enerji içeriğine ve daha düşük sera gazı (GHG) emisyonlarına sahiptir. Biyoyakıtların emisyon azaltma potansiyeli, belirli ham maddeye, biyoyakıt üretimine, motor tipine/modeline ve tedarik zincirine bağlı olarak geniş ölçüde değişmektedir.

Gemiler için en umut verici biyoyakıtlar; biyodizel, biyokütle-sıvılar (BTL), yağ asidi metil ester (FAME) ve sıvılaştırılmış biyogazdır (LBG). Biyodizel, deniz tipi yakıtları (MDO/MGO) değiştirmek için en uygun seçenek olarak görülmektedir ayrıca sıvılaştırılmış biogaz (LBG), sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) en iyi alternatifi olarak görülmekte ve düz bitkisel yağ (SVO), deniz tipi ağır yakıtların (HFO) yerini ileride alabileceği düşünülmektedir. Biyoyakıtlar, dizel motorlarda yanma özellikleri geleneksel dizel ile neredeyse aynı olduğundan motor sistemlerinde herhangi bir değişiklik yapılmasını gerektirmeden uygulanabilir (Mohd Noorve diğ, 2018).

Ancak, geleneksel biyoyakıt kullanımı, büyük ölçekli üretim ile ilgili sürdürülebilirlik sorunları nedeniyle uluslararası düzeyde kısıtlanmaktadır. Uluslararası deniz taşımacılığı uygulamalarında kullanılan en uygun biyoyakıtlar Fischer-Tropsch dizel (FT-Diesel), piroliz yağı, lignoselülozik etanol (LC Etanol), biyometanol, dimetileter (biyo-metanolden yapılmış) ve biyogas (LBG)'dir. Genel olarak, gelişmiş biyoyakıtlar, geleneksel biyoyakıtlardan daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir (Balcombe ve diğ, 2019).

3.2 Alternatif teknolojiler

IMO'nun 2050'deki %50 sera gazı emisyonu azaltma hedefine hazırlanmak için teknolojik araştırmalar ve geliştirmeler devam etmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte gemiler için yeni tahrik sistemleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu teknolojilerden ön plana çıkanlar;

- yakıt pili sistemleri
- batarya sistemleri

olarak gösterilmektedir.

3.2.1 Yakıt pili sistemleri (Fuel cells)

Hidrojen renksiz, kokusuz ve toksik olmayan bir gazdır. Gemilerde kullanım için, sıvı olarak, sıkıştırılmış gaz olarak ya da kimyasal zincire bağlanmış olarak depolanabilir. Fiziksel özellikleri nedeniyle, yalnızca çok düşük sıcaklıklarda (-253 °C'nin altında) sıvılaştırılmaktadır. Gazlar, sıcaklığı düşürerek ve/veya basıncı yükselterek sıvılaştırılabilir. Bununla birlikte, basınç ne kadar yüksek olursa olsun, bir gazın artık sıvılaştıramadığı kritik bir sıcaklık vardır. Hidrojen durumunda kritik sıcaklık -239.96°C'dir (33.19 K). Hidrojen sıvılaştırılacaksa, sıcaklığı bu noktanın altında olmalıdır. Bu nedenle, hidrojenin sıvılaştırılması çoğunlukla soğutma ve ek bir sıkıştırma gerektirir ve bu yöntem aynı zamanda kriyojenik hidrojen depolaması olarak da adlandırılmaktadır (Url-2).

Kütle başına enerji yoğunluğu çizelge 3.1'de görülebileceği üzere 119,9 MJ/kg, deniz tipi yakıtın (dizel) enerji yoğunluğunun yaklaşık üç katıdır. Sıvılaştırılmış Hidrojen'in 71 kg/m³ hacimsel yoğunluğu, HFO'nun sadece %7'sidir. Bu, HFO şeklinde depolanan enerjiyle karşılaştırıldığında hacmin yaklaşık beş katı olmaktadır.

Dünyada yılda 50 milyon tondan fazla hidrojen üretilmekte ve bugün, hemen hemen tüm hidrojen doğalgazdan elde edilmektedir. Bu miktar yaklaşık 150 milyon ton gemi yakıtının enerji içeriğine denk gelmektedir. Elektroliz yoluyla hidrojenin üretilmesi, fazla yenilenebilir enerjinin depolanması ve taşınması için bir fırsat olarak görülmekte ve böylece güneş veya rüzgar santrallerinin enerji çıkışını dengelemektedir.

Yakıt pilleri düşük karbonlu elektrik üretmenin etkin bir yolu olarak görülmektedir. Bir yakıt hücresi, elektrokimyasal reaksiyondan elektrik üretilen pil gibidir. Hidrojenin oksidasyonu, elektrokimyasal olarak çok verimli bir şekilde gerçekleşmektedir. Oksidasyon sırasında, hidrojen atomları su oluşturmak için oksijen atomlarıyla reaksiyona girerler; İşlemde elektronlar serbest bırakılır ve harici bir devre boyunca bir elektrik akımı olarak akmaktadır (Url-3).

Bu doğrudan dönüşüm, kullanılan yakıt hücresi tipine ve kullanılan yakıta bağlı olarak yüzde 60'a varan yüksek elektrik verimi sağlarken, klasik motorlara göre daha düşük gürültü ve titreşim emisyonları sunmaktadır.

Birçok farklı yapıda yakıt pili sistemleri bulunmaktadır;

- Alkalın yakıt hücreleri (AFC),
- Proton değişim membranı yakıt hücreleri (PEMFC),
- Yüksek sıcaklık proton değişim membranı yakıt hücreleri (HT-PEMFC),
- Doğrudan metanol yakıt hücreleri (DMFC),
- Fosforik asit yakıt hücreleri (PAFC),
- Erimiş karbonat yakıt hücreleri (MCFC)
- Katı oksit yakıt hücreleri (SOFC).

Denizcilik kullanımı için en umut verici üç seçenek; katı oksit yakıt hücreleri (SOFC), proton değişim membranı yakıt hücreleri (PEMFC) ve yüksek sıcaklık proton değişim membranı yakıt hücreleri gösterilmektedir (HT-PEMFC) (DNV GL, 2018).

Deniz ekosistemleri geminin akustik yapısından ektilenmesinden dolayı yakıt pili sistemleri çok az gürültü ve titreşim ürettiği için bu konuda önemli bir avantaja sahip olmaktadır (Marine Hydrogen and Fuel Cell Association, 2017).

Viking Lady gemisi yakıt pili sistemlerini bünyesinde bulunduran ilk gemidir. Ana tahrik sistemi LNG ile çalışan bir dizel motor ile sağlayan gemi bünyesinde bulundurduğu yakıt pili sistemi hibrit gemi modelini bizlere sunmaktadır. Bu sistem kükürt oksit emisyonunu (SOx) %100, azot oksit emisyonunu (NOx) %85 azaltırken karbondioksit salınımını (CO₂) %20 ile %30 oranında düşürmüştür. Buna ilave olarak yakıt pili kullanan bir diğer gemi de Hamburg limanında bulunan 100 yolcu kapasitesine sahip, nehirlerde ve küçük su yollarında kullanım için geliştirilen Sıfır Emisyon Gemisi “ZemShip” FCS Alsterwasser’dir (Zemships, 2012).

3.2.2 Batarya sistemleri

Batarya sistemleri veya aküler olarak tanımlanan elektrik güç sistemleri daha kontrol edilebilir niteliktedir ayrıca performans, güvenlik, yakıt verimliliği açısından da optimize edilmesi kolay sistemlerdir. Batarya teknolojisi geliştikçe ve kapasite olarak güçlenmeye başladıkça, gemi tahrik sistemleri için yeni seçenekleri ortaya çıkarmaktadır.

Batarya teknolojisindeki gelişmeler son yıllarda oldukça artmaktadır. Elektrik tahrik sistemleri ve iki zamanlı ana makine ile uyumlu hibrit sistemleri de gemiler için emisyon kontrolleri açısından çevreye duyarlı çözümler sunmaktadır. Bunun en önemli nedeni ise batarya sistemlerinin çalışma sırasında sıfır emisyon üretmesidir.

Yardımcı makinelerin temel güç ihtiyaçlarının batarya sistemleri ile sağlanması, özellikle dinamik yükler (kreyn, güverte ekipmanları vb.) için genel enerji tüketimini azaltabilmektedir. Günümüzde batarya sistemleri alanında lityum-iyon sistemleri yoğunlukla kullanılmaktadır. Katodun kimyasal bileşimi, Lityum-iyon tanımını (pozitif elektrot) belirlemektedir. Katot, performans açısından bir Lityum-iyon bataryaların en açıklayıcı unsurlarından biridir bu sebeple katodun kimyasal bileşimi genellikle çeşitli batarya teknolojilerini belirlemek için kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın lityum-iyon batarya tipleri şunlardır:

- Lityum kobalt oksit (LiCoO_2): Kısa ömür süresi ve sınırlı güç oranları nedeniyle denizcilik endüstrisinde kullanılmayan ilk lityum iyon teknolojisi uygulamasıdır. Yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle eski elektroniklerde en sık uygulanan sistemdir.
- Lityum demir fosfat (LiFePO_4): Bu bileşimin ana yararı, katodun daha kararlı hale gelmesi ve termal kaçak riskini azaltmasıdır. LiFePO_4 daha düşük enerji yoğunluğuna, daha uzun ömre ve LiCoO_2 'den daha iyi şarj oranlarına sahiptir.
- Lityum nikel mangan kobalt oksit (LiNiMnCoO_2): Enerji yoğunluğu yeterliyken, uzun ömürlü olması sebebiyle elektrikli araçlarda ve denizcilik endüstrisinde tercih edilmektedir.
- Lityum mangan oksit (LiMn_2O_4): Yüksek şarj oranları sunmasına rağmen LiCoO_2 'ye kıyasla daha düşük enerji kapasitesi ve daha az kullanım ömrüne sahip olması açısından denizcilik sektöründe tercih edilmemektedir.

Tamamen elektrikli gemiler, gemi güç sistemleri açısından önemli bir adım olarak görülmektedir, ancak şu anda sadece feribot ve kısa deniz taşımacılığı gibi sınırlı uygulamalarda batarya sistemlerinin kullanılması mümkün olmaktadır.

3.3 Yardımcı Sistemler

Emisyon kontrolü için hem azot oksit (NO_x), kükürt oksit (SO_x), partikül madde sınırlamalarını yerine getirebilmek amacıyla;

- egzoz gazı temizleme sistemleri (Scrubber sistemleri)
- seçici katalitik indirgeme sistemleri (SCR)
- egzoz gazı resirkülasyon sistemleri (EGR)

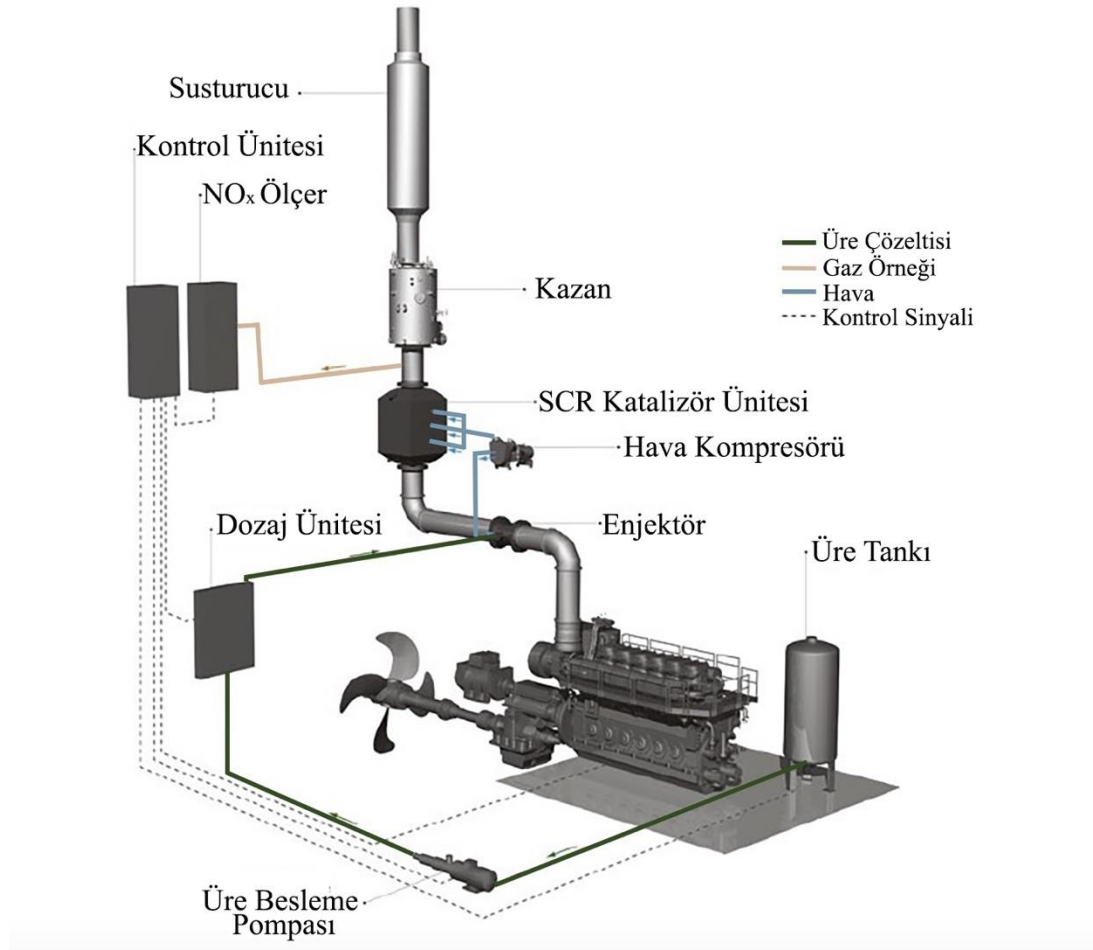
yardımcı sistem olarak karşımıza çıkmaktadır.

3.3.1 Seçici katalitik indirgeme (Selective catalyst reduction)

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından belirlenen, Emisyon Kontrol Alanları'nda (ECA) geçerli olan şartlara uyum sağlayabilmek amacıyla makine üreticileri emisyon düzenlemelerine uyumluluğu odak noktası haline getirmişlerdir. IMO'nun Tier III azot oksit (NO_x) emisyon limitlerini sağlayabilmek amacıyla seçici katalitik indirgeme sistemini kurmak emisyon oranı azaltma yöntemlerinden biri olmaktadır.

Seçici Katalitik İndirgeme sistemi, katalizör ve bir indirgeyici madde yardımıyla egzoz gazındaki azot oksit seviyesini azaltmaktadır. Bu sistemde indirgeyici madde olarak üre (suda çözünen katı üre ((NH₂)₂CO)) kullanılmaktadır, katalizörlerde baskın bileşen ise titanyumdioksit (TiO₂) ile desteklenen vanadyumpentoksit V₂O₅'tir (Magnusson ve diğ., 2012). Genellikle kurulan sistemde, %40 konsantrasyonda üre kullanılması yaygındır ve depolama alanından tasarruf sağlamaktadır. Katalizör üzerinde meydana gelen indirgeme reaksiyonu, NO_x'in NO/NO₂ oranına bağlı olarak normal hızda, hızlı veya yavaş olabilir. Üre çözeltisindeki su, egzoz gazına enjekte edildiğinde yüksek sıcaklığın etkisiyle üre (NH₂)₂CO, izosiyanik asit (HNCO) ve amonyak'a (NH₃) dönüşmektedir. Katalizör üzerinde izosiyanik asitin hidrolizi ile beraber amonyak (NH₃) ve karbondioksit (CO₂) ayrılmaktadır. Egzoz gazı azot oksit (NO_x) emisyonları daha sonra katalitik yüzeyde amonyakla (NH₃) reaksiyona girerek azot (N₂) ve suya (H₂O) dönüşmektedir (YANMAR, 2018). Katalitik elemanlar, egzoz gazı hattında bulunan metalik bir yapının içine yerleştirilmiştir. Katalitik indirgemenin etkinliği, indirgeyici maddenin dozu, katalizör elementlerinin hacmi ve egzoz gazı sıcaklığını içeren bir dizi faktöre bağlıdır. Normalde, azot oksit (NO_x) emisyonunu

%90 oranında azaltması mümkündür. Şekil 3.2’de sistemin bileşenleri görülmektedir (Url-4).



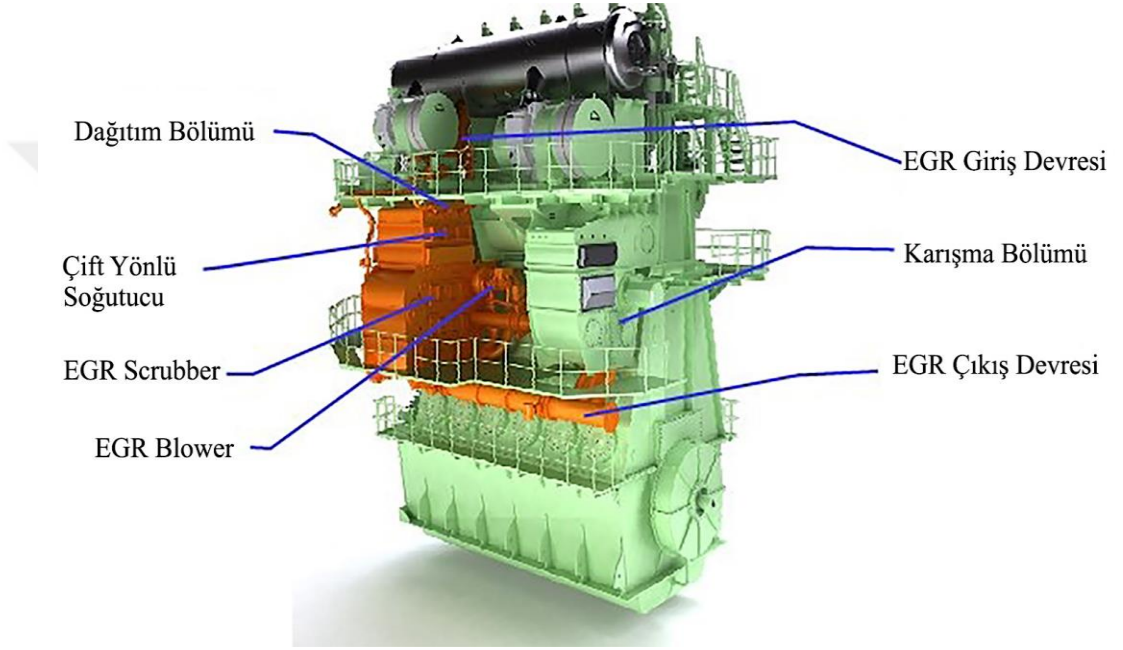
Şekil 3.2 : Seçici katalitik indirgeme sistemi bileşenleri.

3.3.2 Egzoz gazı resirkülasyonu (Exhaust gas recirculation)

Emisyon Kontrol Alanları’ndaki (ECA) gemi dizel makinlerinden kaynaklanan NO_x emisyonları için IMO Tier III kriterlerine uyum sağlamak adına, makine üreticileri azot oksit emisyonlarını (NO_x) azaltmak için yeni çözüm yöntemleri geliştirmektedirler. İki zamanlı dizel motorlarında azot oksit emisyonları (NO_x) azaltımı, egzoz gazı devirdaimi/resirkülasyonu (EGR) veya seçici katalitik indirgeme teknolojileri (SCR) gibi yardımcı teknolojiler gerektirmektedir.

Egzoz gazı, resirkülasyon sisteminde egzoz gazları soğutma ve temizleme işlemlerinden sonra, gazların bir kısmı yeniden skavenç mahaline gönderilmektedir. Bu şekilde, skavenç mahalinde bulunan oksijenin (O₂) bir kısmı yanma işleminde meydana gelen karbondioksit (CO₂) ile değiştirilir. Karbondioksit (CO₂), oksijenden

(O₂) daha yüksek bir ısı kapasitesine sahip olduğu için bu da silindirdeki yanma sırasında meydana gelen maksimum sıcaklığın azalmasını sağlamaktadır. Maksimum sıcaklığın azalması ile yanma hızı azaltılmış olur. Azot oksit oluşum hızları da dizel makinelerin silindirlerindeki yanma sıcaklıklarına bağlı olduğu için azalan yanma hızı ile birlikte azot oksitlerin oluşumunu etkiler ve IMO Seviye III limitlerinin gereklilikleri sağlanmış olur. Bunlara ilave olarak Şekil 3.3’de MAN B&W tarafından geliştirilen iki zamanlı gemi dizel makineleri için EGR sistemi uygulaması paylaşılmıştır (Url-5).



Şekil 3.3 : İki zamanlı dizel makineleri için EGR sisteminin uygulanması.

3.3.3 Egzoz gazı temizleme sistemleri (Scrubber)

Egzoz gazı temizleme sistemleri (EGCS) veya scrubber sistemleri, gemi makinelerindeki egzoz gazı kaynaklı partikül maddeyi ve kükürt oksitlerin seviyesini azaltmak için kullanılan sistemlerdir. Gemilerde bu sistemler makine veya kazandan sonra egzoz sistemine monte edilmiştir. Yıkama işleminden sonra kükürt oksit ve partikül madde seviyesi azaltılmış egzoz gazı atmosfere salınımı gerçekleşmektedir. Scrubber teknolojileri, ıslak ve kuru tip olmak üzere iki farklı sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Gemilerde yaygın olarak ıslak tip scrubber sistemleri kullanılmakla birlikte üç farklı sistem olarak geliştirilmiştir.

Açık çevrim sistemlerde; kimyasal bileşeninden dolayı egzoz gazının temizliği için deniz suyu tercih edilmektedir. Açık döngü yıkayıcısının etkinliği, geminin faaliyet gösterdiği suyun kimyasına bağlı olmaktadır. Ayrıca sistemin tasarım ve seçim aşamasında geminin amaçlanan operasyonel alanı dikkate alınması gerekmektedir. Su alkalin değilse, scrubber sistemi gerekli performans seviyesini karşılamayacak ve yürürlükteki SO_x emisyon yönetmeliklerine uygun olması için düşük kükürtlü yakıt kullanması gerekecektir (ABS, 2018). Açık döngü sistemlerde temizlik için deniz suyu uygun şekilde işlenmekte ve tekrar denize deşarj edilmektedir. Açık çevrim sistemlerdeki yıkama suyu debisi yaklaşık olarak 45 m³/MWh'dir (EPA, 2011).

Kapalı çevrim sistemler; sistem kapalı bir tip sistemdir ve kendi içerisinde sirküle olmaktadır. Egzoz gazını temizlemek amacıyla tatlı su kullanılmakta ve bu kullanılan temiz suyun tekrar temizleme sistemine sokulması için sodyum hidroksit (NaOH) ile tedavi/ıslah edilmesi gerekmektedir. Tipik olarak kapalı bir sistemdeki çevrim hızı yaklaşık olarak 20 m³/MWh civarındadır (EGCSA, 2012). Kapalı çevrim sistemler, egzoz gazı temizleme işleminde kullanılan temiz suyun içeriğinin bozulmasını önlemek amacıyla küçük miktarlarda arıtılmış yıkama suyunu tahliye edilmektedir ve Lloyd's Register 2012 yılında yayınlanan egzoz gazı temizleme sistemleri ile ilgili çalışmasında yıkama suyu deşarj oranının yaklaşık 0,1m³/MWh tavsiye edildiği belirtilmektedir.

Hibrit sistemler; açık ve kapalı çevrim sistemlerin birleştirilmiş hali olarak karşımıza çıkmaktadır. Hybrid'in temizleme sistemleri açık döngü modunda deniz suyunu kullanmakta ve sistem tasarımına bağlı olarak kapalı döngü modunda ise tatlı su ve ilave olarak kimyasal madde kullanmaktadır. Deniz suyu, alkaliliğin etkin temizleme için yeterince yüksek olduğu açık sularda kullanılmaktadır. Su alkalinitesinin yetersiz olduğu veya yıkama suyunun deşarj edilmesine karşı hassasiyetin veya düzenlemenin olduğu ve diğer zamanlarda sistem kapalı çevrim moduna geçmektedir (ABS, 2018). Düzenleme, sodyum hidroksitin yalnızca gerektiğinde kullanılması, kullanım ve depolama ile ilgili maliyetleri azaltmak gibi avantajlar sunarken tatlı su tüketimini de azaltmaktadır.

Bu sistemlerin kullanımı günümüzde gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır ancak egzoz gazı temizleme sistemlerinde kullanılan suların gemiden tahliye edilmesi açısından çevresel düzenlemeler konusunda belirtilmiş bir sınırlama bulunmamaktadır. Bu sınırlamaları liman devletleri bireysel olarak getirmektedir. Gün geçtikçe bir çok liman

devleti özellikle açık çevrim egzoz gazı temizleme sisteminin liman periyodunda kullanımını yasaklamaya başlamıştır. Bu limanlar; ABD için Kaliforniya, Connecticut ve Hawai limanları ve kara sularını, Birleşik Arap Emirlikleri için Abu Dabi ve Fujairah limanlarını, Almanya için iç suları, Bahreyn limanı, Cebelitarık'ı, Çin için; iç nehir ECA'ları, kıyı ECA'ları ve Bohai Denizi'ndeki liman alanları ile Dandong, Dalian ve Yantai, Weihai kıyılarının bağlantı noktalarını birbirine bağlayan hatlar içindeki deniz alanları, İrlanda için Dublin limanını ayrıca Belçika, Letonya, Litvanya, Malezya ve Portekiz için bütün limanlarını, Panama Kanalı ile Süveyş Kanalını, Pakistan için Karaçi limanını, Singapur limanını kapsamakta bunlara ilave olarak her geçen gün yasaklayan ülke sayısında da artış görülmektedir (Url-6).





4. EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

4.1 Gemi Kaynaklı Emisyon Miktarlarının Tahminlenmesi

Deniz taşımacılığının çevresel etkileri konusundaki artan farkındalık hem yasal işlemlerin hem de hava kirletici seviyelerinin düzenlenmesi ya da piyasaya dayalı mekanizmaların uygulanması için teknolojik gelişmelerin acilen gemilere entegre edilmesini gerekli kılmaktadır.

Emisyon miktarlarının tahminlenmesi birçok amaca hizmet etmektedir. Bunun yanında gemilerden yayılan emisyonların, küresel veya bölgesel limitlere uygunluğunu denetlemek, egzoz emisyonu temizleme sistemlerinin performansını ölçmek ve değerlendirmek için de emisyon miktarlarının tahminlenmesi önemli gösterilmektedir.

Bu değerlendirmenin ana aracı, geminin emisyon envanterleridir. Bir geminin emisyon envanteri oldukça tartışmalı bir konudur ve son yıllarda bu konuyla ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları; Endresen ve diğ, 2009; Dalsoren ve diğ, 2009; Wang ve diğ, 2007; Jalkanen ve diğ, 2009; Olesen ve diğ, 2009; Miola ve diğ, 2010; Eyring ve diğ, 2005; Paxian ve diğ, 2010; Corbett ve diğ, 2003 örnek olarak gösterilebilir. IMO raporunda sunulan emisyonların tahminleri 2003 yılında Corbett ve Koehler'in yaptığı çalışmada bildirilenlere uygun olduğu görülmektedir. Egzoz emisyonları miktarının tahminlenmesi için yakıt tüketimini baz alarak yapılan tahminleme yöntemi olan yukarıdan aşağıya (top-down) yöntemi ve gemi makinelerinin gücünü baz alarak gerçekleştirilen aşağıdan yukarıya (bottom-up) yöntemi kullanılmaktadır.

4.1.1 Yukarıdan aşağıya (top-down) yöntemi

Bu yöntem kullanılırken ayrıntılı gemi verilerinin yanı sıra gemilerle ilgili kullanılan makinenin büyüklüğü ve teknolojisi, yakıt kullanımı, geminin seyir, manevra, demir ve liman periyodunda geçirdiği süre gibi teknik bilgiler mevcut olduğunda kullanılmalıdır.

Gemiler için, bu yöntem kullanımında bir sefer süresince açığa çıkan emisyonları sefer bazında hesaplayarak daha detaylı sonuç alınmasına olanak sağlamaktadır. Tek bir sefer için açığa çıkan emisyonlar denklem 4.1’de gösterilmiştir.

$$E_{sefer} = E_{liman} + E_{manevra} + E_{seyir} \quad (4.1)$$

Denklemde gösterilen durumların hesaplanması için her gemi özelinde yakıt harcamı, makine türü, yakıt türü gibi faktörler ele alınarak denklem 4.2’de gösterildiği şekilde egzoz emisyon tahminlemesi yapılabilir.

$$E_{trip} = \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p}) \quad (4.2)$$

Bu denklemdeki faktörler;

E_{trip}	: Geminin belirtilen durumdaki emisyon miktarı (ton),
FC	: Yakıt harcamı (ton),
EF	: Emisyon faktörü (kg/ton),
i	: Emisyon türü (NO _x , SO _x , CO ₂ , PM),
j	: Makine tipi (düşük devirli, orta devirli vb.),
m	: Kullanılan yakıt cinsi (HFO, MGO/MDO),
p	: Geminin bulunduğu durum (seyir, demir, manevra, liman) olarak belirtilmiştir.

4.1.2 Aşağıdan yukarıya (bottom-up) yöntemi

Sefer süresi boyunca istenilen durumlar için yakıt tüketimi bilinmediğinde, farklı seyir durumlarında harcanan makine gücü ve zamana bağlı olarak emisyonların hesaplanması için farklı bir denklem kullanılmaktadır. Emisyonlar, kurulu ana ve yardımcı makine ve kazan gücü, makinenin içinde bulunduğu durum için makinelerin yük faktörü ve toplam süre ile birlikte dikkate alınarak aşağıdaki yardımıyla hesaplama yapılabilir. Denklem 4.3’de gösterilmiştir.

$$E_{i,j} = \sum_{t=0}^{t=n} [(P_{MEi} \times LF_{i,t} \times EF_{MEj,k,l,m} + D_{AEp,i,t} \times EF_{AEj,k,l} + D_{BOp,i,t} \times EF_{BOj,m}) \times 1 \text{ saat}] \quad (4.3)$$

Bu denklemdeki faktörler;

i	: Gemi
j	: Emisyon türü
t	: Zaman (operasyon saati, h)
k	: Makine tipi

I	: Makine seviyesi (Tier I, II, III)
m	: Kullanılan yakıt cinsi (HFO, MGO/MDO)
p	: Geminin bulunduğu durum (seyir, demir, manevra, liman)
$E_{i,j}$	: i gemisi ve j emisyon türü için emisyon miktarı (g)
P_{MEi}	: Makine gücü (kW)
$LF_{i,t}$	: Ana makine üzerindeki yük faktörü (%)
$EF_{MEj,k,l,m}$	: Ana makine için emisyon faktörü (g/kWh),
$DAEp,i,t$	: Yardımcı makine için faz durumuna göre güç miktarı (kW),
$EF_{AEj,k,l,m}$	: Yardımcı makine için emisyon faktörü (g/kWh)
$DBOp,i,t$	: Kazan için faz durumuna göre güç miktarı (kW)
$EF_{BOj,m}$	: Yardımcı makine için emisyon faktörü (g/kWh) olarak belirtilmiştir.

4.1.3 Emisyon faktörlerinin belirlenmesi

Emisyon faktörleri, emisyonları tahmin etmek için yukarıdan aşağıya yönteminde yakıt tüketimi ile ya da aşağıdan yukarıya yönteminde makine gücü ve yük faktörü ile denkleme koyularak kullanılmaktadır. Emisyonların çeşidine göre, kullanılan makine tipine ve kullanılan yakıta göre değişebilmektedir. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) 2014 yılında yayınladığı Üçüncü IMO Sera Gazı Çalışması'nda emisyon çeşitlerine ve makine türüne göre emisyon faktörleri verilmiştir. Bu faktörler çizelge 4.1'de belirtilmektedir. Buna ilave olarak 2019 yılında Avrupa Çevre Ajansı tarafından yayınlanan AÇA Hava Kirletici Emisyon Envanteri kitapçığında kullanılan makine tiplerine göre 2000, 2005 ve 2010 yıllarında toplanan verilerle oluşturulan veri tabanı ile yakıt türlerine göre emisyon faktörleri belirlenmiştir. Meydana getirilen bu emisyon faktörleri çizelge 4.2'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1 : IMO'nun 2014 yılında yayınladığı emisyon faktörleri.

Emisyon türü	Makine tipi	Ana Mak. SFOC (g/kWh)	Ana Mak. EF (g/kWh)	Ana Mak. EF (g/g yakıt)	Ana Mak. EF (kg/ton)	Yrd.Mak. SFOC (g/kWh)	Yrd.Mak. EF (g/kWh)	Yrd.Mak. EF (g/g yakıt)	Yrd.Mak. EF (kg/ton)
CO ₂	Düşük devirli	195	607	3,114	3114	Na	Na	Na	Na
	Orta devirli	215	670	3,114	3114	227	707	3,114	3114
	Yüksek devirli	Na	Na	Na	Na	227	707	3,114	3114
	LNG (otto)	166	457	2,750	2750	166	457	2,750	2750
NO _x	LNG (otto)	166	1,3	0,00783	7,83	166	1,3	0,00783	7,83
SO _x	LNG (otto)	166	0,00269	0,00002	0,02	166	0,00269	0,00002	0,02
PM	LNG (otto)	166	0,03	0,00018	0,18	166	0,03	0,00018	0,18

Çizelge 4.2 : AÇA'nın belirlediği emisyon faktörleri.

Makine tipi	Yakıt türü	NO _x (2010) (kg/ton)	SO _x (kg/ton)	PM ₁₀ (kg/ton)	PM _{2,5} (kg/ton)
Düşük devirli	HFO	86,5	20	8,7	7,8
	MGO	86,5	20	1,6	1,5
Orta devirli	HFO	61,3	20	3,8	3,4
	MGO	60,6	20	1,5	1,3
Yüksek devirli	HFO	55,6	20	3,8	3,4
	MGO	55,1	20	1,5	1,3

4.1.4 Gemi emisyonlarının çevresel maliyetinin değerlendirilmesi

Emisyonların çevresel maliyetleri, bir kilogramdan daha fazla kirleticinin çevreye yayıldığı zaman ortaya çıkan ekonomik refah kaybını göstermektedir. Emisyonların çevre açısından maliyetleri, emisyon türünün kilogram başına göre Euro cinsinden ifade edilen sosyal maliyeti veya kirlilik için belirlenmiş fiyatlarıdır. 2018 yılında yayınlanan “Çevresel Fiyatlar El Kitabı EU28 Versiyonu” isimli çalışmada emisyon türüne göre ortaya çıkacak bu maliyetleri bizlere sunmaktadır (De Bruyn ve diğ, 2018). Bu çalışma kirleticilerin etki değerlerini uyumlu hale getirmek, etkilerinin veya kirlenmenin tutarlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için tasarlanmıştır. Hava kirliliği ve iklim değişikliği bağlamında en sık rastlanan değerleri veya maddelerin çevresel maliyetleri emisyon türüne göre kilogram başına Euro ve USD cinsinden çizelge 4.3’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.3 : Atmosferik emisyonlar için ortalama çevresel maliyetler.

Emisyon Türü	Alt Seviye		Orta Seviye		İleri Seviye	
	€/kg	\$/kg	€/kg	\$/kg	€/kg	\$/kg
CO ₂	0,022	0,024	0,057	0,062	0,094	0,10
PM _{2,5}	27,7	30,35	38,7	42,40	59,5	65,13
PM ₁₀	19	20,80	26,6	29,12	41	44,88
NO _x	9,97	10,91	14,8	16,20	22,1	24,19
SO _x	8,3	9,09	11,5	12,59	17,9	19,6

Bu değerleri kullanacak olan kullanıcılar için yayında orta seviye değerlerin kullanılması önerilmektedir. Bu değerler, detaylandırılmıştır, diğer seviye fiyatları ile kıyaslandığında ayrıca tüm belirsizlikler göz önüne alındığında mümkün olan en iyi tahmini temsil ettiği belirtilmektedir.

Gemilerde, bir emisyon azaltma yönteminin tercih edilmesi veya deniz tipi dizel yakıtı kullanmanın yıllık çevresel faydaları Jiang, L ve diğerlerinin 2014 yılında gerçekleştirdiği çalışmada denklem 4.4 ve 4.5’de ifade edildiği şekilde değerlendirilmektedir (Jiang ve diğ, 2014).

$$B^{s_{ij}} = N \times \sum_k (\Delta E^{s,k}_{i,j} \times MEC_k) \quad (4.4)$$

$$B^{MGO_{ij}} = N \times \sum_k (\Delta E^{MGO,k}_{i,j} \times MEC_k) \quad (4.5)$$

Bu denklemlerdeki faktörler;

- $B^{s_{ij}}$: Emisyon azaltma seçeneğini kullanmanın çevresel faydası
- $B^{MGO_{ij}}$: MGO kullanımının çevresel faydası
- N : Bir yıl içerisindeki sefer sayısı
- MEC_k : Emisyonun çevresel maliyeti (\$/ton)
- k : Emisyon türü
- i : Yükleme/tahliye limanı
- j : Yükleme/tahliye limanı
- $\Delta E^{MGO_{ij}}$: i ve j limanları arasında MGO kullanımı sonrası azalan emisyon miktarı
- $\Delta E^{s_{ij}}$: i ve j limanları arasında emisyon azaltma yönteminin uygulanması sonrası azalan emisyon miktarı olarak belirtilmiştir.

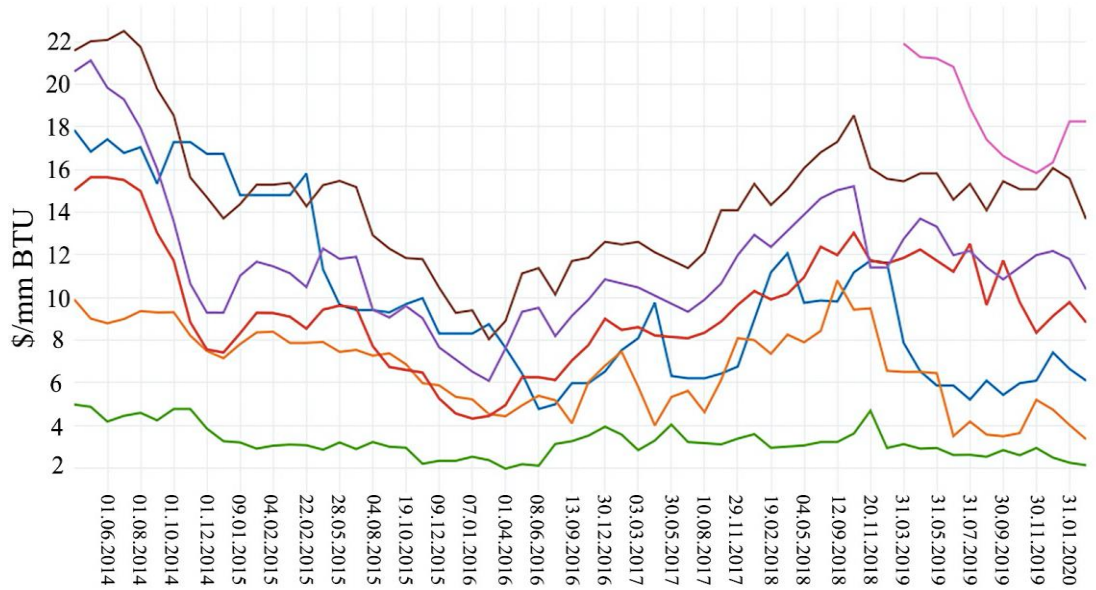
4.2 Emisyon Azaltma Yöntemleri Maliyetlerinin İncelenmesi

Emisyon azaltma yöntemlerinden hangisinin ya da hangilerinin tercih edileceğini belirlerken geminin çalıştığı bölgeler, geminin yaşı ve hizmet ettiği taşımacılık alanı gibi faktörler ön plana çıkmaktadır. Gemilerin işletmecilik maliyetleri arasında yakıt giderleri son derece önemli bir yer tutmaktadır. Tercih edilecek azaltma yöntemleri seçilirken ilk kurulum maliyetleri haricinde kullanım süresince makinenin özgül yakıt

tüketiminin %1-1,5 oranında artırması öngörülmektedir. Yakıt harcamasının artması şirkete ek maliyetler sunmaktadır.

4.2.1 Mevcut yakıt seçeneklerinin maliyet açısından değerlendirilmesi

Deniz yolu taşımacılığındaki bir işletme için en önemli giderlerden biri yakıt tüketimi olarak gösterilmektedir. IMO'nun 2014 de sera gazları ile ilgili yayınladığı raporda da belirttiği üzere deniz yolu taşımacılığındaki ticari büyüme, mevcut yakıt seçeneklerine yeni kurallar gereği ilave edilecek olan düşük kükürt oranına sahip (%0,50 m/m) deniz tipi yakıtlarının fiyatlarındaki dalgalanmalar, gemilerde kullanılacak emisyon azaltma yöntemlerinin (scrubber, scr, egr vs.) yakıt harcamasına negatif etkileri gibi nedenler yakıt fiyatlarının önemini bizlere tekrar hatırlatmaktadır. Küresel ekonomik koşullarda, denizcilik sektörü mevcut sistem içerisinde değerlendirildiğinde yakıt fiyatlarının uzun vadeli tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır. Şirket bünyesinde bulunan ticari gemi filosu teknik açıdan doğru şekilde planlanamaz ise yakıt fiyatlarındaki değişiklik şirketi ticari açıdan zor durumlara sürükleyebilir. Şekil 4.1'de belirtilen grafikte 2014 ile 2020 yılları arasındaki Japonya gaz (mavi), Henry Hub (yeşil), Avrupa gaz (sarı), IFO 380 (kırmızı), hampetrol-brent (mor), 0,10 m/m MGO (kahverengi) ve metanol (pembe) yakıt ve gaz türlerinde meydana gelen fiyat değişimini \$/mmBTU cinsinden göstermektedir. 2020 Şubat ayı için ton başına LNG fiyatlaması ise 155 USD olarak belirtilmiştir (DNV GL, 2020).



Şekil 4.1 : 2014-2020 Yılları arası yakıt ve gaz fiyatları.

Günümüz itibari ile gemilerde kullanılan ve kullanılmaya başlanacak olan deniz tipi dizel (MGO), deniz tipi ağır yakıt (IFO 380) ve yeni yakıt türü olarak sisteme dahil edilen çok düşük kükürtlü deniz tipi ağır yakıt (%0,50 m/m VLSFO) karşılaştırma yapılabilmesi için metrik ton başına fiyatları USD cinsinden çizelge 4.4’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 : Dünya genelinde limanlara göre değişen yakıt fiyatları (\$/mt).

	IFO 380	VLSFO	MGO
Global 4 liman ortalaması	185,50	252,50	339,50
Global 20 liman ortalaması	207,50	270,50	356,50
Global bunker fiyat ortalaması	235,00	324,50	469,50

Çizelge 4.3’de verilmiş olan global 20 liman ortalaması; Dünya çapındaki yakıt hacminin büyük bir çoğunluğundan sorumlu olan 20 ana küresel limanının doğrusal ortalamasıdır. Bu limanlar; Busan, Colombo, Durban, Fujairah, Cebelitarık, Hong Kong, Houston, İstanbul , LA/Long Beach, Las Palmas, Bombay, New York, Panama, Pire, Rotterdam, Santos, Şangay, Singapur, St. Petersburg, Tokyo. Global 4 liman ortalaması; küresel yakıt ikmali hacminin yaklaşık %25’ini temsil eden Singapur, Rotterdam, Fujairah ve Houston’ın doğrusal ortalamasıdır. Global bunker ortalaması ise; çizelgenin oluşturulduğu gün için her bir yakıt sınıfı için tüm gemi ve yakıt ikmali için belirlenen fiyat göstergelerinin doğrusal ortalamasıdır (Url-7).

Verilen değerler doğrultusunda farklı yakıt türleri arasındaki fiyat dağılımı görülebilmekte ve filo kapsamında gemilerin günlük işletim maliyetleri için ortalama yakıt giderleri için tahminleme yapılabilmektedir.

4.2.2 Egzoz gazı temizleme sistemleri kurulum ve operasyonel maliyetleri

Açık döngü, kapalı döngü ve hibrit (karma) sistem olarak bulunan ıslak tip scrubber sistemleri, IMO 2020 Kükürt Emisyonu düzenlemelerine uyum sürecinde alternatif azaltma yöntemlerinden biri olarak tercih edilmektedir. 2016 yılında CE Delft tarafından yayınlanan “Yakıt Bulunabilirliği Değerlendirme Raporu” isimli çalışmada scrubber sistemleri maliyetlerine yer vermiştir. Yayınlanan raporda verilen bilgilere paralel olarak denizcilik sektöründe gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmalar sonucu edindiğimiz bilgiler ışığında şirketler, maliyet açısından değerlendirildiğinde açık döngü scrubber sistemlerini tercih etmektedirler. Açık döngü scrubber sistemleri

ortalama olarak, ilave pompalar, yıkama suyu için soğutma üniteleri, çamur tankları, vb. ekipmanların kurulumunu gerektiren kapalı devre scrubber sisteminden daha uygun fiyatlarda bulunabilmektedir. Hem açık hem de kapalı döngü modunda çalışabilen, böylece iki pompa ve boru seti gerektiren hibrit scrubber sistemi ise en pahalı olan sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Yakın zamanda scrubber sistemlerine yatırım yapan denizcilik şirketlerinden alınan görüşler ve 2016 yılında CE Delft'in yayınlamış olduğu raporda belirtildiği üzere scrubber sistemine yatırım maliyetleri ve kurulu motor gücü (kW) başına değişken maliyetler USD cinsinden çizelge 4.5'de gösterilmiştir (Vanhamme, 2016).

Çizelge 4.5 : Scrubber sistemi finansal parametreleri.

Scrubber Türü	Yatırım Maliyeti (milyon USD)	Değişken Maliyet (kW/USD)
Açık döngü (Mevcut gemi kurulumu)	2,3	55
Açık döngü (Yeni inşa gemi kurulumu)	1,9	38
Hibrit Sistem (Mevcut gemi kurulumu)	2,8	58
Hibrit Sistem (Yeni inşa gemi kurulumu)	2,4	44

Sistem, kurulum süreci ve sonrasında denizcilik işletmelerine ek maliyetler getirmektedir. Bir scrubber maliyeti, sistem yatırım maliyetlerinin ve işletme maliyetlerinin toplamıdır. Yatırım, scrubber tipine, makine özelliklerine ve sistemin yeni bir gemiye mi yoksa eski bir gemiye mi monte edilmesine bağlıdır. Panasiuk ve diğerleri, 2015 yılında yaptığı çalışmada scrubber sistemi için sermaye harcamasını ekipman, tasarım, kurulum ve dokümantasyon maliyetlerinden oluştuğunu belirtmektedir. Scrubber sistemi yatırım maliyetini hesaplama formülü denklem 4.6'da verilmiştir.

$$CAPEX_{SCRUB.} = C_{ekipman} + C_{tasarım} + C_{kurulum} + C_{dokümantasyon} \quad (4.6)$$

Bu denklemdeki faktörler;

$CAPEX_{SCRUB}$: Egzoz gazı temizleme sistemi yatırım maliyeti (\$)

$C_{ekipman}$: Scrubber ekipman maliyeti (\$)

$C_{tasarım}$: Scrubber tasarım maliyeti (\$)

$C_{kurulum}$: Gemiye sistem montajı sırasında (2–4 hafta) işletme dışı kalacağı için mürettebatın masrafları ve süreç boyunca elde edeceği gelirden vaçgeçmesini içeren maliyet (\$)

$C_{dökümantasyon}$: Geliştirici tarafından taslak hazırlama ve müzakere ile ilgili olarak ortaya çıkan tüm ücretler, maliyetler ve masraflarını (\$) içermektedir.

Gemi için belirlenen scrubber sisteminin kurulması sonrasında karşımıza çıkacak olan işletme maliyetlerini Panasiuk ve diğerleri, 2015 yılında gerçekleştirdiği çalışmada; bakım maliyetleri, sistem için kullanılacak kimyasallar (kapalı ve hibrit sistemler için geçerlidir), su temizliği, ek enerji ve kayıplardan oluşacağını belirtmiştir. Scrubber sistemi işletme maliyetini hesaplama formülü denklem 4.7’de gösterilmiştir.

$$OPEX_{SCRUB.} = C_{bakım} + C_{kimyasal} + C_{sis. FW} + C_{ek enerji} + (M_{scrub.} \times C_{yük} \times nm) \quad (4.7)$$

Bu denklemdeki faktörler;

$OPEX_{SCRUB}$: Scrubber sistemi işletme maliyeti (\$/yıl)

$C_{bakım}$: Scrubber sistemi yıllık bakım maliyetleri (\$/yıl)

$C_{kimyasal}$: Seçilen sistemde gerekli ise yıllık NaOH maliyeti (\$/yıl)

$C_{sis. FW}$: Kapalı ve hibrit sistemler için bir yıllık tatlı su maliyeti (\$/yıl)

$C_{ek enerji}$: Sistemin neden olacağı ekstra enerji harcamı maliyeti (\$/yıl)

$M_{scrub.}$: Scrubber sisteminin ağırlığı (kg)

$C_{yük}$: Yükün taşıma maliyeti (\$/kg)

Nm : Yılda katedilen deniz mili (nm/yıl) olarak belirtilmiştir (Panasiuk ve diğerleri, 2015). Formüle ilave olarak CE Delft’in yayınlamış olduğu raporda sektörel araştırmalara dayandırarak hazırladığı işletme maliyeti de çizelge 4.6’de sunulmaktadır. $P_{M.E.}$, gemi makinesinin gücünü (kW) belirtmektedir.

Çizelge 4.6 : Scrubber işletme maliyetleri.

Scrubber Türü	İşletme maliyetleri
Açık döngü	%1 ilave yakıt tüketim + 13000 USD + $0,4 \times P_{M.E.}$
Hibrit Sistem	%0,5 ilave yakıt tüketim + 25000 USD + $0,4 \times P_{M.E.}$

Çizelge 4.6’de gösterildiği üzere scrubber sistemleri gemilere ve dolayısıyla denizcilik işletmelerine ek yakıt ve işletme maliyetleri getirmektedir. Seçilecek sistemin değişen şartlara uyum sağlayabilecek potansiyelde olup olmayacağı öngörülerek hareket edilmesi, şirketi sektörel açıdan avantajlı bir konuma getirebilmektedir.

4.2.3 Seçici katalitik indirgeme sistemi kurulum ve operasyonel maliyetleri

NO_x emisyonlarının salınımını azaltmak için belirlenen emisyon kontrol alanlarında gemilerin çalışabilmesi için şirketlerin limitlere uygun olacak şekilde makinelerine yardımcı sistemleri kurmaları gerekmektedir. Günümüzde NO_x emisyonlarını %90 oranında azaltma kapasitesine sahip olan seçici katalitik indirgeme sistemi kurulumu ön plana çıkmaktadır. Bu sistemin kurulumu; reaktör, üre tankı, dozaj pompası, enjektörler, kontrol sistemi, bir baypas valfi, yıllık üre giderleri gibi ek giderleri ortaya çıkarmaktadır. SCR sistemi, NO_x emisyonlarını alternatif azaltma yöntemlerinin içerisinde maliyeti en yüksek sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Z.L. Yang ve diğerlerinin 2012 yılında yapmış olduğu çalışmada makine gücüne (kW) göre gerekli olan maliyetler göstermiştir (Yang ve diğerleri, 2012). Çizelge 4.7’de bu değerler gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 : SCR sistemi kurulum ve işletme maliyetleri.

Yatırım maliyeti (kW başına \$)	Kurulum Maliyeti (\$)	Yıllık işletme maliyeti (\$)
100	304000	153000

2012’de Danimarka Çevre Koruma Ajansı tarafından hazırlanan raporda yıllık işletme maliyetleri değerlendirilirken iki zamanlı bir makine için MWh başına yıllık 5-11\$ arasında değişen işletme maliyetleri ön plana çıkmaktadır. Sektörde yapılan görüşmeler ve edinilen uzman görüşleri sonucunda edinilen bilgilere göre bir denizcilik işletmesine toplam SCR kurulum maliyeti düşük devirli (<130 rpm) iki zamanlı bir makine için ortalama olarak kW başına 68-74\$ arasında bir maliyet çıkmaktadır.

4.2.4 Çift yakıtlı makinelerin kurulum ve operasyonel maliyetleri

Emisyon azaltma sistemleri arasında en çevreci olarak görülen çözüm LNG kullanımı olmaktadır. Bu nedenle LNG kullanımının denizcilik endüstrisine dahil edilmesi için sistemler geliştirilmiştir. Buradan yola çıkarak 2 ve 4 zamanlı LNG ile çalışan makinelerin gemiler için maliyetlerini değerlendirdiğimizde yüksek maliyetleri, LNG transfer istasyonları yayılımının ve yetişmiş personelin azlığı nedeniyle günümüzde daha az tercih edilmektedir. Boulougouris ve diğerlerinin 2015 yılında yaptığı çalışmada çift yakıtlı makineler için LNG depolama tankı, ek sistemler ve makine

açısından ilk kurulum maliyetleri ve mevcut gemi makine modifikasyonunun maliyetleri kW başına USD cinsinden çizelge 4.8’de gösterimiştir (Boulougouris ve diğeleri, 2015).

Çizelge 4.8 : Çift yakıtlı makineler için ilk kurulum maliyetleri.

Makine Türü	Mevcut makine iyileştirmesi (USD/kW)	Yeni makine (USD/kW)
4 Zamanlı Çift yakıtlı	800	1600
2 Zamanlı Çift yakıtlı Yüksek basınçlı	700	1500
4 Zamanlı Çift yakıtlı (Kıvılcım ateşlemeli)	800	1600

Daha önce de belirtildiği gibi, LSFO, HFO ve LNG fiyatlarının tahmin edilmesinin zor olması gemi sahiplerinin tercihleri ile tüm filo için finansal açıdan yönetilmesini kritik hale getirebilmektedir. Geminin işletme maliyetleri büyüklüğüne, tipine, navigasyon alanına ve diğer birçok faktöre göre değişmektedir. LNG kullanan gemiler için LNG ikmal noktalarındaki azlık gemi işletmeleri navigasyonel açıdan doru planlanmasını gerektirmekte bu da dolayısıyla çift yakıtlı makineler için yakıt maliyetlerine etkisi olmaktadır. Yakıt tüketimleri açısından durum incelendiğinde karşılaşılan durum ise yeni nesil çift yakıtlı makineler geleneksel iki zamanlı makineler ile kıyaslandığında yakıt harcamı olarak daha az tüketim yapmakla birlikte, istenilen durumda MGO kullanımına da geçiş yapılmasını sağlamaktadır. Genel itibariyle sektörün öncü üreticilerinden olan bir markanın ürettiği makineler için çift yakıtlı motorları %95-99 LNG ve %1-5 dizel karışımı kullanıldığı Avrupa Birliği tarafından 2017 yılında yapılan Standart LNG Konfigürasyonları için ticari vakaların ön maliyet/fayda analizi isimli çalışmasında belirtilmiştir. 2020 yılının şubat ayındaki gaz fiyatlarına bakıldığında ise 3,3 \$/mm BTU ve 155 \$/ton olarak görülmekte ve bu fiyatlama politikasıyla birlikte ortalama yakıt maliyetlerinin hesaplanması yapılabilmektedir. LNG yakıtlı gemilerin işletilme maliyetleri, bunker operasyonları için limanları bunker portları ve bunker miktarı, kargo tipine, gideceği limana ve diğer birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir.

Makine üreticisi MAN’ın 2018 yılında 11000 teu konteyner taşıma kapasitesine sahip bir gemi için yapmış olduğu çalışmada ana makine ve jenertörler için saatlik LNG ve pilot yakıt harcamasını bulmak için denklem 4.8 ve 4.9’da verilen formüller kullanılmaktadır.

$$ME_{\text{gaz tüketim}} (\text{ton}) = \text{Yük}_{(\text{MW})} \times SGC_{(\text{g/kWh})} \times 10^{-3} \quad (4.8)$$

$$ME_{\text{pilot yakıt tüketim}} (\text{ton}) = \text{Yük}_{(\text{MW})} \times SPOC_{(\text{g/kWh})} \times 10^{-3} \quad (4.9)$$

4.3 Emisyon Azaltma Önlemlerinin Fayda-Maliyet Analizi

Fayda-maliyet denklemlerini kullanarak, emisyon azaltma yöntemlerinin finansal açıdan uygulanabilirliğini değerlendirmek için net bugünkü değeri (NPV) hesaplanmaktadır. Yüksek bir NPV’ye sahip olan azaltma yöntemi tercih edilmektedir. L. Jiang ve diğerleri, 2014’de yaptığı çalışmada belirttiği NPV formülü denklem 4.10’da verilmiştir;

$$NPV = -CAPEX + \frac{1 - (1 + r)^{-t}}{r} \times (B - OPEX) \quad (4.10)$$

Bu denklemde;

NPV : Net bugünkü değer

CAPEX : Emisyon azaltma yöntemi yatırım maliyeti

OPEX : Emisyon azaltma yöntemi işletme maliyeti

B : Emisyon azaltma yöntemi çevresel faydası

r : Bir ekonomik varlığın bugünkü değerinin hesaplanmasında kullanılan faiz oranı

t : Seçilen azaltma yönteminin kullanım süresi olarak belirtilmiştir.

Yeni yapımlar ve sonradan yapılanmaların kullanım ömrü farklı olduğundan, net bugünkü değerleri doğrudan karşılaştırılamamaktadır. Eşdeğer yıllık net faydalarının (EANB) karşılaştırması ile sonuca ulaşılabilmektedir. Denklem 4.11’de eşdeğer yıllık net faydaları hesaplaması verilmiştir.

$$EANB = \frac{NPV}{a_1^t} = \frac{NPV}{\frac{1 - (1 + r)^{-t}}{r}} \quad (4.11)$$

Bu denklemde;

EANB : Eşdeğer yıllık net fayda

NPV : Net bugünkü değer

α^t_i : Faiz oranı ve vadesinin ödenmesi için yıllık düzenli taksit miktarlarını belirleyici fonksiyon

r : Bir ekonomik varlığın bugünkü değerinin hesaplanmasında kullanılan faiz oranı

t : Seçilen azaltma yönteminin kullanım süresi olarak belirtilmiştir (Jiang ve diğeleri, 2014). Gemilerde kullanılan yakıtların ekipman ömrü bulunmadığından kullanımları sonsuzdur. NPV hesaplaması denklem 4.12’da verilen şekilde yapılmaktadır.

$$NPV = \left(\frac{B_{FO} - C_{FO}}{r} \right) \quad (4.12)$$

Bu denklemde;

NPV : Net bugünkü değer

B_{FO} : Seçilen yakıtın çevresel faydası

C_{FO} : Seçilen yakıtın maliyeti

r : Bir ekonomik varlığın bugünkü değerinin hesaplanmasında kullanılan faiz oranı

4.4 Yatırımların Geri Ödeme Süresinin Hesaplanması

Yatırım için planlanan geri ödeme süresi (PBP), yatırım için göze alınan maliyetin ne kadar sürede geri kazanılabildiğini gösteren değerdir. Panasiuk ve diğeleri, 2015 yılında yaptığı çalışmada geri ödeme süresinin (PBP) doğrudan yakıt ve kurulacak sistemin kurulum maliyet ile işletme maliyetinin farkına farklılıklarına bağlı olduğunu belirtmektedir. Denklem 4.13’de formülü belirtilmiştir.

$$PBP = \frac{CAPEX_{SİSTEM} + OPEX_{SİSTEM}}{OPEX_{YAKIT}} \quad (4.13)$$

Bu denklemde;

PBP : Geri ödeme süresi

$CAPEX_{SİSTEM}$: Sistemin ilk kurulum maliyeti

$OPEX_{SİSTEM}$: Sistemin işletim maliyeti

$OPEX_{YAKIT}$: Geminin yıllık yakıt sarfiyatı olarak belirtilmektedir

Oluşturulan formül sonrası elde edilen değer gemi işletme ömründen büyük ise yatırımın yapılması doğru olmamaktadır. Sonucun gemi işletim ömründen küçük çıkması gerekmektedir.

4.5 Gemilerin Enerji Verimliliğinin Hesaplanması

Deniz taşımacılığının daha temiz ve daha yeşil olmasını sağlamak amacıyla IMO, uluslararası deniz taşımacılığında kaynaklanan sera gazı emisyonlarına yönelik sınırlayıcı yaklaşımlar yürütmektedir. Gemilerin enerji verimliliğini artırmak, daha düşük yakıt tüketimi ve daha az CO₂ emisyonu anlamına gelmektedir. Bu kavram göz önünde bulundurularak, IMO, CO₂ emisyonlarının sektör genelinde ilk küresel düzenlemesi olan Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi'ni (EEDI) benimsemiştir.

EEDI, her bir geminin enerji gereksinimlerini ton-mil başına gram CO₂ cinsinden belirlemektedir. Bir gemi için hesaplanan EEDI ne kadar düşük olursa, gemi o kadar enerji tasarruflu olarak kabul edilir. MPEC 73. oturumunda yayınlanan Ek-5 kapsamında belirli bir gemi için EEDI, geminin kurulu makinelerine dayalı teorik enerji tüketimini, verimliliği artırmak için alınan önlemleri ve geminin boyutu ile kapasitesini dikkate alan matematiksel bir formül ve hesaplanmaları belirtir. EEDI'nin hesaplanması için kullanılan matematiksel formül denklem 4.14'da verilmiştir.

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j)(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \times C_{FME(i)} \times SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \times C_{FAE} \times SFC_{AE})}{f_c \times f_l \times f_i \times Capacity \times V_{ref} \times f_w} + \frac{((\prod_{j=1}^n f_j \times \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \times P_{AEff(i)}) \times C_{FAE} \times SFC_{AE})}{f_c \times f_l \times f_i \times Capacity \times V_{ref} \times f_w} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \times P_{eff(i)} \times C_{FME} \times SFC_{FME})}{f_c \times f_l \times f_i \times Capacity \times V_{ref} \times f_w} \quad (4.14)$$

Bu denklemde;

ME : Ana makine

AE : Yardımcı makine

C_F : Yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu arasındaki dönüşüm faktörü

V_{ref} : Saatte deniz miliyle ölçülen gemi hızı

Capacity : Dökme yük gemileri, tankerler, gaz gemileri, LNG gemileri, ro-ro yük gemileri (araç gemileri), soğutmalı yük gemileri için taşıma kapasitesi (deadweight ton (DWT)). Konteynır gemileri için, DWT'nin %70'i kapasite olarak kullanılmalıdır.

P_{ME}	: Ana makine gücü (kW)
P_{AE}	: Yardımcı makine gücü (kW)
$P_{TI(i)}/P_{TO(i)}$	: Şaft jeneratörü/motor gücü (kW)
$P_{eff(i)}$	: Ana makine için mekanik enerji tasarruflu teknoloji
$P_{AEff(i)}$	: Yardımcı makine için mekanik enerji tasarruflu teknoloji
SFC	: Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
f_j	: Gemiye özgü tasarım öğelerini hesaba katan bir düzeltme faktörüdür
f_w	: Denizde hız azaltma faktörü
$f_{eff(i)}$	: Yenilikçi enerji verimliliği teknolojisinin faktörü
f_i	: Kapasitede düzenleyici için kapasite faktörü
f_w	: Denizde hız azaltma faktörü
f_c	: Kübik kapasite düzeltme faktörü olarak belirtilmiştir.

Denklem 4.10’da belirtilmiş olan yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu arasındaki dönüşüm faktörü (Cf) yakıt türü ile doğrudan ilişkili olmakla birlikte çift yakıtlı ana makine ve yardımcı makineye sahip bir gemi için Cf değeri hesaplanırken gaz yakıtın “birincil yakıt” yakıt olduğunun kontrolü yapıldıktan sonra EEDI hesaplaması yapılmaktadır. Birincil yakıt olduğunun kontrolü ise denklem 4.15’de verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

$$f_{DFgas} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{total}} P_{total(i)}}{\sum_{i=1}^{n_{gas}} P_{gas(i)}} \times \frac{V_{gas} \times \rho_{gas} \times LCV_{gas} \times K_{gas}}{(\sum_{i=1}^{n_{liquid}} V_{liquid} \times \rho_{liquid} \times LCV_{liquid} \times K_{liquid}) + V_{gas} \times \rho_{gas} \times LCV_{gas} \times K_{gas}} \quad (4.15)$$

Bu denklemde;

$f_{DFliquid}$	: 1- f_{DFgas}
ρ_{gas}	: Gaz yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_{liquid}	: Sıvı yakıtın yoğunluğu (kg/m ³)
LCV _{gas}	: Gazın alt ısı değeri (kJ/kg)
LCV _{liquid}	: Sıvı yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)
K _{gas}	: Gaz tankının doldurma oranı
K _{liquid}	: Sıvı yakıtın tankının doldurma oranı
P _{total}	: Toplam makine gücü
P _{gas}	: Toplam çift yakıtlı makine gücü olarak belirtilmiştir.

Bu hesaplama sonucunda fDF_{gas} değeri $\geq 0,5$ çıkması durumunda gaz yakıtı bu makine hesaplaması yapılan gemi makinesi için “birincil yakıt”, $fDF_{gas} < 0,5$ şeklinde çıkması durumunda ise gaz yakıtın ikincil yakıt olduğu sonucuna varılmaktadır.

4.6 Bir Filoda Bulunan Geminin Emisyon Azaltma Seçeneğine Karar Verilmesi

Bölüm altında özellikleri çizelge 4.9’de verilmiş olan ticari bir dökme yük gemisinin yıllık emisyon tahminlemesi yapılacak ve sonrasında bu geminin çevresel maliyetinin hesaplaması sunulacaktır. Devam eden süreçte gemi için azaltma yöntemlerinin entegre edilmesiyle birlikte çevresel faydasının hesaplaması yapılacak ve emisyon azaltma seçeneklerinin çevresel faydasını gösterilecektir. Geminin çalıştığı bölgeler ve mevcut emisyon azaltma seçeneklerinin ilk kurulum ve işletme maliyetleri de değerlendirilerek gemi için en makul ve de mantıklı yatırım seçeneği sunulacaktır.

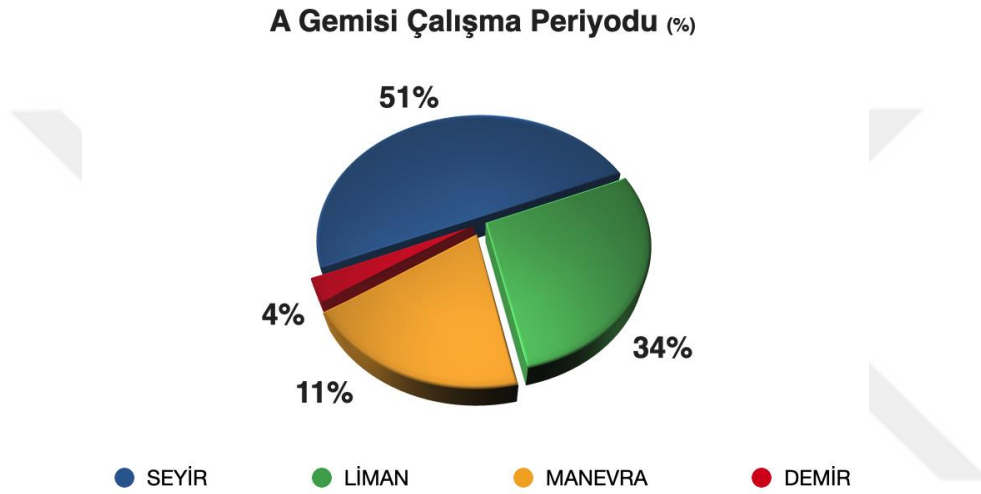
Çizelge 4.9 : A dökme yük gemisi özellikleri.

	M/V A
LOA	189,99
B	32,26
D	17,9
DWT	55953
Yapım Yılı	2005
Ana makine gücü	9480 kW
Yardımcı makine gücü	3x550 kW
Hız	14,5 knot
Özgül yakıt tüketimi (ME)	169 g/kWh
Özgül yakıt tüketimi (AE)	196 g/kWh

Çizelge 4.9’da özellikleri verilmiş olan gemi Türk Denizcilik dökme yük gemileri ile karşılaştırdığımızda genel olarak benzer özellikler taşıdığı için seçilmiştir. Böylelikle elde edilecek sonuçlar yardımıyla sektör durum değerlendirmesi de bu örneklendirme ile yol gösterici olabilmektedir.

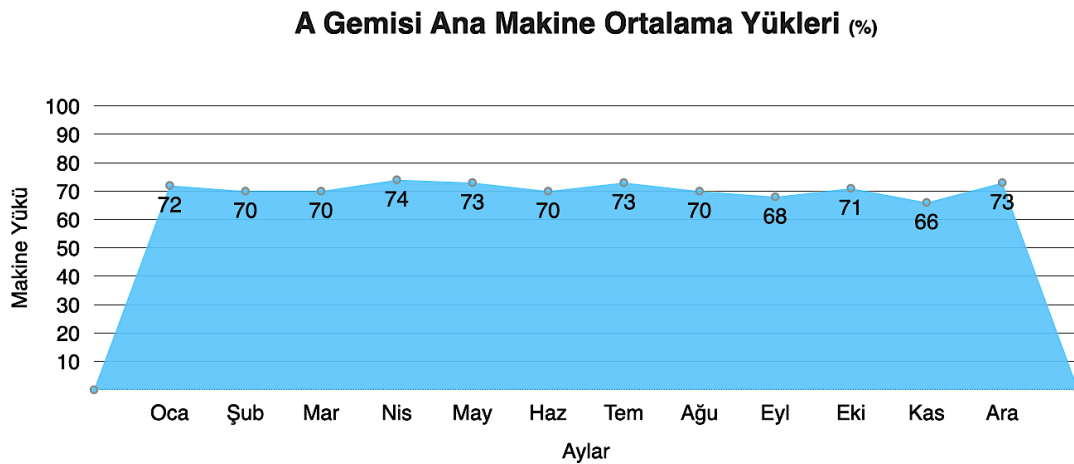
4.6.1 Yıllık emisyon salınımı hesaplanması

Bu kısımda ilk olarak 2018 yılında ticari bir dökme yük gemisinin (A Gemisi) yakıt tüketimi verileri kullanılarak bir yıldaki mevcut emisyon salınım tahmini yapılmıştır. Yıllık yakıt tüketimi gemiden elde edilen 2018 yılı verilerine göre değerlendirilmiş ve HFO ve MGO miktarları hesaplanmaktadır. Bu yakıt değerleri, liman ve demirde bekleme süresi, liman varış ve kalkış saatleri ve seyir sırasında harcanan yakıt miktarı gibi gerçekçi değerler sağlar. Geminin çalışma alanları ECA dışı bölgelerden oluşmaktadır ve bir yıl içinde çalışma periyodu (%) Şekil 4.2'de görülebilmektedir.



Şekil 4.2 : A gemisi yıllık çalışma periyodu.

Geminin yakıt tüketimini yakından incelemek için bir yıllık süre içinde ana makine kullanımı analiz edilmiştir ve seçilen gemi için 2018 yılı içerisindeki çalışma periyodu incelenerek ortalama ana makine yükü Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : A gemisi aylık ana makine ortalama yükleri.

Belirtilen gemi için çift yakıtlı ana makine ve jeneratörlerin kullanılması sonucu ortaya çıkacak olan LNG tüketimi ile birlikte MGO tüketimi çizelge 4.10’da gösterilmiştir. Emisyon hesaplamaları gerçekleştirilirken emisyon faktörleri belirtilen bu duruma göre değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.10 : Yıllık ortalama yakıt tüketim miktarları.

Makine Türü	Yakıt türü	Tüketim miktarı (ton/yıl)
Mevcut makine tüketimi	HFO	5160,46
	MGO	153,23
Çift yakıtlı makine tüketimi	LNG	5247,85
	MGO	111,67

Emisyon miktarlarının hesaplanmasında yukarıdan aşağıya methodu kullanılarak çizelge 4.1 ve 4.2’de verilen emisyon faktörleriyle çarpılması sonucu elde edilmiştir ve emisyon miktarları çizelge 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.11 : Yıllık salınan emisyon miktarları.

Emisyon türü	Salınım miktarı (ton/yıl)
CO ₂	16560,93
NO _x	459,63
SO _x	106
PM ₁₀	45,14
PM _{2,5}	40,48

Seçilen gemi için emisyon azaltma yöntemleri kullanılması durumunda gemi tarafından salınımı gerçekleştirilecek yeni emisyon miktarlarının karşılaştırılması çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12 : Azaltma yöntemlerinin emisyon miktarlarına etkisi.

Emisyon türü	VLSFO (ton/yıl)	MGO (ton/yıl)	Scrubber (ton/yıl)	Scrubber+SCR (ton/yıl)	Çift Yakıt (Dual-Fuel) (ton/yıl)
CO ₂	16940,74	17035,69	16726,54	16726,54	14789,60
NO _x	459,63	459,63	464,23	46,42	50,75
SO _x	31,88	10,63	2,15	2,15	2,34
PM ₁₀	15,83	8,50	0,91	0,91	1,12
PM _{2,5}	14,47	7,97	0,82	0,82	1,11

4.6.2 Salınan emisyonların çevresel fayda ve maliyetlerinin değeriendirilmesi

A gemisi tarafından bir yıllık yakıt tüketimi sonucu açığa çıkan egzoz emisyonlarının çevreye verdikleri zararı maddi açıdan temsil eden maliyetlerin değeriendirilmesinde çizelge 4.3’de gösterilmiş olan atmosferik emisyonlar için ortalama çevresel maliyet katsayılarından faydalanılmıştır. Elde edilen sonuçlar çizelge 4.13’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13 : A Gemisi çevresel maliyetleri.

Emisyon türü	Mevcut HFO-MGO zararı (\$/yıl)
NO _x	7.446.074
PM _{2,5}	1.913.986
SO _x	1.337.987
PM ₁₀	1.314.511
CO ₂	1.026.778
TOPLAM	13.039.335

Elde edilen bu sonuçlar neticesinde emisyon azaltma yöntemlerinin kullanılmasıyla bu çevresel zarar azaltılabilmektedir. Çizelge 4.14’de yardımcı sistemler ve alternatif teknolojilerin çevresel maliyetlere olan etkisi karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4.14 : Azaltma yöntemleri kullanılmasının çevresel maliyetlere etkisi.

Emisyon türü	VLSFO (\$/yıl)	MGO (\$/yıl)	Scrubber (\$/yıl)	Scrubber+SCR (\$/yıl)	Çift Yakıt (Dual-Fuel) (\$/yıl)
NO _x	7.446.074	7.446.074	7.520.535	752.053	822.154
CO ₂	1.050.326	1.056.213	1.037.045	1.037.045	916.955
PM _{2,5}	613.643	337.951	34.672	34.672	47.627
PM ₁₀	460.963	247.575	26.553	26.553	32.710
SO _x	401.396	133.799	27.027	27.027	29.440
TOPLAM	9.972.401	9.221.611	8.645.832	1.877.351	1.848.887

4.6.3 Emisyon azaltma yöntemlerinin fayda maliyet açısından incelenmesi

Günümüz şartlarında durum incelendiğinde karşımıza emisyon azaltma seçenekleri konusunda birçok alternatif çıkmaktadır ancak bunların uygulanabilirliği konusunda çelişkiler ve yüksek maliyetlerinin olması nedeniyle belli sistemler ön plana çıkmaktadır. Durumunu değerlendirmekte olduğumuz gemi için IMO 2020 düzenlemelerine uyulması açısından günümüz şartlarında karşımıza çıkan seçenekler;

- HFO + Scrubber sisteminin kurulması
- HFO + Scrubber +SCR sisteminin kurulması
- VLSFO + MGO kullanılması
- MGO kullanılması
- Çift yakıtlı (Dual-Fuel) LNG makinelerle geçilmesi değerlendirmeye alınmaktadır.

Seçeneklerin, farklı kullanım ömürleri, ilk kurulum maliyetlerinin olması veya olmaması, işletme maliyetlerinin de dikkate alınarak NPV hesaplaması yapılmaktadır ve hesaplama formülü denklem 4.10'de verilmiştir. Ancak belirtilen bu durumlar nedeniyle sistemlerin karşılaştırılmasının yapılabilmesi için Eşdeğer Yıllık Net Faydalarının (EANB) hesaplamasının yapılması gerekmektedir ilgili formül denklem 4.11'da belirtilmektedir. Hesaplamaların yapılabilmesi için öncelikli olarak sistemlerin kurulum ve işletme maliyetleri hesaplanmaktadır ve bu maliyet tablosu çizelge 4.15'de verilmiştir. Hesaplamalar gerçekleştirilirken scrubber sistemleri için çizelge 4.5 ve 4.6'de verilmiş olan bilgilerden faydalanılmıştır. SCR sistemi için ise ilgili bölümde paylaşılan bilgilere göre kW başına 70\$ kurulum maliyeti ve MWh için 7\$ işletme maliyeti seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Çift yakıtlı makine için bu durum çizelge 4.8'de verilen bilgiler doğrultusunda değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.15 : Emisyon azaltma seçenekleri ilk kurulum maliyetleri.

	Kurulum Maliyeti	Operasyonel Maliyeti
SCR (\$)	663.600	184.547
Açık Döngü Scrubber (\$)	2.821.400	29.638
Hibrit Sistem Scrubber (\$)	3.349.840	35.215
A. Scrubber +SCR (\$)	3.485.000	214.185
H. Scrubber +SCR (\$)	4.013.440	219.762
Çift Yakıt LNG (\$)	15.540.000	830.726

A gemisi yıllık olarak yakıt harcamaları çizelge 4.10'de belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında A gemisi için yıllık yakıt maliyetleri belirlenirken çizelge 4.4'de belirtilmiş olan Global Yakıt Fiyat Ortalaması baz alınarak hesaplamalar yapılmış ve çizelge 4.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 : A gemisi için yıllık yakıt maliyeti.

Yakıt türü	Maliyeti (\$)
LNG+MGO	830,726
HFO+MGO	1.284.650
VLSFO+MGO	1.746.511
MGO	2.494.777

Hesaplamanın sürdürülebilmesi için uygulanacak sistemin kullanım ömürleri ve bir ekonomik varlığın bugünkü değerinin hesaplanmasında kullanılan faiz oranının bilinmesi gerekmektedir. Kullanım ömürleri geminin kalan işletim ömrüyle aynı olacağı varsayılmıştır ve bir geminin ortalama 30-35 yıllık işletim ömrüne sahip olduğu düşünülürse sistemlerin kullanım ömürleri 2005 yapımı bir gemi için 2020 yılındaki yaşı da hesaba katılarak 15 yıllık bir kullanım ömrünün kaldığı baz alınarak hesaplama yapılmıştır. Faiz oranı için ise Jiang, L ve diğerlerinin 2014 yılında yaptıkları çalışmada belirtilen %5 referans alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda ulaşılan NPV ve EANB değerleri çizelge 4.17'de sunulmuştur.

Çizelge 4.17 : Emisyon azaltma yöntemlerinin NPV ve EANB değerleri.

	NPV	EANB
VLSFO + MGO (\$)	26.408.458	-
MGO (\$)	26.458.921	-
Hibrit Sistem Scrubber (\$)	41.887.698	4.035.557
Açık Döngü Scrubber (\$)	42.474.022	4.092.044
Çift Yakıt LNG (\$)	91.990.378	8.862.563
H. Scrubber + SCR (\$)	109.563.082	10.555.558
A. Scrubber + SCR (\$)	110.149.407	10.612.046

4.6.4 Emisyon azaltma yöntemlerinin geri ödeme sürelerinin karıştırılması

Azaltma yöntemlerinin seçimleri yapılırken yapılacak yatırımın geri ödeme süreleri açısından da işletme sahipleri tarafından değerlendirilmesi gerekmektedir. Denklem 4.13’de verilmiş olan formül aracılığı ile örnek alınan gemi için seçimi yapılacak emisyon azaltma yöntemlerinin geri ödeme süreleri çizelge 4.18’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.18 : Emisyon azaltma yöntemleri geri ödeme sürelerinin kıyaslaması.

	Geri ödeme süresi (yıl)
Açık Döngü Scrubber (\$)	2,22
Hibrit Sistem Scrubber (\$)	2,64
A. Scrubber +SCR (\$)	2,88
H. Scrubber +SCR (\$)	3,30
Çift Yakıt LNG (\$)	12,74

4.6.5 A gemisi için enerji verimliliği açısından değerlendirilmesi

Geminin mevcut durumdaki enerji verimliliği ile çift yakıtlı LNG kullanması durumunda oluşacak enerji verimliliğin kıyaslaması yapılmıştır. Mevcut seçenekler değerlendirilirken hesaplama denklem 4.14’te verilen formüle göre gerçekleştirilmiştir. Bu formüldeki değerleri ve sonucu çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.19 : A gemisi MGO kullanımında enerji verimliliği hesaplanması.

	MGO
MCR_{ME}	9480 kW
Capacity	55953 DWT
V_{ref}	14,5 kn
P_{ME}	7110 kW
P_{AE}	474 kW
C_{fME}	3,206
C_{fAE}	3,206
SFC_{ME}	169 g/kWh
SFC_{AE}	196 g/kWh
EEDI	5,115 gCO ₂ /t nm

A gemisi için çevresel açıdan faydası yüksek olan LNG ile optimizasyonu yapılması durumunda ortaya çıkacak olan enerji verimliliği incelemesi yapılması için gemi üzerinde LNG depolaması için tank kapasitesinin belirlenmesi, uygun ana makine ve jeneratörlerin seçiminin yapılması gerekmektedir. LNG depolama tankı kapasitesi için geminin bir yıl içerisindeki yapmış olduğu en uzun seyir süresi olan 32 günlük seyir süresi baz alınmıştır. Bu süre içerisinde geminin en az 2 kez yakıt ikmali yapması durumunda 1500 m³ 'lük bir tank gerekmekte eğer 1 kez yakıt ikmali yapılacaksa 3000 m³ 'lük bir LNG depolama tankı gerekmektedir. Hesaplama yapılırken LNG ikmalinin yapılacağı noktalar ve geminin gerçekleştirdiği seferler göz önünde bulundurularak 1500 m³ 'lük LNG depolama tankı seçimi yapılmış ve bu kapasiteye göre EEDI hesaplaması gerçekleştirilerek sonucu çizelge 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.20 : A gemisi LNG kullanımında enerji verimliliği hesaplaması.

	LNG
MCR _{ME}	9480 kW
Capacity	55953 DWT
V _{ref}	14,5 kn
P _{ME}	7110 kW
P _{AE}	474 kW
C _{f ME PİLOT YAKIT}	3,206
C _{f AE PİLOT YAKIT}	3,206
C _{f LNG}	2,75
C _{f MDO}	3,206
SFC _{ME PİLOT YAKIT}	2,7 g/kWh
SFC _{AE PİLOT YAKIT}	1,9 g/kWh
SFC _{ME LNG}	143,3 g/kWh
SFC _{AE LNG}	190 g/kWh
SFC _{ME MDO}	169,9 g/kWh
SFC _{AE MDO}	204 g/kWh
V _{LNG}	1500 m ³
V _{HFO}	2432 m ³
V _{MDO}	221,9 m ³
ρ _{LNG}	440 kg/m ³

Çizelge 4.20 (devam) : A gemisi LNG kullanımında enerji verimliliği hesaplaması.

ρ_{HFO}	991 kg/m ³
ρ_{MDO}	900 kg/m ³
LCV_{LNG}	48000 kJ/kg
LCV_{HFO}	40200 kJ/kg
LCV_{MDO}	42700 kJ/kg
K_{LNG}	0,95
K_{HFO}	0,98
K_{MDO}	0,98
f_{DFgaz}	0,2913
f_{DFliquid}	0,7087
EEDI	4,771 gCO ₂ /t nm

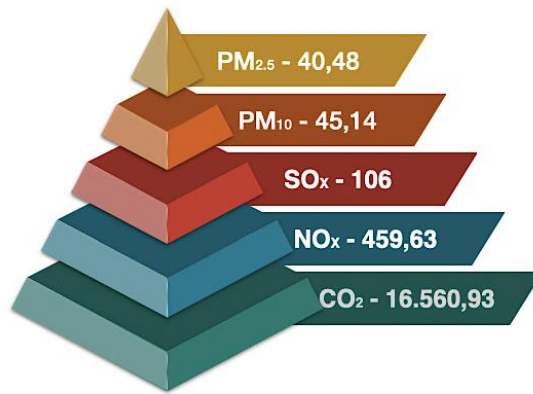


5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir deniz ticareti filosunda bulunan gemi için bir yıllık çalışma sonucunda salınımını gerçekleştirdiği emisyon miktarlarını ve bunların çevresel maliyetlerinin hesaplaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre emisyon azaltma seçenekleri değerlendirilmiş ve bu seçeneklerin kullanılması durumunda çevresel faydalarının nasıl olacağı incelenmiştir. Emisyon azaltma seçeneklerinin fayda maliyet incelenmesi tamamlanarak mevcut gemi için günümüz seçenekleri arasında en doğru ve mantıklı seçimin yapılması için literatürde belirtilen hesaplama yöntemleri ve geminin bir yıl içerisinde gerçekleştirdiği sefer programından elde edilen değerler de kullanılarak analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilecek olursa;

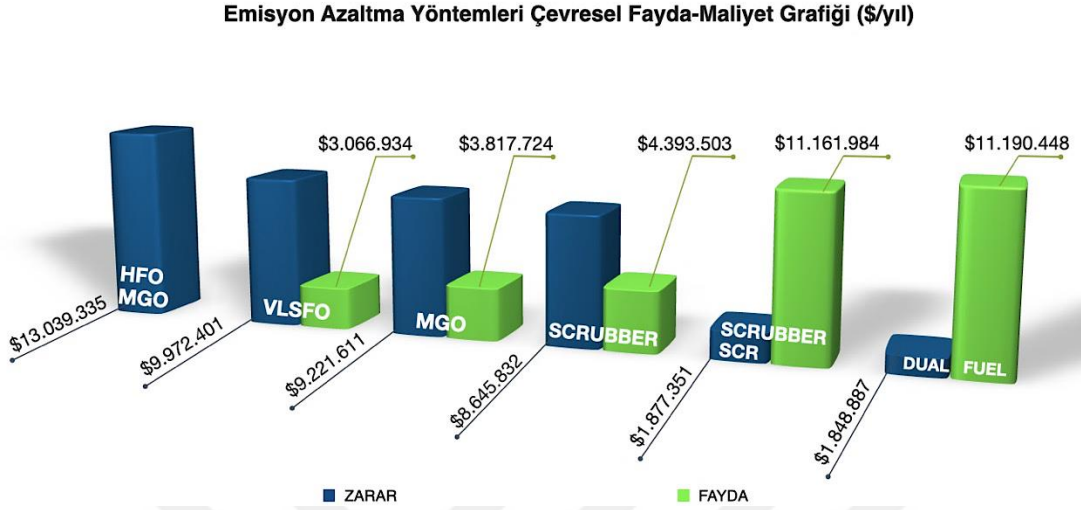
A gemisi için bir yıl sonunda salınımını gerçekleştirdiği emisyon miktarları Şekil 5.1’de görülmektedir. Bu emisyon miktarlarının incelemesi yapıldığında CO₂ salınımı 16560,93 ton/yıl olarak ekolojik açıdan ciddi anlamda risk teşkil etmektedir. Gemi kaynaklı emisyonların azaltılması için teknolojik gelişmeler ışında yeni sistemlerin entegrasyonu yapılması gerekmektedir.

A Gemisi Yıllık Emisyon Miktarı (ton)



Şekil 5.1 : A gemisi yıllık emisyon salınımı.

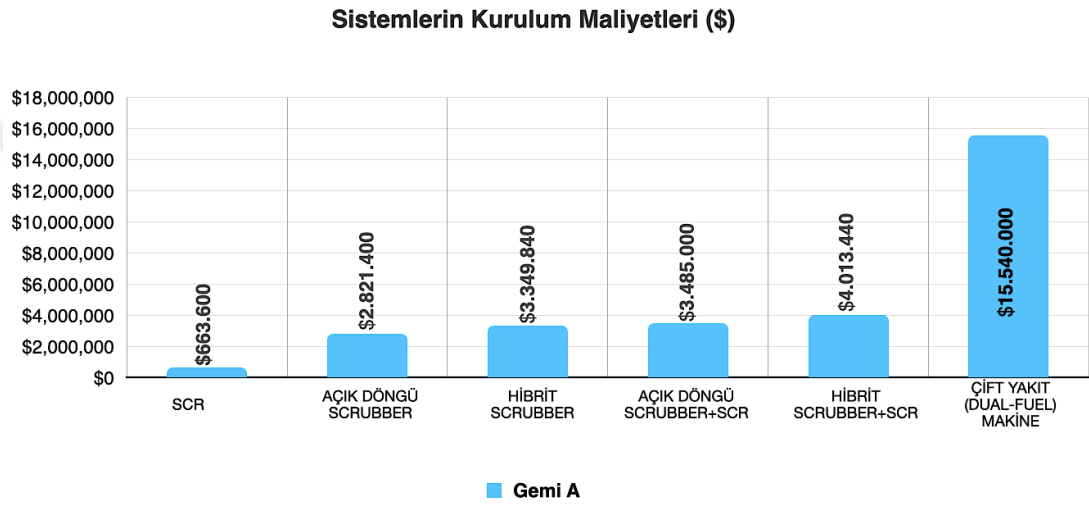
Mevcut seçenekler değerlendirildiğinde A gemisinin çevresel zararı ve emisyon azaltma yöntemlerinin uygulanması sonucunda faydaları Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2 : A gemisi çevresel maliyeti ve sistemlerin çevresel faydaları.

Şekil 5.2’ye bakıldığında A gemisi için bir yıllık işletimi sonucunda ortaya çıkarağı emisyon kaynaklı çevresel zararı 13.039.335 USD olarak hesaplanmıştır. Bir geminin fazla denilebilecek bu zararı ortaya çıkarmasını önlemek için kullanılan yakıtın değiştirilmesi veya emisyon azaltma seçeneklerinin değerlendirilmesi ekoloji için ciddi önem arz etmektedir. Seçenekler değerlendirildiğinde yakıt değişiminin yapılması durumunda IMO 2020 kükürt düzenlemesi ile birlikte kullanımına başlanacak olan VLSFO seçeneğine bakıldığında 3.066.934 USD fayda miktarına sahip olduğu gözlenmektedir. MGO kullanımının çevresel faydası 3.817.724 USD olarak ortaya çıkmıştır. Kükürt oksit emisyonlarını azaltma seçenekleri arasında en çok üzerinde durulan seçenek olan scrubber sistemi için ise bu durum 4.393.503 USD olarak görülmektedir. Çevresel açıdan scrubber sistemine ilave olarak azot oksit emisyonlarını azaltıcı sistem olan SCR sisteminde kurulması 11.161.984 USD gibi ciddi bir fayda miktarının yakalanmasını sağlamaktadır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi seçilen ek sistemlerin kullanılması veya yakıt türünde değişikliğe gidilmesi belirli emisyon türlerinde azaltmalara neden olurken ek sistemlerin kurulması yakıt sarfıyatında az da olsa artışa sebebiyet vereceğinden dolayı CO₂ salınımının artmasında etkili olmaktadır. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde LNG kullanılan çift yakıtlı makineye geçilmesi durumunda yıllık tüketilen yakıt miktarı baz alınarak 11.190.448 USD ile en faydalı sistem olarak ön plana çıkmaktadır.

Bir işletme açısından bakıldığında ise durum ekolojik olarak değerlendirilse dahi önceliğin tamamen işletme menfaatleri doğrultusunda olacağı kaçınılmazdır. Bu nedenledir ki öncelik, seçimi yapılacak sistemin fayda maliyet analizinin yapılmasına verilecek ve yapılan yatırımın kendisini kaç yıl sonunda geri ödeyeceğini belirlemek isteyeceklerdir. Çalışma kapsamında referans alınan A gemisi için yapılan değerlendirme sonucu Türk Deniz Ticareti açısından da işletilen gemiler için örnek alınabilecek detayları sunmaktadır. İlk kurulum maliyetleri değerlendirilmiş ve Şekil 5.3’de sunulmuştur.



Şekil 5.3 : A gemisi için emisyon azaltma yöntemleri ilk kurulum maliyetleri.

Şekil 5.3’e bakıldığında sistemlerin sektörel açıdan ciddi yatırımlar gerektirdiği görülmekte ve en yüksek kurulum maliyeri çift yakıtlı (LNG) kullanımı olan makineler için (15.540.000 USD) olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak seçenekler bireysel olarak değerlendirildiğinde maliyetlerinin yanında avantajlarının ve dezavantajlarının da bu seçimin yapılmasında etkili olduğu bilinmektedir. Özellikle scrubber sistemlerinin kurulmasında gemiler açık döngü sistemleri tercih etmek niyetindedirler fakat bugün sektör geneline bakıldığında açık döngü scrubber sistemlerinin çevresel zararları tartışmaların odağında bulunmaktadır. Açık döngü scrubber sistemlerinde kullanılan deniz suyunun egzoz gazının temizleme işleminden sonra direk deniz verilmesi durumunda denize karışan atıklar arasında polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH), ağır metaller, değişen pH değerleri ve özellikle kıyı bölgesinde ve limanlarda bölgesel kirliliğin artmasında etkili olabilmektedirler. Birçok ülke belirtilen nedenlerden dolayı limanlarında açık döngü scrubber sisteminin kullanılması yasaklamaktadır. Hem açık hem de kapalı sistem olma özelliğine sahip olan hibrit

scrubber sistemi ise yüksek maliyetinden dolayı işletmecileri çekimser kalmaya itmektedirler. Scrubber sisteminin sahip olduğu handikaplardan bir tanesi de sistemlerin işletilmesinde personel bilgi ve tecrübesinin yetersiz olmasıdır. Gemi bünyesinde sistemin işletilmesinden sorumlu olan personelin yetersiz bilgisinden dolayı kazalar meydana gelebilir ve hem can hem de mal kaybına yol açabilecek geri dönüşü olmayan sonuçlara sebebiyet verebilmektedir.

Yeni yakıt türü olan VLSFO kullanımına geçiş sürecinde farklı yakıtların karışımından elde edilmesinden kaynaklı problemlerin ortaya çıkması muhtemel görülmektedir. Klas kuruluşlarında özellikle değinmiş oldukları bu problemler aşağıda sıralanmaktadır;

- Uyumluluk
- Kararlılık, kararsızlık
- Akışkanlık
- Soğuk akış özellikleri
- Hesaplanmış karbon aromatikleşme indeksi
- Katalizör madde konsantrasyonu (Al+Si)
- Parlama sıcaklığı

VLSFO kullanımında ekonomik şartlarında değerlendirilmeye alınması gerekmektedir. Küresel yakıt fiyatlarındaki değişim göz önünde bulundurulduğunda yüksek fiyatlarından dolayı şirketler için önemli bir dezavantaj olarak ön plana çıkmaktadır. IMO 2020 kükürt düzenlemelerine uyum sürecinde şirketler daha çok süreci takip etmek ve küresel açıdan sektörün hangi yönde ilerleyeceğini izlemeyi tercih etmektedirler. Bu nedendir ki aralarında fiyat farkının makul seviyelerde olmasından kaynaklı MGO kullanımını tercih edebilmektedirler.

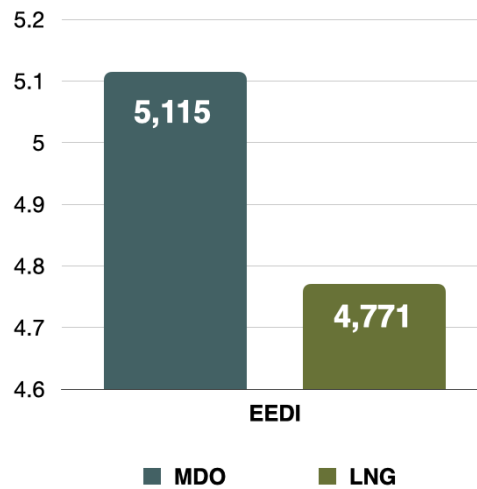
Emisyon kısıtlamalarına uymak için LNG'yi alternatif yakıt olarak kullanmak ise mevcut ve yeni gemiler için bir seçenek olmaktadır. LNG'yi kullanmanın en önemli faydaları ise SO_x ve PM emisyonlarının neredeyse hiç olmaması ve NO_x emisyonları açısından gemileri egzoz gazı temizleme sistemine ihtiyaç duymadan IMO Tier III sınırlarına getirebilmesidir. Çift yakıtlı makinelerin kullanımı için işletmeler açısından durum değerlendirildiğinde hem yüksek maliyetleri hem yakıt ikmal noktalarının Dünya genelindeki yaygınlığının gelişme noktasında olması LNG'nin tercih edilmemesine neden olmaktadır.

Baz alınan A gemisi içi fayda maliyet analizi çerçevesinde sistemler incelendiğinde emisyon azaltma yöntemleri arasında en uygun seçeneğin 28.458.921 USD değeriyle MGO kullanmak olduğu görülmektedir. Sektörel açıdan durum değerlendirmesi yapıldığında ise kurulum maliyeti gerektirmeyen buna ilave olarak avantajları ve dezavantajları deneyimlenmiş olan bu yakıt türü özellikle ECA içerisinde çalışacak gemiler için avantaj sağlamaktadır. 28.408.458 USD değerine ikinci seçenek ise yeni bir yakıt olarak karşımıza çıkan VLSFO yakıt türüdür. Yakıt fiyatları ve geminin çalışma bölgeleri dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında ise ECA dışında çalışacak bu gemi için VLFO yakıt türü değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

Yatırımların geri ödeme süresine ilişkin hesaplamalar, çift yakıtlı motorlar hariç diğer yatırımların 5 yıllık bir süre içinde ödenebileceğini ve geminin kalan kullanım süreleri için değerlendirilebileceğini göstermektedir. Açık döngü için 2.2 yıl ve hibrit için 2.6 yıl içinde yatırımların sermaye harcamalarının karşılığını bulduğu anlaşılabılır ve bu sistemlere SCR eklenmesi ile açık döngü ve hibrid yakayıcı için bu periyodlar 2.8 ve 3.3 yıla çıkmaktadır. Ancak, A gemisi için çift yakıtlı makinelere geçilmesi durumunda yaklaşık 13 yıllık geri ödeme süresi ile karşılaşmakta ve geminin kalan kullanım süresi de göz önüne alındığında yatırımın mantıklı olmaktan uzaklaştırmaktadır.

Emisyon azaltma yöntemleri içerisinde en etkili yöntem olan LNG kullanımı tercih edilmesi enerji verimliliği açısından da değerlendirildiğinde çıkan sonuçlar Şekil 5.4’de gösterilmiştir.

A GEMİSİ EEDI KARŞILAŞTIRMASI (gCO₂/t nm)



Şekil 5.4 : A gemisi için EEDI karşılaştırması.

Şekil 5.4’de görüldüğü üzere iki yakıt türü içinde EEDI hesaplaması yapılmış ve çıkan sonuçlara göre en az karbon salınımının 4,771 gCO₂/t nm ile LNG kullanımı sonucunda olduğu görülmüştür. Bu nedenledir ki günümüzdeki teknolojik gelişmelerin ışında gemiler için en verimli ve en tercih edilebilir yakıt LNG olarak karşımıza çıkmaktadır. EEDI hesaplamaları geminin satılması durumunda da önemli rol oynadığı literatürde yapılan incelemelerde de görülmektedir.

Günümüzde bir geminin enerji verimliliği, ikinci el piyasadaki varlık değerini etkileyen çeşitli mekanizmalarından biri olarak görülmektedir. İlk olarak, enerji verimliliğinin artırılması, özellikle navlun oranları düşük olduğunda ve yakıt fiyatlarının değişken olduğu bilindiğinden, kâr marjlarını geri kazanmanın bir yolu olabilir. İkincisi, kullanıcılar (nihai müşteriler ve gemi sahipleri veya kiralayanlar) taşımacılığın olumsuz çevresel etkisinin giderek daha fazla farkında olduklarından, enerji verimliliği yeni veya ikinci el varlık satın alırken veya kiralarken sektörde rekabetçi bir faktör olabileceği öngörülebilmektedir. Üçüncüsü ise enerji tasarruflu varlıklar (gemiler), potansiyel olarak pazarda giderek daha fazla çevre bilincine sahip kullanıcılardan gelen yüksek talebi yansıtarak, yüksek gelir elde edilmesini sağlayabilmektedir. Yüksek EEDI değerine sahip olan gemiler için günümüzde önemli konumda olan yakıt tüketiminin değerlendirilmesi konusunda da etkili olmaktadır.

KAYNAKLAR

- ABS.** (2018). ABS ADVISORY ON EXHAUST GAS SCRUBBER SYSTEMS.
<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/exhaust-gas-scrubber-systems-advisory.pdf>
- Ammar, N. R.** (2019). An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.001>
- 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(December 2018), 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- Boulougouris, E. K., & Chrysinas, L. E.** (2015). *LNG Fueled Vessels Design Training*. July. <https://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2015/06/Lecture-Notes.pdf>
- Corbett, J. J.** (2003). Updated emissions from ocean shipping. *Journal of Geophysical Research*, 108(D20). <https://doi.org/10.1029/2003jd003751>
- Dalsøren, S. B., Eide, M. S., Endresen, O., Mjelde, A., Gravir, G., & Isaksen, I. S. A.** (2009). Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships: The contribution from major ship types and ports. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), 2171–2194. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2171-2009>
- Danish EPA.** (2012). Economic Impact Assessment of a NOX Emission Control Area in the North Sea.
<https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2012/06/978-87-92903-20-4.pdf>
- De Bruyn, S., Bijleveld, M., de Graaff, L., Schep, E., Schroten, A., Vergeer, R., & Ahdour, S.** (2018). Environmental Prices Handbook EU28 Version. *CE Delft*, 175.
- DNV GL.** (2018). Assessment of Selected Ternative Fuels and technologies. *Imo*, 391(June), 1–48.
[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.391\(95\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.391(95).pdf)
- DNV.GL.** (2020). *Current price development oil and gas - DNV GL*. Dnvggl.Com.
<https://www.dnvggl.com/maritime/lng/current-price-development-oil-and-gas.html>

- EMEP/EEA.** (2019). Air pollutant emission inventory guidebook. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-d-navigation/view>
- Endresen, Ø., Sørgård, E., Behrens, H. L., Brett, P. O., & Isaksen, I. S. A.** (2007). A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(12), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2006JD007630>
- EPA.** (2011). Exhaust Gas Scrubber Washwater Effluent https://www3.epa.gov/npdes/pubs/vgp_exhaust_gas_scrubber.pdf
- ETIP Bioenergy.** (2016). *Use of Biofuels in Shipping*. Etipbioenergy.Eu. http://www.etipbioenergy.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=294
- Exhaust Gas Cleaning Systems Association.** (2012). A practical guide to exhaust gas cleaning systems for the maritime industry. *EGCSA Handbook*, London UK. <https://www.egcsa.com/wp-content/uploads/EGCSA-Handbook-2012-A5-size-.pdf>
- Eyring, V., Köhler, H. W., Van Aardenne, J., & Lauer, A.** (2005). Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 110(17), 171–182. <https://doi.org/10.1029/2004JD005619>
- Herdzik, J.** (2011). *LNG AS A MARINE FUEL – POSSIBILITIES AND PROBLEMS* LNG AS A MARINE FUEL – POSSIBILITIES AND PROBLEMS Jerzy Herdzik According to limitation of NO_x emission MARPOL Annex VI , Regulation 13 the effective date - Tier 1 (current limits for new engines): August.
- Ho-Chun Fang, I., Cheng, F., Incecik, A., & Carnie, P.** (2013). *Global Marine Trends 2030*. 146. <https://doi.org/DOI10.1016/j.anireprosci.2008.01.006>
- ICS.** (2014). Shipping, World Trade and the Reduction of CO₂ Emissions. *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, 1–6.
- IMO.** (2012). *EEDI - rational, safe, effective*. Imo.Org/. <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/EEDI.aspx>
- IMO.** (2016). *STUDIES ON THE FEASIBILITY AND USE OF LNG AS A FUEL FOR SHIPPING*. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/LNG Study.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/LNG%20Study.pdf)
- IMO.** (2017a). *Sulphur oxides (SO_x) – Regulation 14*. Imo.Org. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-\(SO_x\)---Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)---Regulation-14.aspx)
- IMO.** (2017b). *Air pollution*. Imo.Org. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>

- IMO.** (2018). 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS. ANNEX 5 RESOLUTION MEPC.308(73), 308(October), 1–36. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air pollution/MEPC.308%2873%29.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/MEPC.308%2873%29.pdf)
- Jafarzadeh, S., Paltrinieri, N., Utne, I. B., & Ellingsen, H.** (2017). *LNG-fuelled fishing vessels: A systems engineering approach*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 202–222. doi:10.1016/j.trd.2016.10.032
- Jalkanen, J. P., Brink, A., Kalli, J., Pettersson, H., Kukkonen, J., & Stipa, T.** (2009). A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(23), 9209–9223. <https://doi.org/10.5194/acp-9-9209-2009>
- Jiang, L., Kronbak, J., & Christensen, L. P.** (2014). The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28(2014), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.12.005>
- Lloyd's Register.** (2012). Understanding exhaust gas treatment systems; Guidance for shipowners and operators. https://www.alfalaval.sk/globalassets/documents/microsites/puresox/understanding_exhaust_gas_treatment_systems.pdf
- Magnusson, M., Fridell, E., & Ingelsten, H. H.** (2012). The influence of sulfur dioxide and water on the performance of a marine SCR catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 111–112, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.09.010>
- MAN Energy Solutions.** (2018). 11.000 teu container vessel. *An ME-GI Powered Vessel Fitted with Fuel Gas Supply System and Boil-off Gas Handling*. https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/test/11-000-teu-container-vessel.pdf?sfvrsn=66eecca2_4
- MAN Energy Solutions.** (2019). 0.50% S fuel operation 2020. *Detailed Information on Fuels with Less than 0.50% Sulphur – Preparation and Operation*. [https://shipandbunker.com/download/Paper_0.50-s-fuel-operation-2020 MAN ES 2-S.pdf](https://shipandbunker.com/download/Paper_0.50-s-fuel-operation-2020%20MAN%20ES%202-S.pdf)
- Marine Hydrogen and Fuel Cell Association.** (2017). *MHFCA - Ship Technology*. Ship-Technology.Com. <https://www.ship-technology.com/contractors/electrical/mhfca/>
- Mauderly, J.L.**, (1992). *Environmental Toxicants: Human Exposures and Their Health Effects*. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 119–155.
- Methanex Corporation.** (2018). *Industry Welcomes Four New Ocean-Going Vessels Capable of Running on Methanol | Methanex Corporation*. Methanex.Com. <https://www.methanex.com/news/industry-welcomes-four-new-ocean-going-vessels-capable-running-methanol>

- Miola, A., Ciuffo, B., Marra, M., & Giovine, E.** (2010). Analytical framework to regulate air emissions from maritime transport. *European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability*. <https://doi.org/10.2788/78254>
- Mjelde, A., Endresen, Ø., Bjørshol, E., Gierløff, C. W., Husby, E., Solheim, J., Mjøs, N., & Eide, M. S.** (2019). Differentiating on port fees to accelerate the green maritime transition. *Marine Pollution Bulletin*, 149(September), 110561. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110561>
- Mohd Noor, C. W., Noor, M. M., & Mamat, R.** (2018). Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(February 2017), 127–142. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>
- Mollenhauer, K., & Tschöke, H.** (2010). *Handbook of Diesel Engines*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89083-6>
- Olesen, H. R., Winther, M., Ellermann, T., Christensen, J., & Plejdrup, M.** (2009). *Ship emissions and air pollution in Denmark Present situation and future scenarios*. 1307, 134. <http://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2009/978-87-92548-77-1/pdf/978-87-92548-78-8.pdf>
- Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X., & Rutherford, D.** (2017). Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013-2015. *The International Council on Clean Transportation*, October, 1–25. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf
- Panasiuk, I., & Turkina, L.** (2015). The evaluation of investments efficiency of SOx scrubber installation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40(2015), 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.004>
- Paxian, A., Eyring, V., Beer, W., Sausen, R., & Wright, C.** (2010). Present-day and future global bottom-up ship emission inventories including polar routes. *Environmental Science and Technology*, 44(4), 1333–1339. <https://doi.org/10.1021/es9022859>
- Schinas, O., & Stefanakos, C. N.** (2012). Cost assessment of environmental regulation and options for marine operators. *Transportation Research Part C*, 25, 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.05.002>
- Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J. F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Dalsoren, S., Faluvegi, G., Folberth, G., Horowitz, L. W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S. T., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann.** (2016). The effect of future ambient air pollution on human premature mortality to 2100 using output from the ACCMIP model ensemble. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(15), 9847–9862. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9847-2016>

- Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O’Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Winebrake, J. J., & Hoen, M., A.** (2014). Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. *International Maritime Organization (IMO)*, 327. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3>
- Sofiev, M., Winebrake, J. J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira, J., Kouznetsov, R., Jalkanen, J. P., & Corbett, J. J.** (2018). Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. *Nature Communications*, 9(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02774-9>
- Styhre, L., & Winnes, H.** (2019). Emissions From Ships in Ports. In *Green Ports* (Issue X). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814054-3.00006-2>
- Vanhamme, E.** (2016). *Assessment of Fuel Oil Availability Final report*. July, 0–184. www.cedelft.eu
- Walker, T. R., Adebambo, O., Del Aguila Feijoo, M. C., Elhaimer, E., Hossain, T., Edwards, S. J., Morrison, C. E., Romo, J., Sharma, N., Taylor, S., & Zomorodi, S.** (2019). Environmental Effects of Marine Transportation. *World Seas: An Environmental Evaluation*, 505–530. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805052-1.00030-9>
- Wang, C., Corbett, J. J., & Firestone, J.** (2007). Modeling energy use and emissions from North American shipping: Application of the ship traffic, energy, and environment model. *Environmental Science and Technology*, 41(9), 3226–3232. <https://doi.org/10.1021/es060752e>
- Wang, X.** (2010). Diesel Engines: Emission Control. *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering, Second Edition*, x, 292–295. <https://doi.org/10.1081/e-eafe2-120043052>
- World Health Organization.** (2018). *Ambient (outdoor) air pollution*. Who.Int. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- World LPG Association.** (2015). *Annual Report 2015*.
- Yang, Z. L., Zhang, D., Caglayan, O., Jenkinson, I. D., Bonsall, S., Wang, J., Huang, M., & Yan, X. P.** (2012). Selection of techniques for reducing shipping NO_x and SO_x emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(6), 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.05.010>
- YANMAR.** (2018). *Marine SCR System for Compliance with IMO NO_x Tier 3 Regulations / YANMAR Technical Review / Technology / YANMAR Singapore*. Yanmar.Com. https://www.yanmar.com/ph/technology/technical_review/2018/0413_2.html

Zemships. (2012). *One hundred passengers and zero emissions.*
http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Zemships_Brochure_EN.pdf

Url-1. <<https://www.egcsa.com/regulatory/>>. erişim tarihi 15.10.2019

Url-2. <<https://hydrogeneurope.eu/liquefaction-systems>>. erişim tarihi 06.11.2019

Url-3. <<https://hydrogeneurope.eu/fuel-cells>>. erişim tarihi 22.11.2019

Url-4. <https://www.truck.man.eu/de/en/man-world/man-in-germany/press-and-media/Trawlers-Specified-with-MAN_s-SCR-System-192832.html>. erişim tarihi 10.01.2020

Url-5. <<https://www.egcsa.com/exhaust-gas-recirculation-explained/>>. erişim tarihi 18.02.2020

Url-6. <<https://www.nepia.com/industry-news/no-scrubs-more-ports-declare-ban-on-egcs-discharges-update/>>. erişim tarihi 04.02.2020

Url-7. <[https:// www.shipandbunkering.com](https://www.shipandbunkering.com)>. erişim tarihi 03.4.2020

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Emir EJDER

Doğum Tarihi ve Yeri: İstanbul 1990

E-posta : emirejder2@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme
2011, TUDEV, Deniz Eğitim Merkezi, Gemi Mak. İşl. Prog.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Bora Denizcilik (Makine Stajyeri, 2010)
- İnce Denizcilik (Uzakyol Vardiya Mühendisi, 2012-2016)
- Yasa Denizcilik (Uzakyol Vardiya Mühendisi, 2017-)