İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GEMİ MANEVRALARI ESNASINDA EMİSYON DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI VE SİMÜLASYON İLE DOĞRULANMASI: UYGUNLUK VE FARK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Levent KABA

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

OCAK 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GEMİ MANEVRALARI ESNASINDA EMİSYON DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI VE SİMÜLASYON İLE DOĞRULANMASI: UYGUNLUK VE FARK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Levent KABA
(512221037)

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ŞENOL

OCAK 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

CALCULATION AND ASSESSMENT OF EMISSION VALUES DURING SHIP MANEUVERS WITH VALIDATION THROUGH SIMULATION: A SUITABILITY AND VARIANCE ANALYSIS

M.Sc. THESIS

Levent KABA
(512221037)

Department of Maritime Transportation Engineering

Maritime Transportation Engineering Programme

Thesis Advisor: Asst. Prof. Yunus Emre ŞENOL

JANUARY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 512221037 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Levent KABA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GEMİ MANEVRALARI ESNASINDA EMİSYON DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI VE SİMÜLASYON İLE DOĞRULANMASI: UYGUNLUK VE FARK ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde basarı ile sunmustur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre ŞENOL** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

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

Dr. Cem KARTOĞLU .....
Milli Savunma Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17.12.2024
Savunma Tarihi : 02.01.2025

Aileme ve mesai arkadaşlarıma,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, gemi manevraları esnasında ortaya çıkan emisyon değerlerinin hesaplanması ve bu değerlerin simülasyon yöntemi ile karşılaştırılması konusunu ele almaktadır. Deniz taşımacılığı, bilindiği üzere dünya ticaretinin bel kemiğini oluşturmaktadır. Ancak, bu sektörün çevresel etkileri, özellikle de gemi emisyonları, gün geçtikçe daha fazla dikkat çekmektedir. Emisyon salınımları hakkında çıkan regülasyonlar ve ortaya koyulan hedefler de gelecekte gemiler açısından bir hayli zorlu olacaktır.

Tezimin amacı, gemi manevraları sırasında hem gemi hem de yardımcı deniz araçlarından kaynaklanan emisyonların doğru bir şekilde hesaplanması ve bu hesaplamaların simülasyon teknikleri ile karşılaştırılmasıdır. Bu çalışma, gemi manevralarında yayılan emisyonları hem gemi hem de yardımcı deniz araçları açısından değerlendirerek toplam emisyon değerlerini elde etmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, gerçek gemi manevralarındaki emisyonların hesaplanması ve verilerinin elde edilmesinin zorluğu nedeniyle, gelecekte yapılacak emisyon çalışmalarının simülasyon üzerinden gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamak amaçlanmaktadır.

Tez sürecimde beni yönlendiren ve yardımını benden esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre Şenol'a, ayrıca süreçler hakkında engin bilgisini paylaşan değerli kardeşim Dr. Alper Seyhan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez verilerinin toplanması sürecinde sabırla bana destek olan ve benimle birlikte bizzat verileri toplayan mesai arkadaşlarım Kılavuz Kaptanlara teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan aileme ve akademik kariyerimde bana destek veren sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak 2025

Levent KABA
(Kılavuz Kaptan)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Hava Kirliliğinin Dünya ve İnsanlar Üzerindeki Etkileri 2
1.1.1 Hava kirliliğinin dünya üzerindeki etkileri ve küresel ısınma 3
1.1.2 Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki doğrudan etkileri 7
1.1.3 Denizcilik ve hava kirliliği 11
1.1.4 Denizcilikte hava kirliliği düzenlemeleri ve kuralları 17
1.1.5 Gemi kaynaklı emisyonların azaltım yöntemleri 25
1.1.6 Gemi manevrası: emisyon sebepleri ve azaltım yöntemleri 32
1.2 Simülasyon 36
1.3 Literatür Taraması 39
2. METODOLOJİ **51**
2.1 Gemi ve Römorkör Emisyon Hesaplama Süreci 52
2.1.1 Top-down metodolojisi 52
2.1.2 Bottom-up metodolojisi 55
2.1.2.1 ENTEC metodolojisi 56
2.1.2.2 EPA metodolojisi 59
3. MANEVRA ÇALIŞMALARI **63**
3.1 Gerçek Manevralar 64
3.1.1 Gerçek manevra gemi ve römorkör emisyon hesaplama yöntemi 66
3.1.1.1 Gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplama yöntemi 67
3.1.1.2 Gerçek manevra römorkör emisyon hesaplama yöntemi 68
3.2 Simülatör Manevraları 70
3.2.1 Simülasyon manevrası gemi ve römorkör emisyon hesaplama yöntemi 75
3.2.1.1 Simülasyon manevrası ana gemi emisyon hesaplama yöntemi 75
3.2.1.2 Simülasyon manevrası römorkör emisyon hesaplama yöntemi 77
4. EMİSYON HESAPLAMALARI **85**
4.1 Gerçek Manevra Emisyon Hesaplamaları 85
4.1.1 Gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplaması 86
4.1.1.1 Gerçek manevra ana gemi ENTEC metodolojisi emisyon hesaplaması 86
4.1.1.2 Gerçek manevra ana gemi EPA metodolojisi emisyon hesaplaması 87
4.1.2 Gerçek manevra römorkör emisyon hesaplaması 88
4.2 Simülasyon Manevrası Emisyon Hesaplaması 89

4.2.1 Simülasyon manevrası ana gemi emisyon hesaplaması 89
4.2.1.1 Simülasyon manevrası ana gemi ENTEC metodolojisi emisyon hesaplaması 90
4.2.1.2 Simülasyon manevrası ana gemi EPA metodolojisi emisyon hesaplaması 90
4.2.2 Simülasyon manevrası römorkör emisyon hesaplaması 91
4.2.2.1 Simülasyon manevrası römorkör ENTEC metodolojisi emisyon hesaplaması 91
4.2.2.2 Simülasyon manevrası römorkör EPA metodolojisi emisyon hesaplaması 93
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 95
6. SONUÇ 107
KAYNAKLAR 113
ÖZGEÇMİŞ 125

KISALTMALAR

AIS	**:** Automatic Identification System
AMS	**:** Automated Mooring System
ANN	**:** Artificial NeuralNetwork
BC	**:** Black Carbon
CFC	**:** Kloroflorokarbonlar
CFD	**:** Computational Fluid Dynamics
CII	**:** Carbon Intensity Indicator
DSS	**:** Decision Support System
DWT	**:** Deadweight Tonnage
ECA	**:** Emission Control Area
EEDI	**:** Energy Efficiency Design Index
EEOI	**:** Energy Efficiency Operational Indicator
EEXI	**:** Existing Ship Energy Efficiency Index
EGC	**:** Exhaust Gas Cleaning
EGR	**:** Exhaust Gas Recirculation
ENTEC	**:** Environmental Technology
EPA	**:** Environmental Protection Agency
GHG	**:** Greenhouse Gases
GUI	**:** Graphical User Interface
HCFC	**:** Hidrokloroflorokarbonlar
HFC	**:** Hidroflorokarbonlar
HFO	**:** Heavy Fuel Oil
IARC	**:** International Agency for Research on Cancer
IMCO	**:** Inter-Governmental Maritime Consultative Organization
IMO	**:** International Maritime Organization
IPCC	**:** Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	**:** Kızılötesi
KLD	**:** Keel Laid Date
LCAG	**:** Life Cycle Assessment Guideline

LNG : Liquefied Natural Gas
LPG : Liquefied Petroleum Gas
LSFO : Low Sulphur Fuel Oil
MARPOL : International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MAS : Maritime Autonomous Systems
MDO : Marine Diesel Oil
MEPC : Marine Environment Protection Committee
MGO : Marine Gas Oil
NASA : National Aeronautics and Space Administration
NMVOCs : Non-Methane Volatile Organic Compounds
OC : Organik Carbon
PAH : Poliaromatik Hidrokarbonlar
PFC : Perflorokarbonlar
PM : Partikül Madde
RAPIT : Rapid Advanced Prediction and Interface Technology
ROPAX : Roll-on/Roll-off Passenger
RPM : Revolutions Per Minute
SCR : Selective Catalytic Reduction
SECA : Sulphur Emission Control Area
SEEMP : Ship Energy Efficiency Management Plan
SOF : Statement Of Fact
STCW : Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers
UNCTAD : United Nations Conference on Trade and Development
UV : Ultraviyole
VLSFO : Very Low Sulphur Fuel Oil
VOCs : Volatile Organic Compounds
WTO : World Trade Organization

SEMBOLLER

°C	**:** Santigrat (Celsius)
µg/m³	**:** Mikrogram/Metreküp
µm	**:** Mikrometre
CH_4	**:** Metan
CO	**:** Karbon Monoksit
CO_2	**:** Karbon Dioksit
g/kWh	**:** Gram Başına Kilovat-Saat
kW	**:** Kilovat
N_2O	**:** Diazot Oksit
NO_2	**:** Nitrojen Dioksit
NO_X	**:** Azot Oksitleri
S	**:** Kükürt
SO_2	**:** Kükürt Dioksit
SO_X	**:** Kükürt Oksitleri
Tg	**:** Teragram

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : MARPOL ekleri ve yayınlanma tarihleri **18**
Çizelge 1.2 : MARPOL Ek VI kapsamındaki gelişmeler..... **19**
Çizelge 1.3 : İnşaa yılına göre NO_X limitleri..... **20**
Çizelge 1.4 : Güncel emisyon kontrol bölgeleri (ECA) **20**
Çizelge 1.5 : Literatür taramasına dair özet..... **48**
Çizelge 3.1 : Simülasyon modelinde yer alan gemi özellikleri **66**
Çizelge 4.1 : Gerçek ve simülasyon manevralarında emisyon hesaplama **85**
Çizelge 5.1 : Kılavuz kaptan demografik dağılım **99**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünya üzerindeki sera etkisi **3**
Şekil 1.2 : 1880-2020 arası küresel sıcaklık artışı tahminleri..... **6**
Şekil 1.3 : Hava kirliliğiyle bağlantılı küresel ölümlerin yüzdesi **8**
Şekil 1.4 : Farklı taşıma modlarında mesafe ve emisyon karşılaştırması..... **12**
Şekil 1.5 : 2005 Yılı taşıma türüne göre CO_2 emisyonları **12**
Şekil 1.6 : 4 Zamanlı gemi makinesinin çalışma prensibi **14**
Şekil 1.7 : Gemi emisyon hesaplaması örneği..... **15**
Şekil 1.8 : Gemilerin liman sınırları içerisindeki emisyon yayan aşamaları **16**
Şekil 1.9 : Güncel emisyon kontrol alanları **20**
Şekil 1.10 : Yakıt sülfür limitleri..... **21**
Şekil 1.11 : IMO LCAG'ye göre denizcilik yakıtının yaşam döngüsü **28**
Şekil 1.12 : Gemi manevrasının özeti..... **33**
Şekil 1.13 : Gemilerin farklı modlardaki emisyonların değerleri..... **35**
Şekil 1.14 : Geminin veya römorkörün altı serbestlik derecesi..... **37**
Şekil 2.1 : Metodolojik akış diyagramı..... **51**
Şekil 2.2 : Top-down metodolojisi **53**
Şekil 2.3 : Yakıt tiplerine göre yoğunluk tablosu **54**
Şekil 2.4 : Top-down metodolojisinde tahmin için kullanılan emisyon faktörleri ... **54**
Şekil 2.5 : Gemi türü, boyutu ve moda göre yardımcı makine ve kazan güç çıktısı . **58**
Şekil 2.6 : ENTEC'e göre manevra ve yanaşma esnasındaki EF(ME)(g/kWh) (ana makine emisyon faktörleri)..... **58**
Şekil 2.7 : ENTEC'e göre seyir, manevra ve yanaşma esnasındaki EF(AE)(g/kWh) (yardımcı makine emisyon faktörleri) **59**
Şekil 2.8 : Genel hatlarıyla ENTEC ve EPA metodolojisi **60**
Şekil 2.9 : Gemi BSFC Oranları (g/kWh) **61**
Şekil 2.10 : Liman deniz araçları ana makine ortalama emisyon faktörü **62**
Şekil 3.1 : Gerçek manevralara ait örnek gemi makine telgrafı bilgileri..... **65**
Şekil 3.2 : Gerçek manevra örnek gemi makinesi RPM-kW dönüşümü..... **67**
Şekil 3.3 : Gerçek manevra örnek gemi manevra kayıtları kW dönüşümü **68**
Şekil 3.4 : Örnek römorkör yakıt iskandil tablosu..... **69**
Şekil 3.5 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan dökme yük gemisi özellikleri **71**
Şekil 3.6 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan Ro-Ro gemisi özellikleri **72**
Şekil 3.7 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan konteyner gemisi özellikleri **73**
Şekil 3.8 : Simülasyon ortamı dökme yük gemisi yanaşma manevrası..... **74**
Şekil 3.9 : Simülasyon ortamı Ro-Ro yanaşma manevrası..... **74**
Şekil 3.10 : Simülasyon ortamı konteyner gemisi yanaşma manevrası **75**
Şekil 3.11 : Simülasyon manevrası örnek gemi makinesi RPM-Kw dönüşümü..... **76**
Şekil 3.12 : Simülasyon manevrası örnek gemi manevra kayıtları **77**
Şekil 3.13 : Simülasyon manevrası örnek römorkörler manevra kayıtları **78**

Şekil 3.14 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan römorkör no:1 **81**
Şekil 3.15 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan römorkör no:2 **82**
Şekil 3.16 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan römorkör no:3 **83**
Şekil 3.17 : Simülasyon manevrası römorkör verileri örnek dönüşüm tablosu **84**
Şekil 5.1 : 1 Nolu römorköre ait emisyonlar **96**
Şekil 5.2 : 2 Nolu römorköre ait emisyonlar **96**
Şekil 5.3 : 3 Nolu römorköre ait emisyonlar **96**
Şekil 5.4 : Ana gemi emisyonları **97**
Şekil 5.5 : Her bir manevra için toplam emisyon değerleri **97**
Şekil 5.6 : Her bir manevra için ENTEC/EPA ortalamaları **98**
Şekil 5.7 : Gerçek ve simülasyon manevralarının ENTEC/EPA ortalama emisyon sonuçlarının karşılaştırılması **98**
Şekil 5.8 : Manevralara katılan kılavuz kaptanlara ait demografik grafikler **100**
Şekil 5.9 : Kılavuz kaptanlara göre manevralarda üretilen emisyon miktarları **101**
Şekil 5.10 : Dökme yük gemilerinde, C1 ve C2 katsayıları ile gerçek manevralarda üretilen emisyonların karşılaştırılması **103**
Şekil 5.11 : Ro-Ro gemilerinde, C1 ve C2 katsayıları ile gerçek manevralarda üretilen emisyonların karşılaştırılması **103**
Şekil 5.12 : Konteyner gemilerinde, C1 ve C2 katsayıları ile gerçek manevralarda üretilen emisyonların karşılaştırılması **103**

GEMİ MANEVRALARI ESNASINDA EMİSYON DEĞERLERİNİN HESAPLANMASI VE SİMÜLASYON İLE DOĞRULANMASI: UYGUNLUK VE FARK ANALİZİ

ÖZET

Dünya ticaretinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol üstlenen deniz taşımacılığı, büyük hacimli yüklerin tek seferde kıtalar arası taşınmasını mümkün kılan yegâne taşıma yöntemidir. Son verilere göre, küresel lojistik sektörünün %80'inden fazlası deniz taşımacılığı aracılığıyla gerçekleşmektedir.

Artan nüfus ve genişleyen küresel ticaret ağı paralelinde, denizcilik sektörüne düşen sorumluluk giderek artmaktadır. Son yıllarda gemi sayısında belirgin bir artış gözlenmese de artan talep doğrultusunda gemi tonajlarında hızlı bir büyüme yaşanmaktadır. Bu gelişme, denizcilik sektörünün küresel ticaretin artan taleplerini karşılamadaki stratejik önemini daha da vurgulamaktadır.

Gemi tonajlarındaki artış, aynı zamanda hava kirliliğinde de bir yükselişe yol açmakta ve bu durum çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Halihazırda dünya genelinde hizmet veren çoğu gemi ve deniz yardımcıları, güç üretimi için fosil yakıtlarla çalışan dizel makineler kullanmaktadır. Fosil yakıtların yanması, doğrudan insan sağlığını tehdit eden kükürt dioksit (SO_2), azot oksitleri (NO_X), karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOCs) ve partikül madde (PM) gibi kirleticilerin çevreye salınımına neden olurken; diğer taraftan, sera etkisi yaratarak küresel ısınmaya yol açan metan (CH_4), diazot oksit (N_2O), karbon dioksit (CO_2), kloroflorokarbonlar (CFC'ler), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler), hidroflorokarbonlar (HFC'ler) ve perflorokarbonlar (PFC'ler) gibi gazların salınımına da sebep olmaktadır.

Deniz taşımacılığı, diğer taşıma modlarıyla kıyaslandığında ton başına salınan emisyon miktarının çok daha düşük olması nedeniyle verimli ve sürdürülebilir bir ulaşım yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Ancak, denizcilik sektörü, diğer taşıma modlarına kıyasla sektördeki yüksek payı nedeniyle küresel sera gazı emisyonlarına önemli ölçüde sebep olmaktadır. Uluslararası denizcilik kaynaklı CO_2 salınımı yaklaşık %3 iken, azot oksit (NO_X) ve kükürt oksit (SO_X) emisyonları sırasıyla küresel emisyonların yaklaşık %13 ve %12'sini oluşturmaktadır. Ayrıca, gerekli önlemler alınmazsa, CO_2 emisyonlarının 2050 yılına kadar %50 ile %250 oranında artması beklenmektedir. Bu durum, deniz taşımacılığının küresel sera gazı emisyonlarını azaltmak için önlemler almasının zorunlu hale geldiğini göstermektedir.

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından belirlenen 2050 sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, denizcilik sektörünün emisyonlarını kademeli olarak azaltması gerekliliği zorunlu hale gelmektedir. Bu hedefe ulaşabilmek için denizcilik endüstrisinin, yalnızca mevcut teknolojik ilerlemelerden yararlanmakla kalmayıp, aynı zamanda yenilikçi çözümler, operasyonel iyileştirmeler ve enerji verimliliğini artırıcı stratejiler geliştirmesi gerekmektedir. Gemi tasarımı, alternatif yakıt kullanımı ve emisyon kontrol sistemlerine yapılacak yatırımlar, sektörü karbonsuz bir geleceğe taşımak için büyük önem taşımaktadır.

Deniz taşımacılığının neden olduğu hava kirliliği, sera etksinin yanında, insan sağlığı üzerinde solunum, kardiyovasküler ve nörolojik hastalıklar gibi çeşitli olumsuz etkiler de yaratmaktadır. Uzun süreli hava kirliliğine maruz kalma, akciğer kanseri, böbrek hastalıkları ve sindirim sistemi bozuklukları gibi daha ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu sağlık etkileri, özellikle risk altındaki bireylerde daha belirgin olmaktadır. Bu durumun daha da derinleşmesine yol açan bir faktör, deniz taşımacılığının yaklaşık %70'inin, gemilerin kıyı bölgelerinde daha fazla vakit geçirmeleri nedeniyle sahil şeridinden 400 km mesafe içinde yoğunlaşmasıdır. Liman bölgelerinin yoğun yerleşim alanlarına yakın olması, bu bölgelerdeki nüfusun gemilerden kaynaklanan zararlı emisyonlara daha fazla maruz kalmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, deniz taşımacılığının emisyonları yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sağlık açısından da büyük bir risk teşkil etmektedir.

Şüphesiz, deniz taşımacılığı sektöründe en büyük emisyon kaynakları limanlar ve gemilerdir. Liman sahasında oluşan gemi kaynaklı emisyonlar da liman emisyonlarının bir parçası olarak değerlendirilmektedir. Gemilerin liman süreçleri; limana yaklaşma sırasında yapılan manevralar, limanda konaklama süresi (hotelling), limandan ayrılma manevraları ve liman müsaitliği olmadığında demirde bekleme periyotlarından oluşmakta ve bu süreçler boyunca emisyon salınımı gerçekleşmektedir. Bu çalışmada, gemilerin limanlara yanaşma manevraları sırasında üretilen emisyon miktarları ile bu manevralar esnasında emisyonların azaltılmasına yönelik konular incelenmiştir.

Gemi manevraları, öncelikle kılavuz kaptan, gemi kaptanı, mürettebat ve römorkörlerin koordinasyonuyla gerçekleştirilir. Bu süreçte römorkörler, kılavuz kaptanın komutları doğrultusunda yönlendirilir. Manevra sırasında emisyon değişiminde en büyük etkiye sahip olan unsurlardan biri kılavuz kaptanların manevra alışkanlıklarıdır. Bu nedenle, kılavuz kaptanların alışkanlıklarının izlenmesi ve emisyon azaltımı için dikkatlerinin bu konuya çekilmesi önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Yapılan literatür taramasında, gemi ve römorkörlerin, gerçek ve simülasyon manevralarındaki emisyon miktarlarını birlikte ele alan bir araştırmanın bulunmadığını ortaya koymaktadır. Gerçek ve simülasyon manevralarında oluşan emisyon miktarlarının uyumlu olması, simülasyon tabanlı emisyon tahminlerinin güvenilirliği açısından önem taşımaktadır; bu tür bir uyum, gelecekte simülasyon tabanlı tahminlerin kullanımıyla emisyon analizlerini kolaylaştırabilir. Aynı zamanda, simülasyon çalışmaları kılavuz kaptanların emisyon azaltımına yönelik farkındalık ve deneyim kazanmalarına olanak tanıyarak, eğitim süreçlerinde de fayda sağlamaktadır.

Gerçek manevralarda veri toplamanın zorlukları nedeniyle emisyon hesaplamaları sınırlı kalmaktadır; buna karşın, simülasyonlar daha kolay veri erişimi sunarak kapsamlı emisyon analizlerinin gerçekleştirilmesine olanak tanır. Bu çalışma, özellikle gerçek ve simülasyon tabanlı manevralardan kaynaklanan CO_2 emisyonlarının uyumunu ve kılavuz kaptanların demografik özelliklerinin emisyon miktarlarına olan etkisini incelemektedir.

Bu çalışma kapsamında, üç farklı gemi tipi (dökme yük gemisi, Ro-Ro gemisi ve konteyner gemisi) için toplam 18 gerçek manevra verisi, altı kılavuz kaptan tarafından toplanmıştır. Kılavuz kaptanların demografik özellikleri de analiz edilerek, deneyim seviyelerinin daha iyi anlaşılması sağlanmıştır. Her bir kılavuz kaptan, bir gemi tipiyle toplam altı manevra gerçekleştirmiştir ve her tipteki gemiler, kendi içlerinde benzer özelliklere sahip uyumlu gemilerden seçilmiştir. Gerçek manevraların ardından,

benzer hava ve akıntı koşullarında, aynı kılavuz kaptanlar ve benzer gemi ile römorkör özellikleri kullanılarak bu manevralar, limanın simülasyon ortamında aslına uygun şekilde yeniden gerçekleştirilmiştir. Gerçek verilere en yakın simülasyon sonuçlarını elde etmek amacıyla, tam donanımlı Transas NTPRO 5000 köprüüstü simülatörü kullanılmıştır.

Gerçek ve simülasyon manevraları tamamlandıktan sonra, gemi ve römorkör kaynaklı emisyon miktarları, "top-down" ve "bottom-up" metodolojilerinden ENTEC ve EPA yaklaşımları kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir manevraya ait gemi ve römorkör emisyonları toplanarak, o manevra için üretilen toplam emisyon miktarı belirlenmiştir; bu hesaplamalar hem gerçek hem de simülasyon manevraları için gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, gerçek ve simülasyon manevralarında elde edilen emisyon değerleri arasında yüksek bir uyum gözlemlenmiş olup, bu bulgu simülasyon tabanlı analizlerin limanlardaki emisyon tahminleri için güvenilir bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Bu durum, kılavuz kaptanların emisyon yönetimi konusunda kendilerini geliştirebilmeleri için gerçek manevralara ihtiyaç duymadan simülasyon ortamında eğitim yapmalarına olanak tanımaktadır. Simülasyon ortamı, kılavuz kaptanların operasyonel becerilerini geliştirmelerine yardımcı olarak emisyon seviyelerinin daha etkin bir şekilde kontrol edilmesine katkı sağlayabilir.

Manevra bazında dakika başına düşen emisyon değerleri incelendiğinde, aynı tip gemilerde 4,52 kata kadar değişen önemli farklar tespit edilmiştir. Bu, kılavuz kaptanların operasyonel alışkanlıkları ve deneyimlerinin emisyon seviyeleri üzerinde belirgin bir etki yarattığını göstermektedir. Simülasyon ortamında daha fazla manevra yaparak deneyim kazanan kılavuz kaptanların, özellikle benzer gemi tiplerinde gerçekleştirdikleri manevralarda operasyonel verimliliklerini artırarak emisyon seviyelerini düşürmeleri mümkündür. Böylece, kılavuz kaptanların simülasyon ortamında kendilerini geliştirmeleri, emisyonların optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Gemi tiplerine göre emisyon değerlerine bakıldığında, konteyner gemilerinin makine gücünün diğer gemi tiplerinden yüksek olmasının etkisiyle en yüksek emisyon değerlerine sahip olduğu, buna karşın dökme yük gemileriyle benzer makine özelliklerine sahip Ro-Ro gemilerinin daha düşük emisyonlar ürettiği gözlemlenmiştir. Dökme yük gemilerindeki yüksek emisyon seviyelerinin, kılavuz kaptanların deneyim eksiklikleri ve operasyonel alışkanlıklarıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma hem denizcilik sektöründe emisyon azaltımı hem de akademik araştırmalar açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Kılavuz kaptanların performansını artırmak, liman süreçlerinin çevresel etkilerini minimize etmek ve simülasyon temelli emisyon tahminleriyle sektörde sürdürülebilirliği sağlamak için güçlü bir temel oluşturmuştur. Gelecek çalışmalar, bu bulguları daha geniş örneklemlerle ve farklı metodolojilerle zenginleştirerek sektörel iyileştirmelere katkı sağlayabilir.

CALCULATION AND ASSESSMENT OF EMISSION VALUES DURING SHIP MANEUVERS WITH VALIDATION THROUGH SIMULATION: A SUITABILITY AND VARIANCE ANALYSIS

SUMMARY

Maritime transportation, which plays a critical role in the sustainability of global trade, is the only transportation method capable of moving large volumes of cargo across continents in a single voyage. According to recent data, over 80% of global logistics is carried out through maritime transportation.

Alongside the growing global population and expanding trade network, the responsibilities of the maritime sector are increasing. While there has not been a significant increase in the number of vessels in recent years, there has been rapid growth in the tonnage of ships due to rising demand. This development further underscores the strategic importance of the maritime industry in meeting the growing demands of global trade.

The increase in ship tonnage has also led to a rise in air pollution, which in turn creates negative environmental impacts. Most vessels and marine auxiliaries currently in operation around the world use diesel engines powered by fossil fuels. The combustion of fossil fuels leads to the emission of pollutants such as sulfur dioxide (SO_2), nitrogen oxides (NO_X), carbon monoxide (CO), volatile organic compounds (VOCs), and particulate matter (PM), which directly threaten human health, while also emitting greenhouse gases like methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), carbon dioxide (CO_2), chlorofluorocarbons (CFCs), hydrochlorofluorocarbons (HCFCs), hydrofluorocarbons (HFCs), and perfluorocarbons (PFCs), contributing to global warming.

Maritime transportation stands out as an efficient and sustainable mode of transport compared to other modes, given that the emissions per ton are significantly lower. However, due to its dominant share in global transportation, the maritime industry is responsible for a substantial portion of global greenhouse gas emissions. International shipping accounts for approximately 3% of global CO_2 emissions, while nitrogen oxides (NO_X) and sulfur oxides (SO_X) contribute around 13% and 12%, respectively. Moreover, without appropriate measures, CO_2 emissions are expected to increase by 50% to 250% by 2050. This highlights the urgent need for the maritime sector to take action to reduce global greenhouse gas emissions.

In line with the 2050 zero-emission target set by the International Maritime Organization (IMO), it has become imperative for the maritime industry to gradually reduce its emissions. Achieving this goal will require the maritime sector not only to take advantage of existing technological advancements but also to develop innovative solutions, operational improvements, and strategies that increase energy efficiency. Investments in ship design, alternative fuel use, and emission control systems will be crucial in steering the industry toward a carbon-free future.

Marine transportation-induced air pollution not only contributes to the greenhouse effect but also has various detrimental impacts on human health, including respiratory, cardiovascular, and neurological diseases. Prolonged exposure to air pollution can lead to more severe health issues, such as lung cancer, kidney diseases, and digestive system disorders. These health effects are particularly pronounced in vulnerable individuals. One contributing factor to the worsening of this situation is that approximately 70% of maritime transportation occurs in coastal regions, where ships spend more time, intensifying pollution within 400 km of the coastline. The proximity of port areas to densely populated urban zones results in greater exposure to harmful emissions from ships. In this context, the emissions from maritime transportation pose not only an environmental threat but also a significant public health risk.

Undoubtedly, the major sources of emissions in the maritime sector are ports and ships. Emissions generated by vessels at ports are considered part of port emissions. Ship operations in ports include maneuvers when approaching, staying (hotelling), departing, and waiting when the port is unavailable, during which emissions occur. This study examines the amount of emissions produced during ship maneuvers when approaching ports and explores ways to reduce emissions during these maneuvers.

Ship maneuvers are primarily coordinated by the maritime pilot, ship captain, crew, and tugboats. Tugboats are directed by the pilot’s commands during the maneuver. One of the most significant factors affecting emission changes during maneuvers is the operational habits of the pilot. Therefore, monitoring the pilots' habits and raising awareness about emissions reduction is an important necessity.

A literature review reveals the absence of research that simultaneously considers the emissions produced during real and simulated maneuvers involving ships and tugboats. The alignment of emission amounts in real and simulated maneuvers is crucial for the reliability of simulation-based emission predictions. Such consistency could simplify emission analysis through simulation-based predictions in the future. Additionally, simulation studies offer pilots the opportunity to increase awareness and experience in emissions reduction, which is beneficial for training processes.

Due to the difficulties in data collection during real maneuvers, emission calculations are limited; however, simulations provide easier access to data, allowing for comprehensive emission analyses. This study specifically examines the alignment of CO_2 emissions from real and simulation-based maneuvers and explores the effect of pilots’ demographic characteristics on emission levels.

In this study, 18 real maneuver data from three different ship types (bulk carrier, Ro-Ro, and container ship) were collected by six pilots. The demographic characteristics of the pilots were also analyzed to better understand their experience levels. Each pilot performed six maneuvers with one type of ship, and the ships selected for each type were similar in characteristics. Following the real maneuvers, these maneuvers were recreated in the port’s simulation environment under similar weather and current conditions, using the same pilots and vessels with similar tugboat characteristics. The fully equipped Transas NTPRO 5000 bridge simulator was used to achieve the closest simulation results to the real data.

After completing the real and simulated maneuvers, the emissions from the ships and tugboats were calculated using the ENTEC and EPA approaches based on the "bottom-up" and "top-down" methodologies. The total emission amount for each maneuver was determined by summing the emissions from the ships and tugboats, and this calculation was performed for both real and simulated maneuvers.

Emission calculations for ships and tugboats, based on top-down, ENTEC, and EPA methodologies, revealed a correlation coefficient of 0.9888, indicating 99% consistency in maneuver-based averages. Simulation maneuvers showed emission results closely aligned with real maneuvers. However, individual differences may stem from variations in calculation methods or pilot performance. These findings suggest that simulator maneuvers can effectively replace real maneuver data for emission predictions, enabling ports to estimate emissions without needing hard-to-obtain real data. By involving pilots in simulation-based maneuvering, emissions from docking ships can be predicted more efficiently. Simulations also provide a platform for pilot training focused on emission reduction, potentially enhancing operational efficiency and lowering emissions through increased experience in handling similar ships and maneuvers. While this study assessed emissions, it did not evaluate maneuver safety.

When comparing the total emission values of real and simulated maneuvers, a general similarity is observed; however, emissions from real maneuvers are typically higher than those from simulations. This discrepancy is attributed to factors such as stress, uncertainty, pressure, and fatigue experienced by pilots during real maneuvers. Furthermore, higher emissions observed in certain simulated maneuvers may result from the pilots' lack of familiarity with the simulation system, potentially leading to additional trial attempts. Given the limited number of maneuvers analyzed, a more thorough investigation is needed to compare the emission outputs of real and simulated maneuvers and to identify the underlying causes of these differences, with particular attention to the impact of such factors.

In the study, when comparing the emission amounts produced during maneuvers based on ship types, the highest emission levels were observed in container ships, while the lowest were recorded in Ro-Ro ships, as expected. A review of the technical data indicates that the higher emission levels in container ships are attributable to their larger engine capacities compared to other ship types. However, when Ro-Ro and bulk carriers with approximately similar engine power were compared, it was found that bulk carriers produced significantly higher emissions than Ro-Ro ships. A similar trend was observed for tugboats in terms of emissions per maneuver. Tugboats serving container ships recorded the highest average emission levels, while those assisting Ro-Ro ships had the lowest. In contrast, tugboats serving bulk carriers exhibited higher emission amounts compared to those serving Ro-Ro ships. This disparity is believed to stem from a lack of practical experience among pilots with bulk carriers due to their less frequent maneuvers (KB2). Therefore, it is suggested that improving pilots' maneuvering skills through simulator-based training could contribute to reducing pilot-induced emissions in this ship type.

When emissions per maneuver were examined, significant differences were found, with up to 4.52 times variation among the same type of ships. This highlights the considerable impact of pilots' operational habits and experience on emission levels. By gaining more experience through simulations, pilots can increase operational efficiency, particularly in maneuvers with similar ship types, which may lead to a reduction in emissions. Thus, pilots’ development in simulation environments plays a key role in optimizing emissions.

This study makes a significant contribution both to emission reduction in the maritime sector and to academic research. It provides a robust foundation for enhancing pilot performance, minimizing the environmental impacts of port operations, and ensuring sustainability in the sector through simulation-based emission estimations. Future

studies can enrich these findings with larger sample sizes and diverse methodologies, thereby contributing to sectoral improvements.

1. GİRİŞ

Dünya ticaretinin omurgasını oluşturan deniz taşımacılığı kapasite olarak her geçen gün büyümektedir. Coğrafi ekonomik ayrışma, azalan kalkınma oranları ve iklim değişikliği gibi ardışık sorunlara rağmen, deniz ticareti dünyada ticaret istikrarı sağlayan en önemli unsur olmaya devam etmektedir (UNCTAD, 2023). Dünya ticaretinin %80'den fazlası deniz taşımacılığı yoluyla gerçekleşmektedir. Dünya ticaretinin can damarı olarak adlandırılan deniz taşımacılığı, gıda, enerji ve diğer temel malların kritik taşımacılığını içermektedir (WTO, 2024). Çok yüksek hacimlerde yüklerin deniz taşımacılığı dışında başka bir yolla taşınması mümkün değildir.

Son yıllarda, gemi sayısında büyük bir artış olmamakla birlikte, gemilerin tonajlarındaki artışlar nedeniyle deniz ticaretindeki taşınan yük miktarı önemli ölçüde artmaktadır (Yapıcı ve Koldemir, 2016). Bu durum, deniz taşımacılığındaki kapasitenin ve etkisinin artmasına yol açmaktadır. Gemi tonajlarının artması, denizcilik sektörünün çevreye verdiği zararları daha da ön plana çıkarmaktadır. Gemi kirliliği, sadece deniz kazalarından değil, gemilerin düzenli seyirlerinden ve operasyonlardan da kaynaklanır. Gemilerin çevreye başlıca etkileri denize deşarjlar, gaz emisyonları ve gürültüdür (Bacalja ve diğ., 2020) .

Denizcilik sektörü de diğer sektörler gibi sürdürülebilirlik tartışmalarının içerisinde yerini bulmaktadır. Temel olarak, sürdürülebilirlik; insanların yaşamlarını şimdi ve gelecekte sürdürebilmelerini sağlayacak şekilde kaynakları, çevresel, sosyal ve ekonomik faktörleri dengeli bir şekilde kullanılmasının yönetilmesine denmektedir (Şahan, 2017). Çevresel faktörlerden olan denizcilik endüstrisi emisyonları, son yıllarda denizcilik temsilcilerinin çabalarıyla odak noktası haline gelmiştir. Diğer ekonomik sektörler gibi, deniz taşımacılığı sektörü de sera gazı emisyonları (GHG) üretmektedir. Bu doğrultuda bakıldığında, dünya ticaretinin yüzde 80'den fazlasını hacim olarak taşıyan uluslararası denizcilik endüstrisi, tüm küresel GHG'nin neredeyse %3'ünden sorumludur (UNCTAD, 2023).

Küresel anlamda çevreye zarar veren en önemli GHG karbon dioksit (CO_2) gazıdır. CO_2 gazı küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine yol açmaktadır (Yoro ve Daramola,

2020). 2050 yılına kadar önlem alınmazsa CO_2 emisyonlarının %50 ila %250 artması beklenmektedir. Uluslararası denizcilik kaynaklı CO_2 salınımı %3 civarıyken, Azot oksit (NO_X) ve kükürt oksit (SO_X) emisyonları, küresel emisyon toplamının yaklaşık %13 ve %12'sini oluşturmaktadır (Smith ve diğ., 2015). Bu ifade bize göstermektedir ki denizcilik kaynaklı salınımı değerlendirirken genel olarak sadece CO_2 salınımını değil, tüm kirleticileri dikkate almak gereklidir. Bu veriler, denizcilik sektöründe taşınan yükün ton başına emisyonlarının diğer taşıma yöntemlerine göre çok daha çevreci olduğunu, ancak denizcilik sektöründen kaynaklanan emisyonların yine de ihmal edilemeyecek derecede büyük olduğunu göstermektedir (Tokuşlu, 2020).

1.1 Hava Kirliliğinin Dünya ve İnsanlar Üzerindeki Etkileri

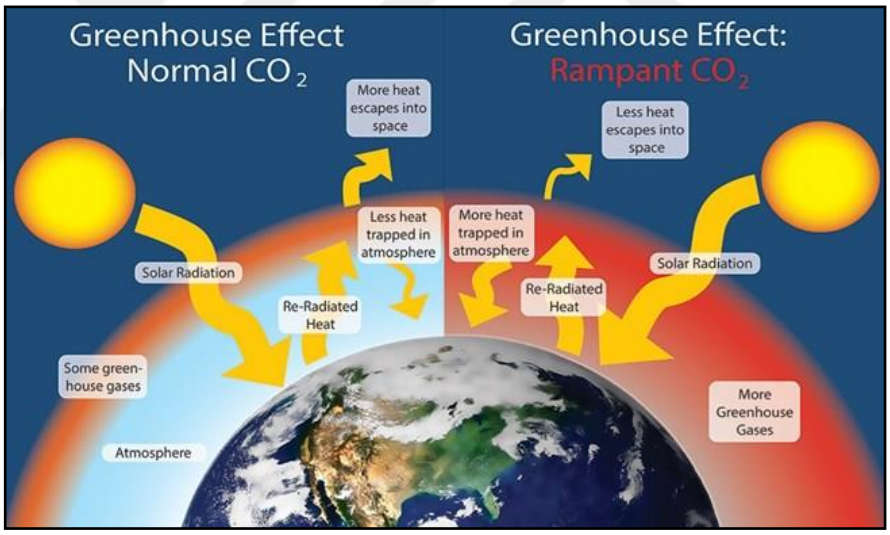
Hava kirliliği denilen olgu organik ve organik olmayan bileşikler, partikül madde (PM) ve çeşitli gazlardan oluşan karmaşık bir kombinasyondur (Calderón-Garcidueñas ve diğ., 2015). Doğal faaliyetlerin (yanardağ patlamaları, orman yangınları, çiftlik atıkları vb.) çevreye birçok kirletici madde salmasına neden olabileceği açıktır. Buna ek olarak, çoğu zaman çevresel hava kirliliğinin ana nedeni insan kaynaklı faaliyetlerdir (Kampa ve Castanas, 2008). Bu faaliyetler sonucunda, tesadüfi olarak zararlı kimyasallar ortama yayılabilirken, birçok hava kirleticisi endüstriyel tesisler ve diğer insan etkinlikleri tarafından salınır. Bu durumda insan sağlığına ve çevreye zararlı etkiler ortaya çıkar.

Oransal olarak değerlendirildiğinde, hava kirliliğinin en büyük nedeni antropojenik faaliyetlerin bir sonucu olarak fosil yakıtların yanması gibi çeşitli kaynaklardan gelmektedir. Bu kirlilik, kükürt dioksit (SO_2), azot oksitleri (NO_X), karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (VOCs) ve partikül madde (PM) gibi klasik kirleticilerin yanı sıra çeşitli gazlar tarafından da oluşturulmaktadır (Holman, 1999). Bu gazların doğrudan insan sağlığı üzerinde etkileri olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra, fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan gazlar, sera etkisi yaratarak küresel ısınmaya neden olmaktadır.

Sera etkisi yaratarak küresel ısınmaya sebep olan gazlar ise metan (CH_4), diazot oksit (N_2O), karbon dioksit (CO_2), kloroflorokarbonlar (CFC'ler), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC'ler), hidroflorokarbonlar (HFC'ler) ve perflorokarbonlar (PFC'ler) olarak bilinmektedirler (Akın, 2015).

1.1.1 Hava kirliliğinin dünya üzerindeki etkileri ve küresel ısınma

Sera etkisi, önemli ölçüde güneş enerjisinin dünyanın atmosferindeki CO_2, CH_4, N_2O ve florlu gazlar gibi sera gazlarıyla reaksiyonu sebebiyle oluşmaktadır. Bu gazların ısıyı absorbe edebilmesi gibi özelliklerinin olması, sera gazı etkisinin temel nedenidir (Kweku ve diğ., 2018). Şekil 1.1'de gösterildiği gibi bu gazlar, ısıyı atmosferde daha uzun süre tutarak enerjinin yayılmasını engellerler ve sonuç olarak gezegenimizin ısınmasına neden olurlar. Sera gazları, atmosferde doğal olarak bulunan ve dünyanın belli bir ısıda kalmasını sağlayarak insanlığın yaşayabileceği sıcaklık seviyesini koruyan gazlardır. Ancak, fosil yakıtların yanması gibi insan faaliyetleri sonucunda, bu gazların miktarı atmosferde olması gereken seviyenin üzerine çıkmaktadır. Sera gazlarını dünyamızı çevreleyen ve bizi yaşayabileceğimiz ısıda tutan bir battaniye gibi düşünebiliriz. Tıpkı meyve ve sebze yetiştirmede kullanılan bir seranın camı gibi, ultraviyole (UV) ışınlarını geçirirken, daha zayıf olan kızılötesi (IR) ışınları içeride sıkışır ve bu durum seranın tekrar ısınmasına neden olur (Kumar, 2018).



Şekil 1.1 : Dünya üzerindeki sera etkisi (National Park Service, 2020).

İklim Değişikliği 2024 Raporu doğrultusunda elde edilen bilgilere göre, sera gazlarının neredeyse 2/3'ünü oluşturan CO_2 gazı, diğer etkenlere göre baskın olarak fosil yakıtların yanmasıyla meydana gelir. Doğal gazın bileşenlerinin başında gelen CH_4 gazı ise bugün karşılaştığımız ısınmanın dörtte birinden daha yüksek bir oranda sorumludur. CO_2'ye kıyasla CH_4 gazı atmosfere salındıktan sonra 20 yıl içinde CO_2'ye kıyasla 80 kat daha fazla küresel ısınma etkisi potansiyeline sahip çok etkili bir kirletici olarak ortaya çıkmaktadır (United Nations Environment Programme, 2024).

Sera gazı etkisini azaltmak amaçlı ortaya karbon ayak izi kavramı atılmıştır. Karbon ayak izi, bir kişinin, kuruluşun, sürecin, ürünün veya olayın belirli bir sınırlar içinde yaydığı sera gazı emisyonlarının miktarını ifade eder (Pandey ve diğ., 2011). Bu genellikle CO_2 türünden ölçülmekte olup, boyutsal olarak veri sağlamamıza ve zararlı salınımların çevresel etkilerini anlamamıza yardımcı olur.

Sera etkisine sebebiyet veren başka gazlar da bulunmaktadır. CFC'ler ise, ısı azaltıcı ve sprey tetikleyici şeklinde kullanılan kararlı bileşim ve sera gazı etkisinin %10-25'ine denk gelmektedir. CFC'ler, CO_2'ye nazaran yüzlerce misli kızılötesi ışını hapseder ve dünyada çok daha kalıcı olabilir. Montreal Protokolü ile CFC üretiminin azaltılması amaçlansa da bu konuda henüz yekün bir başarı sağlanamamıştır. NO_X emisyonları ise tarımsal faaliyetlerden ve fosil yakıtlardan kaynaklanır ve atmosferik ısınma potansiyelinin %5'ini oluşturur. Tarım faaliyetlerinde kullanılan gübre ve fosil yakıt harcamının kısıtlanması, salınımların azalmasına katkıda bulunabilir; ancak bu gazlar da atmosferde uzun süre kalabilirler. Troposfer katmanındaki ozon, özellikle sanayileşmiş bölgelerde artarak küresel ısınmaya neden olur. Ozon, antropojenik salınımların kimyasal reaksiyonları sonucu oluşur ve diğer gazlara kıyasla daha geçicidir (Aksay ve diğ., 2005).

Küresel ısınma ve iklim değişikliği terimleri sıklıkla birbirlerinin yerine kullanılsa da küresel ısınma olgusu iklim değişikliğinin sadece bir koludur. İklim değişikliği, küresel ısınmayı de içine alan birtakım değişikliklerin bütünüdür. Bu değişikliklerden bazıları denizlerin yükselmesi, dağ buzullarının erimesi, Grönland, Antarktika ve Arktik bölgelerindeki buz erimesinin hızlanması ve bitkilerin çiçek açma zamanlarının değişmesi gibi olaylar olarak aklımıza gelebilir (NASA, 2024b). Bu etkilerin en büyük sebepleri fosil yakıtların yakılması ve atmosfere ısı tutucu gazların salınmasıdır.

Küresel ısınmanın bir sonucu olarak aşırı sıcaklıkların ve yağış dengesinin bozulmasının kuraklık olaylarını tetiklediğini gözlemleyebiliriz. Ancak, iklim değişikliği bazı bölgelerde olumlu etkiler gösterirken, bölgesel olarak değişkenlik gösterdiği için dengesiz kuraklıklar ortaya çıkabilir (Houghton, 2001). Bu durum, besin dağılımının dengesiz olmasına ve bölgesel kıtlıkların oluşmasına neden olabilir. Nüfus artışıyla birlikte dünya genelinde su talebinin arttığı da gözlemlenmektedir. Özellikle 20. yüzyılda sulama amaçlı su talebinin on kat arttığı belirtilmektedir. Artan buharlaşma, azalan kar ve buzul erimeleri, yağış desenlerindeki değişiklikler ve deniz seviyesindeki yükselme, su kaynakları üzerinde olumsuz etkiler yaratarak suya erişimi

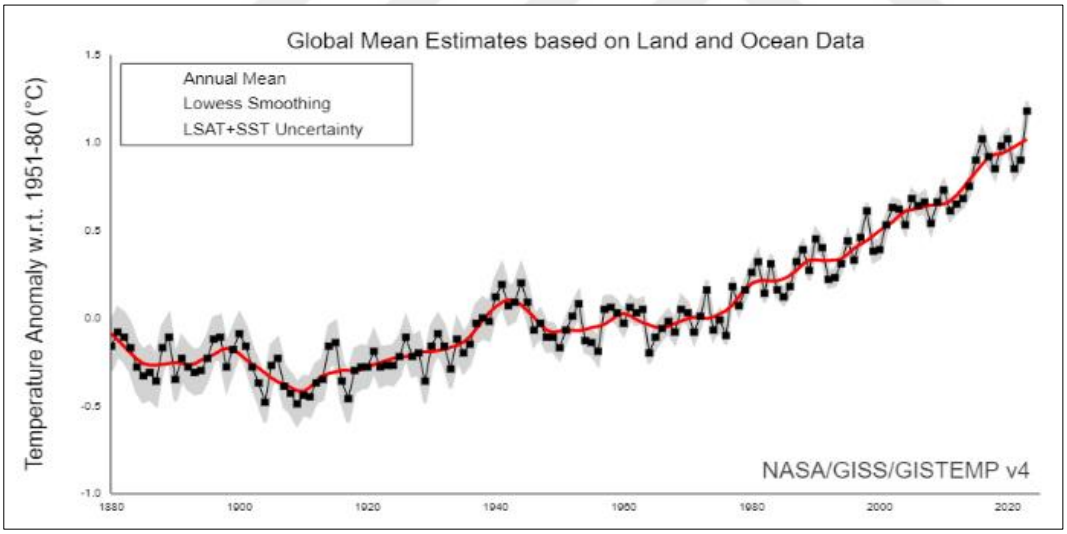
azaltmaktadır (Malek ve diğ., 2018). Küresel ısınmaya bağlı olarak su erişiminin azalması, dünya için önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Küresel ısınma sebebiyle Grönland ve Batı Antarktika Buz Örtüsü gibi büyük buzulların, sanayi devrimi sonrası erimeye başladığı ve bunun sonucu olarak da deniz seviyelerinin yükseldiği görülmüştür. Ayrıca termal genişleme ve dağlardaki sürekli buzların erimesi de deniz seviyelerin yükselmesine katkıda bulunmuştur. Deniz sularının yükselmesi; kıyı erozyonu, kıyısal habitatların değişimi, kentsel ve tarımsal alanlarda su baskınları ve kullanılabilir su kaynaklarının azalmasına neden olabilmektedir (Mimura, 2013). Küresel ısınmanın bir sonucu da yaşanan doğa olaylarının şiddetlerinin artmasıdır. Bazı çalışmalar, daha sıcak bir dünyanın aşırı yağış olaylarının sıklığını artıracağını göstermektedir. Bu durum, daha yoğun bir hidrolojik döngü ve sıcak atmosferin artan su tutma kapasitesiyle ilişkilidir, bu da sel gibi doğal afetlerin olasılığını arttırmaktadır (Fowler ve Hennessy, 1995). Küresel ısınmanın tropikal siklonların şiddetini arttırdığı ve bu nedenle ısınma kaynaklı tayfun ve kasırgaların doğaya ve insanlara daha fazla zarar verdiği görülmüştür (Gualdi ve diğ., 2008).

Küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin insan sağlığı üzerinde de bazı etkileri bulunmaktadır. Bölgesel ortalama sıcaklıkların artışı ve hava durumu değişkenliği yüzünden sıcak hava dalgalarında artış görülmüştür. Bu da insan sağlığı üzerinde bazı direkt etkilere sebep olmuştur. Bunlardan bazıları öncelikle solunum problemleri, dehidrasyon ve sıcak çarpması yer alır. Bu da ölüm oranı ve hastalık oranlarını arttırabilir. Bu durum daha büyük oranda yaşlı ve hastalar üzerinde olumsuz etkiler yaratırken, ortalama yaşam süresi üzerindeki etki büyük olmayabilir. Ayrıca, değişen hava alerjenleri (örneğin sporlar ve küf) ve ozon gibi hava kirliliği unsurlarının bileşimi, solunum sağlığı üzerinde etkili olabilir. İklim değişikliğinin, fırtınalar ve seller gibi aşırı hava olaylarının frekans ve şiddetini etkilemesi ise sağlık üzerindeki direkt olmayan etkiler arasında sayılabilir. Bunlardan bazıları vektör organizmaları sebebiyle enfeksiyon hastalıkları, sıtma ve dengue ateşi benzeri hastalıklardır (McMichael ve Haines, 1997).

Dünya Meteoroloji Örgütü'nün (DMÖ) 2024 yılındaki raporuna göre, önümüzdeki beş yıl içinde yıllık ortalama global sıcaklığın en az bir yıl boyunca geçici olarak sanayi öncesi seviyelerinin 1.5°C üzerine çıkma olasılığı %80'e ulaşmıştır. Bu durum, Birleşmiş Milletler Paris Anlaşması'nın uzun vadeli hedeflerine yaklaşıldığının güçlü

bir göstergesi olup, 2024-2028 döneminde yıllık sıcaklıkların 1.1°C ile 1.9°C arasında artması beklenmektedir. Rapor, iklim eyleminin aciliyetini vurgulayarak, liderlerin sıcaklık artışını 1.5°C ile sınırlama çabalarını derhal güçlendirmesi gerektiğini belirtmektedir (World Meteorological Organization, 2024).

Yukarıda bahsedilen 1.5°C ile sınırlama hedefi, "Intergovernmental Panel on Climate Change"in (IPCC) 2018'de yayımladığı özel raporda geçmektedir. 1880 yılları, yani sanayi devrimi öncesi dönemin ortalama sıcaklık değerlerine göre hesaplanmış olan 1.5°C ile sıcaklık artışı sınırlama hedefi, küresel ortalama yüzey sıcaklığının bu zaman dilimine göre belirlenmiştir. 1880 yılı ve sonrasındaki sıcaklık artışını gösteren Şekil 1.2'de, 10 yıllık değişimlere yer verilmiş olup 1980 yılından itibaren küresel düzeyde sıcaklık artışının belirgin şekilde hızlandığı gözlemlenmektedir. 2023 yılında bu artış 1.18°C'ye ulaşmış olup, acil önlemler alınması gerekliliğini apaçık ortaya koymuştur. Oysa ki, normal olarak karşılanmasa da 1750 ile 1880 yılları arasında sadece 0.15°C'lik bir ısınma yaşanmıştır. Bu raporda küresel ısınmanın 1.5°C üzerindeki etkileri ve bu sıcaklık artışını sınırlamanın yollarından bahsedilmektedir.



Şekil 1.2 : 1880-2020 arası küresel sıcaklık artışı tahminleri (NASA, 2024a).

1.5°C ile 2°C arasındaki küresel ısınma farkı incelendiğinde, 1.5°C'lik bir artışın 2°C'ye göre ekosistemlere, insan sağlığına ve genel refah üzerindeki olumsuz etkileri minimize edebileceği belirtilmektedir. Ayrıca, 2°C'lik bir artışın aşırı hava olaylarını, deniz seviyelerindeki yükselmeleri, Arktik deniz buzu kaybını ve ekosistem kayıplarını daha da kötüleştirebileceği vurgulanmaktadır. Rapora göre, 1.5°C sıcaklık artışı hedefine ulaşabilmek için 2030'a kadar karbon dioksit emisyonlarının 2010

seviyelerine göre %45 azaltılması ve yaklaşık olarak 2050'de net sıfıra ulaşılması gerekmektedir. Bu amaçla enerji, arazi kullanımı, kentsel altyapı, endüstri ve diğer sektörlerde çok büyük yenilikler ve bu işi gerçekleştirebilecek büyük sermayeler gerekmektedir (IPCC, 2018). Konulan bu hedeflerin de denizcilik endüstrisinde konulan hedeflerle uyuştuğu görülmektedir.

Alınan birçok önleme rağmen, yapılan bazı çalışmalarda 1.5°C sıcaklık eşiğine ulaşılmasının, hazırlanan senaryolarda 2033 ile 2035 yılları arasında gerçekleşmesi beklenmektedir (Diffenbaugh ve Barnes, 2023). Küresel ısınma ile kentleşme arasındaki doğru orantılı bir ilişki bulunmuştur. 56 yıllık bir süreç ve 118 ülke için yapılan bir araştırmada uzun vadede kentleşme ve küresel ısınmanın ilintili oldukları görülmüştür (Helbling ve Meierrieks, 2023). Bu ilişkiyi incelerken lojistik avantajı sebebiyle, limanların da kentleşmenin içinde bulunmasından dolayı gemi emisyonlarının da küresel ısınmaya ekstra katkıda bulunduğunu göz ardı etmemek gerekmektedir. Limanlar, genellikle büyük şehirlerde kurulmuş olup, ekonomik faaliyetlerin merkezinde yer alır ve önemli birer lojistik merkezidir. Ancak, deniz taşımacılığı ile limanların yoğun faaliyetleri, özellikle gemi emisyonları aracılığıyla, önemli miktarda sera gazı salınımına neden olmaktadır. Bu durum, kentsel alanlarda hava kalitesini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda küresel ısınmayı da hızlandırır.

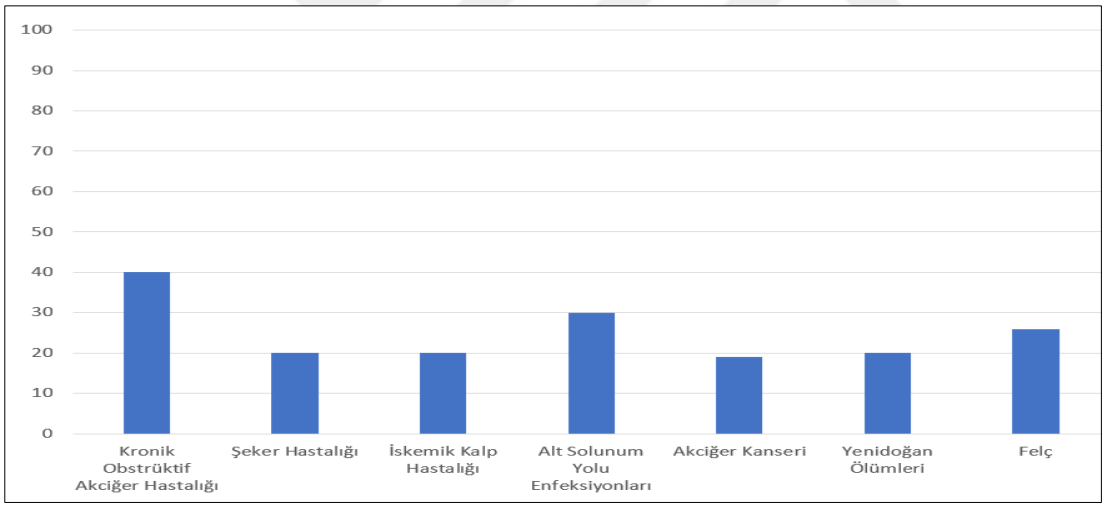
1.1.2 Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki doğrudan etkileri

Zararlı emisyonların diğer bir etkisi de insan sağlığı üzerindeki etkileridir. Hava kirliliği, insan sağlığı üzerinde çeşitli doğrudan ve dolaylı etkilere sahiptir. Bu etkiler, hava kalitesinin kötü olduğu günlerde daha belirgin hale gelebilir ve uzun süreli maruz kalma durumunda daha ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir.

Neden hava kirliliği bu kadar büyük bir sorun diye soracak olursak, hava kirliliği, dünya genelindeki her 9 ölümden 1'inden fazlasından sorumludur. 2019 yılında hava kirliliği 6.67 milyon ölüme sebebiyet vermiştir. Hava kirliliği, yüksek tansiyon, tütün kullanımı ve kötü beslenmenin ardından erken ölüm için 4. önde gelen risk faktörüdür. Hava kirliliği, yapılan araştırmalarda insan ömrünü 1 yıl 8 ay kısaltmaktadır (Health Effects Institute, 2019). Dünya Sağlık Örgütü (WHO), hava kirliliğini en büyük çevresel sağlık tehlikesi olarak adlandırarak her yıl bu kirliliğe bağlı olarak 7 milyon erken ölüm olduğunu belirtmektedir. Ölüm oranları incelendiğinde, bulaşıcı

olmayan hastalıklar sınıfı içinde hava kirliliğinin ölümlerin %16'sından sorumlu olduğu görülmektedir (World Health Organization, 2016).

Hava kirliliği etkileri, insanlar üzerinde farklılıklar göstermektedir. Ekonomik geliri düşük olan bölgelerde yaşayan insanlar, hava kirliliği etkilerine daha fazla maruz kalırlar ve ölümlerin çoğunluğu genç çocuklar ve yaşlılar arasında görülür. Bu durum, hava kirliliği maruziyetindeki farklılıkları, sosyal, ekonomik ve demografik faktörleri, kişinin temel sağlık durumunu, hassasiyet düzeyini ve tıbbi bakıma erişimini yansıtır (State of Global Air, 2022). Bazı durumlarda hava kirliliğinin etkileri hemen fark edilen sağlık sorunlarına yol açabilirken, çoğu zaman insan vücudunda sessizce ilerleyerek zamanla ortaya çıkar. State of Global Air (2022) tarafından yapılan çalışmaya göre bazı hastalıkların ölüm oranları içerisindeki hava kirliliği sebepli oranların oldukça yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu oranlara ait grafik Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Örneğin, kronik obstuktif akciğer hastalığından (KOAH) ölenlerin yaklaşık yüzde 40'ı hava kirliliği ile ilişkilidir.



Şekil 1.3 : Hava kirliliğiyle bağlantılı küresel ölümlerin yüzdesi (State of Global Air, 2022).

Kirli hava solumak insan sağlığını ciddi şekilde etkiler. Ciğerlerden kan dolaşımına geçen zararlı kalıntılar ve gazlar, kalp, beyin ve diğer organlara da zarar verebilir. Zararlı salınımlar plasentadan geçerek gelişmekte olan fetüsü bile etkileyebilir. Hava kirliliği, akciğerlerde ve vücudun diğer bölgelerinde iltihaplanmaya neden olur. Bu sebeple hava kirliliği, birçok önemli hastalığa bağlı ölümlerin büyük bir kısmını oluşturur. Sindirim sistemi ve üriner sistem üzerinde de etkili olan hava kirliliği, karaciğer hücre hasarı, karaciğer kanseri ve böbrek rahatsızlıklarına da yol

açabilmektedir. Sinir sistemini etkileyebilir, hafıza bozuklukları, uyku bozuklukları, öfke, yorgunluk gibi sinirsel semptomlara neden olabilir (Kampa ve Castanas, 2008). Solunum sistemine en çok zarar veren kirleticiler arasında partikül madde (PM2.5 ve PM10) öne çıkar. Partikül madde büyük oranda fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu ince partiküller, solunum yollarına derinlemesine inebildikleri için hastalıklara yol açarlar. PM2.5 (çapı 2.5 mikrometreden küçük partiküller) PM10'a (çapı 10 mikrometreden küçük partiküller) göre daha tehlikelidir çünkü akciğerlerin derinliklerine inebilir ve hatta kan dolaşımına geçebilir (Santos ve diğ., 2021). Hava kirliliğin en başta solunum yollarına zarar verdiği bilinmektedir. Hava kirliliği, kısa periyotta solunum yolu tahrişi, öksürük, nefes darlığı ve solunum yolu enfeksiyonlarına yol açarken; astım ve nefes darlığı semptomlarını şiddetlendirir ve ayrıca kırılgan bünyeye sahip kişilerde de astım başlangıcına neden olabilir. Uzun periyotta ise rahim içi büyüme geriliği, doğan çocuğun kilo olarak yetersiz olması, erken doğum, akciğer fonksiyonlarında bozukluklar, çocuklarda gelişme geriliği, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH) ve akciğer kanseri riskini artırır (Goldizen ve diğ., 2016). Ayrıca, çocuklarda maruz kalınan hava kirliliği ileri yaşlarda da çeşitli solunum sistemi ile alakalı hastalıklara neden olabilir.

Hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki etkileri hakkında artan çalışmalarla birlikte, hava kirliliğinin kardiyovasküler hastalıklara ve ölüme sebebiyet olduğu yönündeki veriler ve kanıtlar artmaktadır. Özellikle PM2.5 gibi ince partikül kalıntısına maruz kalmanın, ilerleyen zamanlarda kalp damar hastalığı gelişimini hızlandırabileceği çalışmalar üzerinde durulmaktadır. Bu partiküllerin, akciğerlerde oluşturduğu iltihap veya oksidatif stres (vücutta serbest radikallerin aşırı üretimi sonucu hücrelerde ve dokularda hasar) maddelerini kan dolaşımına yayarak, vücutta sinir sistemi dengesizliği oluşturabileceği veya doğrudan kalp-damar dokularına zarar verebileceği düşünülmektedir. Hava kirliliği sebepli bir diğer hastalık olan ateroskleroz, arterlerde kalıntı birikmesiyle oluşan bir durumdur. Bu kalıntılar damarların içini daraltarak kan akışını azaltır veya tamamen tıkayabilir, bu sebeple dokular yeterince oksijen ve besin alamaz, dokular zarar görebilir. Hava kirliliği kalp damarlarında koroner arter hastalığı, bacaklardaki damarlarda periferik arter hastalığı, beyin damarlarında inme gibi sorunlara yol açabilir (Franklin ve diğ., 2015).

Ortamdaki hava kirliliğinin solunum yolları ve kardiyovasküler sistem üzerindeki etkileri kanıtlanmıştır. Hava kirliliği, sinir sistemi üzerindeki etkileriyle bilişsel

fonksiyon bozukluklarının artmasına ve Alzheimer ile Parkinson gibi nörodejeneratif hastalıkların ilerlemesine katkıda bulunabilir. Ayrıca, yapısal beyin etkileri arasında beyaz madde (beyin dokusunun derinlerinde bulunan ve nöronları birbirine bağlayan lif demetleri) hasarı da bulunmaktadır (Babadjouni ve diğ., 2017). İskemik inme ve multipl skleroz hastalıklarının da sebepleri arasında hava kirliliğinin olduğu yönünde çalışmalar mevcuttur. Çocukluktan itibaren hava kirliliğine maruz kalan bireylerin nörodejeneratif hastalıklara yakalanma ihtimali de artmaktadır. Hava kirliliği, sinir sistemi üzerindeki etkilerini iki temel mekanizma ile gerçekleştirebilir. Birincisi, çok küçük boyuttaki partiküllerin doğrudan sinir sistemi içine taşınmasıdır. İkincisi ise vücut genelinde inflamasyon oluşturarak sinir sistemini etkilemesidir. Bu etkilerin oluşmasında partiküllerin fiziksel özellikleri veya üzerlerine bağlanmış olan zararlı kimyasallar önemli bir rol oynayabilir (Genc ve diğ., 2012).

Ortamdaki hava kirliliğinin bir diğer etkisi de üriner sistem üzerindedir. Hava kirliliğinin üriner sistem üzerindeki etkileri, zararlı emisyonların böbrek fonksiyonlarını bozabilmesiyle ilgilidir. Solunan partiküller ve gazlar kan dolaşımına girerek böbreklere ulaşmakta ve burada birikerek böbrek hücrelerine zarar verebilmektedir. Bu durum, kronik böbrek hastalıkları ve böbrek yetmezliği gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Kronik böbrek hastalığı erken ölüm gibi çeşitli olumsuz sonuçları olan ve kalp rahatsızlıkları önem derecesiyle eşit kabul edilen çok tehlikeli bir rahatsızlıktır. Ayrıca hava kirliliğinin diyabet riskini arttırdığı bilinmekte olup, diyabetin de üriner sistem üzerindeki olumsuz etkisi dolaylı olarak hava kirliliğine bağlıdır (Afsar ve diğ., 2019). Dahası yapılan araştırmalarla, hava kirliliği ile mesane, böbrek ve üriner sistem kanseri arasında pozitif ilişkiler bulunmuştur (Sakhvidi ve diğ., 2020).

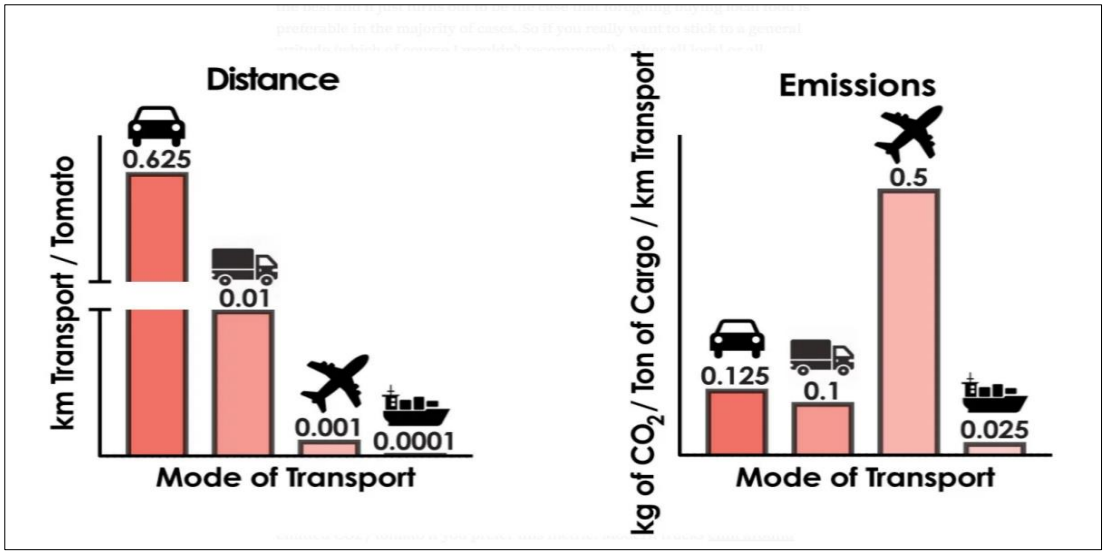
Hava kirliliği, özellikle uzun süreli maruziyet durumunda sindirim sistemi üzerinde de çeşitli olumsuz etkilere neden olabilir. Özellikle sülfür dioksit (SO_2), nitrojen dioksit (NO_2) ve karbon monoksit (CO) gibi emisyon gazlarının maruziyeti ile inflamatuar bağırsak hastalığı, gastroenterit, peptik ülserler, appendisit, karın ağrısı ve ülseratif kolit gibi sindirim sistemi bozuklukları arasında pozitif ilişkiler bulunmuştur. Hava kirliliğine maruziyet ile sindirim sistemi kanserleri ve apandisit gibi çeşitli bağırsak hastalıkları arasında ilişki bulunduğunu gösteren birkaç çalışma mevcuttur. Genç yetişkinlerde ve çocuklarda hava kirliliğinin etkilerinin daha belirgin olduğunu gösteren çalışmalar da bulunmaktadır (Beamish ve diğ., 2011).

Hamilelik sırasında hava kirliliği maruziyeti, anne ve fetüs üzerinde potansiyel sağlık risklerini artırabilecek bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bu konu üzerine yapılan araştırmalar, hava kirliliğinin erken doğum riskini, hamilelik kaybını (düşük), ölü doğum ihtimalini, doğum ağırlığını ve bebek sağlığını etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmalarda PM2.5, PM10 ve CO emisyonlarının gelişmekte olan fetüs üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu kirleticilere maruziyetin, fetüsün sağlığı üzerinde potansiyel olumsuz etkileri olabileceği belirtilmektedir (Grippo ve diğ., 2018).

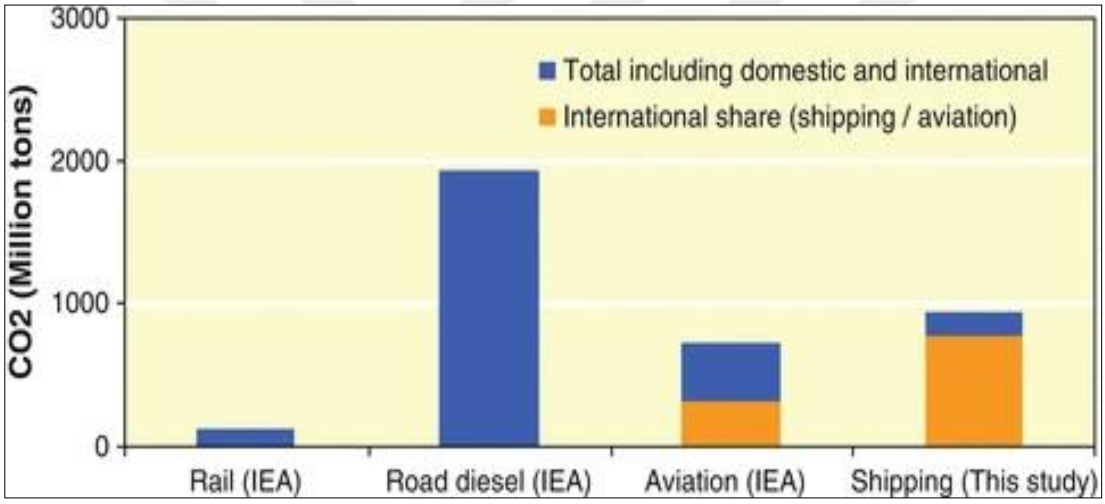
1.1.3 Denizcilik ve hava kirliliği

Denizcilik denince ilk akla gelen sektör deniz taşımacılığı üzerinedir. Denizlerde askeri amaçlı ve balıkçılık gibi faaliyetler gerçekleştirilse de şüphesiz en büyük çevre tahribatı gemi ve liman kaynaklı yaşanmaktadır (Aygül ve Baştuğ, 2020). Lojistik sektörü açısından incelendiğinde, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından denizcilik sektörü hala en mantıklı yöntem olarak görülmektedir. Deniz taşımacılığının verimli ve sürdürülebilir olmasının en büyük sebebi ton başına salınan emisyon miktarının diğer taşımacılık dallarıyla kıyaslandığında çok daha düşük olmasıdır (Lee ve diğ., 2019). Şekil 1.4’te çeşitli ulaşım modları için taşıma sırasında oluşan mesafeleri ve emisyonları ortaya koyan çalışmada deniz taşımacılığının diğer taşıma modlarıyla kıyaslanında ne kadar ekonomik ve daha az hava kirliliği yaratan gaz salınımına neden olduğu görülmektedir. Şeklin sol tarafındaki sütunda bir birim malın bir yerden diğer yere götürülürken kat ettiği birim başına mesafe, sağ sütunda ise birim başına emisyon miktarı verilmiştir.

Denizcilik sektörünün ton başına emisyon oranı diğer taşıma modlarına göre düşük olabilir, ancak küresel ölçekte neden olduğu toplam salınım miktarı önemli düzeydedir. Şekil 1.5’te görüldüğü üzere, diğer sektörlerle kıyaslandığında, denizcilik sektörü yüksek hacimli taşıma kapasitesiyle yılda milyarlarca tonluk mal taşıyarak atmosfere önemli miktarda sera gazı salınımına neden olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, denizcilik sektörünün yarattığı CO_2 salınımı ile küresel emisyonların sadece %3.3'ünü oluşturduğu görülmüştür (Buhaug ve diğ., 2009).



Şekil 1.4 : Farklı taşıma modlarında mesafe ve emisyon karşılaştırması (Bojar, 2019).



Şekil 1.5 : 2005 Yılı taşıma türüne göre CO_2 emisyonları (Buhaug ve diğ., 2009).

Dünya nüfusu artışına bağlı olarak ticaret hacmi her geçen yıl artmaktadır. Artan ticaret lojistik ağının ve hizmet sağlayıcılarının da genişlemesine olanak tanımıştır. Bu süreçten denizcilik sektörü de nasibini almıştır. Her geçen gün artan yoğunluğa sahip deniz rotaları oluşmuş ve limanlar da buna bağlı olarak büyümüştür. Artan talep, dünya ekonomilerini birbirine bağlamış ve uluslararası ticaret ile deniz taşımacılığı talebinin hızla genişlemesine olanak tanımıştır. Yapılan tahminlere göre, 2050 yılına kadar deniz ticaretinde %40'a varan bir talep artışı öngörülmektedir (Mueller ve diğ., 2023). Ancak, taşıma sürecinin tamamlanmasında kullanılan deniz araçlarının yaydığı emisyonların sebep olduğu hava kirliliği ve bunun çevreye verdiği zararlar giderek artmaktadır (Pekşen ve diğ., 2014). Gemi sayısındaki azalmaya rağmen gemi gross

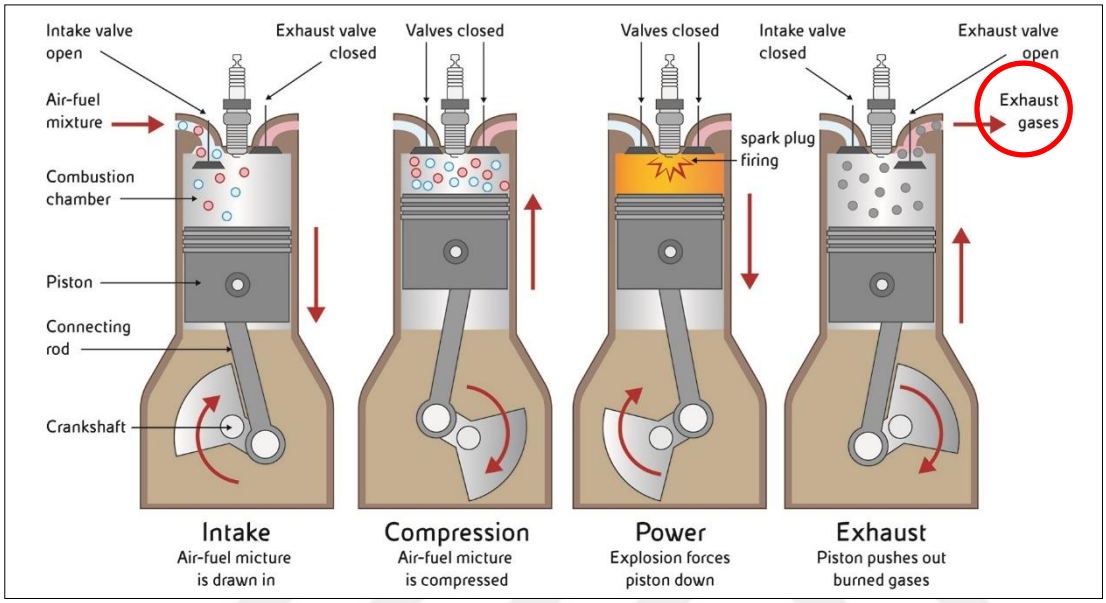
tonajlarının artması sebebiyle, gemilerden kaynaklanan emisyon salınımının beklenildiği gibi azalmadığı görülmüştür. Bu durum, gemi sayısının azalmasının tek başına emisyonların azaltılması için yeterli olmadığını ve tonaj artışının etkisinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Ay ve diğ., 2022).

Deniz taşımacılığında kullanılan araçların saldığı emisyonun başlıca sebebi içten yanmalı makinelerde kullanılan fosil yakıtlardır. Deniz taşımacılığında kullanılan taşıtların makineleri çalıştığında, hava ve yakıt karışır; bu karışım yakılarak enerji üretilir ve bu enerji tahrik gücü olarak kullanılır. Bu süreçlerin yanında, hava kirliliğine sebep olan sıcak egzoz gazları da atmosfere salınır (Buffaloe ve diğ., 2014). Deniz taşımacılığında kullanılan araçlardan kaynaklanan emisyonların başlıca kaynağı, taşıtların (gemi, pilot botu, römorkör, palamar botu vs.) ana makine ve yardımcı makinelerinde yakılan yakıttan çıkan egzoz gazlarıdır. Çalışmada, diğerlerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksek emisyon üretimiyle sonuçlanan gemi ve römorkörler üzerinde bir değerlendirme yapılmıştır.

Çalışmakta olan çoğu gemi ve römorkör, güç üretimi için sıkıştırmalı ateşlemeli, yani dizel makineler kullanmaktadır. Bu makineler, yakıtın muhteviyatında olan kimyasal enerjinin açığa çıkmasıyla çalışır. Kullanımda olan gemi ve römorkör yakıtları çoğunlukla ham petrolün distilasyonuyla elde edilir ve yaklaşık %86 karbon ve %14 hidrojen muhteva eden hidrokarbon bileşikleridir, fakat bunun yanında kükürt ve metaller gibi diğer elementleri de içerebilirler (UNCTAD, 2022). Makinede bulunan yakıt ateşlendiğinde, hava ve yakıt karışımı yanarak mekanik enerjiyi açığa çıkarır ve bu enerji mekanik enerjiye dönüşürken yan ürün olarak sıcak egzoz gazları oluşur. Bu yolla meydana gelen kirlilik yaratan gazlardan CO_2, sera gazı oluşumunu tetiklerken, CO, SO_X, NO_X, CH_4, siyah karbon (BC) ve organik karbon (OC) gibi diğer gazlar hem sera gazı üretiminde hem de insan sağlığı üzerinde negatif çevresel etkilere sahiptir (Lindstad ve diğ., 2015). Ayrıca bu emisyonlar asit yağmurlarına da sebep olurlar (Singh ve Agrawal, 2007).

Fosil yakıtların denizcilikte kullanımı, dizel veya denizcilikte yaygın olarak kullanılan düşük kaliteli yakıtların, makinedeki piston silindiri içerisinde sıkıştırma vuruşunun sonunda enjekte edilmesiyle gerçekleşir. Bu süreç, yakıtın yüksek basınç altında sprey haline gelmesini sağlar. Yüksek basınç ve ısı bulunan ortamda, hava-yakıt karışımı kendiliğinden yanar. Bu yanma, yakıtta bulunan hidrokarbonlar ile havadaki oksijen arasında gerçekleşir. Enerji salınımıyla silindir içindeki hava genişler ve pistonu

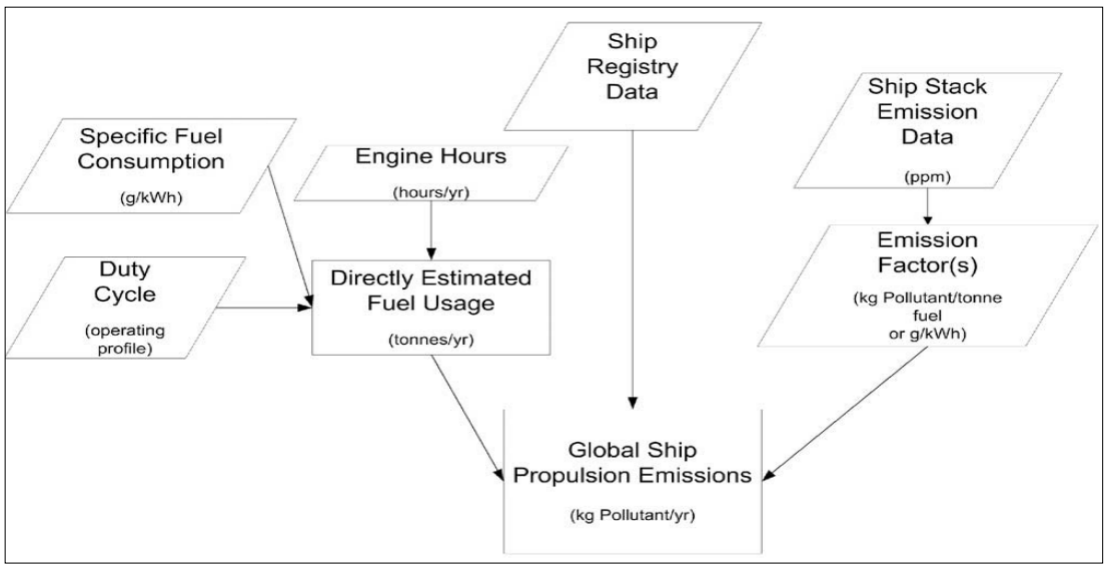
harekete geçirerek mekanik güç üretir. Yakıtın muhteviyatındaki bileşikler, mekanik enerjiye dönüşüm esnasındaki değişkenler ve yakıtın içerisindeki bir takım yabancı değişkenler gibi çeşitli faktörler genellikle yanma yan ürünlerinin çeşitli kirleticileriyle birlikte salınmasına yol açar. Şekil 1.6'da gösterilen ve kırmızı halka içine alınan kısım, egsoz gazının açığa çıkış anına işaret etmektedir.



Şekil 1.6 : 4 Zamanlı gemi makinesinin çalışma prensibi (Eni Live Oil Products, 2019).

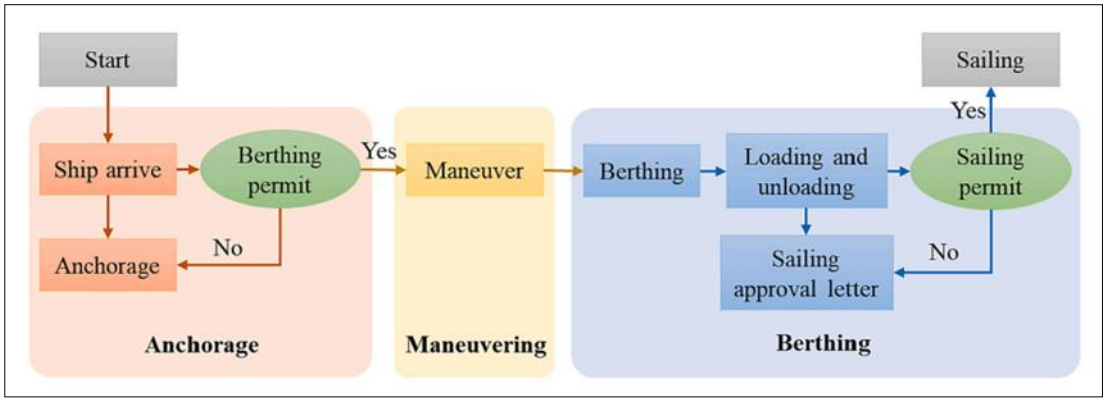
Yabancı partiküllerden kaynaklı salınımlar arasında NO_X, PM ve poliaromatik hidrokarbonlar (PAH) bulunur. Ayrıca, yakıtta bulunan düşük miktardaki elementlerin birleşimleri ve yeterli miktarda sülfürün varlığında sülfür dioksit (SO_2) gibi diğer kirleticiler de egzoz emisyonlarının önemli parçasıdır (Escusa dos Santos, 2024). Denizcilik yakıtlarında bahsedilen zararlı gazlara ek olarak, Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı (IARC), insan sağlığı için bilinen veya olası kanserojen olarak tanımlanan 35 bileşen belirlemiştir. Bu bileşenler arasında arsenik, berilyum, kadmiyum, krom, 1,3-bütadien, benzen, formaldehit, dioksin/dibenzofuranlar ve benzo[a]pyren gibi "Grup 1" kanserojenleri bulunmaktadır (IARC, 2014). Tüm dünyada, gemilerden yayılan emisyonlar senelik 1.6 Tg 10 mikrometreden (µm) küçük partikül madde (PM10), 6.5 Tg kükürt oksit (SOx olarak S) ve 6.9 Tg azot oksit (NOx olarak N) miktarına kadar çıkabilmektedir (Healy ve diğ., 2009). Uluslararası deniz taşımacılığı, sahile yakın bölgelerde ölüm oranlarının artışıyla bağlantılıdır. Gemi egzozundan kaynaklanan PM2.5 emisyonlarının her yıl yaklaşık olarak 60.000 kardiyopulmoner ve akciğer kanseri sebepli ölümlere neden olduğu belirtilmektedir.

Son zamanlarda yapılan tahminler, bu sayının yaklaşık 250.000 ölüme kadar arttığı belirtilmektedir (Johnson ve diğ., 2019). Deniz taşımacılığı emisyonlarının küresel etkilerinin yanı sıra, gemilerden kaynaklanan hava kirleticilerinin neredeyse %70'inin sahil şeridinden 400 km mesafe içinde oluştuğu görülmektedir (Bojar, 2019). Bu durumun temel nedeni, gemilerin okyanuslarda seyir halinde geçirdikleri süreye kıyasla kıyı bölgelerinde daha fazla vakit geçirmeleridir. Gemiler liman bölgesinde seyir yaparken, demirde limanda veya kanal geçişlerinde beklerken, yükleme ve boşaltma işlemleri sırasında daha uzun süreler harcarlar; bu da daha fazla emisyon salınmasına yol açar. Genel olarak liman bölgelerinin insanların daha yoğun yaşadığı bölgelere inşaa edilmesi sebebiyle çok daha fazla insanın zararlı emisyonlardan etkilendiği görülmüştür (Adamo ve diğ., 2014). Denizcilikte CO_2, küresel iklim üzerinde sorumlu iken, liman bölgesinde PM, VOC'ler, CO, NO_Xve SO_X oluşumunda gemilerin payı büyüktür. Limanlar sahil elektriğinden beslenirken, gemiler genellikle fosil yakıtlarla enerjilerini sağlar. Limanların emisyon değerleri, genellikle devletin sağladığı sahil elektriğinin üretilmesinde kullanılan kaynakların emisyon değerlerine bağlıdır. Yani, sahil elektriği genellikle daha temiz enerji kaynaklarından elde edilirse, limanların çevresel etkisi azalabilir. Diğer yandan şekil 1.7'de gösterildiği üzere, gemilerin emisyon değerleri; aldıkları yakıtın kalitesine, makinelerinin çalışma süresine, geminin teknik özelliklerine ve uyguladıkları emisyon azaltma işlemlerine (scrubber vs.) bağlıdır.



Şekil 1.7 : Gemi emisyon hesaplaması örneği (Corbett ve Koehler, 2003).

Dünya genelindeki büyük limanlarda, NO_2, SO_2 ve PM2.5 dahil olmak üzere deniz kaynaklı hava kirleticilerinden doğrudan etkilenen yaklaşık 230 milyon insan bulunmaktadır (Merk, 2014). Deniz taşımacılığı kaynaklı PM2.5'in yılda yaklaşık 80,000 erken ölüme yol açtığı, özellikle kardiyovasküler ve solunum hastalıkları üzerinde olumsuz etkiler yarattığı tahmin edilmektedir (Winebrake ve diğ., 2009). Geminin limanda geçirdiği süre boyunca yaydığı emisyonlar, liman emisyonlarıyla karşılaştırıldığında önemli ölçüde fazladır. Yapılan çalışmalarda, olası senaryolarda limandaki gemilerin toplam emisyonun limanın sınırları içerisindeki toplam emisyonunun yaklaşık %55 ila %77'sini oluşturabileceği tespit edilmiştir (López-Aparicio ve diğ., 2017). Liman periyodu, geminin liman sınırlarına girdiği anda başlar. Gemi, liman sahasına girdikten sonra yanaşma manevrası yapar, yanaştıktan sonra limanda operasyonlar için zaman geçirir (hotelling), ve ardından limandan ayrılma manevrası yaparak liman sınırlarını terk eder. Eğer gemi için yanaşma planı yapılmamışsa, gemi demirde yanaşma zamanını bekleyebilir. Şekil 1.8'de verilen adımların toplamı, geminin liman periyodu boyunca yaydığı emisyonları temsil eder. Yayılan emisyonların önemli noktalarından bir tanesi ise, insan popülasyonunun yoğun olduğu bölgelerde olması ve bu nedenle insan sağlığına daha fazla zarar verebilecek potansiyelde olmasıdır (Hussain ve diğ., 2022).



Şekil 1.8 : Gemilerin liman sınırları içerisindeki emisyon yayan aşamaları (Wang ve Li, 2023).

Liman emisyonları ise, inşaat ekipmanları, yük taşıma ekipmanları, araçlar, aydınlatma, klima, stok sahası, çalışanların işe gidip gelmesi ve atık bertarafından kaynaklanmaktadır (World Ports Climate Initiative, 2010). Ancak, bu çalışmada liman emisyonlarından ziyade, gemi ve römorkörlerin manevra esnasındaki emisyonları incelenmektedir.

Denizcilik sektörü, emisyon azaltımı üzerindeki baskılardan fazlasıyla etkilenmektedir. Her geçen gün yeni kurallar getirilmekte ve bu kurallar sıkı bir şekilde takip edilmektedir. Bu durum, araştırmacıları ve sektördeki uygulayıcıları, gemilerin enerji verimliliğini arttırma ve emisyonları azaltma yollarını incelemeye yönlendirmiştir (Jimenez ve diğ., 2022).

1.1.4 Denizcilikte hava kirliliği düzenlemeleri ve kuralları

IMO (International Maritime Organization), Birleşmiş Milletler'e bağlı bir kuruluş olup, denizcilik emniyeti, güvenliği ve gemiler tarafından deniz ve atmosfer kirliliğinin önlenmesinden sorumludur (IMO, 2019). 1948 yılında Birleşmiş Milletler Denizcilik Konferansında kurulması öngörülmüş ve 1959 yılında Hükümetler Arası Deniz Danışma Örgütü (IMCO) adıyla kurulmuştur. 1982 yılına kadar bu isimle Birleşmiş Milletler bünyesinde bir danışmanlık birimi olarak faaliyet göstermiştir. 1983 yılından bu yana Londra'daki yeni merkezlerinde dünya denizciliği için kuralları koymaya devam etmektedir. IMO, uluslararası denizcilik için emniyet, güvenlik ve çevresel standartları belirleyen küresel bir otoritedir. Deniz kirliliği ile ilgili ilk sözleşme olan "Denizlerin Petrolle Kirlenmesinin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme (International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil, OILPOL)" 1954 yılında kabul edilmiştir. IMO bunun üzerine kuruluşu olan 1959 yılı sonrasında deniz kirliliği konularında sorumluluk üstlenmiş ve gemilerden kaynaklanan kirliliği önlemek ve kontrol etmek için çeşitli önlemler almıştır.

IMO'nun teknik birimlerinden olan Deniz Çevresi Koruma Komitesi (MEPC), deniz kirliliği ile ilgili uluslararası düzeyde teknik konular üzerinde çalışmaktadır. Bu komite, denizcilik endüstrisinde çevresel koruma standartlarının belirlenmesi ve geliştirilmesiyle ilgili önemli kararlar alır. MEPC'nin çalışmalarına, özellikle Kirlilik Önleme ve Müdahale Alt Komitesi (PPR) gibi diğer IMO alt komiteleri de destek sağlamaktadır.

1967'de İngiltere açıklarında meydana gelen Torrey Canyon petrol tankeri kazasının ardından, IMO denizlerin yağ ve yakıt nedeniyle kirlenmesi üzerine çalışmalarını sürdürmüş ve bu çabaları 1973 yılında kabul edilen "Uluslararası Gemi Kirliliğinin Önlenmesi Sözleşmesi (MARPOL)" ile somutlaştırmıştır (IMO, 2019). MARPOL'ün ilk oluşturulma amacı yağ ve yakıt kirliliğiyle mücadele etmek olsa da zaman içinde sözleşme kapsamı genişletilerek kimyasallar, diğer zararlı maddeler, çöpler, atıklar,

gemilerden kaynaklanan hava kirliliği ve emisyonları gibi daha geniş bir yelpazeyi kapsayacak şekilde güncellenmiştir. MARPOL Sözleşmesi kapsamında çevresel sorunlara karşı önlem almak amacıyla oluşturulan çeşitli kurallar, altı ek altında sınıflandırılarak Çizelge 1.1'de sunulmuştur.

Çizelge 1.1 : MARPOL ekleri ve yayınlanma tarihleri (IMO, 2019).

Ek No	Kirlilik Türü	Yayınlanma Yılı
I	Petrol Kirliliğinin Önlenmesi Kuralları	1983
II	Dökme Halde Taşınan Zehirli Sıvı Maddeler	1983
III	Denizde Paketli Halde Taşınan Zararlı Maddeler	1992
IV	Gemilerden Kaynaklanan Pis Su Kirliliği	2003
V	Gemilerden Kaynaklanan Çöp Kirliliği	1988
VI	Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliği	2005

Gemiler kaynaklı emisyon kuralları MARPOL Ek VI kapsamındadır. IMO, gemilerden kaynaklanan hava kirliliğinin, çevre ve insan sağlığına olan zararlı etkilerini hafifletmek niyetiyle, 1997 yılında yayınladığı bir protokolle MARPOL Ek VI'yı uygulamaya koymuştur. MARPOL Ek VI protokolü 19 Mayıs 2005'te yürürlüğe girmiştir. CO_2 emisyonlarını ele alan ilk karar da 1997 yılında IMO tarafından kabul edilmiştir (IMO, 2019). Ayrıca SO_X ve NO_X emisyonlarına da sınırlamalar getirmiştir. Çizelge 1.2'de gösterildiği üzere, MARPOL Ek VI'nın yayınlanmasından sonra günümüze kadar birçok değişiklik olmuştur ve yeni kurallar yürürlüğe girmiştir.

1992 Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ve 1997 Kyoto Protokolü'nün ardından uluslararası taşımacılığın çevresel politikaları ve hava kirliliği hakkında önlemler alması konusunda IMO'ya da görev düşmüştür. Bunun akabinde IMO, ilk sera gazı (GHG) çalışmasını 2000 yılında gerçekleştirmiştir. Toplantıda gemilerin yakıt tüketimi tahminlerindeki tutarsızlıklar ve emisyonların doğru hesaplanması, bu bağlamda kullanılan istatistiksel modellerin ve hesaplama metodolojilerinin iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, gemi kaynaklı CO_2 ve NO_X emisyonlarının yerel ve küresel etkileri ele alınmış ve bu emisyonların azaltılması için teknik ve operasyonel önlemlerin etkinliği tartışılmıştır. IMO'nun GHG emisyonlarını azaltma stratejileri olarak ise yeni anlaşmalar ve yeni gemi emisyon standartlarının tasarlanması gibi konular öne çıkmıştır (Skjølsvik ve diğ., 2000).

2005'te yürürlüğe giren MARPOL Ek VI'nın amacı, gemiler ve "Emisyon Kontrol Alanı (ECA)/ Kükürt Emisyon Kontrol Alanı (SECA)" için geçerli olan yakıt kalitesi

ve emisyon kontrol düzenlemeleriyle SO_X, NO_X, VOC ve PM emisyonlarını azaltmak, ayrıca teknolojik ve operasyonel önlemler alarak gemilerden yayılan emisyonları daha da düşürmektir (Bojić ve diğ., 2023).

Çizelge 1.2 : MARPOL Ek VI kapsamındaki gelişmeler (IMO, 2023).

Tarih	Gelişme
1997	MARPOL Ek VI kabul edilmiştir.
2000	İlk IMO GHG çalışması yapılmıştır.
2005	MARPOL Ek VI yürürlüğe girmiştir.
2005	Küresel kükürt limiti %4.5 olarak belirlenmiştir, NO_X aşama 1 (tier I) uygulanmaya başlanmıştır.
2008	GHG azaltım baz yılı olarak belirlenmiştir.
2009	İkinci IMO GHG çalışması gerçekleştirilmiştir.
2010	ECA'lar için kükürt limiti %1'e düşürülmüştür.
2011	NO_X aşama 2 (Tier II) uygulanmaya başlanmıştır.
2012	Küresel kükürt limiti %3.5 olarak revize edilmiştir.
2013	Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi ve Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı uygulamaya konmuştur.
2014	Üçüncü IMO GHG çalışması yapılmıştır.
2015	ECA'lar için kükürt limiti %0.1'e düşürülmüştür, EEDI faz 1 %10 karbon azaltımı belirlemiştir.
2016	NO_X tier II küresel olarak zorunlu hale gelmiş, NO_X aşama 3 (tier III) ECA'lar için zorunlu olmuştur.
2020	Küresel kükürt limiti %0.5'e düşürülmüştür, dördüncü IMO GHG çalışması gerçekleştirilmiştir.
2020	%20 karbon azaltım hedefi belirlenmiştir.
2021	EEXI ve CII uygulamaya konmuştur.
2022	EEDI Faz 3 %50 karbon azaltımı (yeni inşa konteyner gemileri için) sağlamıştır.
2023	CII veri toplama başlangıcı yapılmıştır.
2025	EEDI Faz 3 %30 karbon azaltımı (tüm yeni inşalar için) sağlanması hedeflenmektedir.
2030	Tüm GHG'de %40 azalma hedeflenmiştir.
2030	5% sıfır emisyonlu yakıtların kullanımı sonrası %10'a ulaşma hedefi konmuştur.
2030	Toplam yıllık GHG emisyonlarında %20 azalma sonrası %30'a ulaşma hedeflenmektedir.
2040	Toplam yıllık GHG emisyonlarında %70 azalma sonrası %80'e ulaşma hedeflenmektedir.
2050	Sıfır emisyon hedeflenmiştir.

Ayrıca 2005 yılında yürürlüğe giren MARPOL Annex VI'da, tüm yakıtların maksimum %4.5 kükürt (S) içermesi gerektiği yanında NO_x salınımı için "Tier 1, Tier 2 ve Tier 3" uygulaması ortaya çıkmıştır. Baltık Denizi SECA alanı ilan edilmiş olup, birkaç ay sonra Kuzey Denizi de buna eklenmiştir. Ayrıca Avrupa Birliği limanlarını ziyaret eden gemiler için de belli kükürt oranlarına sahip olmaları istenmiştir (Schinas ve Hartmann, 2009). Tier I [Keel Laid Date (KLD)>1 Ocak 2000] %15 emisyon azaltımı, Tier II (KLD>1 Ocak 2011) %15 daha fazla azaltım ve Tier III (KLD>1 Ocak 2016) ise %85 emisyon azaltımı hedeflemektedir (Seddiek ve Elgohary, 2014). Çizelge 1.3'te gösterildiği üzere; Tier I, II ve III için makine dakikada devir sayısı (RPM) değerlerine bağlı limitler belirlenmiştir. Engine International Air Pollution Prevention Certificate Sertifikası (EIAPP) ve International Air Pollution Prevention

Certificate Sertifikası (IAPP) 130 kilovat (kW) üstü dizel makineye sahip gemilere zorunlu hale gelmiştir.

Çizelge 1.3 : İnşaa yılına göre NO_X limitleri (Register, 2022).

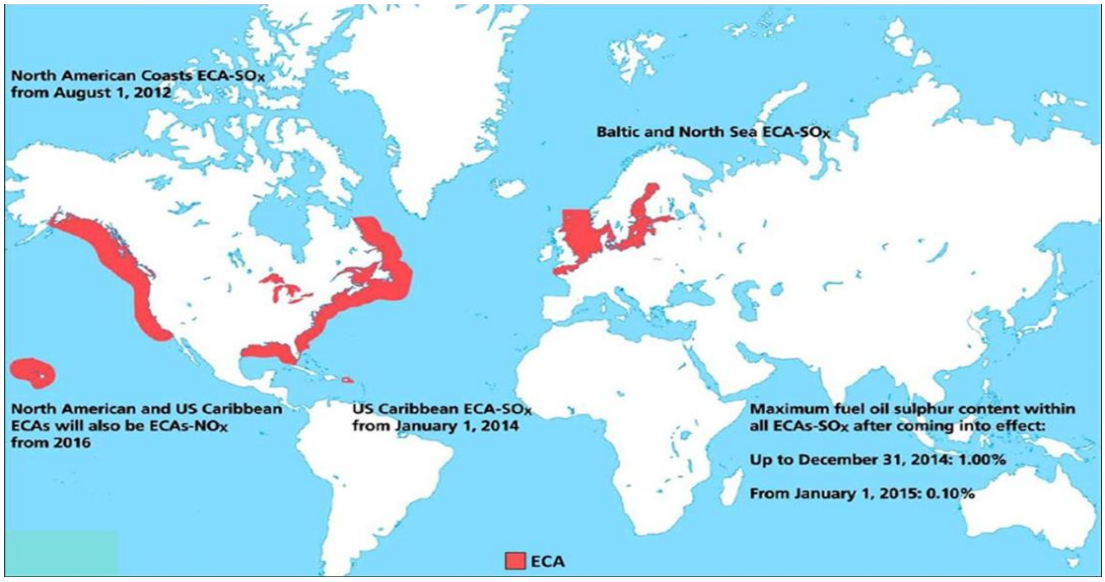
Tier No	KLD	RPM<130	130≤RPM<2000	RPM≥2000
I (g/kWh)	2000	17.0	45 x $rpm^{-0.2}$	9.8
II (g/kWh)	2011	14.4	44 x $rpm^{-0.23}$	7.7
III (g/kWh)	2016	3.4	9 x $rpm^{-0.2}$	2.0

MARPOL Ek VI Tier III kuralları sadece ECA için geçerlidir. Çizelge 1.4'te güncel ECA alanları verilmiştir.

Çizelge 1.4 : Güncel emisyon kontrol bölgeleri (ECA).

ECA Alanı	Kapsam	Uygulama	Sülfür İçeriği Sınırı
Kuzey Amerika	ABD ve Kanada'nın kıyı suları	SO_X, NO_X ve PM	%0.10
ABD Karayipler	Porto Riko ve Virgin Adaları'nın çevresi	SO_X, NO_X ve PM	%0.10
Kuzey Denizi	Kuzey Denizi	SO_X ve NO_X	%0.10
Baltık Denizi	Baltık Denizi	SO_X ve NO_X	%0.10

Şekil 1.9'da harita üzerinde güncel ECA alanları gösterilmiştir. Artık tüm ECA'lar için özel sülfür kuralları da geçerli olduğundan SECA terimi günümüzde kullanılmamaktadır.

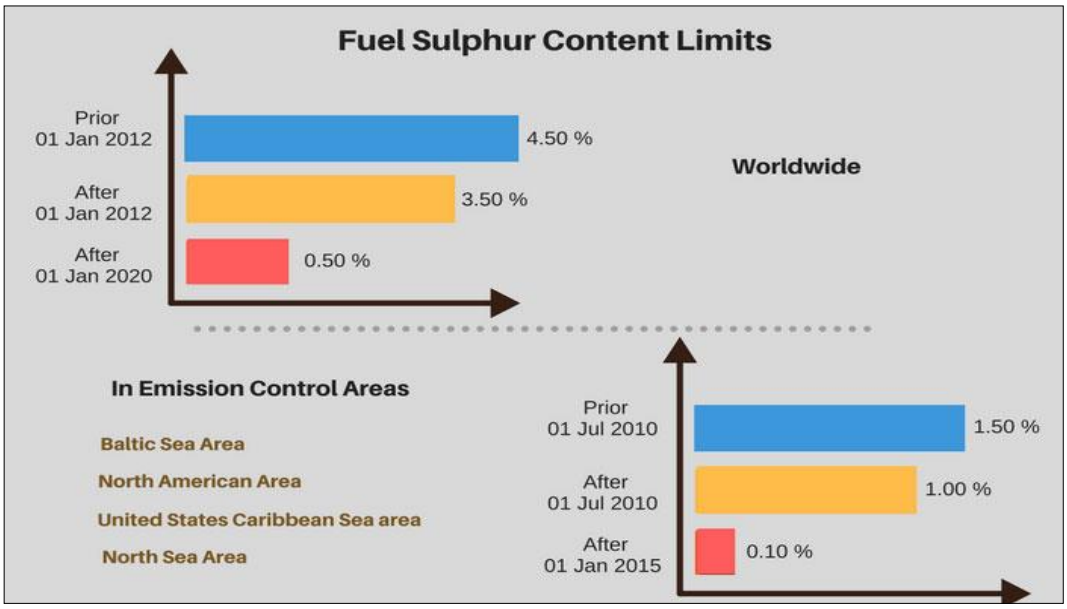


Şekil 1.9 : Güncel emisyon kontrol alanları (Komar ve Lalić, 2015).

2009 yılında gerçekleştirilen 2. IMO GHG çalışmasında CO_2, CH_4 (metan), N_2O gibi ana sera gazlarının yanı sıra diğer hava kirleticilerin emisyonlarını değerlendirilmiştir

ve küresel düzeyde emisyonların düşürülebilmesi için yeni kurallar uygulanması gerektiği vurgulanmıştr. Enerji verimliliği iyileştirmeleri kapsamında, gemi tasarımı ve operasyonlarında iyileştirmeler önerilmiş, Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi (EEDI) ve Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) gibi araçlar ilk kez tanıtılmıştır. Ayrıca, düşük karbonlu ve sıfır karbonlu yakıtların kullanımı teşvik edilerek, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), biyoyakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi alternatifler değerlendirilmiştir (Buhaug ve diğ., 2009).

Gemilerden kaynaklı SO_X emisyonları, yalnızca yakıtın sülfür içeriğine bağlıdır; bu nedenle sülfür içeriği önlemleri, yakıttaki sülfür oranını düşürmeye yöneliktir. Gemi yakıtının yanması sırasında, yaklaşık olarak yakıttaki sülfürün %90'ı oksijen gazı (O_2) ile reaksiyona girerek sülfür dioksit (SO_2) olarak; daha küçük bir kısmı ise SO_3 şeklinde form alır, bu nedenle sıklıkla SO_X kısaltması kullanılır ($SO_X = SO_2 + SO_3$). 2005 yılında %4.50 ile başlayan yakıt sülfür oranı sınırlaması giderek daha da azaltılmıştır. 2020 yılından itibaren küresel olarak gemi yakıtlarındaki sülfür içeriği %0.50 veya daha az olacak şekilde düzenlenmiştir. ECA bölgelerinde ise bu değer 2015 yılında %0.10'a kadar düşürülmüştür (Svensson, 2011). Şekil 1.10'da sülfür oranındaki kısıtlamalar gösterilmiştir. Sülfür oranındaki MARPOL kısıtlamaları sayesinde PM oranlarında da ciddi oranda düşüş görülmüştür (Zhang ve Aikawa, 2024). Bu da sülfür ve PM'in bağlantılı olduklarını göstermiştir.



Şekil 1.10 : Yakıt sülfür limitleri (Kim ve Seo, 2019).

2021 yılında Antalya'da düzenlenen Akdeniz Çevre Koruma Konvansiyonu (Barcelona Convention) ile 1 Ocak 2025 tarihinden itibaren Akdeniz'deki deniz yakıtlarının %0,1 sülfür içeriği ile kullanılması zorunlu hale getirilmiştir. Bu da Akdeniz'in yeni bir ECA bölgesi olması demektir. Gelecekte emisyon kontrol alanlarının artması beklenmektedir.

2013 yılında uygulanmaya başlayan SEEMP, MARPOL kapsamındaki gerekliliklere göre gemi enerji verimliliği yönetim planıdır. Plan, gemi özellikleri ve operasyonel bilgileri, enerji yönetim stratejileri, enerji verimliliği önlemleri, izleme ve ölçüm yöntemleri, değerlendirme ve geri bildirim süreçleri, personel eğitimi ve farkındalık programlarını içerir. Ayrıca, belgelendirme ve raporlama süreçlerini de kapsar (Im ve diğ., 2019). Bu sayede gemi işletmecileri, gemilerinin enerji verimliliklerini izleyebilir, gerekirse optimize edebilirler. Yine 2013 yılında uygulanmaya başlayan EEDI enerji verimliliği dizayn indeksi olup, gemiler kaynaklı GHG emisyonlarının azatılması için çok önemli bir araçtır. Bu kuralla beraber 1 Ocak 2013 tarihinden itibaren yeni inşaa edilen gemiler ilk 2 yıllık aşamada EEDI taban değerini karşılamak zorundadır. Bunu takip eden her 5 senede bir de CO_2 emisyonu azaltım hedefinin %10 azalması gerekmektedir. EEDI, bir geminin CO_2 emisyonlarını gemi kapasitesi ve referans hızı ile bölerek hesaplayan bir ölçüttür. Gemi türüne ve deadweight değerine bağlı olarak belirlenen referans EEDI değeri ile karşılaştırılarak geminin uyum gereksinimleri belirlenir (Tzannatos and Stournaras, 2015). Bu gereksinim, geminin inşa yılına göre değişen bir azaltma faktörü (X) ile hesaplanır (2013-2015 arası X = %0, 2016-2020 arası X = %10, 2020-2025 arası X = %20 ve 2025-2030 arası X = %30). Bu faktörlerin artması, gelecekte inşa edilen gemilerin daha düşük EEDI hedeflerine ulaşması gerektiğini bize anlatmaktadır (Psaraftis, 2019).

2014 yılında 3. IMO GHG toplantısı gerçekleştirilmiştir. Bu toplantıda 2007-2012 yılları arasında denizcilik taşımacılığının küresel GHG emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunduğu ele alınmıştır. Ayrıca, deniz taşımacılığından kaynaklanan NO_X ve SO_X emisyonlarının da küresel ölçekte dikkate değer düzeyde olduğu belirtilmiş ve azaltılması için gerekli olan politikalar incelenmiştir. Yapılan çalışmada toplam deniz taşımacılığının, yıllık ortalama CO_2 emisyonlarının %2.8'ini, aynı zamanda küresel NO_X emisyonlarının %13'ünü ve SO_X emisyonlarının %12'sini oluşturduğu görülmüştür (Smith ve diğ., 2015).

1 Mart 2018 tarihinde yürürlüğe giren “Yakıt Tüketimi Veri Toplama Sistemi (The Fuel Oil Consumption Data Collection System, DCS)”, 5000 groston üzerindeki tüm gemiler için yıllık CO_2 emisyonları ve diğer faaliyet verilerinin raporlanmasını zorunlu kılan bir sistemdir. Bu sistem, gemilerin yakıt tüketimini ve ilgili emisyon verilerini düzenli olarak toplayarak raporlamalarını sağlar.

2020 yılında da son toplantı olan 4. IMO GHG gerçekleştirilmiştir. Bu toplantıda 2012 ve 2018 yılları arasındaki CO_2 emisyon verileri karşılaştırılmış ve 2018 yılında %10’a yakın artış görülmüştür. Buna bağlı olarak küresel anlamda da %0.2’lik bir artış görülmüştür. IMO, 2008 emisyon baz yılına kıyasla 2030 yılına kadar CO_2 emisyonlarını en az %40, 2050 yılına kadar ise yıllık toplam GHG emisyonlarını en az %50 azaltmayı hedeflemektedir. Emisyonların, 2018'de 2008 (baz yılı) emisyonlarının %90'ı seviyesinden, 2050'ye kadar %90-130'u seviyesine yükselmesi beklenmektedir. Bu toplantıda küresel 2°C hedefi üzerinde de çalışma yapılmıştır. Gemilerin “Enerji Verimliliği Operasyonel İndeksi (EEOI)” verileri takip edilmeye devam edilmiştir (IMO, 2021). 2021 yılında “Mevcut Gemi Enerji Verimliliği İndeksi (EEXI)” kullanıma girmiştir. EEXI’ın EEDI’dan farkı mevcut gemiler için enerji verimliliği hesaplamasıdır. EEDI yeni gemiler için standartları belirlemeyi amaçlamaktadır. 1 Ocak 2023 tarihi sonrası yürürlüğe giren EEXI da CO_2 emisyonlarının azaltılması odaklı bir çalışmadır. EEXI, geminin taşıdığı kargo miktarına ve her mil başına üretilen CO_2 miktarını gram cinsinden ifade eden bir ölçüt olup, geminin tasarım hızında taşıma kapasitesine göre enerji verimliliğini değerlendirir. EEXI, geminin tasarım özelliklerine dayalı olarak ve ayrıca gemi seyirdeyken hesaplanmaktadır. Ana makine %75, yardımcı makineler %50 yükte çalışırken geminin yakıt tüketimi (Ship Fuel Consumption, SFC) ve gemi makinesi %75 yükteyken hız faktörü (EEXI Speed), denklem 1.1'de gösterilen şekilde hesaplanmaktadır. Denklem 1.1, 1.2 ve 1.3 gösterilen EEXI, EEOI ve CII’ya ait formüller bu çalışmada kullanılmayacağından, bu denklemlere dair ayrıntılı açıklamalara yer verilmemiş olup bu denklemler bilgi amaçlı verilmişlerdir.

$$\text{EEXI (g/ton} \cdot \text{mile)} = \frac{CO_2 \text{ Con. Fac.} \times \text{ SFC (g/kW} \cdot \text{h) x Engine Power (kW)}}{\text{Capacity (ton) x EEXI Speed (knots)}} \tag{1.1}$$

EEOI ise operasyonel bir gösterge olarak, geminin gerçek işletme koşullarında ne kadar enerji verimli olduğunu değerlendirir. Denklem 1.2’de gösterilen EEOI, taşınan

kargo miktarını ve kat edilen mesafeyi temel alarak hesaplanır. Bu gösterge, geminin gerçek işletme performansını yansıtır (Ivanova, 2021).

$$\text{EEOI}\ (\text{g/ton} \cdot \text{mile}) = \frac{CO_2\ \text{emissions}\ (\text{g})}{\text{Distance Travelled}\ (\text{ton.mile})} \tag{1.2}$$

CII ise, bir geminin yıl boyunca yaydığı toplam karbon dioksit miktarını geminin taşıma kapasitesi ve seyir ettiği toplam mesafe ile ilişkilendirerek hesaplar. Denklem 1.3'te gösterildiği üzere, payda geminin yıl boyunca yaydığı toplam CO_2 miktarı bulunurken, paydada geminin resmi yük taşıma kapasitesi ile yıl boyunca seyahat ettiği toplam mil miktarı yer alır. Bu hesaplama, geminin faaliyet gösterdiği her durumu dikkate alır (demirde, limanda, seyirde, tersanede vs.). Örneğin eğer son bir yıl içinde gemi hiç seyir yapmadıysa CII değeri sonsuz da çıkabilir. Ayrıca taşıdığı gerçek yük miktarı yerine formülde DWT kullanılır (Norton ve diğ., 2022). Correction factor gemi tipine ve DWT'ye göre değişmektedir (IMO, 2022). 1 Ocak 2024'ten itibaren, belirli kategorilere giren 5.000 groston ve üzerindeki gemiler, yıllık operasyonel karbon yoğunluğunu (CII) hesaplamak zorundadır. Karbon yoğunluğu hesaplama formülü aşağıda verildiği gibidir (IMO, 2022).

$$\text{CII}\ (\text{g/ton} \cdot \text{mile}) = \frac{\text{Actual}\ CO_2\ \text{Emissions}\ (\text{g})}{\text{DWT}\ (\text{ton})\ \text{x Actual Miles Traveled}\ (\text{mile})}\ x\ \text{Corr. Factors} \tag{1.3}$$

Uluslararası denizcilik sektörü için belirlenen iklim hedeflerine göre, 2030 yılına kadar tüm sera gazı emisyonlarında %40 azalma hedeflenmiştir. Aynı yıl, sıfır emisyonlu yakıtların kullanımının %5'e ulaşması ve ardından %10'a ulaşması hedeflenmiştir. Ayrıca, 2030 yılına kadar toplam yıllık sera gazı emisyonlarında %20 azalma sağlandıktan sonra %30 azalma hedeflenmektedir. 2040 yılına kadar toplam yıllık sera gazı emisyonlarında %70 azalma sağlandıktan sonra %80'e ulaşma hedefi konulmuştur. Son olarak, 2050 yılı için sıfır emisyon hedeflenmiştir. Bu hedefler, denizcilik sektörünün çevresel etkisini azaltmak ve sürdürülebilir bir geleceğe katkıda bulunmak amacıyla belirlenmiştir (Friedman, 2024). Gemi endüstrisi için belirlenen sıfır emisyon hedefi, Paris Anlaşması'nın etkisiyle ortaya konmuş çok iddialı bir hedeftir (Bilgili ve Ölçer, 2024). Bu hedefin gerçekleştirilmesi oldukça zor görünmektedir. Bununla birlikte, bu hedefe en yakın şekilde ulaşmak için mevcut tüm kaynakların ve çözüm yollarının kullanılması, uluslararası denizcilik kuralları ve düzenlemeleri doğrultusunda kaçınılmaz bir gerekliliktir.

1.1.5 Gemi kaynaklı emisyonların azaltım yöntemleri

Liman ve gemi kaynaklı emisyonların azaltımında kullanılan yöntemler farklı olup, liman sahası içerisinde gemi kaynaklı emisyonlar da liman emisyonları kapsamına alınmaktadır. Bu durum, limanların çevresel etkilerini değerlendirirken dikkate alınması gereken önemli bir husustur (Merk, 2014). Çalışma konusu olan manevra esnasındaki emisyon incelemesi için, gemi kaynaklı emisyon azaltım yöntemleri ele alınmıştır. Çalışmada, manevra başlangıcı römorkörün bağlanmasıyla başlamış ve gemi, limana halatlarını verdikten ve kendini emniyete aldıktan sonra (final halat sayısına gerek olmaksızın) römorkörün mola vermesiyle sona ermiştir.

Denizcilik sektörünün "Bölüm 1.1.4'te" anlatılan kuralların gerekliliklerini yerine getirebilmesi hususunda önünde üç ana yaklaşımı vardır. Bunlar yakıt değiştirme, scrubber kurulumu ve temiz enerji kullanımı olarak alternatif yakıt kullanılmasıdır (Ma ve diğ., 2023).

Yakıt değiştirme yöntemi, gemilerin belirli ECA bölgelerinde daha pahalı olan marine gas oil (MGO) (%0.1'in altında sülfür içeriği) ve ECA dışında daha ucuz olan düşük kükürtlü fuel oil (LSFO) (%0.5'in altında sülfür içeriği) kullanarak doğrudan bir enerji stratejisi sunar. Bu yöntem, gemilerin ekonomik yakıt kullanımını optimize etmelerini sağlar ve teknik değişiklik gerektirmediği için yatırım maliyetleri düşüktür. Ancak uzun süreli ekonomik planlama gerektiren düşük sülfürlü yakıtların maliyeti yüksek olabilir (Olaniyi ve Viirmäe, 2016). Diğer bir yandan MGO'nun pahalı olması sebebiyle gemi operatörleri, daha ekonomik olması amacıyla gemilerin hızlarını 1 ila 2 knot arasında azaltma yoluna gitmektedir. CO_2 emisyon seviyeleri hususunda, hız azaltımı kaynaklı olarak, MGO seçeneğinde, ağır fuel oil'e (HFO) (yüksek sülfür içerikli yakıt) göre ton-mil başına %10 ila %15 arasında CO_2 emisyon azaltımı sağlanmaktadır (Lindstad ve diğ., 2017).

EGC sistemleri egzoz gazlarındaki zararlı emisyonları azaltmak için kullanılan teknolojilerdir. Bu sistemler genellikle SO_2, NO_X, PM ve diğer zararlı emisyonları azaltmak için tasarlanmıştır. Bu sistemler scrubber, SCR (Selective Catalytic Reduction) ve EGR (Exhaust Gas Recirculation) sistemleridir (Vasilescu ve diğ., 2021).

Scrubber sistemi, egzoz gazlarını soğutarak içlerindeki katı parçacıkları ve gaz bulutlarını giderir, böylece emisyon oranlarını düşürerek hava kalitesini arttırır.

Scrubber kullanan gemilerde ana ve yardımcı makinelerin toplam sülfür emisyonları 6.0g SO_X/kWh veya daha az olmalıdır. Sülfür emisyonlarını düşürürken partikül madde miktarını da düşürmektedir (Shaketange, 2024). Gemilerde scrubber kurulumu, gemi egzoz gazındaki SO_X içeriğini %0.1'in altına indirmenin başka etkili bir yoludur. Aslında, scrubberlı gemiler HFO kullanmaya devam edebilir ve bu da hem LSFO hem de MGO'dan daha ucuzdur. Scrubber sistemleri, ıslak ve kuru olmak üzere iki tipe ayrılmaktadır. Kuru scrubber, sıvı yerine sodyum bikarbonat veya kireç gibi kuru sorbentlerin emisyon akışına enjekte edilmesiyle çalışır. Islak scrubber ise hava kirleticilerini yakalamak ve nötralize etmek amacıyla deniz suyu veya kimyasal katkı maddeleri içeren suyu emisyon akışına dahil ederek çalışır. Islak scrubberın açık, kapalı ve hibrit döngü sistemi olarak üç tipi vardır. Açık sistemde yıkama suyu denize boşaltılır. Bu da denizlerin kirlenmesinde ve deniz canlılarının olumsuz etkilenmesine sebebiyet vermektedir. Scrubber sistemi kurulan gemilerin yarısı, düşük sülfürlü yakıtların kullanımına göre maliyetini 5 sene gibi bir süreçte çıkarabilmiştir. Diğer yarısının maliyetini çıkaramamasının sebebi ise açık döngü sisteminin bazı devletler tarafından yasaklanmasıdır. Diğer bir yandan açık döngü, kapalı ve hibrit sistemlerin kurulum maliyetlerine göre daha düşüktür (Lunde Hermansson ve diğ., 2024). EGR sisteminin amacı NO_X emisyonlarını düşürmektir. LSFO kullanımı dahi MARPOL ek VI'da yer alan NO_X gereklilikleri karşılayamamaktadır. Çünkü LSFO sülfür açısından düşük yakıttır. EGR sistemi bunu fosil yakıtların yanması sonucu çıkan egsoz gazlarının bir kısmını makineye tekrar geri göndererek NO_X emisyonlarını düşürür. Egsoz gazı bacadan dışarı atılacakken tekrar yanma döngüsüne girer ve işlemden geçmiş olur. Geri dönüştürülmüş egsoz gazı ve makinenin çalışabilmesi yani yanmanın olabilmesi için gerekli olan temiz hava karışır, bu şekilde dışarıdan alınan temiz havanın ısısı artar, bu da yanma için gerekli olan sıcaklığı düşürerek NO_X emisyonlarını azaltır (Ni ve diğ., 2020).

EGR sistemlerinin en büyük dezavantajları geminin manevra yapması esnasında ortaya çıkmaktadır. Manevra esnasında makinenin yükünün değişmesi sebebiyle sistem kendini ayarlamakta zorlanmaktadır (Wang ve diğ., 2020). Ayrıca EGR kullanımı makinenin yakıt tüketimini arttırabilir, ısıl verimliliğinin düşmesi sebebiyle makine veriminin düşmesine sebep olabilir, kullanımı esnasında atmosfere CH_4 emisyonu kaçabilir ve yakıtın kötü yanması sebebiyle yine verimlilik düşebilir (Karahalios, 2024).

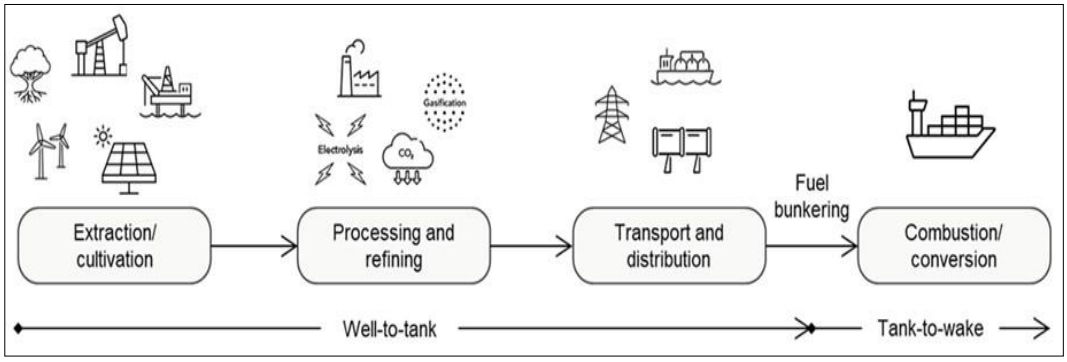
SCR, fosil yakıtlardan kaynaklanan egsoz gazındaki NO_X miktarını düşürmeyi sağlayan bir sistemdir. NO_X emisyon miktarını yaklaşık %90 oranında azaltabilmektedir (Ammar, 2019). Çalışma presnsibi olarak egsoz gazına üre-su çözeltisi eklenmektedir, böylece üre termal ayrışmaya uğrayarak NO_X ve oksijenden N_2 ve su açığa çıkar. Bu sayede de NO_X ortadan kalkmış olur (Zhuang ve diğ., 2024). SCR sistemkleri iki tiptedir, bunlardan birincisi düşük basınçlı SCR, ikincisi ise yüksek basınçlı SCR'dir. Yüksek basınçlı SCR'nin avantajı yakıttaki kükürt seviyesine bakmaksızın makineye uygun bütün yakıtlarla çalışabilmesidir. Düşük basınçlı SCR ise ağırlıkça en çok %0,1 kükürt içeren yakıtlarla uygundur (MAN, 2019).

Üçüncü seçenek ise LNG, sıvılaştırılmış biyogaz, doğal gazdan metanol ve yenilenebilir metanol gibi temiz enerjileri yakıt olarak kullanmaktır(Trodden ve Haroutunian, 2018). Alternatif yakıtlar klasik denizcilik yakıtlarına göre çok daha düşük emisyon oranlarına sahiptir. Mevcut koşullar altında IMO'nun 2050 yılındaki hedeflerini gerçekleştirebilmenin en büyük favorisi alternatif yakıtlar olarak görülmektedir. IMO'nun hedeflediği emisyonlara uyum için gereken sermaye yatırımlarının yaklaşık 1.4–1.9 trilyon ABD doları olarak tahmin edilmektedir (Foretich ve diğ., 2021). Alternatif yakıtlar şu şekilde listelenebilir: LNG, amonyak, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), batarya sistemleri, yakıt hücreleri, likit hidrojen, bio yakıtlar, metanol, etanol, ethan ve dimethyl etherdir (Roy ve Chakraborty, 2024).

IMO farklı deniz yakıtları ve teknolojilerinin yaşam döngüsü çevresel etkilerini değerlendirmek için Şekil 1.11'de gösterilen "Life Cycle Assessment Guideline (LCAG)" yani deniz yakıtlarının yaşam döngüsü sera gazı yoğunluğu kılavuzlarını oluşturmuştur. Bu kılavuzlar, bir yakıtın veya teknolojinin üretimden kullanım ömrü sonuna kadar olan tüm aşamalarındaki toplam çevresel ayak izini, sera gazı emisyonlarını, enerji kullanımını ve diğer çevresel etkileri anlamaya yardımcı olur (MEPC, 2023). Bu kılavuz şirketlerin gemilerinde kullanacakları yakıt seçimi hususunda, şirketlere yardım sağlamaktadır.

LNG kullanımında yakıt tüketiminde sağlanan tasarruf %23 ile %26 arasında değişmekte olup, CO_2 emisyonları %28 ile %31 arasında azalmaktadır. Özellikle NO_X emisyonları %87 azalırken, SO_X emisyonları tamamen ortadan kalkmakta ve PM emisyonları ihmal edilebilir seviyelere düşmektedir. Deniz taşımacılığı sektöründe Avrupa Birliği, emisyon azaltımı için LNG kullanımını kısa ve orta vadeli çözüm

olarak belirtmektedir. LNG depolanabilmesi için yalıtımlı tanklara ihtiyaç duyulmaktadır. Şu anda LNG kullanımının en büyük problemi tedarik olarak ortaya çıkmaktadır ve yatırıma ihtiyacı vardır (Gil-Lopez ve Verdu-Vazquez, 2021).



Şekil 1.11 : IMO LCAG'ye göre denizcilik yakıtının yaşam döngüsü (MEPC, 2023).

Amonyak, NH_3 kimyasal formülüne sahip olan, -33°C'de gaz haline gelebilen, sülfür ve karbon açısından sıfır emisyona sahip, fakat NO_X açsından bir hayli yüksek emisyona sahip bir yakıt türüdür. IMO emisyon kuralların uyum amacıyla LNG ile birlikte kullanılabilmektedir. Amonyak, gemideki yakıt tanklarının yetersiz olması durumunda dahi yüksek enerji kapasitesi sunabilmesiyle bu eksiği kapatabilmektedir ancak, geç yanan ve yanma için yüksek sıcaklık isteyen bir yakıt olması sebebiyle, tutuşması için başka yakıtlarla birlikte kullanılması gerekir (Zincir, 2020). Amonyak yakıt tedariği de zor bir husustur. Amonyak, zehirli yapısı ve metal alaşımlarla reaksiyona girebilme özelliği nedeniyle dikkat edilmesi gereken bir yakıt türüdür. Amonyak kullanımı, emisyon açısından bakıldığında çok çevreci görünmekle beraber amonyak sızıntısı gibi çevreyi kirletebilen sonuçları doğabilmektedir. Amonyak kirliliği doğrudan organizmalara zarar verebilmekte ve asiditeye neden olabilmektedir (Schwarzkopf ve diğ., 2023). LPG kullanımı denizcilikte çok sınırlıdır. Sadece iç sularda bazı feribotlarda ve küçük ölçekli gemilerde görülebilmektedir. Depolanması için büyük tanklara ihtiyaç duymasından ve enerji veriminden dolayı uzun seyir yapan gemilerde kullanılması zordur. Tüm emisyonlar açısından düşük olsa da fiyat açısından da diğer yakıtlarla kıyaslandığında geride kalmaktadır (Kjartansson, 2012).

Batarya sistemleri, elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan ve gerektiğinde elektrik enerjisi olarak geri veren cihazlardır. Ancak, gemileri karadan sağlanan (cold ironing) elektrikle beslemek konusunda bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu zorlukların başında bataryaların ve diğer enerji depolama çözümlerinin yeterince enerji

sağlayamaması gelmektedir. Bu da gemilerin uzun seyir yapmalarına engel teşkil etmektedir. Tam elektrikli ve hibrit sistem olmak üzere iki tipi vardır (Chin ve diğ., 2019). Özellikle buz kırıcılar, büyük cruise gemileri ve offshore sondaj gemileri elektrik enerjisini yakıt olarak kullanmaya başlamışlardır. Bu sistemler, yüksek güç tüketimine sahip gemilerde yakıt verimliliğini artırarak operasyonel maliyetleri azaltmaktadır. Fakat elektrik kullanan gemilerin emisyonları, sahilden aldıkları elektriğin üretimine bağlıdır. Sahil elektriği fosil yakıtlarla üretiliyorsa aslında bu da emisyona neden olmaktadır. Yakıt hücreleri ile birlikte elektrik kullanımı geminin gereksinim duyduğu enerji kontrolünü ve voltaj düzenlemesini sağlayabilir (Haxhiu ve diğ., 2021).

Yakıt hücreleri (fuel cells), kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek yüksek verimlilik sağlar ve işletim sırasında neredeyse hiç emisyon oluşturmazlar. AFC (alkalin yakıt hücresi), PEMFC (proton değişim membranı yakıt hücresi), HT-PEMFC (yüksek sıcaklık proton değişim membranı yakıt hücresi), PAFC (fosforik asit yakıt hücresi), DMFC (direkt metanol yakıt hücresi), MCFC (eritilmiş karbonat yakıt hücresi) ve SOFC (katı oksit yakıt hücresi) gibi çeşitli yakıt hücresi tipleri bulunmaktadır (Xing ve diğ., 2020). Sistemde hareketli parçaların olmaması sebebiyle düşük gürültü seviyeleri sunarlar ve az sayıda parçanın olması bakım maliyetlerini düşürür. Modüler yapıları sayesinde kısmi yüklerde bile yüksek performans gösterirler, bu da dizel makinelere göre daha avantajlı bir seçenek haline getirir. Hidrojen yakıt hücresi, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine doğrudan dönüştüren bir olgudur. Eğer depolama sorunu artan teknolojiyle çözülebilirse, IMO'nun 2050 hedefi olan sıfır emisyon göz önünde bulundurulduğunda en mantıklı yakıt olarak gözükmektedir (Sürer ve Arat, 2022). Sıvı hidrojen kullanımının avantajları arasında hidrojenin yüksek enerji yoğunluğu ve düşük karbon salınımı bulunmaktadır. Fakat yüksek depolama alanına ihtiyaç duyması ve depolama ile taşıma anında soğuk tutulması gerektiğinden bu teknolojinin denizcilikte yaygınlaşması zor görünmektedir (Ustolin ve diğ., 2022; Van Hoecke ve diğ., 2021).

Metanol, günlük hayatta kullanılan birçok üründe bulunan sıvı bir kimyasaldır. Yenilenebilir metanol, sürdürülebilir biyokütle kaynakları veya atmosferden yakalanan CO_2 ve yeşil hidrojen ile üretilen düşük karbonlu bir kimyasaldır. Geleneksel yakıtlara kıyasla CO_2 emisyonlarını %95'e kadar azaltır, NO_X emisyonlarını %80'e kadar azaltır ve SO_X ve PM emisyonlarını tamamen ortadan

kaldırır (Meca ve diğ., 2022). Depolaması kolaydır, emisyon oranları çok düşüktür ve mevcut gemi makinelerine adaptasyonu kolaydır. Fakat yenilenebilir metanol maliyetli bir yöntemdir. Fosil yakıtlarla beraber dual-fuel olarak kullanımı ekonomik açıdan daha verimli olup, emisyonlarda önemli düşüş sağlamaktadır (Ammar, 2019). Biyoyakıtlar, bitkisel yağların işlemden geçerek biyodizele dönüştürülmesi ile elde edilir. Bu sayede emisyon değerleri azaltılmış olur. Bioetanol, şeker kamışı, mısır gibi hammaddelerden üretilirler. Yenilikçi yakıt çeşitleri arasında ise bio-Sentetik doğal gaz gibi biyoyakıtlar bulunmaktadır. Ancak bu yakıtların daha geniş kullanımı için teknolojik gelişmeler ve performans standartlarının iyileştirilmesi gereklidir. Dimethyl Ether, metanolün dehidrasyonu ile elde edilen bir sentetik yakıttır. LPG'ye benzer özellikte sıvılaştırılmış bir gazdır, bu yüzden de taşıma koşulları ve bazı diğer özellikleri LPG'ye benzemektedir. Dimethyl ether, doğal gaz, kömür, artık yağ, ham petrol, biyokütle veya atık ürünler gibi çeşitli hammaddeler kullanılarak üretilen sentetik bir yakıttır. Dimethyl ether, duman üretmeyen, kolay yanabilen ve emisyonu düşük bir yakıttır. Ancak düşük enerji sağlaması, büyük basınçlı tanklara ihtiyaç duyması ve düşük vizkozitesi nedeniyle makinede sızıntıya sebep olması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Makoś ve diğ., 2019). En çok kullanılan denizcilik yakıtları için genel olarak emisyon oranlarına yukarıda yer verilmiştir. Genel olarak sıkıntı bazı alternatif yakıtlar dışında CO_2 emisyonunun düşürülememesidir. CO_2 açısından bir kıyaslama yapacak olursak, MGO'ya göre, LPG yaklaşık %12 azalma, LNG (metan) yaklaşık %24 azalma ve fosil yakıtlardan üretilen metanol ise yaklaşık %8 azalma görülmektedir (Lee, 2024). Alternatif yakıtlar açısından, LNG, yerel kirlilik emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilmekte, ancak sera gazı (GHG) emisyonlarını azaltma kapasitesi sınırlıdır. Biyodizeller ise, mevcut makine sistemlerinde küçük değişikliklerle kullanılabilir ancak sürdürülebilirlik ve "gıda mı yakıt mı" tartışmaları engel oluşturmaktadır. Hidrojen ve amonyak açısından değerlendirildiğinde, yüksek enerji yoğunlukları ve düşük emisyonları ile potansiyel alternatiflerdir ancak yüksek maliyetler ve teknik engeller bulunmaktadır. Batarya ile çalışan gemiler, yenilenebilir elektrikle şarj edildiklerinde düşük iklim etkisine sahiptir ancak enerji yoğunluğu ve ömür uzunluğu gibi teknik zorluklar aşılmalıdır. Metanol, düşük üretim ve depolama maliyetleri ile ekonomik avantajlar sunar ancak GHG tasarrufları, kullanılan hammaddeye bağlı olarak değişir. Bu alternatif yakıtlar, denizcilikte karbonsuzlaştırma için önemlidir ancak tek başlarına yeterli değildir ve uzun vadeli politikalar gerektirmektedir (Law ve diğ., 2021; Wang ve Wright, 2021).

Bunların dışında yukarıda da bahsedilen yakıt tipleri denizcilik sektöründe henüz yaygın olarak kullanılmamakta olup, gelişen teknolojilerle beraber karşımıza çıkmaları muhtemeldir. Alternatif yakıt olarak adlandırılan, gemiler için güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi ekipmanları, yakıt tüketimini düşürerek emisyon azaltımına yardımcı olmaktadır. Fakat bu sistemler, ana makine için değil, yardımcı makinelerin emisyonlarını azaltmak için kullanılmaktadır (Chou ve diğ., 2021; Zhang ve Liang, 2022).

Hız azaltma olarak bilinen "slow steaming", geminin makine yükünü azaltarak daha az yakıt yakmasına ve dolayısıyla daha az emisyon üretmesine olanak tanır. Bu yöntem, emisyon azaltımı sağlarken aynı zamanda yakıt tasarrufu yaparak sefer maliyetlerini de düşürür. Yakıt maliyetleri, geminin toplam giderlerinin %40'tan fazlasını oluşturur. Bu nedenle, farklı yüklerde ve hızlarda hesaplama yaparak optimum yakıt/mesafe/kira hesaplaması ile karlılık analizi yapmak ve bunu en çevreci emisyonla örtüştürmek gerekmektedir (Goicoechea ve Abadie, 2021). Sadece yakıt miktarını azaltmak için yapılan uygulamalarda, emisyonların çok küçük değerlerde düştüğü ve IMO hedeflerine ulaşmada pek de bir katkısının olmadığı görülmektedir (Rutherford ve diğ., 2020). Bazı çalışmalarda sefer hızı %20 azaltıldığında yakıt tüketimi ve CO_2 emisyon miktarı sırasıyla %40'tan fazla ve %20 azaltılabileceği görülmüştür. Hız azaltma yönteminin maliyet artışına sebep olabildiği görülmekte olup, emisyon azaltımında IMO'nun hedeflerine ulaşmada en kolay çözümlerden biri olacağı aşikardır (Woo ve Moon, 2014). Başka bir çalışmada da LSFO kullanan bir gemi için %13,6 hız azaltmasıyla tüm analiz edilen deniz durumlarında yaklaşık %31'e kadar yakıt tüketimi ve CO_2 emisyon tasarrufu elde edilmiştir. Benzer şartlarda LSFO yerine LNG kullanılması durumunda hız azaltılmasıyla CO_2 emisyonlarında %49'a kadar tasarruf sağlanabilir (Degiuli ve diğ., 2021).

Cold ironing, gemilerin limanda bağlıyken gemi jeneratörlerinden kaynaklanan emisyonları azaltmak için kıyı bazlı elektriğe bağlanma uygulamasını ifade eder. Sahil elektriğinden beslenme yöntemi tersanede enerji kaynağı olmayan gemiler için sıkça kullanılırken, limanların bu hususta yatırım yapmaları gerekmektedir. Gemiler sahil elektriğinin üretimine bağlı olarak emisyon üretirler (Zis, 2019). Sefer optimizasyonu, gemi performansını tahmin ederek ve seyir sırasında karşılaşabileceği deniz durumları ve akıntılar gibi faktörleri dikkate alarak gemi kaptanlarına en uygun rotayı seçmelerinde yardımcı olur. Böylece gemi sefer süresini minimize etmek, emniyeti

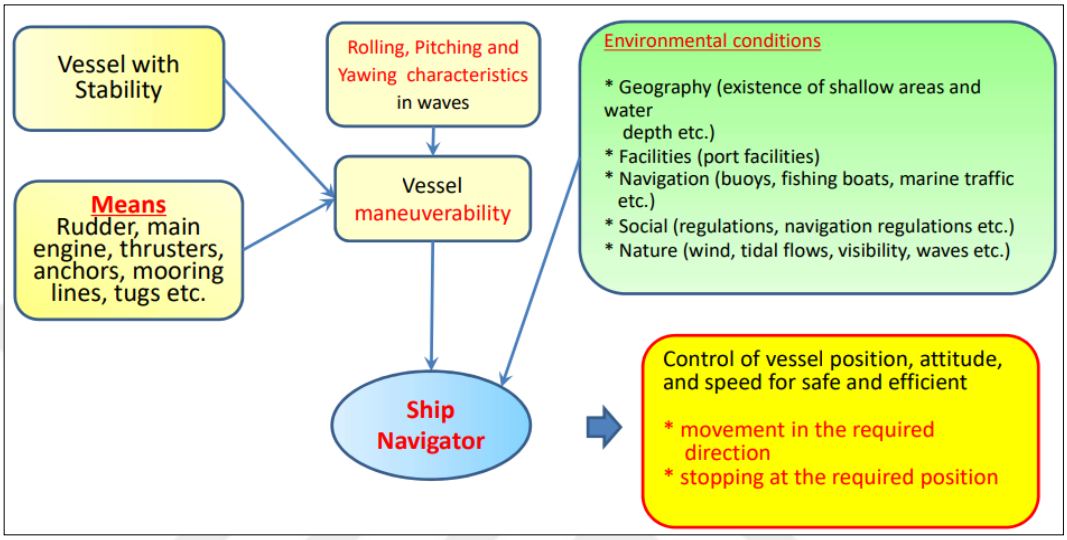
maksimize etmek ve yakıt tüketimini azaltmak gibi çeşitli hedeflere yönelik olarak rotaları optimize etmeyi sağlar. Bu sayede gemilerin emisyon değerleri de yakıt tüketimine bağlı olarak azalır (Lu ve diğ., 2013). Yük azaltarak direnç azaltma yöntemi gemiler için uygun bir yol olmayabilir çünkü geminin asıl işlevi yük taşımaktır. Bununla ilgili çalışmalarda balastlı gemilerde balast azaltılması, balastsız gemilerin inşaası, fiber takviyeli plastik kompozitler, yüksek mukavemetli çelikler ve alüminyum alaşımları gibi hafif malzemeler kullanımı ile gemi ağırlığının azaltılarak, dirençlerin azaltılması ve buna bağlı yakıt tasarrufu sağlanması hedeflenmektedir (Xing ve diğ., 2020).

Gemiler, kendi potansiyelleri dahilinde de belirgin emisyon azaltımları yapabilirler, bu da hassas ayarlamalarla mümkündür. Buna genel olarak teknik ve operasyonel önlemler denilmektedir. Bu konuda başarıya ulaşmak için gemilerden sürekli veri toplanması ve izlenmesi gereklidir. Geminin su ve hava direnci ile hız arasındaki ilişki, makine ve pervane hızı arasındaki fark, optimize edilmiş bakım-tutum, yakıt tüketimi yönetimi ve trim/su çekimi gibi optimum ayarlamalarla emisyon değerleri düşürülebilir (Perera ve Mo, 2016). Geminin karina altının temizlenmesi, anti fouling boyasının yenilenmesi dahi su direncini azaltacağından emisyon oranlarını düşürmektedir. Geminin rüzgar ve su direncini azaltacak en önemli yöntem de gemilerin inşaası sırasında gemilerin hidrodinamik ve aerodinamik yapılarının iyi hesaplanmasıdır. Bu sayede su ve rüzgar direnci minimuma indirilerek daha düşük emisyon üreten gemiler denizlerde yerlerini alabilir. İnsan faktörü de operasyonel emisyon azaltım yöntemlerinin arasında bulunmaktadır (Xing ve diğ., 2020). Manevra esnasında emisyon kontrolü de operasyonel önlemlerin önemli bir parçasıdır. Bu süreçte insan faktörü, özellikle kılavuz kaptan, gemi kaptanı ve köprüüstü takımı olarak ortaya çıkar. Kılavuz kaptanın komutları, geminin ve römorkörlerin yakıt tüketimini doğrudan etkileyerek emisyon değerlerini belirler. Bu nedenle, manevra sırasında doğru yönetim ve koordinasyon, emisyonların kontrol edilmesi için kritik öneme sahiptir.

1.1.6 Gemi manevrası: emisyon sebepleri ve azaltım yöntemleri

Gemi manevrası, bir geminin yönünü, hızını veya hareketini değiştirmek için yapılan işlemleri ifade eder. Şekil 1.12’de özetlenenen gemi manevrası, geminin rotasını değiştirme, hızını ayarlama, durdurma, ilerleme, dönüş yapma veya demir atma gibi

çeşitli operasyonları içerir. Gemi manevraları genellikle geminin kaptanı, mürettebatı ve bazı durumlarda kılavuz kaptanın yardımıyla gerçekleştirilir. Gemi manevralarında yardımcı olarak römorkörler gemiye eşlik etmektedir. Römorkörler, gemi makinesi veya makineleri, baş ve kıç iterler, dümen, demir ve halatlar yardımıyla gemiler yanaşma ve kalkış manevralarını tamamlamaktadırlar.



Şekil 1.12 : Gemi manevrasının özeti (Okada, 2018).

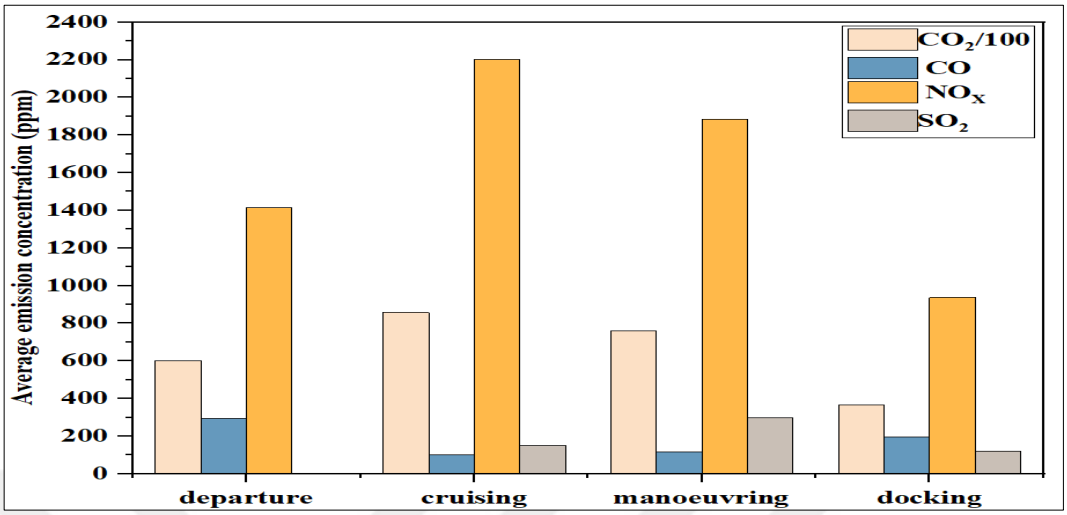
Kılavuz kaptanlar, dar su yollarında, boğazlarda ve kanallarda gemilerin emniyetli bir şekilde seyretmesini sağlayan uzman denizcilik profesyonelleridir ve limanlarda yanaşma ve ayrılma manevralarını yönetirler. Kılavuz kaptanlık mesleği, denizciliğin ilk dönemlerine kadar dayanmaktadır (Geçili, 2017). Kılavuz kaptanlar, gemilerin limanlara güvenli bir şekilde yaklaşmasını ve ayrılmasını sağlamaktan sorumludur. Gemi kaptanlarıyla yakından iş birliği yaparak, manevra teknikleri, hız kontrolü ve rota ayarlamaları konusunda tavsiyeler ve talimatlar verirler, böylece gemilerin güvenli ve verimli bir şekilde yanaşmasını ve ayrılmasını sağlarlar. Kılavuz kaptanlar gemi kaptanlarına nazaran manevraya daha hakimdirler ve en önemlisi bölgenin lokal koşullarını iyi bilmektedirler (Mikkers ve diğ., 2012).

Teknolojideki artan gelişmelere rağmen, denizcilik kazalarının en büyük sebebinin hala insan faktörünü olduğu açıktır. Denizcilik sektöründe, gemi manevraları, kazaların meydana gelme olasılığının en yüksek olduğu en riskli operasyonlar olarak kabul edilmektedir. Bundan dolayı gemi kaptanları emisyon değerlerini düşünmeyi daha geride bırakarak, genellikle geminin emniyetli yanaşması hususunda hareket etmektedirler. Fakat her geçen gün eklenen IMO MARPOL Ek VI kuralları gereği,

gemilerin manevra esnasında da emisyon azaltımını düşüneceği günler daha da yakın gözükmektedir. Bunu da gerçekleştirecek olanlar başta kılavuz kaptanlar, daha sonra gemi kaptanları ve gemideki personellerdir. Önlemlere rağmen artan talep sebebiyle 2012'den 2018'e kadar, denizcilik endüstrisi kaynaklı CO_2, NO_X, SO_X, PM, CO, VOC ve CH_4 emisyonlarının sırasıyla %5,6, %1,2, %5,5, %3,5, %10,2, %7,6 ve %151 arttığı gözlemlenmiştir (IMO, 2021). Gemi manevralarının emisyonlar açısından diğer bir önemi de sahile yakın yerlerde yapılmalarıdır. Denizcilik sektörü, küresel CO_2 emisyonlarının sadece yaklaşık %2'sini oluşturmasına rağmen, limanlara yakın bölgelerde yerel hava kirliliği çok yüksek olabilir. Çünkü limanlar, insan popülasyonunun yüksek olduğu bölgelere yapılmaktadır. Gemi kaynaklı emisyonların %70'ine yakının sahilden 400 km mesafede gerçekleştiği bilinmektedir ki bu durumda yayılan PM emisyonu açısından liman çalışanları ve genel nüfusun hava kirliliğine bağlı hastalıklara yakalanma risklerinin artmakta olduğu aşikardır. Küreselde, büyük liman şehirlerinde NO_2, SO_2 ve PM2.5 gibi deniz kaynaklı emisyonlardan dolayı ortalama olarak 230 milyon insanın doğrudan etkilendiği belirtilmiştir (Moreira ve diğ., 2024). Gemi manevraları sırasında yapılabilecek alternatif yakıt kullanımından hariç birkaç emisyon azaltım yöntemi vardır. Manevra esnasında az makine kullanımı, gemi imkanlarını kullanarak römorkörleri daha az kullanma şüphesiz emisyon değerlerini düşürmektedir. Bu yöntemler operasyonel emisyon azaltım yöntemleri sınıfına girmektedir. Diğer yöntemler otomatik bağlama sistemleri (AMS) ve hız azaltımıdır.

Gemilerin yakıt tüketimine bağlı olarak egzoz gazı emisyon miktarının değişebildiği bilinmektedir. Gemi hızının düşürülmesi de makinede daha az yük oluşturduğundan, yakıt tüketimini azaltmaktadır ve dolayısıyla, emisyon miktarları da azalmaktadır (Seddiek ve Elgohary, 2014). Fakat hava durumu, akıntı, görüş, trafik yoğunluğu, yanaşılacak yerin pozisyonu, manevra yapılan yerdeki engeller gibi etkenler sebebiyle hız azaltılması her zaman mümkün olmayabilmektedir. Hız azaltımı emniyet unsurlarına etki ederek geminin manevrasını zora sokabilir. Şekil 1.13'e göre, manevra koşulları açısından değerlendirildiğinde, geminin operasyonları sırasında emisyonların önemli bir kısmı bu süreçte gerçekleşmektedir. Manevra esnasında CO emisyonları toplamın %24.2'sini, CO_2 emisyonları %22.87'sini, NO_X emisyonları %22.37'sini ve SO_2 emisyonları %33.18'ini oluşturmaktadır. Bu yüksek emisyon

oranları, gemi makinesinin sürekli değişen yükler altında çalışması ve tam yanma olmaması nedeniyle oluşur (Fan ve diğ., 2024).



Şekil 1.13 : Gemilerin farklı modlardaki emisyonların değerleri (Fan ve diğ., 2024).

Diğer bir yandan manevra esnasında gemi makineleri tasarım noktasında çalışmazlar ve makinenin yükü sürekli olarak değişir. Bu durum, gemi yakıtlarının verimsiz şekilde yanmasına neden olur ve düşük verimlilik sebebiyle özellikle PM ve NOX gibi emisyonların artmasına yol açar (Deniz ve Kilic, 2010). Bu koşullar altında, manevra durumları için bir emisyon modeli belirlemek, emisyonların azaltılması açısından çok faydalı olabilir. Otomatik bağlama sistemi (AMS), gemilerin geleneksel halatlı bağlama sistemleri yerine kullanılan bir manevra yardımcısıdır. Bu sistem, gemilere uzaktan kontrol edilebilen vakum pedleri, manyetik sistemler ve hidrolik olarak çalışan robotik kollarla bağlanarak manevra süresini yaklaşık olarak 30 saniyeye indirir (Seyhan ve diğ., 2023). AMS, limanlarda emniyeti artırmak ve gemilerden yayılan emisyonları azaltmak amacıyla kullanılan bir teknolojidir. Fakat kullanımı yaygın olmayan bir sistem olup, limanlar için büyük maliyetlere sahiptir.

Manevra esnasında gemi ve römorkör emisyonlarının azaltılması, büyük ölçüde insan faktörüne bağlıdır. Gemilerin gerçekleştirdiği her manevra birbirini tekrarlamamaktadır; birçok dışsal ve insani etken her manevranın farklı olmasına yol açmaktadır. Ayrıca, aynı gemiyle yapılan manevralarda dahi, farklı kılavuz kaptanlar ve kaptanlar, her bir manevranın öncekiyle birebir aynı olmadığını gözlemlemektedir. (Özkulluk ve Nas, 2023). Buna bağlı olarak römorkör kullanım tarzları da değişmektedir. Fakat bir bölgede çalışan kılavuz kaptan hep aynı bölgeye hizmet vermesinden ötürü ister istemez bir manevra alışkanlığı edinmektedir. Bu da dış

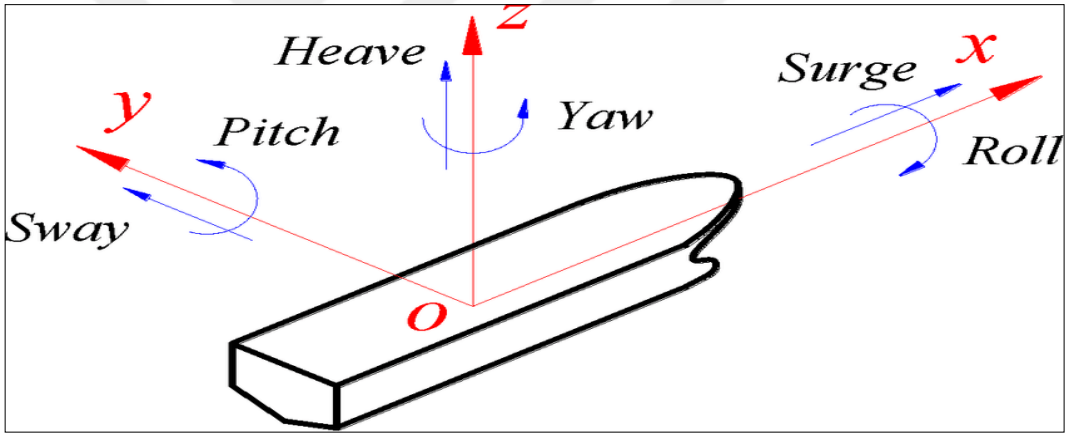
şartlardan bağımsız olarak benzer manevraların ortaya çıkması demektir. Gemiler hakkında veri toplamak için yapılan gemi manevra testleri ve ölçümleri genel olarak sakin denizlerde yapılmaktadır. Rüzgar, akıntı, dalga, swell, kısıtlı görüş ve yoğun trafik gibi etkenler manevrayı zorlaştıran etkenlerdir. Bu etkenler eklenmeden yapılan çalışmaların doğru sonuç vermesini beklemek zor gözükmektedir (Zhang ve diğ., 2017). Fakat gemi manevralarının simülasyonunu yapmak ve manevra esnasındaki emisyonu hesaplamak doğru sonuçlar verebilir.

Gemi manevrası esnasındaki emisyon değerlerini hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Emisyon faktörleri yaklaşımı, birim yakıt tüketimi başına salınan kirlilik miktarını temsil eder ve genellikle literatürden veya denizcilik otoritelerinden alınan veritabanları kullanılarak yakıt tüketimi ile emisyon faktörlerini çarparak toplam emisyon miktarını hesaplar. Modelleme ve simülasyon yaklaşımı, gemi hareketlerini ve makine performansını detaylı bir şekilde modelleyerek emisyonları tahmin eder ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) gibi araçlar kullanabilir. Gerçek zamanlı ölçümler, gemilere yerleştirilen emisyon ölçüm cihazları ile yapılır ve en doğru sonuçları sağlar ancak maliyetli olabilir. Deneysel yaklaşımlar, gemi model testleri ve deniz denemeleri ile geminin belirli operasyonel koşullarda nasıl performans gösterdiğini belirlemektedir. Veri tabanlı yaklaşımlar ise mevcut emisyon veritabanları ve geçmiş operasyonel veriler kullanılarak tahminler yapar ve makine öğrenmesi (machine learning) gibi teknikleri kullanabilmektedir. Manevrada kullanılan komutlar ile ENTEC veya EPA gibi matematiksel formüller kullanılarak da emisyon değerleri hesaplanabilir. Bu yöntemlerin kombinasyonu, emisyonların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için kullanışlı olmaktadır (Fang ve diğ., 2018).

1.2 Simülasyon

Gemi simülasyonu, gemilerin çeşitli deniz koşulları altında nasıl hareket ettiğini ve tepki verdiğini gerçekçi bir şekilde modellemek için kullanılan bir teknoloji ve yazılım sistemidir. Gemi simülasyon sistemleri, gerçek zamanlı olarak gemi hareketlerini simüle edebilmektedir (Ueng ve diğ., 2008). Katılımcılar, gemilerin dalgalara, akıntılara ve rüzgarlara nasıl tepki vereceğini gözlemleyebilir ve öğrenebilirler. Bu özellik, gemi manevralarını öğrenmek veya bilgilerini tazelemek isteyen katılımcılar açısından çok faydalıdır (Sariöz ve Narli, 2003). Gelişmiş hesaplama modelleri sayesinde, gemi simülasyon sistemleri farklı gemi tipleri, makine tipleri ve dış koşullar

(dalga frekansları, dalga genlikleri, akıntılar, rüzgarlar, kısıtlı görüş) ile başa çıkabilir ve bu da, sistemlerin çok yönlülüğünü ve geniş kullanım alanını sağlamaktadır (Xiufeng ve diğ., 2012). Simülasyon kullanıcıları, bir grafik kullanıcı arayüzü (GUI) aracılığıyla gemi makine güçlerini, dümeni, baş-kıç iterlerini, diğer gemi sistemlerini ve römorkörlerini ayarlayabilir. Ayrıca, ortamı değiştirerek (dalga yönleri, akıntılar, rüzgarlar), farklı gemi ve çevre kombinasyonları oluşturabilirler. Bu şekilde öğrenme süreci çok daha gerçekçi hale gelir (Luo ve diğ., 2014). Gemi simülasyonları, bir gemiyi veya römorkörü deniz yüzeyinde yüzen rijit bir cisim olarak ele alır. Şekil 1.14'te gösterilen gemilerin veya römorkörlerin hareketleri, pitch (daldırma), heave (yükselme), roll (yanal dönme), surge (ilerleme), sway (yana hareket) ve yaw (dönme) olmak üzere altı serbestlik derecesine ayrılır. Bu hareketler hem deniz dalgaları tarafından hem de pervaneler, dümenler, akıntılar ve rüzgarlar gibi etkenler tarafından tetiklenir (Sandurawan ve diğ., 2011).



Şekil 1.14 : Geminin veya römorkörün altı serbestlik derecesi (de Winter ve diğ., 2019).

Kısacası simülasyonlar, gerçek dünya koşullarını taklit eden sanal ortamlarda yapılan hesaplamalar veya deneylerdir. Simülasyonda yapılan gemi hareketleri gerçeğe ne kadar olarak programlanırsa sonuçları da o kadar gerçeğe yakın olmaktadır. Denizcilik sektöründe de en çok kullanılan simülasyonlar köprüüstü ve makine simülasyonlarıdır. Köprüüstü simülasyonu, kullanıcıların gemi manevralarını gerçeğe en uygun şekilde gerçekleştirebilmelerini sağlar. Gerçekçi bir şekilde tasarlanmış bir köprüüstü simülasyon programı ile birçok senaryo ve uygulama yapılabilir. Bunlar arasında liman modellemeleri, yakıt harcamaları, sefer optimizasyonları, risk değerlendirmeleri, manevra becerilerinin geliştirilmesi, yoğun trafik durumları ve çatışma senaryoları yer alır. Ayrıca, kılavuz kaptan yeterlilik ve yenileme eğitimleri,

gemi teknik verimlilik analizleri, römorkör eğitimleri ve değişik tip römorkörlerin kullanımı gibi birçok eğitim de simülasyonlar aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Simülasyonlar, denizcilik personelinin eğitimini ve yetkinliğini artırarak denizcilik operasyonlarının güvenliğini ve verimliliğini büyük ölçüde geliştirmektedir (Mizythras ve diğ., 2017; Ni ve diğ., 2020). Simülatör tabanlı eğitimde kullanılan simülatörlerin belirli standartlara uygun olması gerekmektedir. Bu standartlar, simülatörün eğitim hedefleriyle uyumlu olması, gemi ekipmanını gerçekçi bir biçimde simüle etmesi ve yeterli davranışsal gerçekçilik sunmasıdır. Ayrıca, acil durum gibi farklı koşulları yaratabilme yeteneği, kullanıcıların simüle edilmiş ortamla etkileşimde bulunabilmesini sağlayan bir arayüz sunması ve eğitmenlerin uygulamaları kontrol edip kaydedebilmesi de önemlidir. Simülasyonun sahip olması gereken yeterliliklerle ilgili kurallar, IMO tarafından yayımlanan "STCW Code" içerisinde yer almaktadır. Navigasyon ve vardiya tutma simülasyon ekipmanları, "STCW A-I/12" bölümündeki performans standartlarını karşılamalı ve kabul edilen navigasyon ekipmanı ile köprüüstü standartlarını simüle edebilmelidir. Simülasyon, gerçek zamanlı bir ortam oluşturmalı, gece-gündüz görselliğini belirgin bir şekilde sunabilmelidir (Malabanan ve Dela Cruz, 2021). Açık deniz koşullarında gemi hareketlerini (yalpa, baş-kıç, hız azalması ve diğ.), hava durumunu (akıntı, rüzgar, yağmur, kısıtlı görüş ve diğ.) ve diğer gemilerle/dar kanallarla etkileşimi (interaction, bank emmesi, bank püskürmesi ve diğ.) simüle etmelidir. Ayrıca, gemi ile kıyı arasındaki VTS iletişim prosedürlerini içermelidir. Kısacası bir gemide ne yapılıyorsa bütün olanakların, köprüüstü simülasyonunda da uygulanabilmesi gerekmektedir. Gemi kullanımı ve manevra simülasyonları, köprüüstünden görülebilen gerçeğe yakın senaryolar sunarak denizdeki tüm şartları doğru bir şekilde yansıtmalıdır. Denizcilik simülatörleri, performans kapasitelerine göre üç ana sınıfta değerlendirilir. "Class A (full mission)" simülatörleri, en üst düzey performans özelliklerine sahip olup karmaşık ve detaylı senaryoların simülasyonunu sağlar. Örneğin, köprüüstünde yapılan gemi manevraları tüm detaylarıyla bu simülatörlerde canlandırılabilir. "Class B (multi-task)" simülatörleri ise orta düzey performans sunarak, daha genel operasyonel süreçleri simüle eder. Bu sınıf, radardan ve gözle mevkii koymanın karşılaştırılmasının simülasyona uyarlanması gibi işlemler için uygundur. En temel düzeyde performans özelliklerine sahip olan "Class C (limited task)" simülatörleri, daha basit eğitim ve uygulamalar için kullanılır. Örneğin, GPS arızasında belirli aralıklarla radardan ve gözle mevkii koyma gibi işlemler bu simülatörlerde gerçekleştirilebilir. Ayrıca, özel

görevler için kullanılan “Class S (special tasks)” simülatörlerinde performans, her bir durumun gerekliliklerine göre ayarlanır; örneğin, radarda mevkii koymayı zabitlere öğretmek gibi durumlar bu sınıf için uygundur (IMO, 2012).

Çalışmada kullanılan simülatör, en üst düzey performans özelliklerine sahip olan "Class A" tipi bir simülatördür. Bu simülatör, tüm senaryoların gerçeğe en yakın koşullarda uygulanması amacıyla çalışmaya büyük fayda sağlamış olup, akademik analizlerin yüksek doğrulukla yapılmasına da olanak tanımaktadır. Senaryoların gerçekleştirilmesinde, Det Norske Veritas (DNV) Class Kuruluşu tarafından onaylanmış olan Transas NTPRO 5000 full-mission köprüüstü simülatörü kullanılmıştır. Transas NTPRO 5000 simülatörü, denizcilik eğitimlerinde gerçekçi ve kapsamlı bir deneyim sunmak için yüksek çözünürlüklü görsel kalite ve 360 derece görüş açısına sahiptir. Gelişmiş hidrodinamik modelleme sayesinde rüzgar, akıntı ve dalgaların etkilerini gerçekçi bir şekilde simüle eder; gemi hareketleri ve etkileşimlerini matematiksel modellemelerle gerçeğe en yakın hale getirmektedir.

1.3 Literatür Taraması

Schaub ve diğ. (2019), liman bölgelerinde oldukça yoğun olan PM emisyonlarını incelemiştir. Veri tabanlı bir modeli, hızlı model simülasyonuyla birleştirerek, özellikle gemi manevraları esnasında enerji verimli ve emisyon açısından daha çevreci bir operasyon sağlamak amacıyla insan etkisiyle bu unsurların iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada iki farklı makine tipi kullanılmıştır. Çalışma yapay sinir ağı (ANN) tabanlıdır ve makinelerin farklı yüklerde ürettikleri PM verilerini hesaplamayı amaçlar. Çalışmanın uygulama kısmında, öğrencilere farkındalık amaçlı olduğundan ve daha sonraki çalışmalarla çıkarımların arttırabileceğinden bahsedilmektedir. Çalışmada diğer emisyonları hesaplamak için bir çalışma yapılmamıştır.

Finger ve diğ. (2020), yaptıkları çalışmada yakıt tüketimini ve buna bağlı emisyonları azaltmayı hedeflemiştir. Çalışmada sadece bir adet feribot tipi gemi kullanılmıştır. Yaklaşım seçilen geminin dinamik hareket davranışını ve makinesinin termodinamik süreçlerini birleştiren iki modelden oluşmaktadır. Bir yazılım programıyla dinamik hareket davranış ve termondinamik süreç analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla gemi manevralarında optimum emisyon değerleri için bir çıkarım elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen manevra izi feribottaki elektronik haritaya yüklenmiş ve köprüüstü takım yönetimi ekibinden buna yakın bir manevra yapmaları beklenmiştir.

Benzer manevrayı yerine getirmek için elektronik haritadaki önceden hareket tahmini (ship movement prediction) modundan faydalanılmıştır ve emisyonların düştüğü gözlemlenmiştir.

Trodden ve Haroutunian (2018), gemi manevralarının NO_X oluşumuna etkilerini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Yakıt tüketiminden emisyon hesaplamak yerine, kimyasal kinetik hesaplamalarla uyumlu hale getirilmiş sayısal makine modeli ile bir emisyon faktörü geliştirilmiştir. Sakin suda, geminin düşük hızda ve tasarım hızında ilerleyerk bir NO_X emisyon faktörü oluşturulmuştur. Ayrıca, köprüüstü ve makine simülatörleri aracılığıyla kimyasal kinetik çözümler kullanılarak sabit olmayan NO_X emisyonları da hesaplanmıştır. Sabit ve sabit olmayan emisyon verileri karşılaştırılarak bir formül elde edilmiştir. Sabit bir şekilde ilerleyen bir gemi için oluşturulan NO_X formülünün, değişken manevra hareketlerinin olduğu bir gemiyle kıyaslandığında, elde edilen sonuçların farklı olabileceği ve bu durumun yanıltıcı olabileceği ifade edilmiştir. Bu durum, NO_X emisyonlarının manevra esnasında, stabil halden çok farklı olabileceğini göstermiştir.

Chu-Van ve diğ. (2019), manevra esnasında iki büyük gemiye ait PM ve diğer emisyon faktörlerini incelemiştir. Yakıt olarak aynı sülfür seviyesinde ve benzer özelliklerde HFO kullanan bu iki geminin emisyon değerleri, manevra koşullarının okyanus seyir koşullarına kıyasla daha yüksek salınıma yol açtığını ortaya koymuştur. İki gemi arasında bir kıyaslama yapıldığında, PM emisyon miktarlarında farklılıklar bulunmuştur; bu farklar, örnekleme konumu ve makine özelliklerindeki (gemi yaşı, teknik özellikleri, bakım-tutum kondüsyonu, farklı makine özellikleri) farklılıklardan kaynaklandığı varsayılmıştır. Tabi ki daha fazla yakıt tüketimine neden olan makine yükü de bu durumu etkilemiştir. Sonuç olarak limanların bulunduğu bölgelerde gemi kaynaklı emisyonların daha yoğun olduğu belirtilmektedir.

Paulauskas ve diğ. (2020), liman alanlarında insan unsuru kaynaklı gemi emisyonlarını azaltmaya dair bir metod geliştirmeye çalışmışlardır. Araştırma, limanlardaki gemilerin emisyonları üzerinde gemi kaptanlarının ve kılavuz kaptanların niteliklerinin etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Özellikle manevra sırasında, sorumlu kişinin niteliğinin bu emisyonları ne ölçüde azaltabileceği araştırılmaktadır. Litvanya'da bir limanda vaka çalışması üzerine yapılan çalışmada, standart LNG tankerinin liman alanından LNG terminaline kadar olan hareketleri incelenmiştir. Gerçek veriler kayıtlı gemi ekipmanlarından alınmış, ayrıca GPS ve AIS verisiyle

doğrulanmıştır. Kontrol amaçlı olarak da aynı manevra aynı koşullar altında 10 operatöre (tümü kılavuz kaptan değil) simülasyonda tekrar ettirilmiştir. Farklı yakıt tipleri de araştırmaya eklenmiş, LNG kullanımının emisyonları azaltığı görülmüştür. Çalışma bir gemi üzerinden gerçekleştirilmiş olup, çalışma sonuçları; gemi kaptanlarının ve kılavuz kaptanların niteliklerinin emisyon hacmini %12,5 veya daha fazla azaltacak şekilde etkileyebileceğini göstermektedir.

Bal Beşikçi ve diğ. (2016), geminin farklı operasyonları için yakıt tüketimini yapay sinir ağı (ANN) ile tahmin etmek ve emisyon azaltımı için ANN tabanlı bir yakıt tahmin modeli içeren bir karar destek sistemi (DSS) geliştirmeyi amaçlamıştır. Tek bir tankerin 233 gün boyunca öğle raporu bilgileri yakıt verilerini elde etmek için toplanmış, ayrıca günlük raporlarından geminin demir, manevra, liman, drift ve seyir süreleri hesaplanmıştır. Geminin yakıt hesabı için hız, RPM, draft, trim, yük miktarı, rüzgar ve deniz durumu bilgileri de dahil edilmiştir. Bu verilerle gemi hızının, trim ve draftların, hava ve deniz koşullarının yakıt harcamaları üzerindeki etkisini hesaplayan bir karar destek sistemi ortaya çıkarmak amaçlanmıştır. Geliştirilen DSS, iki farklı senaryo için test edilmiş ve gemi işletmecilerinin sefer planı yaparken yakıt tasarrufu ve hava kirliliği açısından karar vermelerine yardımcı olacağı sonucuna varılmıştır.

Johnson ve Styhre (2015), kısa mesafe deniz taşımacılığında limanda geçen sürenin azaltılmasıyla hava kirliliği yaratan emisyonların azaltılabileceğini söylemektedir. 2 geminin 1 yıllık verilerini (sefer özetleri ve SOF) toplamış ve liman süresinin bu sürenin %40'ını bulduğunu, bunun da yarısının boşta geçen süre olduğunu tespit etmiştir. Boşta geçen liman süresini de seyir esnasında hız azaltımı yaparak değerlendirmeyi ve bu yolla da enerji verimliliği sağlamayı hedeflemişlerdir. Boşta geçen sebeplerden birisi olarak ise pilot bekleme süresi tespit edilmiştir. Hız azaltmayla %2-%8 arası bir verimlilik sağlanmıştır.

Tacar ve diğ. (2020), gemiye monte edilen gate rudder tipi bir dümen sisteminin, gemiye sağladığı enerji verimliliği avantajını bulmayı hedeflemiştir. Bu pervane sistemi, gemide bir kıç iter gibi paralel olarak hareket etmeyi sağlamakta ve manevra kabiliyetini artırmaktadır, fakat çalışmada buna odaklanılmamıştır. Çalışma, %20-%30 arası bir enerji verimliliği kazanımı hedeflemiştir. Testler, 5 metrelik model gemi üzerinde gerçekleştirilmiş ve seyir esnasında gate rudder tipi dümenler ile konvansiyonel dümenlerin performansı karşılaştırılmıştır. CFD analizleri de çalışmada kullanılmıştır. 15 knot hızla seyreden bir gemide, dümenlerin sürtünmeye bağlı

oluşturduğu direnç ve gemiyi durdurmak için gereken tornistan gücü bakımından gate rudder sistemi daha az enerji ihtiyacı göstermiştir. Sonuç olarak, gate rudder sistemi gemi performansında sağladığı avantajlarla enerji verimliliğini artırmaktadır. Ancak çalışmada, dümenin manevradaki enerji verimliliği ayrıntılı incelenmemiştir.

Bacalja ve diğ. (2020), belirli bir hatta çalışan gemilerin manevralarında ve limanda bağlı bulunduğu sürelerdeki emisyonların azaltılmasına yöneliktir. Belli bir limana yanaşan gemilerin 3 yıl boyunca verilerini analiz edip emisyonlarını incelemiş ve azaltmayı amaçlamışlardır. Özellikle CO_2 üzerine yoğunlamış ve diğer emisyonların CO_2 ile lineer arttığını kabul etmiştir. Kalış süresine bağlı olarak limanda bağlı iken geminin emisyon oranının çok fazla olduğu tespit edilmiştir. Emisyon oranları diğer limanlarla karşılaştırılmış ve daha düşük bulunmuştur. Çalışmada emisyonları azaltmaya yönelik bir öneri sunulmamaktadır.

Winnes ve Fridell (2010), popülasyon açısından yoğun olan liman bölgelerinde yapılan manevra esnasındaki PM ve NO_X emisyonlarına dikkat çekmek istemiştir. Biri tanker diğeri feribot (4 makineli, SCR sistemi mevcuttur) olmak üzere ana makine emisyon ölçümleri manevra esnasında gemi üzerinde yapılmıştır ve manevranın PM ve NO_X emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Makine dairesi en üst katında baca üzerinden yapılan ölçümlerde, NO_X miktarları değişkenlik göstermektedir. Her ne kadar manevra sırasında oluşan emisyon, tam yolla seyir haline göre düşük olsa da SCR kullanımında durumun tersine döneceği düşünülmektedir (çalışmada SCR sistemi manevrada kullanılamamıştır). PM emisyonları manevra esnasında genel olarak yüksek seviyededir fakat makine stop edildiğinde veya bunun tam tersi durumda, PM konsantrasyonun maksimum seviyeye çıktığı görülmüştür.

Schubert ve diğ. (2020), manevra esnasındaki yakıt tüketimini optimize etmek için gemi otomasyonunu kullanmışlardır. Manevra esnasındaki davranışı en çevre dostu hale getirmek için manevrayı yapan kişilerden faydalanılmıştır. Geminin manevra esnasındaki hareketleri ve makine komutları manuel olarak incelenmiş daha sonrasında simülasyonda kontrolü sağlanmış ve otomasyona taşınmıştır. Manevrayı yapan kişiye "Rapid Advanced Prediction and Interface Technology (RAPIT)" adlı manevra asistan sistemi (MAS) ile yardımcı olunmuş buna manuel yapılan manevra planı (RAPIT ve plan birarada) eklenmiş, manevra verimliliği bu şekilde ölçülmüştür. Planlanan ve başarılı olan bir manevra insansız şekilde yapılan bir manevraya dönüştürülmeye çalışılmış, gelişmeler simülasyon üzerinde takip edilmiştir. Bu

çalışma, gemi manevrasını otomatikleştirmek için kademeli bir yaklaşımı benimsemiş ve eğitim, makine modelleri, planlama araçları ve kontrol yapılarının geliştirilmesi gibi çeşitli bileşenleri bir araya getirmiştir. Manevra asistanının tek başına emisyonların azaltımına yardımcı olduğu görülmüştür. İnsansız yapılan manevralara da tecrübeli kişilerin refakat etmesinin daha doğru olacağı belirtilmiştir.

Yalçın ve diğ. (2023), liman yaklaşımları esnasında gemilerin manevralarını optimize etmek için karar destek sistemi (DSS) geliştirmek istemişlerdir. Çalışmada gemi ve çevresel etkenler dahil edilmiş ve manevra sürelerini kısaltmak amaçlanmıştır. İki konteyner gemisi üzerinden Gemlik limanına yapılan manevralarda makine komutları ve teknik bilgiler kaptanlar ve kılavuz kaptanlar tarafından sağlanmış, römorkör kullanım bilgileri ise römorkör kaptanları ve mühendisleri tarafından toplanmıştır. Ayrıca, AIS bilgileri ve meteorolojik bilgiler de bu süreçte kaydedilmiştir. Çalışmada, "Goal Programming Integrated Ship Maneuvering" (GPISM) modeli kullanılmıştır. Bu model, geminin hızını ve manevra komutlarını optimize etmek için kullanılan matematiksel bir modeldir. Elde edilen gerçek ve empirik veri karşılaştırılmış ve optimizasyon yapılan değerle manevra süresinin kısaltıldığı tespit edilmiştir. Çalışmada emisyonlara dair bir bilgi sunulmamıştır.

Sang ve diğ. (2023), yakıt kullanımına bağlı olarak çeşitli operasyonel koşullarda sefer optimizasyonunu hedeflemiştir. 38,800 DWT'lik bir gemi ile 32 deniz mili kıyı seferini, 24 farklı durum kombinasyonunda simülasyon ortamında gerçekleştirmiş ve her durum için yakıt hesabı yapılmıştır. Simülasyonda gemiyi yaratmak için gerçek geminin tersanede yapılan makine deneme testleri ve seyir deneme verileri kullanılmıştır. Bu verilerin simülasyona yerleştirilmesiyle %5'i geçmeyen hata payı ile doğruluğu ispatlanmıştır. Ayrıca, gemi tersanede üretildiği zaman yapılan bu testlerin, geminin yaşlandıkça kondisyonunun kötüleşebileceği gerçeği çalışmada göz ardı edilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları şu şekildedir: Hava koşulları müsait olduğunda sakin manevra (ardarda makine komutları vererek gemiyi hızlı bir şekilde ataletlendirmek veya yavaşlatmak) yapmanın sadece emniyeti değil, aynı zamanda yakıt tüketimini de olumlu yönde etkilediği, gemi makine sürati ile gemi çalışma süratinin uyumlu olması ve aralarındaki farkın olmaması sayesinde maksimum makine verimi sağlanacağı vurgulanmaktadır. Çalışma sadece bir gemi üzerinden gerçekleştirilmiş ve birçok faktör göz ardı edilmiştir.

Murcia González (2021), romörkörlerin emisyon oranlarını azaltmak amaçlı yaptığı çalışmada bottom up metodolojisini kullanmış olup, her biri 2 makineye sahip 7 römorkörün 407 adet hareketini incelemiştir. Römorkörlerin teknik özellikleri toplanmış, gerçek zamanlı AIS bilgisi alınmış ve emisyon faktör hesabı IMO'nun internet sayfasından alınmıştır. Çalışmada romörkörlerin sadece ana makine kullanımlarına bağlı emisyonlar hesaplanmış olup, yardımcı makinelerin çok küçük olması ve limanda bağlıyken sahil elektriği kullanmaları bunda en önemli etkenlerdir. Her manevra için römorkörlerin ne kadar çalıştığı kaydedilmiş, römorkörün o manevra özelinde hangi yükte çalıştığı bilgisi ise kılavuz kaptanlardan elde edilmiştir. Bu bilgi kılavuz kaptanın kaydettiği bir bilgi olmayıp, kılavuz kaptan bu bilgiye sadece geçmişe dönük tahminde bulunarak erişebilmiştir. Manevrayı adımlara bölerek, bir başlangış/bitiş noktası belirlemiş ve bu şekilde yakıt verilerine ulaşmaya çalışmıştır. Daha sonra emisyonları hesaplamış ve emisyonları nasıl azaltacağını araştırmıştır. Bulunan emisyon azaltım yöntemleri: Römorkörün manevra esnasında %42'lik zaman diliminde boşta beklediği ve bu süreçte tek makine çalıştırılmasının enerji verimliliği sağlayacağı, gemi hızının azaltılmasına bağlı olarak emisyonların ve yakıt tüketiminin %25 oranında azaltılabileceği, liman manevralarında daha küçük römorkörlerin yettiği ve bunların daha az emisyon yaydığı tespit edilmiştir. Ayrıca gelecek çalışmalarda, emisyonların azaltılması için römorkör makinelerinin teknik olarak geliştirilmesi hususunda öneriler verilmiştir.

Artyszuk ve Zalewski (2021), gemi manevralarında kullanılan baş ve kıç iterlerin optimizasyonuyla enerji tasarrufu sağlama konusunu ele almaktadır. Genelde gemilerde kullanılan baş iter ve kıç iterlerin kontrolü 2 (%50-%100 vb.) veya 3 (%30-%60-%100 vb.) kademeli butonlarla yapılmaktadır. Çalışmada, kademeli sistemin enerji kaybına yol açtığı ve yüzdelik olarak çalışabilen bir joystick sisteminin faydalı olabileceğinden bahsedilmektedir. Araştırmada tam donanımlı köprüüstü simülatörü kullanılmıştır. 18 liman manevrası iki pervaneli RoPax gemisi ile yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre, joystick kontrolü ile yönetilen liman manevralarında, kademeli sistem kontrolüne göre yaklaşık %10 enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmektedir.

Jensen ve diğ. (2018), tam donanımlı köprüüstü simülatöründe eğitim bazlı enerji verimliliği araştırması yapmıştır. İnsan faktörünün yanı sıra teknik konular da ele alınmış, farkındalığın artırılmasının yanında düşünme-harekete geçme fırsatı tanınması ile katılımcılar yaklaşık %10 enerji verimli operasyonlar gerçekleştirmiştir.

Çalışmada 6 kişi seçilmiş olup, bu kişiler mesleğin henüz başında olan ve 12 aylık deniz stajını tamamlamış öğrencilerdir. Katılımcıların tabularının olmaması ve yeni bilgiye açık olmaları düşünülerek bu seçim yapılmıştır. Çalışma 8 aşamaya bölünmüş ve öğrencilerin ilerleyen kısımlarda hem güvenli hem de enerji açısından optimize edilmiş manevralar yapabildiği belirtilmiştir.

Bassam ve diğ. (2015), simülatör kullanımı ile enerji verimliliği değerlendirmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, IMO tarafından önerilen üç temel önlem olan sefer optimizasyonu, hız azaltımı ve hibrit elektrik gücü ile tahrik konseptlerinde yakıt hücrelerinin kullanımı ele alınmaktadır ve sayısal simülasyonlar kullanılmıştır. Hız azaltmanın yakıt tasarrufu sağladığını fakat bunun da bir limiti olduğunu, yakıt hücreleri için de MATLAB benzeri sayısal simülasyonların artması gerektiğinden bahsetmiştir. Çalışmada manevra ve köprüüstü simülasyonu incelenmemiştir.

Papanikolaou ve diğ. (2015), EEDI gereklilikleri nedeniyle gemi makinelerine gelen kısıtlamaların gemi manevra gücünde azalmaya neden olabileceği ve bunun da emniyetsiz durumlar oluşturabileceğini belirtmişlerdir. Gemi tahrik sistemlerinin gücünün azaltılması dümen kabiliyetinin azalmasına yol açar ki bu durum, gemilerin en çok kötü hava koşullarında, liman yanaşma ve kalkış manevralarında sıkıntı yaşamasına neden olur. “Energy Efficient Safe Ship Operation (SHOPERA)” adlı Avrupa Birliği projesini de bu minvalde incelemişlerdir. Bu proje, gemi manevra yeteneklerini ve emniyetini artırmaya yönelik uygun yöntemler, araçlar ve kılavuzlar geliştirmeyi amaçlamaktadır. Veri toplama sürecinde kaza raporlarından yararlanılmış, 50 gemi kaptanı ile görüşmeler gerçekleştirilmiş, literatür taramasında elde edilen gemi ve makine bilgileri incelenmiş ve sayısal modellemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda kazaya en yatkın gemi tipi genel kargo sonrasında Ro-Ro gemileri olmuştur. Ro-Ro kazaları ise genelde liman bölgelerinde olmuştur. Çalışmada emisyona dair veri paylaşılmamıştır.

Guo ve diğ. (2017), EEDI gereklilikleri nedeniyle gemi makinelerine gelen kısıtlamaların, özellikle kötü hava koşullarında gemi manevra kabiliyetinde azalmaya neden olabileceğini ve bunun gemi için emniyetsiz durumlar oluşturabileceğini belirtmektedir. Bu nedenle araştırmacılar, kötü hava koşullarında gemilerin minimum manevra kabiliyetini araştırmaları gerektiğini vurgulamaktadır. Bu doğrultuda “Waqum” adlı bir yazılım oluşturulmuştur. Bu yazılım, belirli zaman aralığında gemi hareketlerini simüle ederek gemi manevra kabiliyetini kötü hava koşullarında test

etmektedir. Yeni bir gemiyi simülasyona eklemek için bazı kuvvet bileşenleri önceden hesaplanmaktadır. CFD modülü ile geminin tüm kuvvet bileşenleri incelenmekte ve zamana dayalı Waqum programıyla veriler elde edilmektedir. Gemi manevraları sırasında farklı kuvvet bileşenlerinin (rüzgar, dalga, dümen, pervane, makine) birbirleriyle etkileşimi ve bu etkileşimlerin gemi manevra kabiliyeti üzerindeki etkileri sakin ve dalgalı havada detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada üretilen programın gelecek çalışmalar için iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmakta olup, emisyon değerleri incelenmemiştir.

Zaraphonitis ve diğ. (2016), yukarıda verilen 2 çalışmanın konusu olan kötü hava koşullarında makine gücünün azaltılması üzerine çalışmışlardır. Küçük bir Ropax gemisi üzerinde yapılan çalışmada EEDI gerekliliklerine uyumun zor olduğundan, tier III gerekliliği olarak ise gemi hızının yaklaşık 2 deniz mil azaltılması gerektiğinden ve bunun da manevra karakteristiğini büyük ölçüde etkileyeceğinden bahsetmiştir. Çalışmada, düşük hızın olumsuz sonuçları arasında, kötü hava koşullarında gemi stabilitesinin bozulması ve manevra yeteneğinin azalması gibi risklerin altı çizilmiştir.

Ay (2020), İstanbul Boğazı'ndan geçen ticari gemilerden kaynaklanan emisyonları incelemiştir. Çalışmasında, 2010-2017 yılları arasında boğazdan geçen gemi verileri devlet otoritesinden alınmış, ENTEC ve EPA metodolojisi birlikte kullanılarak emisyon değerleri hesaplanmıştır. Elde edilemeyen veriler olan 2018-2019 yılları için emisyon tahmini ise bir makine öğrenmesi metodu olan regresyona analiziyle tamamlanmıştır. Boğaz geçişi bir manevra sayılmasına rağmen gemi lineer olarak seyretmektedir ve çok fazla makine komutları ile hız ayarlaması yapılmamaktadır. Bundan dolayı manevra esnasındaki emisyon hesabı için örnek bir araştırma olamaz. Ayrıca veri üzerinden hesaplama yapılmış ve simülasyon üzerinde denemeler yapılmamıştır.

Paulauskas ve diğ. (2023), liman yaklaşımlarında ve kanal geçişlerinde mümkün olduğunca düşük süratle gitmenin emisyonları azaltacağını vurgulamaktadır. Fakat düşük süratle seyretmenin emniyet unsurlarını tehlikeye sokabileceğini belirtmiş olup, bunun için de emniyetli en düşük süratin saptanması için çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada gemilerin manevra kabiliyetlerini, yakıt tüketimlerini ve emisyonlarını optimize etmek amacıyla teorik ve deneysel veriler kullanılarak bir matematiksel model geliştirilmiştir. Simülatörde 2 farklı tip gemi üzerinde 20'den fazla kanal geçişi yapılmış, gemi hareketleri incelenmiş, gerçek verilerle karşılaştırılmış ve minimum

hız tespiti için matematiksel modele konmuştur. Manevra sırasında kılavuz kaptanların, gemi ve römorkör kaptanlarının beceri seviyelerinin değişken olduğunu ve bu becerilerin optimal gemi hızları ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca sığ suda manevra etkileri de takip edilmiştir. Bir geminin optimum hızı 8 knots çıkarken, diğerinin 5,6 knots çıkmıştır. Sonuç olarak optimal düşük hızın bulunmasının gemi emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür.

Zhang (2023) tezinde, iç su yollarında gemilerin enerji verimliliği ve manevra modellemesi üzerine çalışmıştır. Çalışmada gemi performans modeli geliştirme (ShipCLEAN-IWV) ve manevra modeli geliştirme (MMG Modeli) modüllerini iç su yollarına uyarlamaya çalışmıştır. İç su yollarında var olan sığ su etkisi ve bank etkisi gibi etkileri de incelemiştir. Otonom iç su yolu gemilerinin enerji verimliliği ve manevra performansının değerlendirilmesine yönelik bulgular etmeye çalışmıştır. Emisyon hesabı yapılmamış olup, liman manevrası üzerine bir veri yoktur.

Zoubir ve diğ. (2023), gemi personelinin enerji verimliliğine olan algı, duygu ve motivasyonunu daha iyi anlamak için bir çalışma yapmışlardır. Bunun için, gemi üzerinde 14 deniz çalışanı ile görüşmeler ve çevrimiçi olarak 74 deniz çalışanı ile DSS kullanılarak anketler gerçekleştirilmiştir. Personelin demografik bilgileri toplandıktan sonra, onlara enerji verimliliği konusunda engelleyici konular (emniyet kaygılar, yetersiz bilgi, karmaşık komutlar, zaman kısıtlamaları vs.), motive eden konular (çevre, destekleyici komutlar, şirkete fayda, azalan iş gücü yoğunluğu vs.), departmanlar açısından engelleyici konular (kiracı, şirket, liman otoritesi, gemi kaptanı, acente vs.) ve teknolojik yenilikler hakkında sorular sorulmuştur. Çalışmanın bulguları, mevcut politikaların personelin enerji verimliliği stratejilerine tam katılımını engellediğini ve bu durumun personelin strateji bilgisini geliştirmesini veya uygulamasını sınırladığını göstermektedir.

Literatür taraması sürecinde geniş bir çalışma yelpazesi incelenmiştir. Çizelge 1.5'te, yapılan literatür taramasının daha kolay anlaşılabilmesi için özet hali sunulmuştur. Metodolojik açıdan benzer çalışmalar bulunsa da literatür taramasında gemi ve römorkörün gerçek zamanlı ve simülasyon tabanlı manevraları sırasında emisyon değerlerini birlikte ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu doğrultuda, mevcut çalışma hem gerçek zamanlı hem de simülasyon tabanlı manevra süreçlerinde, gemi ve römorkörlere ait emisyon değerlerini entegre olarak inceleyerek literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Çizelge 1.5 : Literatür taramasına dair özet.

Yazar	Özet	Metod	Sonuç
(Schaub ve diğ., 2019)	Liman bölgelerinde PM emisyonlarını inceleyerek enerji verimli ve çevreci operasyon.	ANN tabanlı model	Emisyonları iyileştirici olası unsurlar tespit edilmiştir.
(Finger ve diğ., 2020)	Yakıt tüketimi ve buna bağlı emisyonları azaltmayı hedeflemiştir.	Dinamik hareket ve termodinamik süreç modelleri	Manevra izi optimizasyonu ile emisyonlar düşürülmüştür.
(Trodden ve Haroutunian, 2018)	Gemi manevralarının NOx oluşumuna etkilerini incelemiştir.	Kimyasal kinetik hesap uyumlu sayısal makine modeli	NOx emisyonlarının manevra esnasında stabil durumdan farklı olduğu görülmüştür.
(Chu-Van ve diğ., 2019)	İki büyük geminin PM ve diğer emisyon faktörlerini karşılaştırmıştır.	HFO kullanan gemiler üzerinde emisyon ölçümleri	Manevra koşullarının okyanus seyir koşullarına göre daha yüksek emisyona sahip olması.
(Paulauskas ve diğ., 2020)	Limanlarda insan unsuru kaynaklı gemi emisyonlarını azaltmayı hedeflemiştir.	Gerçek gemi, GPS ve AIS verileri ve simülasyon	Gemi kaptanlarının niteliklerinin emisyonları %12,5 oranında azaltabileceği bulunmuştur.
(Beşikçi ve diğ., 2016)	Yakıt tüketimi ve emisyon azaltımı için ANN tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir.	ANN tabanlı yakıt tahmin modeli ile DSS	DSS sistemi gemi işletmecilerinin yakıt tasarrufu sağlamasına yardımcı olmuştur.
(Johnson ve Styhre, 2015)	Liman süresinin azaltılmasıyla hava kirliliği yaratan emisyonları azaltmayı amaçlamıştır.	2 geminin 1 yıllık verileri ile MATLAB analizi	Hız azaltma ile %2-%8 arasında enerji verimliliği sağlanmıştır.
(Tacar ve diğ., 2020)	Gate Rudder dümen sistemi ile gemi enerji verimliliğini artırmayı hedeflemiştir.	5 metrelik model gemi üzerinde testler ve CFD analizleri	%20-%30 enerji tasarrufu sağlandığı belirlenmiştir.
(Bacalja ve diğ., 2020)	Manevralar ve limanda bekleme süresi boyunca gemi emisyonlarını azaltmayı hedeflemiştir.	3 yıllık veriler ile ENTEC metodolojisi	Emisyonlar, kalış süresine bağlı olarak yoğun bulunmuş ancak öneri sunulmamıştır.
(Winnes ve Fridell, 2010)	Manevra esnasında PM ve NOx emisyonlarını incelemiştir.	Gemiler üzerinde fiili emisyon ölçümleri	SCR sistemi kullanılmadığında manevra sırasında NOx ve PM emisyonları yüksek bulunmuştur.
(Schaub ve diğ., 2019)	Gemi manevralarını otomatikleştirmek için kademeli bir yaklaşım geliştirilmiştir.	RAPIT manevra asistanı ile manuel komutların simülasyona taşınması	Verimlilik artmış, emisyonlar azalmıştır. İnsansız manevralar için tecrübeli denetim önerilmiştir.
(Yalcin ve diğ., 2023)	Liman manevralarını optimize ederek süreyi kısaltmayı amaçlanmıştır.	GPISM modeli, AIS ve çevresel veriler ile manevra analizi	Optimizasyon ile manevra süresi kısalmış, emisyonlara dair bilgi sunulmamıştır.
(Sang ve diğ., 2023)	Yakıt tüketimini optimize etmek için farklı operasyonel durumlar incelenmiştir.	24 farklı operasyonel senaryo simüle edilerek yakıt tüketimi analizi	Hava koşulları ve makine süratinin optimizasyonu yakıt tüketimini olumlu yönde etkilemiştir.
(Murcia González, 2021)	Römorkör emisyonlarını azaltmak için analiz yapılmıştır.	AIS verisi ve bottom-up metoduyla 407 römorkör hareketi analizi	Boşta geçen süreyi azaltmak ve daha küçük römorkörler kullanmak yakıt tasarrufu sağlamıştır.
(Artyszuk ve Zalewski, 2021)	Gemi baş-kıç iterlerinin enerji tasarrufunu artırmaya yönelik optimizasyon yapılmıştır.	MATLAB/C++ ve köprü üstü simülasyonu	Joystick kontrolü ile %10 enerji tasarrufu sağlanmıştır.
(Jensen ve diğ., 2018)	Tam donanımlı köprüüstü simülatöründe eğitim bazlı enerji verimliliği araştırılmıştır.	Yakıt tüketimine bağlı karşılaştırma	Eğitimle operatörlerin yakıt tüketiminde %10'a kadar tasarruf sağlandığı tespit edilmiştir.
(Bassam ve diğ., 2015)	IMO'nun önerdiği üç önlem (sefer optimizasyonu, hız azaltma, hibrit güç) değerlendirilmiştir.	Sayısal simülasyonlar (MATLAB)	Belirli bir hızdan sonra verimlilik etkinliğinin düştüğünden, yakıt hücreleri sayısal simülasyonların artması gerektiği vurgulanmıştır.
(Papanikolaou ve diğ., 2015)	Gemi makinelerine gelen kısıtlamaların manevra kabiliyetine etkisi	Kaza raporları analizi, anket, sayısal modelleme	Emisyon kısıtlamaları nedeniyle manevra kabiliyetinin azaldığı görülmüştür.
(Guo ve diğ., 2017)	EEDI gereklilikleri nedeniyle kötü hava koşullarında gemi minimum manevra kabiliyeti incelenmiştir.	CFD modülü, Waqum yazılım simülasyonu	Belirtilen şartlarda manevra kabiliyetinde azalma gözlenmiştir.
(Zaraphonitis ve diğ., 2016)	EEDI gerekliliklerinin gemi manevra kabiliyetini nasıl etkilediği incelenmiştir.	Simülasyon, performans testi	Küçük gemilerde EEDI gerekliliklerinin manevra kabiliyetini kısıtladığı görülmüştür.
(Ay, 2020)	İstanbul Boğazı'ndaki gemi emisyonları ENTEC ve EPA metodolojileri ile incelenmiştir.	ENTEC ve EPA, makine öğrenmesi ile regresyon	Emisyonların SO2 ve CO_2 açısından yüksek seviyelerde olduğu saptanmıştır.
(Paulauskas ve diğ., 2023)	Liman yaklaşımlarında düşük hızda emisyon azaltımı incelenmiş, minimum hız tespiti yapılmıştır.	Teorik ve deneysel veriler, simülatör matematiksel model	Düşük hızda operasyonların PM ve NOx emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.
(Zhang, 2023)	İç su yollarında enerji verimliliği ve manevra modellemesi yapılmıştır.	ShipCLEAN-IWV ve MMG modelleri	Gemilerin manevra performans arttırımı ile yakıt verimliliği.
(Zoubir ve diğ., 2023)	Deniz çalışanlarının enerji verimliliğine olan algı ve motivasyonları incelenmiştir.	Anketler, görüşmeler, nitel veri analizi	Çalışanların yakıt tasarrufuna dair algılarının verimlilik üzerinde etkisi olduğu belirlenmiştir.

Çalışmanın temel amacı, kılavuz kaptanlar tarafından gerçekleştirilen gerçek manevra ve simülasyon manevrası esnasında gemilerden ve römorkörlerden elde edilen emisyon değerlerini "top-down" ve "bottom-up" metodolojilerini kullanarak hesaplamak ve bu değerleri karşılaştırarak anlamlı çıkarımlar elde etmektir. Gerçek manevralar tamamlandıktan sonra, aynı manevralar benzer koşullar altında köprüüstü simülasyon ortamında aynı kılavuz kaptanlarla tekrarlanmıştır. Manevralar sırasında emniyet unsurları açısından bir değerlendirme yapılmamış, sadece emisyon değerleri hesaplanmıştır.

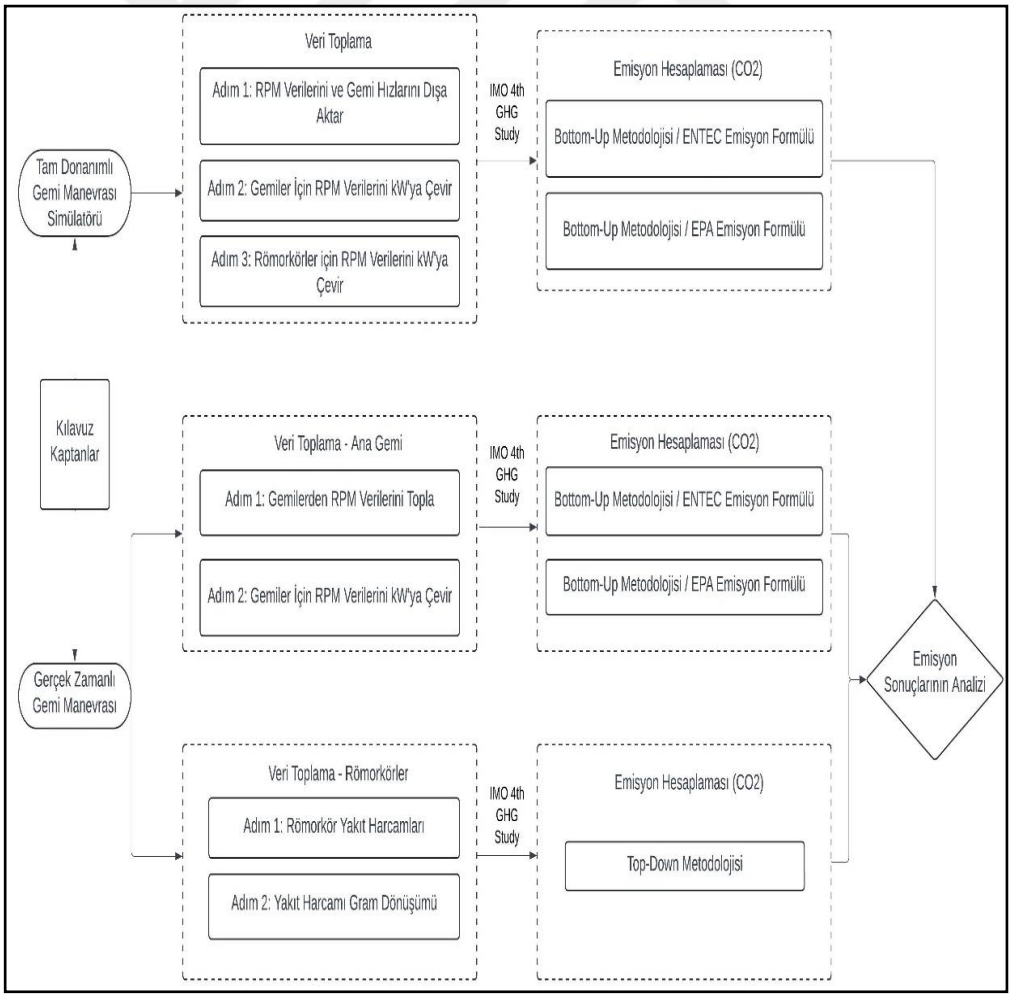
Literatür taraması, gemi ve römorkörün hem gerçek hem de simülasyon tabanlı manevraları sırasında emisyon değerlerini birlikte ele alan bir araştırmaya rastlanmadığını göstermektedir. Gerçek gemi manevralarının emisyon değerlerini hesaplamak için manevra sonucunda üretilen tüm gerekli bilgilere ulaşmanın zorluğu, simülasyonla karşılaştırma yapma fikrini doğurmuştur.

Araştırmada, altı kılavuz kaptan seçilmiş ve benzer özelliklere sahip üç gemi tipi grubunda icra edilen toplam 18 manevra aynı kılavuz kaptanlarla simülasyon ortamında da tamamlanmıştır. Emisyon değerleri yalnızca CO_2 odaklı olarak hesaplanmış ve karşılaştırma amaçlı analiz edilmiştir. Bulgular, gerçek ve simülasyonda yapılan manevralarda elde edilen emisyon değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. Ayrıca, gerçek manevralarda kılavuz kaptanlar arasında dakikada üretilen emisyon miktarının 4,52 kata kadar değişebildiği görülmüştür. Gerçek manevralara yakın emisyon sonuçları, simülasyonda emisyon değerlerinin gerçeğe yakın hesaplanabileceğini göstermektedir. Bu durum, kaptanların alışkanlıklarının emisyon değerlerine etkisini inceleme fırsatı sunmaktadır.

Bu bölümün devamı olan Bölüm 2'de, emisyon hesaplamalarında kullanılan "top-down" ve "bottom-up" yöntemleri ile kapsamı detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bölüm 3, manevra çalışmalarını içermekte olup, gerçek manevra ve simülasyon uygulamaları ile verilerin toplanması aşamaları anlatılmıştır. Bölüm 4'te emisyon hesaplamaları sunulmuş ve sonuçlar örnek hesaplamalarla metodolojiye uygun olarak değerlendirilmiştir. Bölüm 5'te tartışma ve sonuç verilmiş; çalışmanın bulguları, sınırlamaları ve karşılaşılan zorluklar ele alınmıştır. Sonuç kısmında ise çalışmanın ana bulgularının özeti, çıkarımlar ve gelecek çalışmalar açıklanarak çalışma tamamlanmıştır.

2. METODOLOJİ

Gemi ve römorkörlerin gerçek ve simülasyon verilerinin hesaplanmasında Şekil 2.1'de gösterildiği üzere farklı yöntemler kullanılmıştır. Gemilerin gerçek manevra emisyonlarının hesaplanmasında makine yükü (kW), römorkörlerin gerçek manevra hesaplanmasında ise her bir manevra için yakıt tüketimi verisi ile hesaplama yapılmıştır. Simülasyon verilerinin hesaplanmasında da gemi ve römorkörlerin makine yükleri kullanılarak hesaplama yapılmıştır. Römorkörlerden yakıt verileri, gemilerden ise manevra bazında makine telgraf komutları, pilot kartları ve makine yük değerlerini gösteren ilgili tablolar toplanmıştır. Simülasyon verileri ise saniye bazında tüm manevralar için ayrı ayrı uygun tablolara dökülmüştür.



Şekil 2.1 : Metodolojik akış diyagramı.

2.1 Gemi ve Römorkör Emisyon Hesaplama Süreci

Gemi ve römorkör emisyonlarının hesaplanabilmesi için gerekli verilerin belirlenmesi ve bu verilerle kullanılacak yöntemlerin tespit edilmesi gerekmektedir. En yaygın olarak kullanılan iki yöntem "top-down (yukarıdan aşağıya)" ve "bottom-up (aşağıdan yukarıya)" metodolojileridir. Gemi kaynaklı emisyonların tahmin edilmesinde kullanılan bu yöntemler, gemilerin farklı coğrafi bölgelerdeki hareketlerinden dolayı uluslararası emisyon envanterlerinin oluşturulmasını sağlamak amacıyla oluşturulmuşlardır. Bu yöntemlerin temel farkı, top-down metodolojisinin yakıt tüketimi verilerine dayalı hesaplamalar yapması, bottom-up metodolojisinin ise gemi ve römorkörlerin faaliyetlerini dikkate alarak toplam emisyonları hesaplamasıdır (Tai ve Chang, 2022).

ENTEC, TNO, STEAM (Gemi Trafik Emisyon Değerlendirme Modeli), Uluslararası Denizcilik Örgütü Emisyon Çalışmaları (IMO) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA) gibi emisyon tahmini sağlayan metodlar bulunmaktadır (Toscano ve Murena, 2019).

Emisyon tahminleri için ana olarak 3 referans kaynakçadan faydalanılmıştır. Bunlar;

- “Fourth IMO GHG Study 2020” (IMO, 2021),
- “ENTEC 2010”, UK Ship Emission Inventory Final Report (Whall ve diğ., 2010),
- “EPA 2020”, Ports Emissions Inventory Guidance: Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emissions (Environmental Protection Agency, 2020).

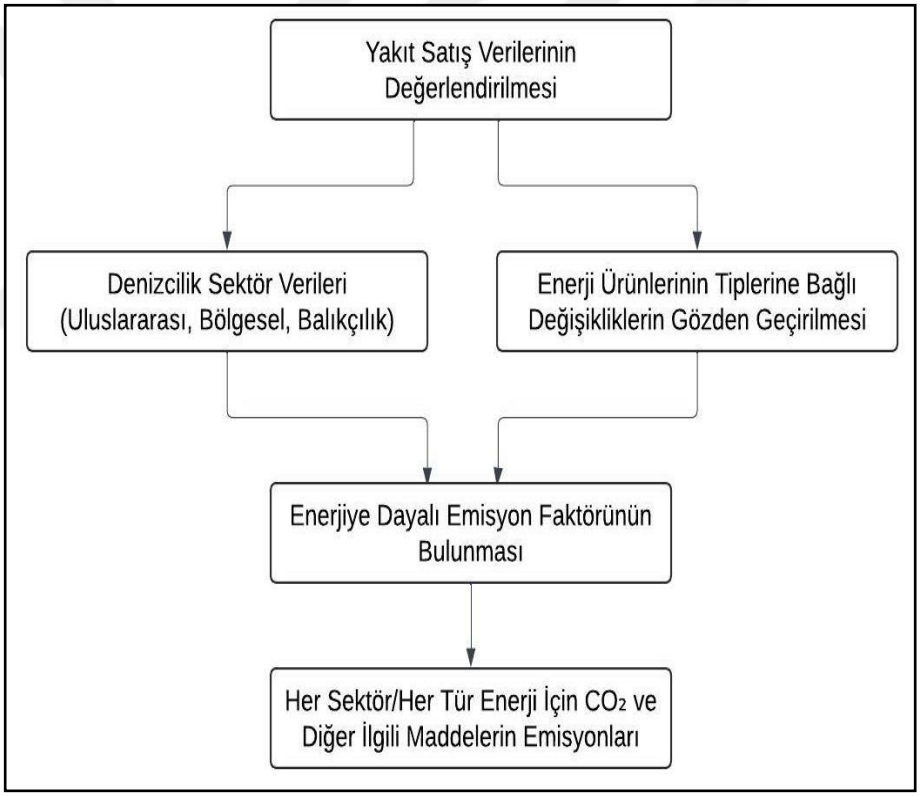
2.1.1 Top-down metodolojisi

Top-down yöntemi, esas olarak gemi tipi, makine tipi, seyir veya liman durumu, emisyon faktörleri ve gemilerin özgül yakıt tüketimine dayalı bir yakıt tüketimi hesaplamasına dayanmaktadır (Brown ve Aldridge, 2019).

Şekil 2.2’de akışı verilen bu metodoloji, esasen gemi ihrakiye satış kapasitesi ve ihrakiye cinsi ile birlikte ilgili emisyon faktörlerine dayanmaktadır. Gemilerin ve römorkörlerin ana makinesi ile yardımcı makinelerinin yakıt harcamlarına bağlı olarak sağlıklı bir emisyon faktörü çıkarmayı amaçlar. Bu emisyon faktörü ile gelecekteki çalışmalara kolaylık sağlamayı hedeflemektedir (Liu ve diğ., 2014).

Bottom-up metodolojisinde gemi trafik verilerine bağlı olarak bir küresel ve ulusal emisyon tahmini yapılmaktadır. Gemi izlerinin ve yoğunluğunun takip edilmesinin mümkün olmadığı yerlerde top-down metodolojisi kullanılmaktadır (Saputra ve diğ., 2013). Detaylı trafik verilerinin pratik olarak toplanmasının imkânsız olduğu durumlarda uygulanır (European Environment Agency, 2019).

Yakıt tüketimi, gemi yük kapasitesine dayalı olarak ortalama seyir mesafeleri ve limandaki ortalama zaman ile ilgili harcanan güce bağlı yakıt tüketim oranı kullanılarak tahmin edilebilir. Dünya genelindeki yakıt tüketimleri, ülkeler bazındaki yakıt satışları aracılığıyla tahmin edilmektedir. Alternatif olarak, gemilerin yakıt kullanımlarına ilişkin detaylı araştırmalar yapılarak da tahmin edilebilir (Eyring ve diğ., 2005).



Şekil 2.2 : Top-down metodolojisi (IMO, 2021).

GHG Study 2020" referans olarak alınmıştır. Litre bazında alınan yakıtın, Şekil 2.3'de gösterilen yoğunluk tabloasından alınan uygun yoğunlukla çarpılarak, ağırlık birimine çevrilmesi gerekmektedir (IMO, 2021).

Fuel type	Density
HFO (Residual fuel)	1.001 tonne/m^3 (mean)
MDO (Distillate fuel)	0.895 tonne/m^3 (mean)
LNG (Gas Boil off, LNG)	0.450 tonne/m^3
Methanol	0.790 tonne/m^3

Şekil 2.3 : Yakıt tiplerine göre yoğunluk tablosu (IMO, 2021).

Toplam emisyon değeri denklem 2.1'e göre, yakıt harcamı Şekil 2.4'de gösterilen tablodaki ilgili yakıtın emisyon faktör değeri çarpılarak hesaplanmaktadır (IMO, 2021).

$$\Sigma E = FC \ x \ EF \tag{2.1}$$

- FC: Yakıt harcamı
- EF: Emisyon faktörü

Pollutants	Fuel Type	The Fourth IMO GHG Study						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
CO_2	HFO	3,114	3,,114	3,114	3,114	3,114	3,114	3,114
	MDO	3,206	3206	3,206	3,206	3,206	3,206	3,206
	LNG	2,750	2,750	2,749	2,749	2,750	2,753	2,755
CH_4	HFO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	MDO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	LNG	5.31	6.00	7.35	8.48	10.20	11.22	11.96
N_2O	HFO	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
	MDO	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	LNG	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10
NO_x	HFO	78.61	77.18	76.19	76.98	76.71	76.67	75.90
	MDO	53.12	52.51	52.14	57.68	57.45	57.62	56.71
	LNG	5.60	5.90	5.82	5.99	7.46	10.95	13.44
CO	HFO	2.84	2.83	2.84	2.86	2.86	2.87	2.88
	MDO	2.48	2.47	2.47	2.58	2.58	2.60	2.59
	LNG	1.88	2.07	2.38	2.64	3.10	3.57	3.97
NMVOC	HFO	3.14	3.13	3.13	3.17	3.18	3.19	3.20
	MDO	2.16	2.15	2.15	2.39	2.39	2.42	2.40
	LNG	0.81	0.88	0.99	1.09	1.26	1.44	1.59
SO_x	HFO	46.63	44.80	45.31	47.90	50.44	50.83	50.83
	MDO	2.74	2.54	2.35	1.56	1.56	1.56	1.37
	LNG	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
PM	HFO	7.11	6.96	7.01	7.26	7.48	7.53	7.55
	MDO	0.97	0.96	0.94	0.92	0.92	0.92	0.90
	LNG	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
$PM_{2.5}$	HFO	6.54	6.41	6.45	6.68	6.88	6.93	6.94
	MDO	0.90	0.88	0.87	0.84	0.84	0.85	0.83
	LNG	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
BC	HFO	0.26	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26
	MDO	0.43	0.43	0.43	0.37	0.37	0.37	0.38
	LNG	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019

Şekil 2.4 : Top-down metodolojisinde tahmin için kullanılan emisyon faktörleri (IMO, 2021).

Top-down metodolojisinin temel dezavantajlarından biri, veri tutarsızlığıdır. Küresel ölçekte yakıt tüketim verileri, farklı ülkeler veya bölgelerden gelen bilgilere dayandığı için tutarsız olabilmektedir. Bu durum, sonuçların güvenilirliğini azaltır ve özellikle yakıt tüketimi ile ilgili tahminlerde hata payını artırır (Fuentes García ve diğ., 2022). Ayrıca, top-down yaklaşımı büyük ölçekli tahminler yaptığı için gemi operasyonlarının ayrıntılarına inmemektedir. Bu yöntem, gemi türleri, hareketleri ve liman operasyonları gibi kritik ayrıntılara dair daha az bilgi sunar, bu da spesifik analizler yapmak isteyenler için yetersiz olabilmektedir (Song ve Shon, 2014).

Top-down metodolojisinin daha sınırlı alanlarda bazı eksiklikleri mevcuttur. Ulusal veya küresel seviyede daha etkili olsa da yerel veya bölgesel emisyon tahminlerinde başarısız olabilmektedir. Bu yöntemde yakıt tüketim verilerinin eksikliği ve gemilerin rotaları, makine yükü, hızları gibi detaylı operasyonel bilgilerin bulunmaması doğru sonuçlar elde etmeyi zorlaştırmaktadır (Lee ve diğ., 2020). Ayrıca, varsayımlara dayalı olduğu için tahminlerde yüksek belirsizlik oluşabilmektedir. Özellikle yük faktörü, makine gücü ve limanda geçirilen süre gibi değişkenler dikkate alınmadığında tahminlerde büyük sapmalar ortaya çıkabilmektedir (Woo ve Moon, 2014). Bu sebeplerden dolayı son yıllarda araştırmacılar, bottom-up metodolojisi yoluyla elde edilen emisyon sonuçlarının gerçeğe daha yakın olduğunu savunmaktadır (Nunes ve diğ., 2017).

Bu çalışmada top-down metodolojisi, römorkörlerin gerçek manevralarda harcadığı yakıt verileri aracılığıyla emisyon hesaplama aşamasında kullanılmıştır. Genel bir yakıt bilgisi yerine anlık yakıt verisinin kılavuz kaptanlar aracılığıyla elde edilebilmesi, anlık olarak emisyon ölçümü gibi gerçeğe daha yakın emisyon değerlerine ulaşmamızı sağlamıştır.

2.1.2 Bottom-up metodolojisi

Top-down metodolojisi için güvenilir veri toplamanın zorlukları nedeniyle (örneğin manevra yapılan tüm gemilerden anlık yakıt verisi toplanması gibi), gemi ve römorkörlere ait özellikler (deplasman, makine bilgileri, kullanılan yakıt tipi, manevra bilgileri gibi) ile operasyonel kayıtlar (seyir süresi, seyir mesafesi, liman periyotları, manevra süresi, hava ve akıntı durumu) hakkında yeterli veri mevcut olduğunda bottom-up metodolojisi kullanmak daha doğru sonuçlar vermektedir (Chen ve diğ., 2024; Pekşen ve diğ., 2014).

Top-down metodolojisi gibi, bottom-up metodolojisi de Avrupa Çevre Ajansı (EEA) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından emisyon hesaplamasında önerilmektedir (Lee ve diğ., 2020). Bu metodolojide, gemilerin operasyonel her bir adımı (seyir, kanal geçişi, yanaşma-kalkış manevrası, liman periyotları, demirleme periyotları, drift gibi) detaylı bir şekilde takip edilmektedir. Her adım için ayrı ayrı emisyon hesaplaması yapılarak, toplam emisyon miktarı bu bireysel adımların sonuçlarının toplanmasıyla elde edilmektedir. Bu yaklaşım, her geminin faaliyetlerine dayalı daha kesin ve ayrıntılı emisyon verileri sağlar, böylece operasyonel süreçler boyunca farklı aşamalardaki emisyonlar net bir şekilde hesaplanabilmektedir (Miola ve Ciuffo, 2011).

Bottom-up yaklaşımının genel emisyon tahmini denklem 2.2'de verildiği şekilde ifade edilebilir (Lee ve diğ., 2021; Nunes ve diğ., 2017). Emisyon azaltım yönteminin olmadığı bir çalışmada, ENTEC metodolojisinde olduğu gibi, herhangi bir yakıt düzeltme katsayısı da kullanılmıyorsa, CF katsayısının kullanılmasına gerek yoktur.

$$E = Power \times EF \times CF \tag{2.2}$$

E: Emisyon miktarı
Power: Geminin veya römorkörün enerji ihtiyacı
EF: Emisyon faktörü
CF: Emisyon azaltım yöntemleri veya yakıt düzeltme katsayısı

Simülasyon ortamında yapılan yanaşma manevralarında gemi ve römorkör emisyon hesaplamalarında, aynı zamanda gerçek gemi manevralarının emisyon tahmini analizlerinde, bottom-up metodolojisinden faydalanılmıştır. Bu metodolojide sıklıkla tercih edilen ENTEC ve EPA yaklaşımları, gemi hareketlerine dayalı emisyon hesaplamaları açısından en güvenilir yöntemler arasında yer almakta olup, aralarındaki metodolojik farklılıklar aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır. ENTEC ve EPA tarafından sağlanan emisyon tahmini sonuçlarında oluşabilecek değişiklikleri dikkate alarak, daha dengeli ve isabetli bir sonuç elde etmek amacıyla bu iki yöntemin ortalamaları da hesaplanmıştır (El-Taybany ve diğ., 2019).

2.1.2.1 ENTEC metodolojisi

Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından ve birçok akademik çalışmada yaygın olarak kullanılan ENTEC metodolojisi, gemilerin operasyonel verilerini ve teknik

özelliklerini dikkate alarak emisyon miktarlarını belirlemeye odaklanmaktadır (Ekmekçioğlu ve diğ., 2020; Tokuslu, 2021).

Lloyds Maritime Intelligence Unit (LMIU) veritabanındaki gemi bilgilerinden yararlanan bu yöntemin genel amacı, 2000 yılından başlayarak 5'er yıl periyotlarla Avrupa ülkelerinde oluşan emisyon miktarını tahmin etmektedir. Emisyon kategorileri arasında SO_2, NO_X, VOCs, PM ve CO_2 yer almaktadır.

Bu yönteme ait denklem 2.3'e ve ilgili açıklamalara aşağıda yer verilmiştir (Whall ve diğ., 2010):

$$E(g) = T(h) \times [((ME(kW) \times LF(ME)(\%) \times EF(ME)(g/kWh)) + ((AE(kW) \times LF(AE)(\%) \times EF(AE)(g/kWh))] \quad (2.3)$$

- E(g): Toplam emisyon miktarı
- T(h): Gemi operasyon süresi
- ME (kW): Ana makine gücü
- LF(ME) (%): Ana makine yük faktörü
- EF(ME)(g/kWh): Ana makine emisyon faktörü
- AE (kW): Yardımcı makine gücü
- LF(AE) (%): Yardımcı makine yük faktörü
- EF(AE) (g/kWh): Yardımcı makine emisyon faktörü

Denklemde görüldüğü gibi, ana makine ve yardımcı makine emisyonları ayrı ayrı hesaplandıktan sonra toplam emisyon bulunmuştur. Bu nedenle, gemi ve römorkör hesaplarında bazı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Gerçek manevra esnasında, römorkörlerin emisyon hesabında "top-down" metodolojisi kullanılmış olup, elde edilen sonuçta ana makine ve yardımcı makine emisyonları toplam olarak hesaplanmıştır. Ancak simülasyonda yapılan manevralarda, römorkör hesaplamaları yapılırken yalnızca ana makine gücü alınabildiği için, manevra esnasındaki yardımcı makine gücünün belirlenmesinde "4th IMO GHG Study"de bulunan Şekil 2.5'deki tablodan faydalanılmıştır (IMO, 2021).

ENTEC metodolojisine göre emisyon faktörü, gemi ve römorkörler için aynı sayı olarak verilmiştir. Ana makine bazında emisyon faktörleri Şekil 2.6'da yardımcı makine bazında ise Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Whall ve diğ., 2010). Kullanılan yakıt tipi ve makine tipi girildikten sonra istenilen emisyon türüne göre emisyon faktörleri bu tablolardan bulunabilmektedir.

Ship Type	Size	Unit	Auxiliary Boiler Power Output (kW)				Auxiliary Engine Power Output (kW)			
			At berth	Anchored	Manoeuvring	Sea	At berth	Anchored	Manoeuvring	Sea
Ferry-pax only	0-299	gt	0	0	0	0	190	190	190	190
	300-999		0	0	0	0	190	190	190	190
	1000-1999		0	0	0	0	190	190	190	190
	2000-+		0	0	0	0	520	520	520	520
Cruise	0-1,999	gt	1,100	950	980	0	450	450	580	450
	2,000-9,999		1,100	950	980	0	450	450	580	450
	10,000-59,999		1,100	950	980	0	3,500	3,500	5,500	3,500
	60,000-99,999		1,100	950	980	0	11,500	11,500	14,900	11,500
	100000-149999		1,100	950	980	0	11,500	11,500	14,900	115,00
	150000-+		1,100	950	980	0	11,500	11,500	14,900	11,500
Ferry-RoPax	0-1999	gt	260	250	170	0	105	105	105	105
	2000-4999		260	250	170	0	330	330	330	330
	5000-9999		260	250	170	0	670	670	670	670
	10000-19999		390	380	260	0	1,100	1,100	1,100	1,100
	20000-+		390	380	260	0	1,950	1,950	1,950	1,950
Refrigerated bulk	0-1999	dwt	270	270	270	0	520	570	560	570
	2000-5999		270	270	270	0	1,100	1,200	1,150	1,200
	6000-9999		270	270	270	0	1,500	1,650	1,600	1,650
	10000-+		270	270	270	0	2,850	3,100	3,000	3,100
Ro-Ro	0-4999	dwt	260	250	170	0	750	430	1,300	430
	5000-9999		260	250	170	0	1,100	680	2,100	680
	10000-14999		390	380	260	0	1,200	950	2,700	950
	15,000-+		390	380	260	0	1200	950	2,700	950
Vehicle	0-9,999		310	300	250	0	800	500	1,100	500
	10,000-19,999		310	300	250	0	850	550	1,400	510
	20,000-+		310	300	250	0	850	550	1,400	510
Yacht	0-+	gt	0	0	0	0	130	130	130	130
Service - tug	0-+	gt	0	0	0	0	100	80	210	80
Miscellaneous - fishing	0-+	gt	0	0	0	0	200	200	200	200
Offshore	0-+	gt	0	0	0	0	320	320	320	320
Service - other	0-+	gt	0	0	0	0	220	220	220	220
Miscellaneous - other	0-+	gt	110	110	90	0	150	150	430	410

Şekil 2.5 : Gemi türü, boyutu ve moda göre yardımcı makine ve kazan güç çıktısı (IMO, 2021).

Engine type / Fuel type	NO_x pre-2000 engine	NO_x post-2000 engine	NO_x fleet average	SO_2	CO_2	VOC	PM	sfc
	(g/kWh)							
SSD / MGO	13.6	11.3	12.8	0.8	647	1.8	0.9	204
SSD / MDO	13.6	11.3	12.8	6.2	647	1.8	1.2	204
SSD / RO	14.5	12.0	13.6	11.6	682	1.8	2.4	215
MSD / MGO	10.6	8.8	9.9	0.9	710	1.5	0.9	223
MSD / MDO	10.6	8.8	9.9	6.8	710	1.5	1.2	223
MSD / RO	11.2	9.3	10.5	12.7	745	1.5	2.4	234
HSD / MGO	9.6	8.0	9.0	0.9	710	0.6	0.9	223
HSD / MDO	9.6	8.0	9.0	6.8	710	0.6	1.2	223
HSD / RO	10.2	8.5	9.6	12.7	745	0.6	2.4	234
GT / MGO	2.9	2.4	2.7	1.3	1014	0.5	0.5	319
GT / MDO	2.9	2.4	2.7	9.6	1014	0.5	0.7	319
GT / RO	3.1	2.6	2.9	18.1	1067	0.5	1.5	336
ST / MGO	1.6	1.3	1.5	1.3	1014	0.3	0.9	319
ST / MDO	1.6	1.3	1.5	9.6	1014	0.3	1.2	319
ST / RO	1.7	1.4	1.6	18.1	1067	0.3	2.4	336

Şekil 2.6 : ENTEC'e göre manevra ve yanaşma esnasındaki EF(ME)(g/kWh) (ana makine emisyon faktörleri) (Whall ve diğ., 2010).

Engine type / Fuel type	NO_X pre-2000 engine	NO_X post-2000 engine	NO_X fleet average	SO_2	CO_2	VOC	PM	sfc
				(g/kWh)				
M/H SD / MGO	13.9	11.5	13.0	0.9	690	0.4	0.3	217
M/H SD / MDO	13.9	11.5	13.0	6.5	690	0.4	0.4	217
M/H SD / RO	14.7	12.2	13.8	12.3	722	0.4	0.8	227

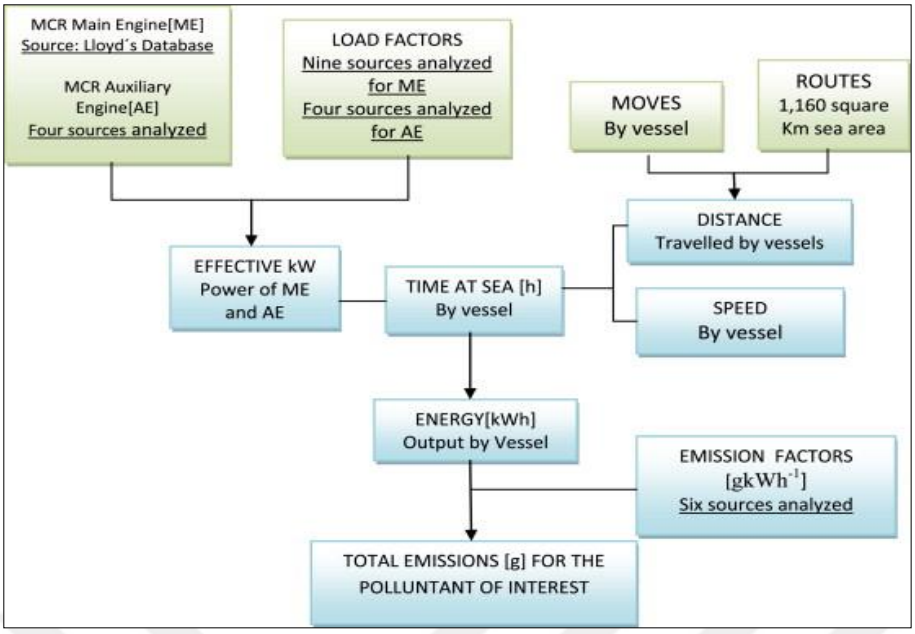
Şekil 2.7 : ENTEC'e göre seyir, manevra ve yanaşma esnasındaki EF(AE)(g/kWh) (yardımcı makine emisyon faktörleri) (Whall ve diğ., 2010).

ENTEC 2010 raporunda makine devir sayısına göre yapılan sınıflandırmaya göre, yavaş devirli dizel makineler (SSD) 300 RPM veya daha düşük hızlarda çalışırken, orta devirli dizel makineler (MSD) 300-1000 RPM arasında, hızlı devirli dizel makineler (HSD) ise 1000 RPM üzerinde çalışmaktadır. Römorkörlerden ve gemilerden teknik bilgiler alınarak RPM bilgilerine ulaşılmış ve ilgili gruplandırmalara uygun olarak emisyon faktörleri denklemde yerine konulmuştur. Günümüz gemileri ve römorkörleri genel olarak yavaş devirli dizel makineler sınıfına girmektedir.

2.1.2.2 EPA metodolojisi

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Amerika Birleşik Devletleri'nde limanlarla ilişkili hava kirliliği emisyon envanterlerini geliştirmek amacıyla kapsamlı bir rehberlik sunmak amacıyla üretilmiştir. Bu rehber, belirli bir coğrafi alan içerisinde mobil kaynaklar tarafından üretilen hava emisyonlarının miktarını ve karakteristiklerini belirlemeye çalışır. Ayrıca, limanlar, yük terminalleri ve intermodal tesisler gibi çeşitli liman türleri için geçmiş ve geleceğe yönelik emisyon envanterlerini kapsamaktadır. EPA, bu rehberle emisyon envanterlerinin güncel bilim ve en iyi uygulamalar doğrultusunda oluşturulmasını hedeflemektedir. Geniş kapsamlı bir rehber olup, gemilerle birlikte limanda oluşabilecek diğer mobil araçlardan kaynaklı emisyon envanterlerini de oluşturmayı amaçlar (Environmental Protection Agency, 2020).

EPA yöntemi bottom-up metodolojisine uygun olarak Şekil 2.8'deki akış şeması şeklinde bir yol izler. ENTEC ile aralarındaki fark denkleme bağlı emisyon faktörü katsayısının değişmesidir. EPA metodolojisinde, ENTEC'den farklı olarak, kullanılan yakıt tipine göre bir emisyon faktörü belirlenir.



Şekil 2.8 : Genel hatlarıyla ENTEC ve EPA metodolojisi (Moreno-Gutiérrez ve diğ., 2015).

EPA metodolojisinde 3 farklı safha bulunmaktadır. Öncelikli olarak geminin operasyonel durumu belirlenir, daha sonra tüm safhalar için harcam hesaplanır ve harcanan ihrakiye emisyon faktörüne göre bir toplam emisyon tahmini yapılır. EPA metodolojisine göre, emisyon tahminlerinde denklem 2.4 (Senol ve Seyhan, 2024).

$$E(g) = EF(g/kWh) \times MCR(\%) \times P(kW) \times t(h) \tag{2.4}$$

- E (Emisyon): Emisyon miktarı
- MCR (Maximum Continuous Rating): Yük faktörü
- P (Güç): Makinenin yük kapasitesi.
- t (Süre): Emisyon hesaplamasında kullanılan süre
- EF (Emisyon Faktörü): Hem ana hem de yardımcı makine emisyon faktörü

EPA metodolojisinde ENTEC'ten farklı olarak emisyon cinsine ve yakıt tipine göre bir emisyon faktörü hesaplanmaktadır. Çalışmada CO_2 emisyonu üzerinden bir karşılaştırma yapılmakta olup, CO_2 emisyon faktörü hesaplaması denklem 2.5'te sunulmuştur (Environmental Protection Agency, 2020).

$$EF\ CO_2 = BSFC \times CCF \tag{2.5}$$

- EF CO_2: CO_2 Emisyon faktörü
- BSFC (Brake Specific Fuel Consumption): Birim enerji üretimi başına tüketilen yakıt miktarı
- CCF (Carbon Conversion Factor): Karbon dönüşüm faktörü

EPA sınıflandırmasına göre, yavaş devirli dizel makineler (SSD) 500 RPM'in altında, orta devirli dizel makineler (MSD) 500-1400 RPM arasında ve hızlı devirli dizel makineler (HSD) 1400 RPM'in üzerinde çalışmaktadır (Environmental Protection Agency, 2020).

EPA metodolojisinde, emisyon tahmini yapabilmek için öncelikli olarak emisyon faktörünün bulunması gerekmektedir. Bunun için geminin veya römorkörün dizel makine devir sayısının ve kullandığı yakıt tipinin bilinmesi gerekir. Bu veriler elde edildikten sonra, makine tipine göre BSFC değerlerii Şekil 2.9'da gösterilen tablodan bulunmaktadır (Environmental Protection Agency, 2020).

Engine Group	Fuel Type	Engine Type	BSFC (g/kWh)	Source
Propulsion	MGO/MDO	SSD	185	29
		MSD	205	29
		ST	300	29
		GT	300	29
	RM/HFO	SSD	195	29
		MSD	215	29
		ST	305	29
		GT	305	29
	LNG	LNG	166	30
Auxiliary	MGO/MDO	MSD	217	29
		HSD	217	29
	RM/HFO	MSD	227	29
		HSD	227	29
	LNG	LNG	166	30
Boiler	MGO/MDO	Boiler	300	29
	RM/HFO		305	29

Şekil 2.9 : Gemi BSFC Oranları (g/kWh) (Environmental Protection Agency, 2020).

"4th IMO GHG Study"de bulunan, Şekil 2.4'de gösterilen tabloya, CO_2 emisyonu ve yakıt tipi girilerek karbon dönüşüm faktörü (CCF, MGO/MDO için: 3.206, RM/HFO için: 3.114, LNG için: 2.755) bulunur ve BSFC değeri ile çarpılarak emisyon faktörü ilgili emisyon tipi için hesaplanmaktadır (IMO, 2021).

Gemi hesaplarında yukarıda verilen iki EPA ilişikli tablonun kullanılması yeterlidir. Fakat çalışmada simülasyon römorkör verilerine ait emisyon hesabı da yapıldığından farklı bir yol izlenilmesi gerekmiştir. Simülasyon verisinde yardımcı makinenin emisyon hesabı elde edilememesinden dolayı ana makine ve yardımcı makine için iki ayrı emisyon faktörü hesabı yapmak gerekmiştir.

Römorkörlerin ana makinesine ait emisyon faktörünü bulabilmek için Şekil 2.10'da gösterilen tablodan istenilen emisyon tahmini girilerek sonuca varılmıştır (Environmental Protection Agency, 2020).

Tier	NOx (g/kWh)	PM_{10} (g/kWh)	$PM_{2.5}$ (g/kWh)	VOC (g/kWh)	CO (g/kWh)	CO_2 (g/kWh)	SO_2 (g/kWh)
Tier 0	10.28152	0.258902	0.251135	0.295615	1.612632	679.47	0.006246
Tier 1	9.624039	0.258902	0.251135	0.295615	1.61	679.47	0.006246
Tier 2	5.642273	0.148049	0.143608	0.295615	0.918732	679.47	0.006246
Tier 3	4.749214	0.082975	0.080486	0.124798	0.918732	679.47	0.006246
Tier 4	1.3	0.03	0.0291	0.124798	0.918732	679.47	0.006246

Şekil 2.10 : Liman deniz araçları ana makine ortalama emisyon faktörü (Environmental Protection Agency, 2020).

Römorkörlerin yardımcı makinesine ait emisyon faktörünü bulabilmek için ise Şekil 2.9'da bulunan "BSFC oranları" tabloasından yardımcı makineler için ilgili yakıt ve makine tipi girilerek bir BSFC değeri bulunmaktadır. Daha sonra 4th IMO GHG Study'den aldığımız Şekil 2.4'te gösterilen tablodaki, CO_2 emisyonu ve yakıt tipi girilerek karbon dönüşüm faktörü (CCF, MGO/MDO için: 3.206, RM/HFO için: 3.114, LNG için: 2.75) bulunur ve BSFC değeri ile çarpılarak, römorkörlerin yardımcı makinesine ait emisyon faktörü elde edilir (Environmental Protection Agency, 2020; IMO, 2021).

3. MANEVRA ÇALIŞMALARI

Deniz taşımacılığı, kara taşımacılığından daha karmaşıktır; gemi manevralarının gerçekleştirilmesinde çevresel faktörler ve gemi özellikleri dikkate alınmalıdır. Gemiler, kullanım amaçlarına göre çeşitlilik gösterir; boyut, tonaj, dümen ve makine gücü gibi faktörler manevra kabiliyetlerini etkiler. Bu değişkenler nedeniyle emisyon değerlerine dair bir model oluşturmak zordur (Shih ve diğ., 2012).

"Top-down" ve "bottom-up" metodolojilerinin ortak dezavantajları, veri kalitesine bağımlılıkları ve modelleme hatalarıdır. Coğrafi emisyon haritası oluşturulurken manevra izleri, yakıt satışları, AIS verileri ve GPS kayıtları gibi yöntemlerle genel bilgiler elde edilmektedir. Bu yöntemlerde, gemi makinesi bilgilerine doğrudan erişilmeden emisyon hesaplamaları yapılmaktadır. Ancak, gerçek manevralar esnasında alınan verilerin daha doğru sonuçlar verdiği bilinmektedir. Benzer şekilde, simülasyon manevralarında da gemilerin saniye saniye makine ve hız bilgileri elde edilebilmektedir.

Bu bölümde, gerçek manevralardan elde edilen verilerin analizi ve emisyon hesaplamaları ele alınmıştır. Ayrıca, bu verilerin simülasyon ortamında tekrarlanması ve simülasyon manevralarından elde edilen verilerle emisyon hesaplamalarının yapılması incelenmiştir. İlk olarak, kılavuz kaptanlar tarafından gerçekleştirilen manevralardan elde edilen veriler detaylandırılmış; bu verilerin simülasyon ortamında yeniden oluşturulma süreci açıklanmıştır. Farklı gemi tiplerinden analiz edilebilir ve simülatörde tekrarlanabilir manevralar seçilerek gerekli teknik veriler toplanmıştır. Gemi makine telegrafı ve diğer teknik veriler kullanılarak "bottom-up" yöntemiyle emisyon hesaplamaları yapılırken, römorkörler için "top-down" yöntemi tercih edilmiştir.

Ayrıca, kullanılan simülatörün teknik özellikleri ve yeterlilikleri tanıtılmış; veri toplama ve hesaplama süreçleri açıklanmıştır. Simülasyon ortamında elde edilen veriler hem gemi hem de römorkör bazında "bottom-up" yöntemiyle analiz edilerek emisyon hesaplamalarında kullanılmıştır.

3.1 Gerçek Manevralar

Gerçek manevralar, liman gibi gerçek koşullarda kılavuz kaptanlar tarafından fiili olarak gerçekleştirilen gemi manevralarını ifade etmektedir. Bu manevralar, geminin yanaşma, kalkış, demirleme veya belirli bir liman içindeki yer değiştirme süreçlerini kapsar ve gerçek dünya koşullarında, çevresel faktörler, gemi dinamikleri ve römorkörlerin müdahaleleri gibi tüm etkilerin dikkate alındığı uygulamalardır.

Çalışmada, kalkış manevralarına kıyasla daha uzun süren ve daha doğru bir karşılaştırma imkanı sunan yanaşma manevraları tercih edilmiştir. Kısa süreli manevralarda, emisyon tahminlerindeki küçük farklılıklar, toplam emisyon değerine oranla daha büyük bir yüzde farkı oluşturur. Bu, kısa süreli süreçlerdeki tahmin hatalarının etkisinin daha belirgin hale gelmesine neden olur. Yanaşma manevralarında römorkörlerin de daha fazla kullanılması, emisyon tahminlerinde ve simülasyonlarla yapılan karşılaştırmalarda daha gerçekçi verilere ulaşılabileceği öngörüsünü desteklemektedir.

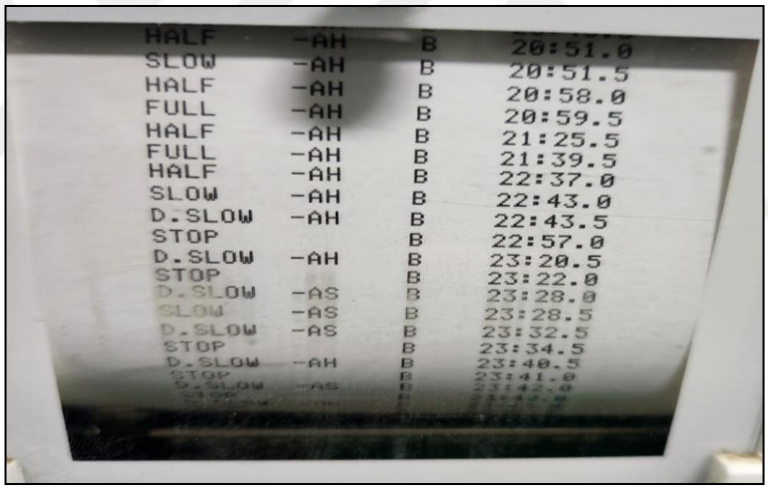
Bununla birlikte yanaşma manevralarında römorkörlere ait emisyon hesaplamalarının da doğru şekilde hesaplanabilmesi amacıyla, manevranın başlangıç ve bitiş zamanları, römorkörlerin gemiye bağlandığı ve gemiden ayrıldığı saatler olarak tanımlanmıştır. Çalışmada, kılavuz kaptanın etap seyrinden dolayı manevra sürecinden yaklaşık bir buçuk saat önce gemiye katıldığı ve bu süre zarfında geminin yaklaşık tam yol manevra hızında seyir yaptığı gözlemlenmiştir. Emisyon hesaplamaları için başlangıç zamanı olarak römorkör bağlanma saatinin seçilmesi, bu hesaplamalar için uygun bir referans noktası sunmaktadır. Ayrıca, römorkörlerin gemiye bağlamadan önce ve ayrılmadan sonra boşta bekledikleri süreler manevra süresine dahil edilmemekte olup, römorkörlerin hizmet süreleri, gemiye bağlanma ve ayrılma saatleri olarak literatüre geçmektedir.

Çalışmanın başlangıcında, gemilerin yanaşma manevralarıyla ilgili emisyon hesaplamalarını gerçekleştirmek amacıyla toplamda on kılavuz kaptandan gerekli teknik bilgilerin toplanması istenmiştir. Bu bilgiler, gemilerin gerçek yanaşma manevraları sırasında mümkün olan en doğru emisyon hesaplamalarını yapmayı ve uygun simülasyon manevralarını oluşturmayı hedeflemiştir.

Gerçek gemi manevraları esnasında gemi kaptanlarından istenilen veriler arasında yanaşma manevrası kayıtları, mevcut pilot kartları, gemi teknik bilgileri (ship

particulars), geminin yanaşma esnasındaki durumu (draft ve deplasman gibi parametreler), manevra sırasında kullanılan RPM değerleri, mevcutsa RPM-kW dönüşümleri için teknik detaylar, makine telgrafı komutlarına karşılık gelen RPM verileri ve römorkörlerin manevralara dayalı yakıt tüketim verileri yer almaktadır. Şekil 3.1'de örnek olarak gerçek gemilerden fiili olarak kılavuz kaptanlar tarafından alınan, makine telgrafı yazıcısı çıktısı gösterilmiştir. Mevcut olmayan RPM-kW dönüşümleri bilgileri ise ilgili makine üreticileri ile iletişime geçilerek elde edilmiştir. Ayrıca manevrayı gerçekleştiren kılavuz kaptanlardan mevcut hava durumunu ve akıntı durumunu da not etmeleri istenmiştir.

Yanaşma manevralarından elde edilen veriler, simülasyon ortamında tekrar oluşturulabilmeleri için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kılavuz kaptanlardan toplanan veriler yaklaşık 100 veri setine ulaştığında, simülatör ile uyumu sağlamak amacıyla bir kategorizasyon süreci yürütülmüştür.



Şekil 3.1 : Gerçek manevralara ait örnek gemi makine telgrafı bilgileri (AH: Ahead, AS: Astern).

Devam eden süreçte, manevra verilerinin teknik özellikleri ve simülatörde gerçekçi bir şekilde yeniden oluşturulabilirliği dikkate alınarak, mevcut simülatörde var olan, Çizelge 3.1'de de detayları verilen üç farklı gemi tipi belirlenmiştir. Mevcut simülasyon ortamında yeni bir gemi oluşturma işleminin oldukça maliyetli olabilmesi nedeniyle, mevcut gemilere yakın özelliklere sahip gerçek manevra gemileri seçilmiştir. Bu aşamada, gemilerin boyutları, manevra özellikleri ve makine güçleri gibi değişkenler değerlendirilmiştir. Toplanan veri setine en yakın olan altı kılavuz kaptandan, benzer hava koşulları altında her bir gemi tipiyle gerçek yanaşma

manevralarını gerçekleştirmeleri ve bu manevralar sonrasında gerekli verileri tamamlamaları istenmiştir.

Çizelge 3.1 : Simülasyon modelinde yer alan gemi özellikleri.

Gemi Tipi	Tam Boy (m.)	Genişlik (m.)	Deplasman (ton)	Maksimum Güç (kW)	Pervane Tipi
Bulk Carrier	199.99	23.75	26343	1 x 10710.0	FPP
Ro-Ro	199.1	32.26	39282	1 x 10598.0	FPP
Container Ship	299.0	37.1	86900	1 x 44443.7	FPP

Manevralarda kullanılan römorkörlerin, liman ve ilgili birimlerle kılavuz kaptanların çalıştığı şirketlere bağlı olması, veri toplama sürecini kolaylaştırmıştır. Römorkörlerden her manevrada yakıt bilgisi alınabilmesi için, ilgili kılavuz kaptanlar, manevra öncesinde römorkörlere bilgilendirme yapmıştır. Ayrıca, her yanaşma manevrasından önce ortalama bir buçuk saat süren etap seyri, kılavuz kaptanlar ve diğer operasyonel birimlerin manevra öncesinde gerekli bilgilere ulaşmasını kolaylaştırmış ve çalışmayı desteklemiştir.

Çalışmada liman ve operasyonlar hakkında paylaşılan bilgilere özel bir hassasiyet gösterilmiştir. Bu doğrultuda, veri güvenliği ve gizlilik ilkeleri göz önünde bulundurularak, çalışmada belirli liman isimleri, coğrafi konum bilgileri veya operasyon detayları gibi hassas verilere yer verilmemiştir.

3.1.1 Gerçek manevra gemi ve römorkör emisyon hesaplama yöntemi

Simülasyon ile uyumlu olan 18 gerçek gemi manevrası tamamlandıktan sonra, bu manevralara ait veriler toplanmış ve sistematik bir şekilde kategorize edilmiştir. Toplanan verilerden mevcut pilot kartları, gemi teknik bilgileri ve yanaşma esnasındaki gemi koşulları, simülasyondaki mevcut gemilerle uyumluluk değerlendirmelerinde kullanılmıştır. Yanaşma manevrasına ilişkin kayıtlar (pilot bill, bell book, jurnal kayıtları), manevra sırasında elde edilen RPM değerleri, mevcutsa RPM-kW dönüşümleri için gerekli teknik detaylar, makine telgrafı komutlarına karşılık gelen RPM verileri ve römorkörlerin manevralara dayalı yakıt tüketim verileri ise emisyon hesaplama sürecinde temel veri kaynakları olarak değerlendirilmiştir.

Gerçek gemi manevralarında metodolojik olarak bottom-up yaklaşımı benimsenmiş olup, bu bağlamda ENTEC ve EPA metodolojileri kullanılarak emisyon tahmini için gerekli veri setlerine erişim süreci, bir sonraki başlıkta ayrıntılı şekilde ele alınmıştır.

3.1.1.1 Gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplama yöntemi

Öncelikle, makine telgrafı komutlarına karşılık gelen RPM değerleri ve RPM-kW dönüşümleri için gerekli teknik detaylar kullanılarak, her gemi için ilgili RPM değerlerine karşılık gelen kW değerleri ondalıklı hassasiyette hesaplanmıştır. Bu dönüşüm işlemi, her gemi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve manevra esnasında verilen makine komutlarına uygun kW karşılıklarının belirlenebilmesi amacıyla gerekli veri seti oluşturulmuştur. Bu süreç sonucunda, Şekil 3.2'de kısmi olarak gösterildiği üzere, her bir gemi için yaklaşık 1.500 satırdan oluşan veriler elde edilmiş ve toplamda yaklaşık 27.000 satırlık bir Excel veri seti oluşturulmuştur. Bu hesaplamalar, tam yol ileri (full ahead) komutundan tam yol tornistan (full astern) komutuna kadar olan aralıkta, her bir RPM değerinin ondalık kısımları dikkate alınarak, ilgili kW değerlerine karşılık gelen dönüşümler gerçekleştirilmiştir.

RPM-kW Makine Üretici Bilgisi		
Engine Power	RPM	kW
100%	124	10470,0
	121,9	9947,0
	119,7	9423,0
	117,5	8900,0
	115,1	8376,0
	112,7	7853,0
	110,1	7329,0
	104,6	6282,0
	98,4	5235,0
Full ahead	91,4	4188,0
	83	3141,0
	78,1	2618,0

Makine Telgrafı Komutlarına Karşılık Gelen RPM Değerleri		
Engine Power	RPM	kW
Full ahead	86	3514,9
Half ahead	72	2724,7
Slow ahead	50	1892,2
D.Slow ahead	37	1400,2
Stop	0	0,0
D.Slow astern	-41	1585,2
Slow astern	-56	2165,2
Half astern	-79	3054,5
Full astern	-95	3673,1

RPM	kW
91,4	4188,0
91,3	4175,5
91,2	4163,1
91,1	4150,6
91	4138,1
90,9	4125,7
90,8	4113,2
90,7	4100,8
90,6	4088,3
90,5	4075,8
90,4	4063,4
90,3	4050,9
90,2	4038,4
90,1	4026,0
90	4013,5
89,9	4001,0
89,8	3988,6
89,7	3976,1
89,6	3963,6
89,5	3951,2
89,4	3938,7
89,3	3926,3
89,2	3913,8
89,1	3901,3
89	3888,9
88,9	3876,4
88,8	3863,9
88,7	3851,5
88,6	3839,0
88,5	3826,5
88,4	3814,1
88,3	3801,6
88,2	3789,1

Şekil 3.2 : Gerçek manevra örnek gemi makinesi RPM-kW dönüşümü.

Daha sonra, manevra sürecinde her bir gemiye ait tüm makine komutları saniyelik olarak RPM değerlerine dönüştürülmüş ve her gemi için ayrı ayrı düzenlenmiştir. Ardından, bu RPM değerlerine karşılık gelen kW değerleri, Şekil 3.2'de gösterilen

tablodan alınarak, manevra esnasında her bir makine komutuna karşılık gelen kW değerleri, Şekil 3.3'de kısmi olarak gösterildiği gibi, manevra başlangıcından manevra sonuna kadar saniye saniye hesaplanmıştır. Bu işlemler sonucunda, ENTEC ve EPA metodolojilerine dayalı olarak ana makine emisyon tahminine yönelik gerekli veri seti oluşturulmuştur.

Zaman	Saniye	Ana Gemi		Ana Gemi ENTEC (gr)	AnaGemi EPA (gr)
		RPM	kW		
23:05:00	0	0	0,0	0	0
23:05:01	1	0	0,0	0	0
23:05:02	2	0	0,0	0	0
23:05:03	3	0	0,0	0	0
23:05:04	4	0	0,0	0	0
23:05:05	5	0	0,0	0	0
23:05:06	6	0	0,0	0	0
23:05:07	7	0	0,0	0	0
23:05:08	8	0	0,0	0	0
23:05:09	9	0	0,0	0	0
23:05:10	10	0	0,0	0	0
23:05:11	11	0	0,0	0	0
23:05:12	12	0	0,0	0	0
23:05:13	13	0	0,0	0	0
23:05:14	14	0	0,0	0	0
23:05:15	15	0	0,0	0	0
23:05:16	16	0	0,0	0	0
23:05:17	17	0	0,0	0	0
23:05:18	18	0	0,0	0	0
23:05:19	19	0	0,0	0	0
23:05:20	20	0	0,0	0	0

Şekil 3.3 : Gerçek manevra örnek gemi manevra kayıtları kW dönüşümü.

Bölüm 2'de altındaki "ENTEC ve EPA metodolojileri" kısımlarında açıklandığı üzere, ana makinenin (ME) güç çıktısı, belirli bir yük faktörü (LF) ile çarpılarak hesaplanmaktadır. Burada, ME (kW) değeri, ana makinenin maksimum kapasitesini ifade ederken, LF (ME) (%) ise makinenin mevcut çalışma koşullarındaki yük faktörünü temsil eder. Yüzde olarak ifade edilen yük faktörü, makinenin o anki kapasitesinin maksimum kapasitesine oranını göstermektedir. Dolayısıyla, ME (kW) × LF (ME) (%) çarpımı, makinenin o anki operasyonel koşullardaki efektif güç üretimini ifade etmektedir. Bu yöntem, gemi operasyonları sırasında makinenin gerçek zamanlı güç tüketimini doğru bir şekilde belirlemek amacıyla kullanılmakta olup, hesaplanan kW değerine temel teşkil etmektedir. Saniye saniye hesaplanan kW değeri, manevra esnasındaki şartlar altında, makinenin anlık güç üretimini vermektedir.

3.1.1.2 Gerçek manevra römorkör emisyon hesaplama yöntemi

Gerçek manevralarda kullanılan römorkörlerin emisyon hesaplamaları için, yakıta dayalı bir emisyon miktarı tahmin yöntemi olan top-down metodolojisi kullanılmıştır. Bu yöntemin tercih edilme nedeni, römorkörlerin manevra esnasındaki hareketlerinin

detaylı bir şekilde incelenmesinin zorluğu nedeniyle, her manevra bazında yakıt tüketim verilerinin elde edilmesinin en doğru sonuçları vermesidir.

Römorkörlerin yakıt tüketimi hesaplamaları için, manevranın başlangıç zamanı olan römorkör bağlama anı ile manevranın bitiş zamanı olan römorkör ayrılma anı arasındaki süre boyunca, römorkörlerden yakıt verisi talep edilmiştir. Bu kapsamda, römorkörler, kılavuz kaptanlar tarafından manevra öncesinde bilgilendirilmiş ve yakıt tüketim hesaplamaları için gerekli hazırlıkları yapmaları istenmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, römorkörler ile kılavuz kaptanların aynı firma bünyesinde çalışıyor olmaları, veri erişimini kolaylaştırıcı bir faktör olmuştur. Yakıt tüketim hesaplamaları, yakıt tanklarından alınan iskandil (ölçüm) değerlerine dayanmaktadır. Şekil 3.4'te örneği gösterilen, iskandil ölçümlerine göre hazırlanan tablolar, belirli yüksekliklere karşılık gelen yakıt miktarlarını göstermektedir. Ancak, manevra süresinin kısa olması nedeniyle, yakıt tanklarında meydana gelen 1 ila 2 cm'lik değişiklikler, römorkörlerin denizdeki hareketi sebebiyle, iskandil ölçümü yapan personel için doğru verileri yakalamayı zorlaştırmaktadır. Manevra süresinin kısalığı, yakıt tüketim hesabında birtakım zorluklar yaratmasına karşın, baş mühendislerin uzun yıllara dayanan tecrübeleri sayesinde, manevra sırasında tüketilen yakıt miktarları olabildiğince doğru bir şekilde tahmin edilmeye çalışılmıştır.

DEPTH (CM)	VOLUME (LİTRE)	DEPTH (CM)	VOLUME (LİTRE)	DEPTH (CM)	VOLUME (LİTRE)	DEPTH (CM)	VOLUME (LİTRE)
0	0.000	102	1.450	204	3.800	306	6.330
2	0.000	104	1.490	206	3.850	308	6.380
4	0.010	106	1.530	208	3.900	310	6.430
6	0.010	108	1.580	210	3.940	312	6.480
8	0.020	110	1.620	212	3.990	314	6.530
10	0.030	112	1.660	214	4.040	316	6.580
12	0.040	114	1.710	216	4.090	318	6.630
14	0.050	116	1.750	218	4.140	320	6.680

Şekil 3.4 : Örnek römorkör yakıt iskandil tablosu.

Gerçek manevra römorkör emisyon hesabı için kullanılan top-down metodolojisinde, alınan yakıt tüketim değerleri önce ağırlık birimine çevrilmiş, ardından yakıt tipine göre 4th IMO GHG Study 2020'de belirtilen emisyon faktörü ile çarpılarak emisyon miktarı hesaplanmıştır (IMO, 2021).

3.2 Simülatör Manevraları

Simülatör manevra çalışmaları İstanbul Teknik Üniversitesi Denizcilik Fakültesi'nde bulunan Transas Navi-Trainer Professional Simulator NTPRO 5000 ile gerçekleştirilmiştir. Bu simülatör, IMO ve STCW standartlarına tamamen uyumlu olup, güncel düzenlemelere göre gemi personelinin simülasyon eğitimlerinin gerçekleştirilmesini sağlamayı hedeflemektedir. Marine Navigation Systems (MNS 34) kullanımını destekleyerek sınıf eğitimi, bulut tabanlı simülasyonu, kısmi köprüüstü ve tam görev köprüüstü eğitimlerine olanak sağlamaktadır.

Hidrodinamik ve fiziksel modelleme metodolojisi kullanılarak geliştirilen NTPRO 5000, kılavuz kaptanların katkılarıyla sürekli olarak iyileştirilmektedir ve gemi hareketlerini gerçeğe en uygun şekilde simüle etme amacını gütmektedir. Simülatör, IMO model kursları, STCW 2010 ve SOLAS gibi uluslararası standartlara tam uyum göstermekle birlikte, ClassNK ile iş birliği içinde geliştirilmiş ve DNVGL-ST-0033 gibi sertifikasyonlara sahip olarak güvenilirliğini kanıtlamıştır (Wärtsilä, 2024).

TRANSAS tarafından geliştirilen güncel görselleştirme sistemi Seagull 5000'i kullanan simülatör, eğitmenlere rüzgar, dalga ve swell koşullarını ayrı ayrı yönetme imkanı sunmaktadır. Deniz yüzeyinin durgunluğunu ve güneş ile ayın pozisyonunu dahi manuel olarak ayarlama imkânı sunan bu simülatör, görsel gerçekçiliği en üst düzeye çıkarmaktadır. Gerçek manevraların tamamlanmasının ardından, benzer hava ve akıntı koşullarında, benzer özelliklere sahip gemilerle ve gerçek manevrayı gerçekleştiren kılavuz kaptanların katılımıyla, aynı manevralar modellemesi yapılan limana ait rıhtımlarda simülasyon ortamında yeniden gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk olarak, simülasyon ortamında liman modellemesi yapılmış ve gerçek manevraların gerçekleştirildiği liman koşulları, simülasyonda birebir şekilde yeniden oluşturulmuştur. Yanaşma tarafları gerçek manevralarla aynı taraflar seçilmiş olup, römorkör bağlama noktaları da gerçek manevralarla uyumludur.

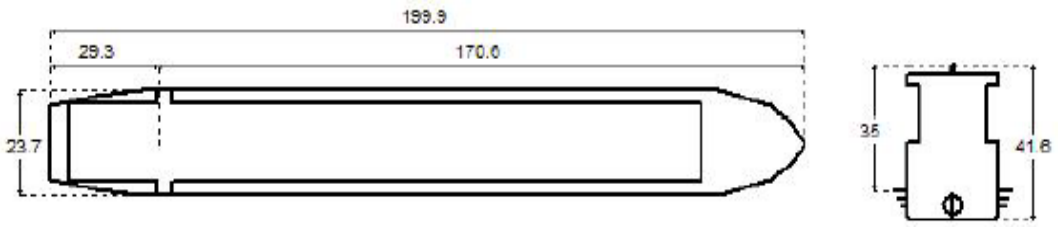
Çalışmaya dahil edilen gemi tipleri ve büyüklükleri veri elde etme güvenirliği, emisyon hesaplamalarına uygunluğu ve aynılarının simülatör sisteminde bulunması kriterlerine göre belirlenmiştir. Buna göre, teknik özellikleri Şekil 3.5 – Şekil 3.7'de gösterilen dökme yük (kuru yük) gemisi, Ro-Ro (Roll-on/Roll-off) gemisi ve konteyner gemisine ait manevralar çalışılmıştır.

PILOT CARD

Ship name	Bulk carrier 3 (Dis.26343t) bl. TRANSAS 2.31.18.0 *			Date	02.12.2010
IMO Number	N/A	Call Sign	N/A	Year built	N/A
Load Condition	Ballast				
Displacement	26343 tones		Draft forward	6.57 m / 21 ft 7 in	
Deadweight	36563 tonnes		Draft forward extreme	6.57 m / 21 ft 7 in	
Capacity			Draft after	6.66 m / 21 ft 10 in	
Air draft	35 m / 115 ft 1 in		Draft after extreme	6.66 m / 21 ft 10 in	

Ship's Particulars

Length overall	199.99 m	Type of bow	Bulbous
Breadth	23.76 m	Type of stern	V-shaped
Anchor Chain(Port)	14 shackles		
Anchor Chain(Starboard)	14 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle =27.5 m / 15 fathoms)	



Steering characteristics

Steering device(s) (type/No.)	Semisuspended / 1	Number of bow thrusters	1
Maximum angle	35	Power	740 kW
Rudder angle for neutral effect	0.02 degrees	Number of stern thrusters	N/A
Hard over to over(2 pumps)	24.4 seconds	Power	N/A
Flanking Rudder(s)	0		

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	196.2 s	3.26 cbls	Advance	2.26 cbls
HAH to HAS	252.3 s	2.49 cbls	Transfer	0.86 cbls
SAH to SAS	305.6 s	2.37 cbls	Tactical diameter	2.33 cbls

Main Engine(s)

Type of Main Engine	Slow speed diesel	Number of propellers	1
Number of Main Engine(s)	1	Propeller rotation	Right
Maximum power per shaft	1 x 10710 kW	Propeller type	FPP
Astern power	55 % ahead	Min. RPM	33.04
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	25.2 seconds

Engine Telegraph Table

Engine order	Speed, knots	Engine power, kW	RPM	Pitch ratio
Full Sea Ahead	15	9089	121.9	0.73
Full Ahead	11	3847	91	0.73
Half Ahead	7.1	1085	59	0.73
Slow Ahead	5.7	601	48	0.73
Dead Slow Ahead	3.8	213	33	0.73
Dead Slow Astern	-1.9	221	-36.4	0.73
Slow Astern	-2.8	657	-53.7	0.73
Half Astern	-3.7	1185	-65.9	0.73
Full Astern	-6.1	3987	-100.6	0.73

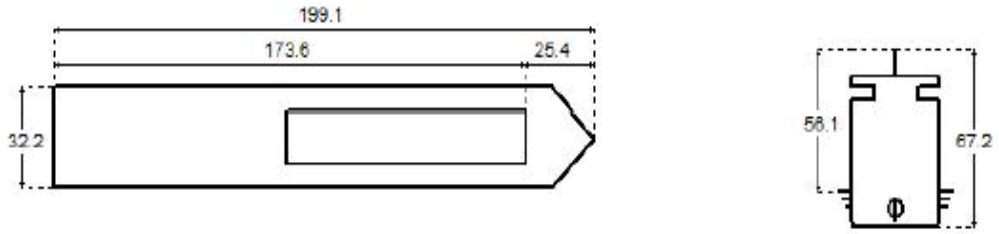
Şekil 3.5 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan dökme yük gemisi özellikleri.

PILOT CARD

Ship name	Car carrier 6 (Dis.39282t) TRANSAS 2.31.4.0 *			Date	11.02.2011
IMO Number	N/A	Call Sign	N/A	Year built	N/A
Load Condition	Full load				
Displacement	39282 tones		Draft forward	11.02 m / 36 ft 3 in	
Deadweight	N/A tonnes		Draft forward extreme	11.02 m / 36 ft 3 in	
Capacity			Draft after	11.02 m / 36 ft 3 in	
Air draft	56.18 m / 184 ft 9 in		Draft after extreme	11.02 m / 36 ft 3 in	

Ship's Particulars

Length overall	199.1 m	Type of bow	Bulbous
Breadth	32.26 m	Type of stern	U-shaped
Anchor Chain(Port)	15 shackles		
Anchor Chain(Starboard)	15 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle =27.5 m / 15 fathoms)	



Steering characteristics

Steering device(s) (type/No.)	Semisuspended / 1	Number of bow thrusters	1
Maximum angle	35	Power	1070 kW
Rudder angle for neutral effect	0.59 degrees	Number of stern thrusters	N/A
Hard over to over(2 pumps)	29.6 seconds	Power	N/A
Flanking Rudder(s)	0		

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	251.2 s	5.11 cbls	Advance	3.59 cbls
HAH to HAS	406.6 s	5.43 cbls	Transfer	1.5 cbls
SAH to SAS	555.6 s	6.09 cbls	Tactical diameter	3.51 cbls

Main Engine(s)

Type of Main Engine	Slow speed diesel	Number of propellers	1
Number of Main Engine(s)	1	Propeller rotation	Right
Maximum power per shaft	1 x 10598 kW	Propeller type	FPP
Astern power	25 % ahead	Min. RPM	37.44
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	9.6 seconds

Engine Telegraph Table

Engine order	Speed, knots	Engine power, kW	RPM	Pitch ratio
Full Sea Ahead	19.6	8296	110.3	0.98
Full Ahead	12.5	2052	69.3	0.98
Half Ahead	9.8	1009	54.3	0.98
Slow Ahead	8	559	44.3	0.98
Dead Slow Ahead	6.8	356	37.4	0.98
Dead Slow Astern	-3.2	311	-38.4	0.98
Slow Astern	-4	726	-48.5	0.98
Half Astern	-5	1289	-59	0.98
Full Astern	-6.4	2695	-75.8	0.98

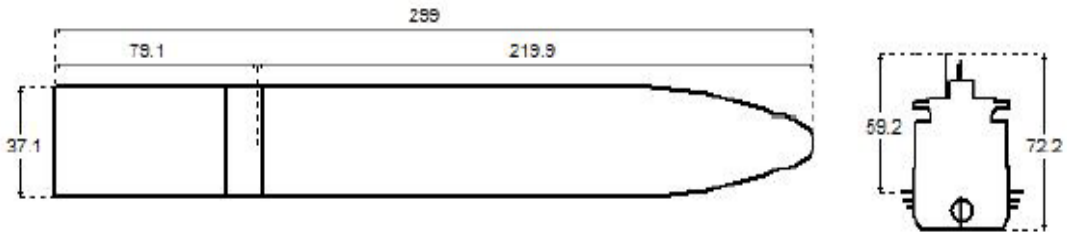
Şekil 3.6 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan Ro-Ro gemisi özellikleri.

PILOT CARD

Ship name	Container ship 5 (Dis.86900t) TRANSAS 2.31.30.0 *			Date	22.11.2010
IMO Number	N/A	Call Sign	N/A	Year built	N/A
Load Condition	Full load				
Displacement	86900 tones		Draft forward	13 m / 42 ft 9 in	
Deadweight	63440 tonnes		Draft forward extreme	13 m / 42 ft 9 in	
Capacity			Draft after	13 m / 42 ft 9 in	
Air draft	59.25 m / 194 ft 10 in		Draft after extreme	13 m / 42 ft 9 in	

Ship's Particulars

Length overall	299 m	Type of bow	Bulbous
Breadth	37.1 m	Type of stern	Transom
Anchor Chain(Port)	13 shackles		
Anchor Chain(Starboard)	13 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle =27.5 m / 15 fathoms)	



Steering characteristics

Steering device(s) (type/No.)	Semisuspended / 1	Number of bow thrusters	1
Maximum angle	35	Power	1961 kW
Rudder angle for neutral effect	0.14 degrees	Number of stern thrusters	N/A
Hard over to over(2 pumps)	13.8 seconds	Power	N/A
Flanking Rudder(s)	0		

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	222.6 s	4.51 cbls	Advance	4.61 cbls
HAH to HAS	239.1 s	4.1 cbls	Transfer	2.55 cbls
SAH to SAS	267.6 s	3.81 cbls	Tactical diameter	5.6 cbls

Main Engine(s)

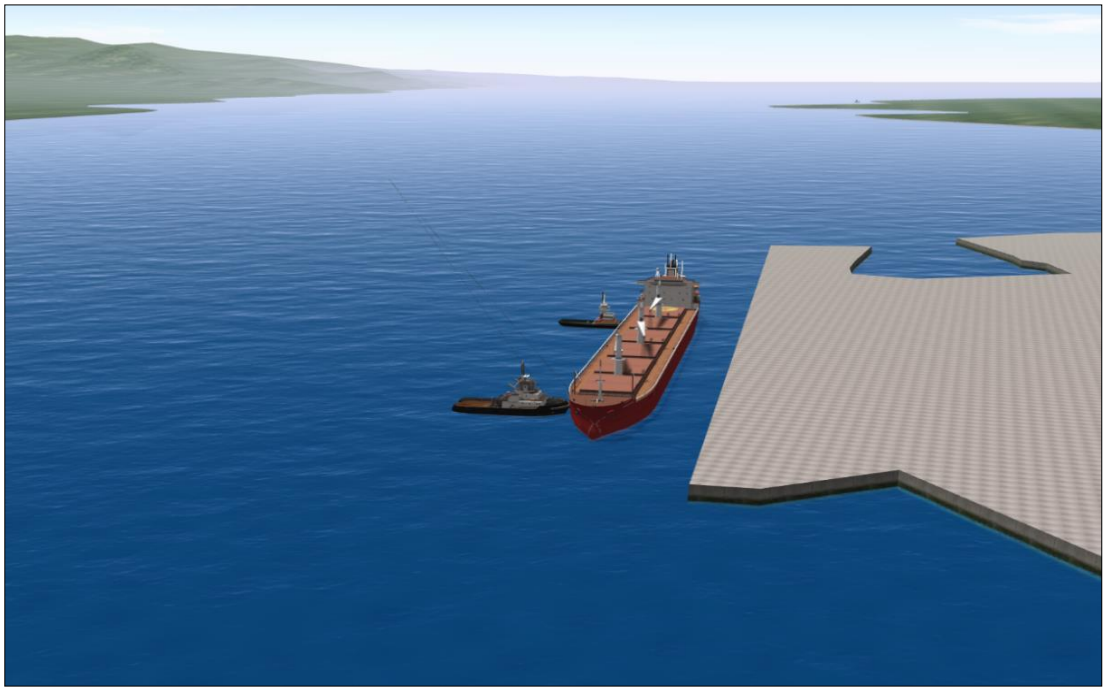
Type of Main Engine	Slow speed diesel	Number of propellers	1
Number of Main Engine(s)	1	Propeller rotation	Right
Maximum power per shaft	1 x 44443.7 kW	Propeller type	FPP
Astern power	10 % ahead	Min. RPM	22.93
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	7.4 seconds

Engine Telegraph Table

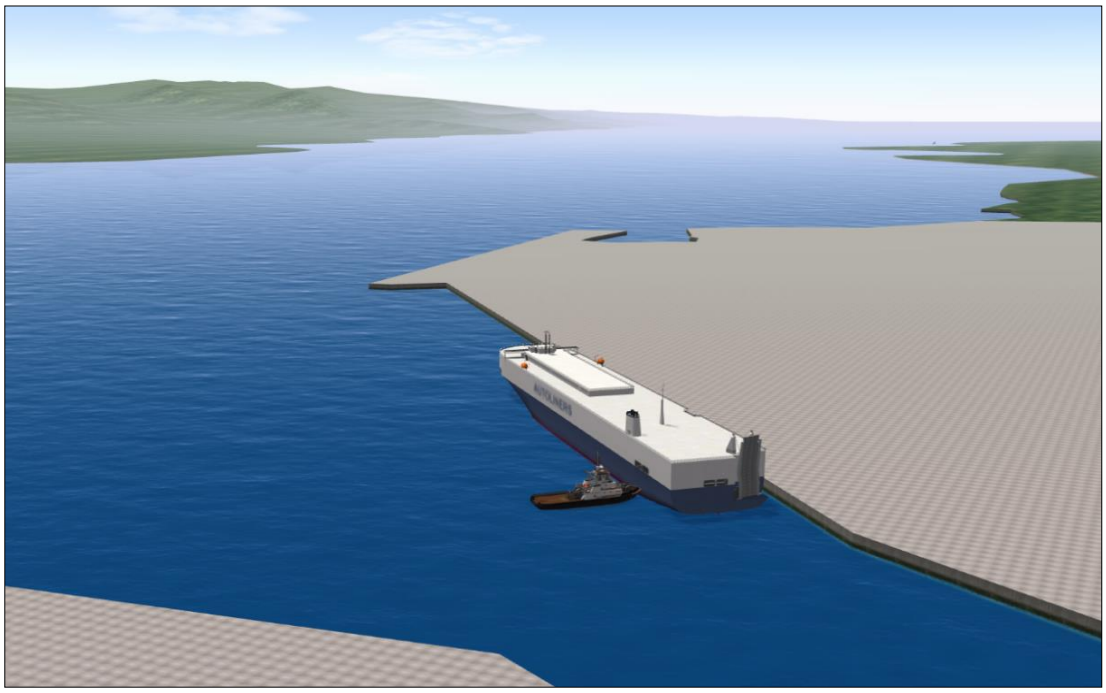
Engine order	Speed, knots	Engine power, kW	RPM	Pitch ratio
Full Sea Ahead	23.7	36644	89	1.14
Full Ahead	11.9	2890	38	1.14
Half Ahead	10.4	1900	33	1.14
Slow Ahead	8.8	1212	28.1	1.14
Dead Slow Ahead	7.2	676	22.9	1.14
Dead Slow Astern	-4.6	938	-23.1	1.14
Slow Astern	-5.8	1729	-28.5	1.14
Half Astern	-7	2750	-33.5	1.14
Full Astern	-8.3	4128	-38.5	1.14

Şekil 3.7 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan konteyner gemisi özellikleri.

Altı kılavuz kaptan, yukarıda verilen üç tip gemiyle simülasyon ortamında Şekil 3.8 – Şekil 3.10'da örneklemesi yapıldığı gibi manevralarını tamamlamıştır. Tamamlanan manevra detayları gemi tipi ve kılavuz kaptan adına kayıt altına alınmıştır. Daha sonra veriler simülasyon veri tabanından direkt olarak çekilmiş ve ana gemi ile römorkör emisyon hesaplama aşamasına geçilmiştir.



Şekil 3.8 : Simülasyon ortamı dökme yük gemisi yanaşma manevrası.



Şekil 3.9 : Simülasyon ortamı Ro-Ro yanaşma manevrası.

Şekil 3.10 : Simülasyon ortamı konteyner gemisi yanaşma manevrası.

3.2.1 Simülasyon manevrası gemi ve römorkör emisyon hesaplama yöntemi

Simülasyon ortamında tamamlanan 18 gemi manevrasının ardından, gemi ve römorkörlere ilişkin emisyon hesaplama sürecine geçilmiştir. Emisyon hesaplamalarının yapılabilmesi için gerekli veri setleri, logfile (kayıt dosyası) aracılığıyla Excel formatında indirilebilir duruma getirilmiştir. İndirilen bu dosyalar, her saniyeye ait ayrıntılı bilgileri sunarak analiz süreçlerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Simülasyon manevralarında, gemi ve römorkörlerin emisyon hesaplamalarında bottom-up bir yaklaşıma dayanan ENTEC ve EPA metodolojileri kullanılmıştır.

Simülasyon manevralarında, römorkör emisyon hesaplamalarında metodolojik farklılık nedeniyle ana makine ve yardımcı makine emisyonları ayrı ayrı hesaplanarak toplam emisyon değeri elde edilmiştir. Simülasyon ana gemi hesaplamalarında ise yalnızca ana makine emisyonları dikkate alınmış ve bu sayede gerçek manevralarla uyumlu bir emisyon değerlendirmesi yapılmıştır.

3.2.1.1 Simülasyon manevrası ana gemi emisyon hesaplama yöntemi

Simülasyon manevralarının emisyon hesaplama aşamasında, gerçek gemi manevralarına ilişkin hesaplama yöntemine benzer bir yöntem izlenmiştir. Bölüm 3.2’de sunulan Şekil 3.5 – Şekil 3.7’de yer alan pilot kartlarındaki makine telgraf

tablosunda (engine telegraph table) verilen komutlara karşılık gelen RPM değerleri ve RPM-kW dönüşümleri için gerekli teknik detaylar kullanılarak, her gemi için ilgili RPM değerlerine karşılık gelen kW değerleri ondalıklı hassasiyetle hesaplanmıştır. Bu dönüşüm süreci, üç farklı gemi tipi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve manevra sırasında verilen makine komutlarına uygun kW karşılıklarının belirlenmesi amacıyla gerekli veri seti oluşturulmuştur. Bu süreç sonucunda, Şekil 3.11'de kısmi olarak gösterildiği üzere, tam yol ileri (full ahead) komutundan tam yol tornistan (full astern) komutuna kadar olan aralıkta, her bir RPM değerinin ondalık kısımları dikkate alınarak ilgili kW değerlerine karşılık gelen dönüşümler tamamlanmıştır.

Simülasyon Gemisi RPM-kW Makine Bilgisi		
Engine Power	**RPM**	**Kw**
Full ahead	69,3	2052,0
Half ahead	54,3	1009,0
Slow ahead	44,3	559,0
D.Slow ahead	37,4	356,0
Stop	0	0,0
D.Slow astern	-38,4	311,0
Slow astern	-48,5	726,0
Half astern	-59	1289,0
Full astern	-75,8	2695,0

RPM	kW
69,3	2052,0
69,2	2045,0
69,1	2038,1
69	2031,1
68,9	2024,2
68,8	2017,2
68,7	2010,3
68,6	2003,3
68,5	1996,4
68,4	1989,4
68,3	1982,5
68,2	1975,5
68,1	1968,6
68	1961,6
67,9	1954,7
67,8	1947,7
67,7	1940,7
67,6	1933,8
67,5	1926,8
67,4	1919,9
67,3	1912,9
67,2	1906,0
67,1	1899,0
67	1892,1

Şekil 3.11 : Simülasyon manevrası örnek gemi makinesi RPM-Kw dönüşümü.

Simülasyon manevrası süresince, her bir gemiye ait tüm makine komutları, Şekil 3.12'de örneği gösterildiği üzere, saniye bazında simülasyon logfile (kayıt dosyası) aracılığıyla elde edilmiştir. Bu verilerin ardından, ilgili RPM değerlerine karşılık gelen kW değerleri, Şekil 3.11'de sunulan tablodan alınarak, manevra başlangıcından manevra sonuna kadar, her bir makine komutuna karşılık gelen kW değerleri saniye hassasiyetinde hesaplanmıştır. Bu süreçte elde edilen kW değerleri, ENTEC ve EPA

metodolojilerine dayalı olarak ana makine emisyon tahmini için gerekli veri setinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Current time:	8.08.2024 14:51	
Area name:		
Exercise name:	7	
Logfile name:	C:\Navi-Trainer Professional 5000\LogFiles\	\7 - 2024-06-10 18-52-56.ntlog
Ship:	TG 2	
Comments:	Bridge: Bridge#1	
Exercise start time:	12:00:00	
Begin time:	12:02:50	
Time end:	12:32:04	
Time step:	00:00:01	

Time	Longitudinal speed through the water (knt)	Port engine RPM
00:02:50	5,264	0
00:02:51	5,258	0
00:02:52	5,251	0
00:02:53	5,245	0
00:02:54	5,238	0
00:02:55	5,231	0
00:02:56	5,225	0
00:02:57	5,218	-30
00:02:58	5,206	-38
00:02:59	5,194	-37
00:03:00	5,184	-38
00:03:01	5,173	-38
00:03:02	5,163	-31
00:03:03	5,152	-14
00:03:04	5,151	-2
00:03:05	5,143	-33
00:03:06	5,134	-38
00:03:07	5,121	-37
00:03:08	5,11	-38
00:03:09	5,099	-38

Şekil 3.12 : Simülasyon manevrası örnek gemi manevra kayıtları.

3.2.1.2 Simülasyon manevrası römorkör emisyon hesaplama yöntemi

Römorkör emisyon hesaplamasında, simülasyon manevralarında gerçek manevralardan farklı olarak bottom-up metodolojisi benimsenmiştir. Gerçek manevralarda kullanılan top-down metodolojisi, yakıt tüketimine dayalı bir emisyon hesaplama yöntemidir. Römorkörlerden elde edilen yakıt verileri hem ana makine hem de yardımcı makinelere ait yakıt tüketimini kapsamaktadır. Bu durum, römorkörlerde ana makine ve yardımcı makineler için aynı yakıt tanklarının kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışmanın temel amacı, manevra sırasında kılavuz kaptan etkisiyle oluşan emisyonları belirlemek ve gerçek ile simülasyon manevralarını karşılaştırmaktır. Bu

nedenle, gemilerdeki emisyon hesaplamasına yardımcı makineler dâhil edilmemiştir. Ancak, römorkörlerde gerçek ve simülasyon manevraları arasındaki emisyon hesaplama metodolojilerindeki farklılıklar göz önüne alındığında, simülasyon bazlı manevralarda römorkörlerin emisyon hesaplamasında yardımcı makine emisyonlarının da bottom-up metodolojisi olan ENTEC ve EPA aracılığıyla hesaplanması gerekmektedir.

Römorkörlere ilişkin her bir manevraya ilişkin simülasyon verileri, Şekil 3.13'de örneklendiği gibi logfile kayıtlarından elde edilmiştir. Simülasyonun mevcut kısıtları nedeniyle, römorkörlere ait RPM bilgisi doğrudan logfile verisi olarak temin edilememektedir. Bunun yerine, logfile dosyasında römorkörlerin saniyelik bazda uyguladıkları itme/çekme gücü ton cinsinden kaydedilmektedir. Emisyon hesaplamalarında, ENTEC ve EPA metodolojilerine uygun verilerin elde edilebilmesi için, römorkörlerin itme-çekme gücü temel alınarak RPM hesaplanacak ve bu değerlerden kW hesaplamasına gidilmiştir.

Current time:	22.09.2024 15:04
Area name:	
Exercise name:	1
Logfile name:	C:\Navi-Trainer Professional 5000\LogFiles\ \1 - 2024-06-06 20-37-38.ntlog
Ship:	TG 1
Comments:	Bridge: Bridge#1
Exercise start time:	12:00:00
Begin time:	12:00:00
Time end:	12:38:07
Time step:	00:00:01

Time	Longitudinal speed through the water (knt)	Port engine RPM	75. Lateral force (t)	45. Lateral force (t)
00:12:38	2,345	-4	-27,0877421	15,77757072
00:12:39	2,348	-3	-27,10506498	15,78093145
00:12:40	2,352	-2	-27,07148318	15,76956868
00:12:41	2,353	-2	-27,10349134	15,80614647
00:12:42	2,374	-1	-27,03763698	15,76677975
00:12:43	2,332	-1	-27,06193935	15,81727669
00:12:44	2,35	0	-27,0724038	15,80168674
00:12:45	2,361	0	-27,06428389	15,79435047
00:12:46	2,32	0	-27,06188838	15,81120668
00:12:47	2,349	0	-27,06107607	15,81386181
00:12:48	2,343	0	-27,04913672	15,799648
00:12:49	2,339	0	-27,02993756	15,78432722
00:12:50	2,346	0	-27,06045489	15,80783958
00:12:51	2,329	0	-27,06127994	15,81064284
00:12:52	2,342	0	-27,07791794	15,81250956
00:12:53	2,336	0	-27,04017266	15,79135608
00:12:54	2,337	0	-27,02234009	15,78951007
00:12:55	2,302	0	-27,09588749	15,82275898
00:12:56	2,336	0	-27,07422273	15,78289532
00:12:57	2,327	0	-27,05649847	15,78285869
00:12:58	2,303	0	-27,05435461	15,81493056
00:12:59	2,331	0	-27,07101809	15,80914883
00:13:00	2,313	0	-27,10623726	15,7818441

Şekil 3.13 : Simülasyon manevrası örnek römorkörler manevra kayıtları.

Simülasyon kayıtlarından elde edilen verilere göre, römorkörle ilgili bilgiler yalnızca yatay itme/çekme kuvveti bileşenini içermektedir. Şekil 3.13'de verilen boyuna hız bilgisi ve RPM bilgisi ana gemiye ait bilgilerdir. Ancak, römorkör emisyon hesaplamalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için, römorkörün dikey kuvvet bileşeninin de dikkate alınması gerekmektedir. Toplam kuvvetin veya kuvvet bileşenleri arasındaki farkın hesaplanması suretiyle, römorkörün itme/çekme manevraları sırasında uyguladığı gerçek kuvvet değerine ulaşılması gerekmektedir. Bu noktada, dikkate alınması gereken önemli bir husus ise, ana geminin hareket hızının bu kuvvet farkına neden olmasıdır.

Ana gemi hareketsiz durduğunda, römorkörün lateral hareketleri sonucunda ürettiği reel itme/çekme kuvveti tam olarak ortaya çıkar. Ancak, ana gemi hareket ettiğinde, bu hız, römorkörün üretebildiği kuvvetin azalmasına sebep olmaktadır. Bu kuvvet azalması, geminin ileri doğru hareketinin römorkörün itme gücünü etkileyen dinamik bir unsur olduğunu göstermektedir. Bu durumu daha iyi anlamak ve analiz edebilmek için, ana gemi hızının etkisiyle oluşan kuvvet azalmalarına yönelik tablolar oluşturulmuştur. Bu tablolar, hem ana geminin hızı ile römorkörlerin efektif itme gücü arasındaki ilişkiyi hem de emisyon hesaplamalarındaki hassasiyeti artırmayı amaçlamaktadır.

Römorkörlerin hızla ilişkili kuvvet azalmasını belirlemek amacıyla, simülasyon ortamında çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler kapsamında, belirli hız aralıklarında ana geminin hareketi esnasında römorkörün itme/çekme kuvvetlerinde meydana gelen azalmalar kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, her hız aralığı için kuvvet değişimlerini gösteren tablolara dönüştürülmüştür.

Her bir manevra için, manevra süresi boyunca kullanılan römorkörlerin ve ana geminin saniye bazında kaydedilen verilerine dayanarak, gemi hızlarına karşılık gelen kuvvet azalmasını gösteren tablolar oluşturulmuştur. Log dosyalarında kaydedilen bu veriler, her saniye için ana gemi hızı ile römorkörlerin üretebildiği kuvvetler arasındaki değişimleri göstermektedir.

Römorkörlerin uyguladığı net kuvvetin ton cinsinden hesaplanmasının ardından, bu kuvvet değerlerine ulaşmak için römorkör makinelerinin uyguladığı RPM bilgilerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Simülasyon manevrası sonucu elde edilen log dosyalarında olduğu gibi, makine telgrafı üzerinde de RPM bilgisi yerine kuvvet

bilgisi yer almaktadır. Ayrıca, makine telgrafında uygulanan kuvvet, yüzdelik bir gösterimle ifade edilmektedir. Bu nedenle, simülasyon ortamında römorkörlerle çeşitli deneyler gerçekleştirilmiş ve makine telgrafındaki yüzdelik değerler ile bu değerlere karşılık gelen kuvvet bilgileri, her üç römorkör için ayrı ayrı tablolara aktarılmıştır.

Makine telgrafına karşılık gelen kuvvet bilgileri hesaplandıktan sonra, simülasyon modlarından biri olan "otomatik tug" özelliği kullanılmaksızın, makine telgrafındaki yüzdelik değerlere karşılık gelen RPM bilgilerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli denemeler yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda, makine telgrafındaki her yüzdelik kuvvet değerine karşılık gelen RPM bilgileri tespit edilmiştir. Son aşamada, elde edilen kuvvet değerlerine karşılık gelen RPM bilgileri tabloların ilgili kısımlarına eklenmiş ve bu şekilde kuvvetten RPM'e dönüşüm tamamlanarak kuvvet-RPM tabloları oluşturulmuştur.

Simülasyonda kayıtlı olan ve Şekil 3.14- Şekil 3.16'da gösterilen römorkör pilot kartlarında var olan RPM-kW bilgileri üç römorkör için de alındıktan sonra her manevra için RPM-kW dönüşümleri saniye saniye hesaplanmıştır ve bottom-up metodolojisi için gerekli olan veriler bu sayede elde edilmiş ve Şekil 3.17'de kısmi örneği verildiği üzere tablo haline getirilmiştir.

Bu bölümde yapılan RPM-kW dönüşümleri, ENTEC ve EPA metodolojilerinde ana makine emisyon hesaplamaları için kullanılmış olup, yardımcı makine emisyon hesaplamaları ise "Bölüm 2- Metodoloji"de açıklanan ilgili tablolardan yararlanılarak yapılmıştır. Ana makine ve yardımcı makine emisyon hesaplamalarının birleştirilmesiyle toplam emisyon değeri elde edilmiş ve bu değer, gerçek manevralar sırasında oluştuğu tahmin edilen römorkör emisyonları ile karşılaştırılabilir hale getirilmiştir.

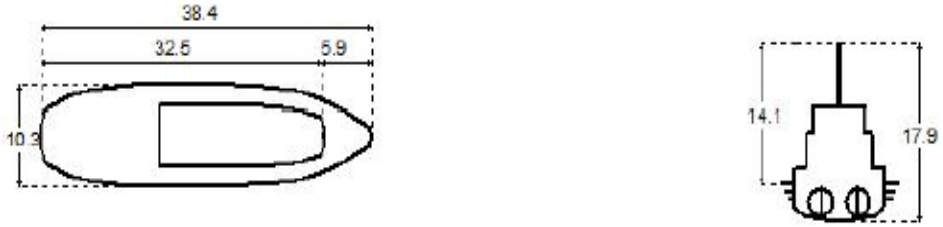
Bir sonraki bölümde, bu çalışmada tanımlanan gerçek ve simülatör manevralarının emisyon hesaplamaları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Top-down yaklaşımı ile EPA ve ENTEC metodolojilerine göre gerçekleştirilen hesaplamalar ayrı ayrı ele alınmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu bağlamda hem gerçek bir manevra için hem de simülatör uygulamasına ilişkin örnek hesaplamalar sunulmuş; ayrıca tüm hesaplama sonuçları kategorik olarak tablolar halinde düzenlenerek ifade edilmiştir.

PILOT CARD

Ship name	Conventional twin screw tug 4 (bp 46.3t) TRANSAS 2.31.17.0 *			Date	21.10.2010
IMO Number	N/A	Call Sign	N/A	Year built	N/A
Load Condition	Full load				
Displacement	686 tones		Draft forward	3.8 m / 12 ft 6 in	
Deadweight	N/A tonnes		Draft forward extreme	3.8 m / 12 ft 6 in	
Capacity			Draft after	3.8 m / 12 ft 6 in	
Air draft	14.11 m / 46 ft 4 in		Draft after extreme	3.8 m / 12 ft 6 in	

Ship's Particulars

Length overall	38.43 m	Type of bow	-
Breadth	10.37 m	Type of stern	Transom
Anchor Chain(Port)	N/A shackles		
Anchor Chain(Starboard)	9 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle =27.5 m / 15 fathoms)	



Steering characteristics

Steering device(s) (type/No.)	Suspended / 2	Number of bow thrusters	N/A
Maximum angle	35	Power	N/A
Rudder angle for neutral effect	0 degrees	Number of stern thrusters	N/A
Hard over to over(2 pumps)	7.4 seconds	Power	N/A
Flanking Rudder(s)	0		

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	28.2 s	0.51 cbls	Advance	0.48 cbls
HAH to HAS	25.2 s	0.38 cbls	Transfer	0.16 cbls
SAH to SAS	24.2 s	0.26 cbls	Tactical diameter	0.44 cbls

Main Engine(s)

Type of Main Engine	High speed diesel	Number of propellers	2
Number of Main Engine(s)	2	Propeller rotation	Outward
Maximum power per shaft	2 x 1840 kW	Propeller type	FPP
Astern power	80 % ahead	Min. RPM	5.83
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	11.8 seconds

Engine Telegraph Table

Engine order	Speed, knots	Engine power, kW	RPM	Pitch ratio
Full Sea Ahead	13.2	1826	252	0.64
Full Ahead	11.8	1194	219.1	0.64
Half Ahead	10.3	727	185.9	0.64
Slow Ahead	8.6	396	151.4	0.64
Dead Slow Ahead	6.8	198	119.3	0.64
Dead Slow Astern	-3.7	370	-110.9	0.64
Slow Astern	-4.2	542	-126.1	0.64
Half Astern	-4.8	798	-144	0.64
Full Astern	-5.4	1104	-160.7	0.64
Full Sea Astern	-5.9	1460	-176.4	0.64

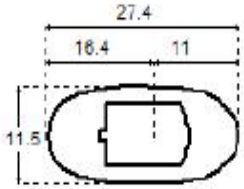
Şekil 3.14 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan römorkör no:1.

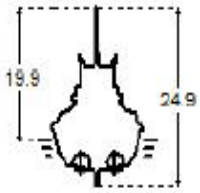
PILOT CARD

Ship name	Azimuth tractor tug 2 (bp 60t) TRANSAS 2.31.3.0 *			Date	01.12.2010
IMO Number	N/A	Call Sign	N/A	Year built	N/A
Load Condition	Full load				
Displacement	513.4 tones		Draft forward	5 m / 16 ft 5 in	
Deadweight	N/A tonnes		Draft forward extreme	5 m / 16 ft 5 in	
Capacity			Draft after	5 m / 16 ft 5 in	
Air draft	19.9 m / 65 ft 5 in		Draft after extreme	5 m / 16 ft 5 in	

Ship's Particulars

Length overall	27.4 m	Type of bow	-
Breadth	11.5 m	Type of stern	U-shaped
Anchor Chain(Port)	9 shackles		
Anchor Chain(Starboard)	9 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle =27.5 m / 15 fathoms)	





Steering characteristics

Steering device(s) (type/No.)	Z-Drive / 2	Number of bow thrusters	N/A
Maximum angle	180	Power	N/A
Rudder angle for neutral effect	0 degrees	Number of stern thrusters	N/A
Hard over to over(2 pumps)	10 seconds	Power	N/A
Flanking Rudder(s)	0		

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	10.7 s	0.2 cbls	Advance	0.33 cbls
HAH to HAS	11.8 s	0.18 cbls	Transfer	0.18 cbls
SAH to SAS	12.9 s	0.15 cbls	Tactical diameter	0.3 cbls

Main Engine(s)

Type of Main Engine	High speed diesel	Number of propellers	2
Number of Main Engine(s)	2	Propeller rotation	Inward
Maximum power per shaft	2 x 1800 kW	Propeller type	Azimuth FPP
Astern power	95 % ahead	Min. RPM	1.67
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	10.1 seconds

Engine Telegraph Table

Engine order	Speed, knots	Engine power, kW	RPM	Pitch ratio
Full Sea Ahead	12	1710	279.8	0.96
Full Ahead	10.1	1032	236.4	0.96
Half Ahead	8.3	562	193.1	0.96
Slow Ahead	6.4	262	149.6	0.96
Dead Slow Ahead	4.6	94	106.3	0.96
Dead Slow Astern	-4.8	94	106.3	0.96
Slow Astern	-6.8	262	149.6	0.96
Half Astern	-8.8	562	193.1	0.96
Full Astern	-10.7	1032	236.4	0.96
Full Sea Astern	-12.7	1710	279.8	0.96

Şekil 3.15 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan römorkör no:2.

PILOT CARD

Ship name	ASD Tug 2 (bp 78t) TRANSAS 2.31.1.0 *			Date	01.12.2010
IMO Number	N/A	Call Sign	N/A	Year built	N/A
Load Condition	Full load				
Displacement	1050 tones		Draft forward	4.4 m / 14 ft 5 in	
Deadweight	372 tonnes		Draft forward extreme	4.4 m / 14 ft 5 in	
Capacity			Draft after	4.9 m / 16 ft 1 in	
Air draft	20.5 m / 67 ft 5 in		Draft after extreme	4.9 m / 16 ft 1 in	

Ship's Particulars

Length overall	33.1 m	Type of bow	-
Breadth	12 m	Type of stern	U-shaped
Anchor Chain(Port)	4 shackles		
Anchor Chain(Starboard)	4 shackles		
Anchor Chain(Stern)	N/A shackles	(1 shackle =27.5 m / 15 fathoms)	

Steering characteristics

Steering device(s) (type/No.)	Z-Drive / 2	Number of bow thrusters	1
Maximum angle	180	Power	170 kW
Rudder angle for neutral effect	0 degrees	Number of stern thrusters	N/A
Hard over to over(2 pumps)	15 seconds	Power	N/A
Flanking Rudder(s)	0		

Stopping			Turning circle	
Description	Full Time	Head reach	Ordered Engine: 100%, Ordered rudder: 35 degrees	
FAH to FAS	16.2 s	0.34 cbls	Advance	0.39 cbls
HAH to HAS	17.2 s	0.26 cbls	Transfer	0.11 cbls
SAH to SAS	20.2 s	0.19 cbls	Tactical diameter	0.25 cbls

Main Engine(s)

Type of Main Engine	Medium speed diesel	Number of propellers	2
Number of Main Engine(s)	2	Propeller rotation	Inward
Maximum power per shaft	2 x 2320 kW	Propeller type	Azimuth FPP
Astern power	100 % ahead	Min. RPM	1.63
Time limit astern	N/A	Emergency FAH to FAS	15.2 seconds

Engine Telegraph Table

Engine order	Speed, knots	Engine power, kW	RPM	Pitch ratio
Full Sea Ahead	12.9	2200	237.7	0.93
Full Ahead	10	1126	183.4	0.93
Half Ahead	7.4	475	136.6	0.93
Slow Ahead	4.8	141	90.5	0.93
Dead Slow Ahead	2.3	18	44.2	0.93
Dead Slow Astern	-2	18	43.9	0.93
Slow Astern	-4.4	141	90.7	0.93
Half Astern	-6.8	475	137.3	0.93
Full Astern	-9.3	1126	185	0.93
Full Sea Astern	-11.9	2200	237.2	0.93

Şekil 3.16 : Çalışmada kullanılan simülatör ortamında mevcut olan römorkör no:3.

Logfile			Kuvvet Azalması		Toplam Kuvvet		RPM		kW	
Suya Göre Boyuna Hız (knots)	Tug No 1 (ton)	Tug No 3 (ton)	Tug No 1 (ton)	Tug No 3 (ton)	Tug No 1 (ton)	Tug No 3 (ton)	Tug No 1	Tug No 3	Tug No 1	Tug No 3
2,329	-27,0613	15,8106	6,36	3,53	20,70	19,34	70,45	138,93	107,19	319,05
2,342	-27,0779	15,8125	6,36	3,53	20,72	19,34	70,51	138,93	107,36	319,08
2,336	-27,0402	15,7914	6,36	3,53	20,68	19,32	70,38	138,87	106,97	318,74
2,337	-27,0223	15,7895	6,36	3,53	20,66	19,32	70,32	138,87	106,79	318,71
2,302	-27,0959	15,8228	6,36	3,33	20,74	19,15	70,57	138,43	107,54	316,02
2,336	-27,0742	15,7829	6,36	3,53	20,71	19,31	70,50	138,85	107,32	318,60
2,327	-27,0565	15,7829	6,36	3,53	20,70	19,31	70,44	138,85	107,14	318,60
2,303	-27,0544	15,8149	6,36	3,33	20,69	19,14	70,43	138,41	107,11	315,89
2,331	-27,071	15,8091	6,36	3,53	20,71	19,34	70,49	138,92	107,29	319,03
2,313	-27,1062	15,7818	6,36	3,33	20,75	19,11	70,61	138,32	107,65	315,35
2,32	-27,0952	15,7834	6,36	3,53	20,73	19,31	70,57	138,85	107,53	318,60
2,299	-27,0654	15,8009	6,36	3,33	20,71	19,13	70,47	138,38	107,23	315,66
2,311	-27,0762	15,7901	6,36	3,33	20,72	19,12	70,51	138,35	107,34	315,48
2,31	-27,1278	15,7792	6,36	3,33	20,77	19,11	70,69	138,32	107,87	315,30
2,301	-27,1154	15,7685	6,36	3,33	20,76	19,10	70,64	138,29	107,74	315,13
2,282	-27,1231	15,7853	5,96	3,33	21,16	19,12	72,06	138,33	111,89	315,40
2,284	-27,0993	15,7784	5,96	3,33	21,14	19,11	71,98	138,32	111,65	315,29
2,297	-27,1482	15,7814	6,36	3,33	20,79	19,11	70,76	138,32	108,08	315,34
2,302	-27,1337	15,7296	6,36	3,33	20,77	19,06	70,71	138,18	107,93	314,48
2,27	-27,118	15,7675	5,96	3,33	21,16	19,10	72,04	138,29	111,84	315,11
2,278	-27,0993	15,7927	5,96	3,33	21,14	19,12	71,98	138,35	111,65	315,53
2,285	-27,091	15,7344	5,96	3,33	21,13	19,06	71,95	138,20	111,56	314,56
2,271	-27,1109	15,7141	5,96	3,33	21,15	19,04	72,02	138,14	111,77	314,23
2,264	-27,0966	15,7483	5,96	3,33	21,13	19,08	71,97	138,23	111,62	314,79
2,257	-27,0725	15,7515	5,96	3,33	21,11	19,08	71,88	138,24	111,37	314,85
2,262	-27,0542	15,7181	5,96	3,33	21,09	19,05	71,82	138,15	111,19	314,29
2,27	-27,0656	15,6909	5,96	3,33	21,10	19,02	71,86	138,08	111,30	313,85
2,26	-27,1012	15,7038	5,96	3,33	21,14	19,03	71,98	138,12	111,67	314,06
2,243	-27,0736	15,7372	5,96	3,33	21,11	19,07	71,89	138,20	111,38	314,61
2,247	-27,0225	15,7235	5,96	3,33	21,06	19,05	71,71	138,17	110,86	314,38
2,228	-27,0725	15,6682	5,96	3,14	21,11	18,81	71,88	137,51	111,37	310,33
2,225	-27,0945	15,6622	5,96	3,14	21,13	18,80	71,96	137,50	111,60	310,23
2,219	-27,0393	15,7027	5,96	3,14	21,08	18,84	71,77	137,60	111,03	310,90
2,226	-27,0234	15,7058	5,96	3,14	21,06	18,85	71,71	137,61	110,87	310,95

Şekil 3.17 : Simülasyon manevrası römorkör verileri örnek dönüşüm tablosu.

4. EMİSYON HESAPLAMALARI

Bu bölümde, Bölüm 2'de sunulan metodoloji ile Bölüm 3'te detaylandırılan manevra çalışmaları birleştirilerek uygulama aşaması gerçekleştirilmiştir. Önceki bölümlerde hem gerçek manevralar hem de simülasyon manevralarında ana gemi ve römorkörlerin ürettiği emisyon miktarlarının hesaplanması amacıyla çeşitli metodolojiler geliştirilmiştir. Bu metodolojilerin uygulanabilmesi için gerekli veri setleri, gerçek manevralarda kılavuz kaptanlar tarafından gemi ve römorkörlerden toplanan veriler ile simülasyon manevralarında her bir manevranın tamamlanmasının ardından kaydedilen veriler kullanılarak oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1'de gösterildiği üzere, bu çalışmada, dört farklı enstrüman kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve daha sonra bu hesaplamalar, gemi ve römorkör birlikte ele alınarak manevra bazında karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, kılavuz kaptanların performansına bağlı olarak oluşan emisyonlar ile gerçek ve simülasyon manevraları arasında meydana gelen emisyonların karşılaştırılmasıdır. Bu nedenle, hesaplamaların tamamı yalnızca CO_2 emisyonları üzerine olup, diğer emisyon türleri dikkate alınmamıştır. Hesaplanan emisyon miktarı, $kgCO_2$ birimi ile ifade edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Gerçek ve simülasyon manevralarında emisyon hesaplama.

Manevra Türü	Deniz Aracı	Metodoloji	Gerekli Veri
Gerçek Manevra	Ana Gemi	Bottom-up	ME (kW) × LF (ME) (%)
Gerçek Manevra	Römorkörler	Top-down	Yakıt Harcamı
Simülasyon Manevrası	Ana Gemi	Bottom-up	ME (kW) × LF (ME) (%)
Simülasyon Manevrası	Römorkörler	Bottom-up	ME (kW) × LF (ME) (%)

4.1 Gerçek Manevra Emisyon Hesaplamaları

Gerçek manevra emisyon hesaplamalarında, ana gemi için bottom-up metodolojisine dayanan ENTEC ve EPA yöntemleri kullanılmıştır. Nihai olarak, bu iki yöntemin ortalaması alınarak en doğru sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. Manevralarda görev alan römorkörlerin emisyon hesaplamaları ise top-down metodolojisi temelinde yapılmış olup, bu süreçte yakıt tüketim verileri esas alınmıştır.

4.1.1 Gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplaması

Gerçek manevra sırasında ana gemi emisyon hesaplaması için gerekli olan RPM-kW dönüşümü, çalışmanın 3. Bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Her bir RPM değerine karşılık gelen kW bilgisi belirlendikten sonra, tüm manevra komutları saniye bazında kaydedilmiştir. Elde edilen kW değeri, o andaki makinenin yük değerini temsil ettiğinden, EPA metodolojisinde denklem 2.4'e göre MCR (%) × P(kW) ve ENTEC metodolojisinde denklem 2.3'e göre ME (kW) × LF(ME) (%) çarpanlarına karşılık gelmektedir. Bu aşamadan sonra yapılan işlem, uygun emisyon faktörü ile çarpma işlemi uygulayarak ENTEC ve EPA yöntemlerine göre emisyon miktarını hesaplamaktır. ENTEC ve EPA metodolojilerinde emisyon faktörü hesaplamalarında farklılıklar bulunmaktadır ve bu bölümde bu farklılıklar ve ilgili tablolardan değerlerin hangi kriterlere göre elde edildiği anlatılmıştır.

4.1.1.1 Gerçek manevra ana gemi ENTEC metodolojisi emisyon hesaplaması

ENTEC metodolojisine ait emisyon hesaplama formülü, bu çalışmanın 2. Bölümündeki denklem 2.3'te sunulmuştur. Hesaplamalar yalnızca ana makine için yapılmış olup, formülde yer alan ME (kW) × LF(ME) (%) ifadesi, manevra sonucunda elde edilen saniyelik kW değerlerine karşılık gelmektedir.

Emisyon hesaplamaları için elde edilmesi gereken diğer değer, emisyon faktörüdür. Gerçek manevralarda kullanılan tüm gemilerin makineleri maksimum 300 RPM'den daha düşük devirlerde çalışmakta olup, bu makineler ENTEC'e göre yavaş devirli dizel makineler (SSD) sınıfında değerlendirilmektedir (Whall ve diğ., 2010). Manevraları gerçekleştiren kılavuz kaptanların topladığı verilere göre, tüm gemiler yakıt olarak MDO kullanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda, CO_2 emisyonlarının hesaplanabilmesi amacıyla "ENTEC, 2010" raporundaki ilgili emisyon faktörü tablosu "Şekil 2.6" esas alındığında, emisyon faktörü "647 g/kWh" olarak belirlenmiştir. Manevra kayıtlarında saniyelik olarak kaydedilen kW değerleri, emisyon faktörü olan "647 g/kWh" ile çarpılarak saniye bazında emisyon miktarı hesaplanmıştır. g/kWh ifadesi nedeniyle, her saniyelik emisyon miktarı 3600'e bölünerek saatlik emisyon faktörü elde edilmiştir. Tüm manevra süresince oluşan toplam emisyon, Şekil 4.1'de kısmi olarak gösterildiği üzere, saniyelik emisyon değerlerinin (birimi g/kWh) toplanmasıyla belirlenmiştir. Bu yöntemle, ENTEC metodolojisine uygun olarak ana gemi emisyon hesaplaması tamamlanmıştır.

Zaman	Saniye	Ana Gemi		Ana Gemi ENTEC (gr)
		RPM	kW	
23:17:00	720	38	1438,0	258,45
23:17:01	721	38	1438,0	258,45
23:17:02	722	38	1438,0	258,45
23:17:03	723	38	1438,0	258,45
23:17:04	724	38	1438,0	258,45
23:17:05	725	38	1438,0	258,45
23:17:06	726	38	1438,0	258,45
23:17:07	727	38	1438,0	258,45
23:17:08	728	38	1438,0	258,45
23:17:09	729	38	1438,0	258,45
23:17:10	730	38	1438,0	258,45
23:17:11	731	38	1438,0	258,45
23:17:12	732	38	1438,0	258,45
23:17:13	733	38	1438,0	258,45
23:17:14	734	38	1438,0	258,45
23:17:15	735	38	1438,0	258,45
23:17:16	736	38	1438,0	258,45
23:17:17	737	38	1438,0	258,45
23:17:18	738	38	1438,0	258,45
23:17:19	739	38	1438,0	258,45
23:17:20	740	38	1438,0	258,45

TOTAL EMİSYON ANA GEMİ (kg)
ENTEC
116,83

Şekil 4.1 : Gerçek manevra ana gemi ENTEC metodolojisi örnek emisyon hesaplaması.

4.1.1.2 Gerçek manevra ana gemi EPA metodolojisi emisyon hesaplaması

Gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplamalarında, EPA ve ENTEC yöntemleri arasındaki temel fark, yalnızca kullanılan emisyon faktörlerinden kaynaklanmaktadır. EPA metodolojisinde yer alan MCR (%) × P(kW) ifadesi, RPM dönüşümleri sonucunda elde edilen kW değerlerine karşılık gelmektedir. Bu çalışmanın 2. bölümü olan metodoloji kısmında, denklem 2.4'te, formülasyona dair detaylı bilgi mevcuttur (Environmental Protection Agency, 2020). EPA metodolojisinde, emisyon faktörleri, emisyon türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çalışmada emisyon karşılaştırması, CO_2 salınımı üzerinden yapıldığı için yalnızca CO_2 emisyon faktörünün hesaplanmasına odaklanılmıştır. Denklem 2.5'te detaylandırıldığı üzere BSFC, birim enerji üretimi başına tüketilen yakıt miktarını ifade eder ve g/kWh birimiyle tanımlanır. Çalışmada, gemi BSFC değerine ulaşmak için "EPA, 2020" raporunda sunulan, Şekil 2.9'daki tablo kullanılmıştır. Gerçek manevralarda kullanılan tüm gemilerin makineleri, maksimum 500 RPM'nin altında çalışmakta olup EPA'ya göre düşük devirli dizel makineler (SSD) sınıfına girmektedir. Yakıt olarak tüm gemiler MDO kullanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda gemi BSFC katsayısı "185 g/kWh" olarak belirlenmiştir.

BSFC hesaplandıktan sonra, CCF belirlenmiştir. Bu hesaplama için 4th IMO GHG Study'de yer alan, Şekil 2.4'teki ilgili tabloya başvurulmuştur. Bu tabloya göre, MDO kullanan gemiler için CCF CO_2 "3,206 g CO_2/g yakıt" olarak belirtilmiştir. Elde edilen

BSFC ve CCF değerlerinin çarpımıyla CO_2 için emisyon faktörü “593,11 g/kWh” olarak hesaplanmaktadır.

Manevra kayıtlarında saniyelik olarak kaydedilen kW değerleri, elde edilen emisyon faktörü ile çarpılarak saniye bazında emisyon miktarı hesaplanmış ve daha sonra saatlik emisyona dönüştürülmüştür. Ardından, Şekil 4.2’de kısmi olarak gösterildiği gibi, tüm manevra süresince oluşan toplam emisyon, bu saniyelik emisyon değerlerinin toplanmasıyla belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra, EPA metodolojisine uygun olarak ana gemi emisyon hesaplaması tamamlanmıştır. Çalışmadaki tüm ana gemiler için bu işlem tekrarlanmış olup, EPA ve ENTEC metodolojisi gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplamaları tamamlanmıştır.

Zaman	Saniye	Ana Gemi		AnaGemi EPA (gr)
		RPM	kW	
23:17:00	720	38	1438,0	236,92
23:17:01	721	38	1438,0	236,92
23:17:02	722	38	1438,0	236,92
23:17:03	723	38	1438,0	236,92
23:17:04	724	38	1438,0	236,92
23:17:05	725	38	1438,0	236,92
23:17:06	726	38	1438,0	236,92
23:17:07	727	38	1438,0	236,92
23:17:08	728	38	1438,0	236,92
23:17:09	729	38	1438,0	236,92
23:17:10	730	38	1438,0	236,92
23:17:11	731	38	1438,0	236,92
23:17:12	732	38	1438,0	236,92
23:17:13	733	38	1438,0	236,92
23:17:14	734	38	1438,0	236,92
23:17:15	735	38	1438,0	236,92
23:17:16	736	38	1438,0	236,92
23:17:17	737	38	1438,0	236,92
23:17:18	738	38	1438,0	236,92
23:17:19	739	38	1438,0	236,92
23:17:20	740	38	1438,0	236,92

TOTAL EMİSYON ANA GEMİ (kg)
EPA
107,10

Şekil 4.2 : Gerçek manevra ana gemi EPA metodolojisi örnek emisyon hesaplaması.

4.1.2 Gerçek manevra römorkör emisyon hesaplaması

Gerçek manevra römorkör emisyon hesaplamasında top-down metodolojisi kullanılmıştır. Kılavuz kaptanlar tarafından gerçek manevralar sırasında toplanan verilere dayanarak, yakıt bilgileri elde edilmiştir. Manevra bazında, römorkörlerin kullandığı yakıt miktarı, yakıt türüne göre belirlenen emisyon faktörü ile çarpılarak emisyon değerleri hesaplanmıştır. Denklem 2.1’de, genel formülasyona dair detaylı bilgi mevcuttur.

Kılavuz kaptanlar aracılığıyla römorkörlerin yakıt tüketimleri (FC) litre biriminde elde edilmiştir. Formülizasyon gereği yakıt tüketimin ağırlık birimine dönüştürülmesinde “4. IMO GHG Study” kaynak alınmıştır. İlgili yakıt tablosu incelendiğinde, marine

diesel oil (MDO) için yoğunluğun "0,895 tonne/cbm" olarak belirlendiği görülmektedir (Şekil 1.17). Her bir manevra için harcanan yakıt miktarının bu yoğunluk değeri ile çarpılmasıyla, yakıt tüketimi ağırlık birimi cinsinden hesaplanmıştır.

Emisyon faktörünün hesaplanmasında yine 4. IMO GHG Study" kaynak alınmıştır. Bu tabloya göre, yakıt olarak MDO kullanan gemiler için CO_2 emisyon katsayısı "3,206 g CO_2/g yakıt" olarak belirtilmiştir. Şekil 4.3'te kısmi olarak gösterildiği üzere, EF ile ağırlık birimindeki yakıt harcamının çarpılmasıyla gerçek manevrada kullanılan römorkörlere ait emisyon miktarları hesaplanmıştır.

Manevra No	Manevra Süresi (hrs)	Römorkör No	1. Nolu Römorkör (ltr)	2. Nolu Römorkör (ltr)	3. Nolu Römorkör (ltr)	1. Nolu Römorkör (kg)	2. Nolu Römorkör (kg)	3. Nolu Römorkör (kg)	1. Nolu Römorkör (kg x CO2)	2. Nolu Römorkör (kg x CO2)	3. Nolu Römorkör (kg x CO2)
1	0,75	1 ve 3	50,00	-	35,00	0,04	-	0,03	143,47	-	100,43
2	0,50	1 ve 3	40,00	-	30,00	0,04	-	0,03	114,77	-	86,08
3	0,58	1 ve 3	40,00	-	35,00	0,04	-	0,03	114,77	-	100,43
4	0,58	3	-	-	25,00	-	-	0,02	-	-	71,73
5	0,50	1 ve 3	37,50	-	30,00	0,03	-	0,03	107,60	-	86,08
6	0,40	1 ve 3	37,50	-	25,00	0,03	-	0,02	107,60	-	71,73
7	0,75	3	-	-	30,00	-	-	0,03	-	-	86,08
8	0,58	3	-	-	30,00	-	-	0,03	-	-	86,08
9	0,58	3	-	-	30,00	-	-	0,03	-	-	86,08
10	0,33	1 ve 3	37,50	-	25,00	0,03	-	0,02	107,60	-	71,73
11	0,92	2	-	40,00	-	-	0,04	-	-	114,77	-
12	0,58	2	-	30,00	-	-	0,03	-	-	86,08	-
13	0,75	1 ve 3	50,00	-	40,00	0,04	-	0,04	143,47	-	114,77
14	1,08	1 ve 3	40,00	-	35,00	0,04	-	0,03	114,77	-	100,43
15	0,92	1 ve 3	50,00	-	40,00	0,04	-	0,04	143,47	-	114,77
16	1,00	1 ve 3	50,00	-	40,00	0,04	-	0,04	143,47	-	114,77
17	0,92	1 ve 3	40,00	-	35,00	0,04	-	0,03	114,77	-	100,43
18	1,00	1 ve 2	50,00	30,00	-	0,04	0,03	-	143,47	86,08	-

Şekil 4.3 : Gerçek manevra römorkörlere ait emisyon hesaplaması.

4.2 Simülasyon Manevrası Emisyon Hesaplaması

Simülasyon verilerinin elde edilmesinin ardından, hesaplama aşaması bu bölümde detaylandırılmıştır. Ana gemi manevrası ve manevraya yardımcı römorkörlere ait emisyon verileri ayrı ayrı Bottom-up yöntemileri ile hesaplanmıştır.

4.2.1 Simülasyon manevrası ana gemi emisyon hesaplaması

Ana makineye ait kW verilerinin saniyelik bazda düzenlendiği tablo değerleri, uygun emisyon faktörü ile çarpılmıştır. Ardından, tüm manevra süresi boyunca elde edilen saniyelik emisyon değerlerinin toplanmasıyla toplam emisyon miktarı hesaplanmıştır.

4.2.1.1 Simülasyon manevrası ana gemi ENTEC metodolojisi emisyon hesaplaması

Simülasyon sistemi kayıt dosyalarından elde edilen RPM verileri, simülasyonda kayıtlı gemilere ait pilot kartlarındaki RPM-kW bilgileri kullanılarak kW cinsine dönüştürülmüştür. ENTEC metodolojisine göre emisyon faktörü, ana gemi emisyon faktörüyle aynı yöntemle belirlenmiş olup, Şekil 2.6'ya göre değeri "647 g/kWh"dir (Whall ve diğ., 2010). Birimi g/kWh olduğundan, saniyelik emisyon miktarını hesaplamak için 3600'e bölünerek saatlik emisyon faktörü elde edilmiştir. Şekil 4.4'te kısmi olarak gösterildiği üzere, tüm manevra süresince oluşan toplam emisyon, saniyelik emisyon değerlerinin toplanmasıyla elde edilmiştir.

Zaman	Saniye	Ana gemi		Ana Gemi ENTEC (gr)
		RPM	Kw	
00:06:17	377	22	417,3	75,00
00:06:18	378	20	379,4	68,19
00:06:19	379	19	360,4	64,78
00:06:20	380	18	341,5	61,37
00:06:21	381	17	322,5	57,96
00:06:22	382	16	303,5	54,55
00:06:23	383	15	284,5	51,14
00:06:24	384	14	265,6	47,73
00:06:25	385	13	246,6	44,32
00:06:26	386	12	227,6	40,91
00:06:27	387	12	227,6	40,91
00:06:28	388	11	208,7	37,50
00:06:29	389	10	189,7	34,09
00:06:30	390	10	189,7	34,09
00:06:31	391	9	170,7	30,68
00:06:32	392	9	170,7	30,68
00:06:33	393	8	151,8	27,27
00:06:34	394	8	151,8	27,27
00:06:35	395	7	132,8	23,86
00:06:36	396	7	132,8	23,86
00:06:37	397	6	113,8	20,46

TOTAL EMİSYON ANA GEMİ (kg)
ENTEC
105,94

Şekil 4.4 : Simülasyon manevrası ana gemi ENTEC metodolojisi örnek emisyon hesaplaması.

4.2.1.2 Simülasyon manevrası ana gemi EPA metodolojisi emisyon hesaplaması

Simülasyon manevrasındaki ana gemi emisyon hesaplamasında, ENTEC metodolojisinden farklı olarak yalnızca emisyon faktörü değişmektedir. Gerçek manevra ana gemi emisyon hesaplamasında elde edilen "593,11 g/kWh" emisyon değeri, simülasyon manevrasındaki ana gemi emisyon hesabında da kullanılmıştır (Environmental Protection Agency, 2020). Şekil 4.5'te kısmi olarak gösterildiği üzere, tüm manevra süresince oluşan toplam emisyon, saniyelik emisyon değerlerinin toplanması yoluyla belirlenmiştir.

Zaman	Saniye	Ana gemi		Ana Gemi EPA (gr)
		RPM	Kw	
00:06:17	377	22	417,3	68,76
00:06:18	378	20	379,4	62,51
00:06:19	379	19	360,4	59,38
00:06:20	380	18	341,5	56,26
00:06:21	381	17	322,5	53,13
00:06:22	382	16	303,5	50,00
00:06:23	383	15	284,5	46,88
00:06:24	384	14	265,6	43,75
00:06:25	385	13	246,6	40,63
00:06:26	386	12	227,6	37,50
00:06:27	387	12	227,6	37,50
00:06:28	388	11	208,7	34,38
00:06:29	389	10	189,7	31,25
00:06:30	390	10	189,7	31,25
00:06:31	391	9	170,7	28,13
00:06:32	392	9	170,7	28,13
00:06:33	393	8	151,8	25,00
00:06:34	394	8	151,8	25,00
00:06:35	395	7	132,8	21,88
00:06:36	396	7	132,8	21,88
00:06:37	397	6	113,8	18,75

TOTAL EMİSYON ANA GEMİ (kg)
EPA
97,11

Şekil 4.5 : Simülasyon manevrası ana gemi EPA metodolojisi örnek emisyon hesaplaması.

4.2.2 Simülasyon manevrası römorkör emisyon hesaplaması

Gerçek manevra emisyonlarıyla doğru bir karşılaştırma yapabilmek için, simülasyon manevrasında kullanılan römorkörlerin emisyon hesaplamasında, gerçek manevralarda kullanılan römorkörlerin hesaplamalarındaki yakıt tüketiminin hem ana makineyi hem de yardımcı makineleri içermesi nedeniyle, her iki makinenin emisyonları ayrı ayrı hesaplanacak ve manevra başına toplam emisyon değerleri elde edilmiştir. Bu hesaplamalar hem ENTEC hem de EPA metodolojilerine göre ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

4.2.2.1 Simülasyon manevrası römorkör ENTEC metodolojisi emisyon hesaplaması

Bu çalışmanın 3. bölümünde, simülasyon manevrasında römorkörlere ait kW dönüşümlerinin nasıl gerçekleştirildiği açıklanmıştır. Ana makine emisyon hesaplama aşamasında, dönüşümü yapılan kW değerleri, Şekil 2.6'daki tablodan elde edilen "647 g/kWh" ile çarpılarak hesaplama yapılmıştır. Tüm manevra süresince, saniye bazında elde edilen emisyon değerlerinin toplanmasıyla toplam ana makine emisyon miktarı belirlenmiştir.

Denklem 2.3'te sunulan, "ENTEC, 2010" raporundaki formüle göre, "ME (kW) × LF(ME) (%)" değeri ana makine saniyelik bazda kW değeri iken ana makine EF değeri "647 g/kWh"dir (ENTEC, 2010). "AE (kW) × LF(AE) (%)" değeri ise römorkörlerin yardımcı makinelerine ait kW cinsinden gücü ifade etmektedir. Bu değer için Şekil

2.5'te sunulan ilgili tablodan yararlanılmıştır (IMO, 2021). Bu tabloya göre römorkörlerin manevra esnasındaki yardımcı makine gücü "210 kW" olarak verilmiştir. Şekil 2.7'deki tabloda gösterilen römorkör yardımcı makineleri emisyon faktörü de "690 g/kWh" olarak elde edilmiştir (Whall ve diğ., 2010). Yardımcı makine emisyon hesaplaması için bu iki değerin çarpılması ile elde edilmiştir. Kısmi, olarak Şekil 4.6'da gösterildiği üzere, ana makine ve yardımcı makine emisyonlarının toplanmasıyla manevradaki toplam emisyon hesaplanmıştır.

MANEVRA SÜRECİ		ANA MAKİNE kW		FİNAL EMİSYONLAR (ENTEC) gr.	
Zaman	Saniye	3 Nolu Römorkör	1 Nolu Römorkör	3 Nolu Römorkör	1 Nolu Römorkör
		13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:00	0	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:01	1	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:02	2	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:03	3	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:04	4	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:05	5	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:06	6	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:07	7	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:08	8	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:09	9	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:10	10	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:11	11	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:12	12	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:13	13	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:14	14	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:15	15	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:16	16	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:17	17	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:18	18	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:19	19	13,10	144,12	42,60	66,15
00:00:20	20	13,10	144,12	42,60	66,15

RÖMORKÖRLER	
ME EF ENTEC / EPA	AE EF ENTEC / EPA
647 / 679,47	690 / 695,70

TOTAL EMİSYONLAR (ENTEC) (kg)	
3 Nolu Römorkör	1 Nolu Römorkör
92,44	125,65

Şekil 4.6 : Simülasyon manevrası römorkörlere ait ENTEC metodolojisi örnek emisyon hesaplaması.

Hesaplama adımları üzerinden bir örnekle açıklayacak olursak Şekil 4.6'nın birinci saniyesindeki 3 nolu römorköre ait hesabı inceleyelim. Bu hesaplama için denklem 2.3 kullanılmıştır. Denklemde kullanılan birimlerin açıklamaları ve bu örnekleme için ilgili çarpanları detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır. Daha sonra denklem 2.3'teki uygun yerlere konularak saniyelik bazda emisyon hesaplanmıştır.

T(h): Saniye bazında hesaplama yapıldığı için bu değer 1/3600h olarak alınmıştır.

ME (kW) × LF(ME) (%): Ana makinenin anlık gücünü ifade etmekte olup, daha önce dönüşümü yapılmış olan 13,10 kW değerini temsil etmektedir.

EF(ME)(g/kWh): Ana makine emisyon faktörü "647 g/kWh" olarak ilgili tablodan elde edilmiştir.

AE (kW) × LF(AE) (%): Manevra esnasındaki römorkör yardımcı makine gücü, ilgili tablodan "210 kW" olarak elde edilmiştir.

EF(AE)(g/kWh): Manevra esnasındaki römorkör yardımcı makine emisyon faktörü, ilgili tablodan “690 g/kWh” olarak elde edilmiştir.

Bu bilgilerin ışığında ilgili römorkörün 1 saniyedeki emisyon miktarı;

E(g)= (1/3600) (h) × [((13,10 kW) × (647 g/kWh)) + ((210 kW) × (690 g/kWh))]

E(g)=42,60 g olarak elde edilmiştir.

Tüm sütunlar aşağı doğru toplandığında, 3 numaralı römorköre ait toplam emisyon miktarı 92.440 g olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 92,44 kg CO_2 salınımına eşdeğerdir.

4.2.2.2 Simülasyon manevrası römorkör EPA metodolojisi emisyon hesaplaması

Simülasyon manevrasında kullanılan römorkörlerin emisyon hesaplamasında, ana makine için RPM’den dönüştürülen kW değerlerine ve ilgili emisyon faktörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.10’daki liman deniz araçlarının ana makine ortalama emisyon faktörünü içeren tabloda, CO_2 emisyon faktörü “679,47 g/kWh” olarak belirtilmiştir. Emisyon hesaplaması, ana makinenin saniyelik kW değerleri ile emisyon faktörünün çarpılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Römorkörlerin yardımcı makinelerine ait emisyon hesaplaması da denklem 2.4 ve denklem 2.5’e göre gerçekleştirilmiştir. Yardımcı makine güç çıktısı için, Şekil 2.5’teki tablo kullanılmıştır. Bu tabloya göre, manevra esnasında römorkörlerin yardımcı makine güç çıktısı “210 kW” olarak verilmiştir (IMO, 2021).

EPA metodolojisine göre CO_2 emisyon faktörü hesaplamasında, BSFC değeri, Şekil 2.9’daki tablodan alınmıştır. Bu tabloya göre, yakıt olarak MDO kullanan yardımcı makinelere sahip römorkörlerin, yardımcı makine BSFC katsayısı “217 g/kWh” olarak verilmiştir. CCF için Şekil 2.4’te sınulan tablo kullanılmış ve yakıt olarak MDO kullanan römorkörler için CCF CO_2 değeri “3,206 g CO_2/g yakıt” olarak belirlenmiştir. BSFC ve CCF değerlerinin çarpımıyla, CO_2 için emisyon faktörü “695,70 g/kWh” olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.7’de kısmi olarak gösterildiği üzere, ana makine ve yardımcı makinelerden elde edilen emisyon değerlerinin toplanmasıyla toplam emisyon miktarı bulunmuştur.

MANEVRA SÜRECİ		ANA MAKİNE kW		FİNAL EMİSYONLAR (EPA) gr.	
Zaman	Saniye	3 Nolu Römorkör	1 Nolu Römorkör	3 Nolu Römorkör	1 Nolu Römorkör
		13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:00	0	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:01	1	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:02	2	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:03	3	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:04	4	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:05	5	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:06	6	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:07	7	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:08	8	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:09	9	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:10	10	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:11	11	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:12	12	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:13	13	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:14	14	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:15	15	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:16	16	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:17	17	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:18	18	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:19	19	13,10	144,12	43,06	67,78
00:00:20	20	13,10	144,12	43,06	67,78

RÖMORKÖRLER	
ME EF ENTEC / EPA	AE EF ENTEC / EPA
647 / 679,47	690 / 695,70

TOTAL EMİSYONLAR (EPA) (kg)	
3 Nolu Römorkör	1 Nolu Römorkör
93,60	128,23

Şekil 4.7 : Simülasyon manevrası römorkörlere ait EPA metodolojisi örnek emisyon hesaplaması.

Hesaplama adımları üzerinden bir örnekle açıklamak gerekirse, Şekil 4.7'nin birinci saniyesindeki 1 nolu römorköre ait hesap aşağıda incelenmiştir. Bu hesaplama için denklem 2.4 ve denklem 2.5 kullanılmıştır. Bu denklemlere göre;

T(h): Saniye bazında hesaplama yapıldığı için bu değer 1/3600h olarak alınmıştır.

MCR (%) × P(kW) (ME): Ana makinenin anlık gücünü ifade etmekte olup, daha önce dönüşümü yapılmış olan 144,12 kW değerini temsil etmektedir.

EF (g/kWh) (ME): Ana makine emisyon faktörü "679,47 g/kWh" olarak, ilgili tablodan bulunmuştur.

MCR (%) × P(kW) (AE): Manevra esnasındaki römorkör yardımcı makine gücü, ilgili tablodan "210 kW" olarak elde edilmiştir.

EF (g/kWh) (AE): Manevra esnasındaki römorkör yardımcı makine emisyon faktörü, "3,206 g CO_2/g yakıt × 217 g/kWh" (BSFC×CCF) çarpımından "695,70 g/kWh" olarak elde edilmiştir.

Bu bilgilerin ışığında ilgili römorkörün 1 saniyedeki emisyon miktarı;

E(g)= (1/3600) (h) × [((144,12 kW) × (679,47g/kWh)) + ((210 kW) × (695,70g/kWh))]

E(g)=67,78 g olarak elde edilir.

Tüm sütunlar aşağı doğru toplandığında, 1 numaralı römorköre ait toplam emisyon miktarı 128,23 kg CO_2 olarak elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu bölümde, daha önce açıklanan metodolojiye uygun olarak elde edilen on sekiz gerçek ve on sekiz simülasyon manevrasına ait emisyon değerlerinin kapsamlı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Bu doğrultuda, gerçek manevralarda ana gemi ve römorkör kaynaklı emisyonlar ile simülasyon manevralarında elde edilen ana gemi ve römorkör kaynaklı emisyon değerleri çok yönlü olarak analiz edilmiştir. Bu analizler temel alınarak çeşitli tablolar oluşturulmuş ve karşılaştırmaların yapılabilmesi için düzenlenmiştir. Analizler sonucunda, gerçek ve simülasyon manevraları arasındaki uyumun yanı sıra farklı kılavuz kaptanların emisyon değerleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve elde edilen bulgulara dayalı çıkarımlar yapılmıştır.

Emisyon sonuçlarına dair hazırlanan tablolar, römorkörler, ana gemiler ve toplam emisyonlar şeklinde ayrı ayrı sunulmuştur. Sonuçlar, ENTEC ve EPA metodolojilerine göre ayrı ayrı hesaplanmış olup, daha homojen sonuçlar elde edebilmek amacıyla bu metodolojilerin ortalamaları alınmıştır. Emisyon tablolarında manevra numaralandırması kronolojik sıraya göre yapılmıştır.

Gerçek ve simülasyon manevralarında kullanılan römorkörlere ait emisyon değerleri, Şekil 5.1 ile Şekil 5.3 arasında sunulmuştur. Manevralarda yer almayan römorkörlerin emisyon değerleri ise bu tablolarda “0” olarak belirtilmiştir. Sunulan tablolarda, 1, 2 ve 3 numaralı römorkörler için ENTEC ve EPA metodolojilerine göre gerçek ve simülasyon verileri karşılaştırılmış, her iki yöntem için toplam emisyon değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, her iki metodolojide de simülasyon ve gerçek değerler arasında yüksek bir uyum olduğunu ortaya koymaktadır. Manevralar bazında yapılan korelasyon analizinde, ENTEC ve EPA metodolojilerinde korelasyon katsayısının 0,9902 olarak elde edilmesi, değerler arasındaki uyumun %99’dan fazla olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, römorkörler açısından, simülasyon manevralarının gerçek manevraların emisyon sonuçlarını başarılı bir şekilde yansıttığını ortaya koymaktadır.

MANEVRA NO	GEMİ TİPİ	1 NOLU RÖMORKÖR ENTEC		1 NOLU RÖMORKÖR EPA	
		GERÇEK	SİMÜLASYON	GERÇEK	SİMÜLASYON
1	DÖKME	143,47	125,65	143,47	128,23
2	DÖKME	114,77	110,09	114,77	111,89
3	DÖKME	114,77	115,94	114,77	118,03
4	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
5	DÖKME	107,60	110,57	107,60	112,40
6	DÖKME	107,60	100,93	107,60	102,27
7	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
8	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
9	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
10	RO-RO	107,60	102,00	107,60	103,39
11	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
12	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
13	KONTEYNER	143,47	139,60	143,47	142,88
14	KONTEYNER	114,77	118,46	114,77	120,68
15	KONTEYNER	143,47	144,96	143,47	148,51
16	KONTEYNER	143,47	142,51	143,47	145,93
17	KONTEYNER	114,77	124,86	114,77	127,40
18	KONTEYNER	143,47	144,27	143,47	147,79
TOPLAM		1499,25	1479,83	1499,25	1509,39

Şekil 5.1 : 1 Nolu römorköre ait emisyonlar.

MANEVRA NO	GEMİ TİPİ	2 NOLU RÖMORKÖR ENTEC		2 NOLU RÖMORKÖR EPA	
		GERÇEK	SİMÜLASYON	GERÇEK	SİMÜLASYON
1	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
2	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
3	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
4	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
5	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
6	DÖKME	0,00	0,00	0,00	0,00
7	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
8	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
9	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
10	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
11	RO-RO	114,77	90,63	114,77	91,82
12	RO-RO	86,08	95,08	86,08	96,51
13	KONTEYNER	0,00	0,00	0,00	0,00
14	KONTEYNER	0,00	0,00	0,00	0,00
15	KONTEYNER	0,00	0,00	0,00	0,00
16	KONTEYNER	0,00	0,00	0,00	0,00
17	KONTEYNER	0,00	0,00	0,00	0,00
18	KONTEYNER	86,08	90,81	86,08	91,64
TOPLAM		286,94	276,51	286,94	279,97

Şekil 5.2 : 2 Nolu römorköre ait emisyonlar.

MANEVRA NO	GEMİ TİPİ	3 NOLU RÖMORKÖR ENTEC		3 NOLU RÖMORKÖR EPA	
		GERÇEK	SİMÜLASYON	GERÇEK	SİMÜLASYON
1	DÖKME	100,43	92,44	100,43	93,60
2	DÖKME	86,08	80,14	86,08	81,09
3	DÖKME	100,43	98,88	100,43	100,15
4	DÖKME	71,73	72,58	71,73	73,26
5	DÖKME	86,08	83,78	86,08	84,74
6	DÖKME	71,73	70,87	71,73	71,53
7	RO-RO	86,08	80,94	86,08	82,04
8	RO-RO	86,08	83,35	86,08	84,60
9	RO-RO	86,08	93,48	86,08	94,45
10	RO-RO	71,73	67,71	71,73	68,48
11	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
12	RO-RO	0,00	0,00	0,00	0,00
13	KONTEYNER	114,77	108,84	114,77	110,57
14	KONTEYNER	100,43	92,54	100,43	93,46
15	KONTEYNER	114,77	104,94	114,77	106,48
16	KONTEYNER	114,77	104,55	114,77	106,07
17	KONTEYNER	100,43	96,66	100,43	97,78
18	KONTEYNER	0,00	0,00	0,00	0,00
TOPLAM		1391,64	1331,67	1391,64	1348,30

Şekil 5.3 : 3 Nolu römorköre ait emisyonlar.

Gerçek ve simülasyon manevralarına ait ana gemi emisyonları, ENTEC ve EPA metodolojileriyle hesaplanarak Şekil 5.4'teki tabloda gösterilmiştir. Gemilerin ENTEC ve EPA metodolojileriyle yapılan emisyon hesaplamalarında, 0,9872 korelasyon katsayısı elde edilmesi, gerçek ve simülasyon manevraları arasındaki %99 uyumu göstermektedir.

MANEVRA NO	GEMİ TİPİ	ANA GEMİ ENTEC		ANA GEMİ EPA	
		GERÇEK	SİMÜLASYON	GERÇEK	SİMÜLASYON
1	DÖKME	116,83	105,94	107,10	97,11
2	DÖKME	79,76	83,83	73,11	76,84
3	DÖKME	96,99	87,86	88,91	80,54
4	DÖKME	44,89	41,73	41,15	38,26
5	DÖKME	93,31	85,50	85,53	78,38
6	DÖKME	19,93	16,82	18,27	15,42
7	RO-RO	53,47	54,14	49,02	49,63
8	RO-RO	60,31	53,18	55,29	48,75
9	RO-RO	44,85	43,97	41,11	40,31
10	RO-RO	48,76	44,12	44,70	40,44
11	RO-RO	73,55	65,22	67,43	59,79
12	RO-RO	49,16	43,81	45,07	40,16
13	KONTEYNER	179,89	148,62	164,91	136,24
14	KONTEYNER	171,70	146,18	157,39	134,01
15	KONTEYNER	154,03	120,72	141,20	110,66
16	KONTEYNER	38,10	32,53	34,93	29,82
17	KONTEYNER	50,91	47,46	46,67	43,51
18	KONTEYNER	96,79	100,07	88,73	91,73
TOPLAM		1473,23	1321,70	1350,53	1211,61

Şekil 5.4 : Ana gemi emisyonları.

Ana gemi ile römorkörlerin toplam emisyonlarnın ENTEC ve EPA metodolojilerinde ayrı ayrı hesaplandığı tablo Şekil 5.5'te, verilmiştir. Gemi ve römorkörlerin ENTEC ve EPA metodolojileriyle yapılan emisyon hesaplamalarında, 0,9887 korelasyon katsayısı, gerçek ve simülasyon manevraları arasındaki yaklaşık %99 uyumu göstermektedir.

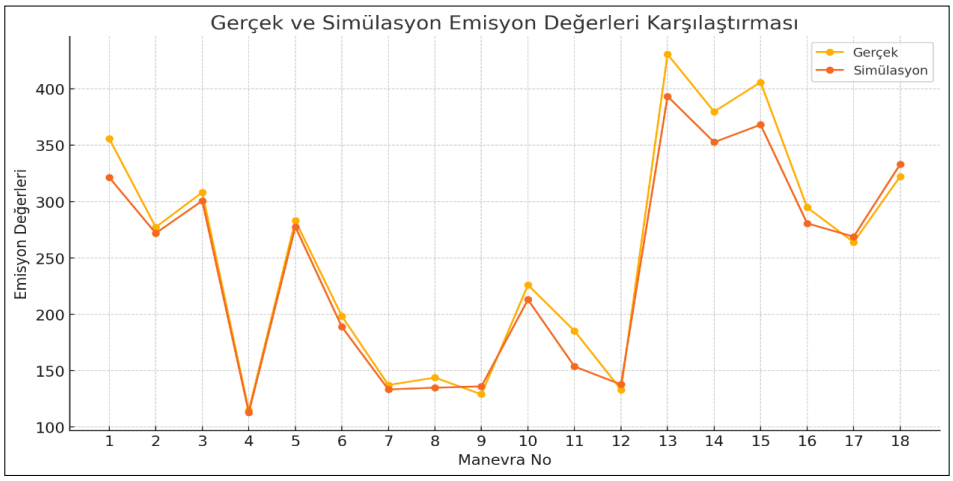
MANEVRA NO	GEMİ TİPİ	TOPLAM ENTEC		TOPLAM EPA	
		GERÇEK	SİMÜLASYON	GERÇEK	SİMÜLASYON
1	DÖKME	360,73	324,02	351,00	318,94
2	DÖKME	280,61	274,06	273,97	269,83
3	DÖKME	312,20	302,68	304,12	298,72
4	DÖKME	116,63	114,31	112,89	111,52
5	DÖKME	286,99	279,85	279,22	275,51
6	DÖKME	199,27	188,62	197,61	189,22
7	RO-RO	139,55	135,08	135,10	131,67
8	RO-RO	146,39	136,52	141,37	133,35
9	RO-RO	130,93	137,46	127,19	134,76
10	RO-RO	228,09	213,82	224,03	212,32
11	RO-RO	188,33	155,85	182,20	151,61
12	RO-RO	135,24	138,89	131,15	136,67
13	KONTEYNER	438,13	397,06	423,15	389,70
14	KONTEYNER	386,90	357,18	372,60	348,14
15	KONTEYNER	412,27	370,62	399,44	365,65
16	KONTEYNER	296,34	279,58	293,17	281,82
17	KONTEYNER	266,11	268,98	261,87	268,69
18	KONTEYNER	326,34	335,15	318,28	331,16
TOPLAM		4651,06	4409,71	4528,35	4349,27

Şekil 5.5 : Her bir manevra için toplam emisyon değerleri.

Gemi ve römorkörlerin ENTEC ve EPA metodolojileriyle yapılan emisyon hesaplamalarının manevra bazında metodolojik ortalamaları alınarak Şekil 5.6'da sunulmuştur. Şekil 5.6'da gösterilen, gerçek ve simülasyon manevralarına ait toplam emisyonlar arasındaki korelasyon incelendiğinde, 0,9888 korelasyon katsayısı elde edilmiş olup, sonuçlar arasındaki uyumun %99'a yakın olduğu ve simülasyon manevralarının emisyon sonuçlarının, gerçek manevraların emisyon sonuçlarına çok yakın olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, manevra bazındaki bazı bireysel değerlerde gözlenen küçük farklılıklar, kullanılan emisyon hesaplama yöntemlerindeki farklılıklardan veya ilgili kılavuz kaptanın performansındaki değişkenliklerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

MANEVRA NO	GEMİ TİPİ	TOPLAM ENTEC/EPA ORTALAMA	
		GERÇEK	SİMÜLASYON
1	DÖKME	355,86	321,48
2	DÖKME	277,29	271,94
3	DÖKME	308,16	300,70
4	DÖKME	114,76	112,91
5	DÖKME	283,10	277,68
6	DÖKME	198,44	188,92
7	RO-RO	137,33	133,38
8	RO-RO	143,88	134,94
9	RO-RO	129,06	136,11
10	RO-RO	226,06	213,07
11	RO-RO	185,26	153,73
12	RO-RO	133,20	137,78
13	KONTEYNER	430,64	393,38
14	KONTEYNER	379,75	352,66
15	KONTEYNER	405,86	368,13
16	KONTEYNER	294,76	280,70
17	KONTEYNER	263,99	268,84
18	KONTEYNER	322,31	333,15
TOPLAM		4589,71	4379,49

Şekil 5.6 : Her bir manevra için ENTEC/EPA ortalamaları.



Şekil 5.7 : Gerçek ve simülasyon manevralarının ENTEC/EPA ortalama emisyon sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.7 incelendiğinde, gerçek ve simülasyon manevraları arasında belirgin bir yakınlık gözlemlense de gerçek manevralara ait emisyon toplamlarının genellikle simülasyon manevralarına ait emisyon toplamlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farkın olası nedenlerinden birkaçı, gerçek manevralar sırasında kılavuz kaptanların karşılaştığı stres, belirsizlik, baskı ve yorgunluk faktörlerinin daha yoğun olmasıyla ilişkilendirilebilir. Simülasyon manevralarında kılavuz kaptanların genellikle dinlenmiş bir şekilde katılım sağladığı bilinmektedir. Buna karşın, gerçek manevralar, kılavuz kaptanların normal çalışma süreleri içinde gerçekleşmekte olup, bu durum kaptanların yorgunluk seviyesinin daha yüksek olmasına yol açabilir. Ancak, gerçek ve simülasyon manevraları arasındaki emisyon farklarının sebeplerine dair bir değerlendirme, bu çalışmada detaylı bir şekilde ele alınmamıştır.

Gerçek ve simülasyon manevralarına ait emisyon sonuçlarına dair ilgili tablolar sunulduktan sonra çalışmaya katılan kılavuz kaptanların gerçekleştirdiği manevralara ait emisyon sonuçları, kılavuz kaptanlar bazında değerlendirilmiştir. Ayrıca, emisyon sonuçlarıyla uygun karşılaştırmalar yapabilmek ve somut çıkarımlar elde edebilmek amacıyla gerekli demografik bilgiler de sağlanmıştır.

Çalışmaya katılan kılavuz kaptanların demografik bilgileri (KB) Çizelgede 5.1'de sunulmuş olup, aynı zamanda demografik özelliklere ilişkin dağılımları gösteren grafiklere de Şekil 5.8'de yer verilmiştir. Çizelgede kılavuz kaptanların mesleki deneyim ve birikimlerine dair bilgiler sunulmaktadır. KB1, kılavuz kaptanın yaşını (yıl) ifade ederken; KB2, benzer gemilerle yapılan toplam manevra sayısını belirtmektedir. KB3, toplam kılavuz kaptanlık süresini (yıl) gösterirken; KB4, bugüne kadar pilotlanan toplam gemi sayısını ifade etmektedir.

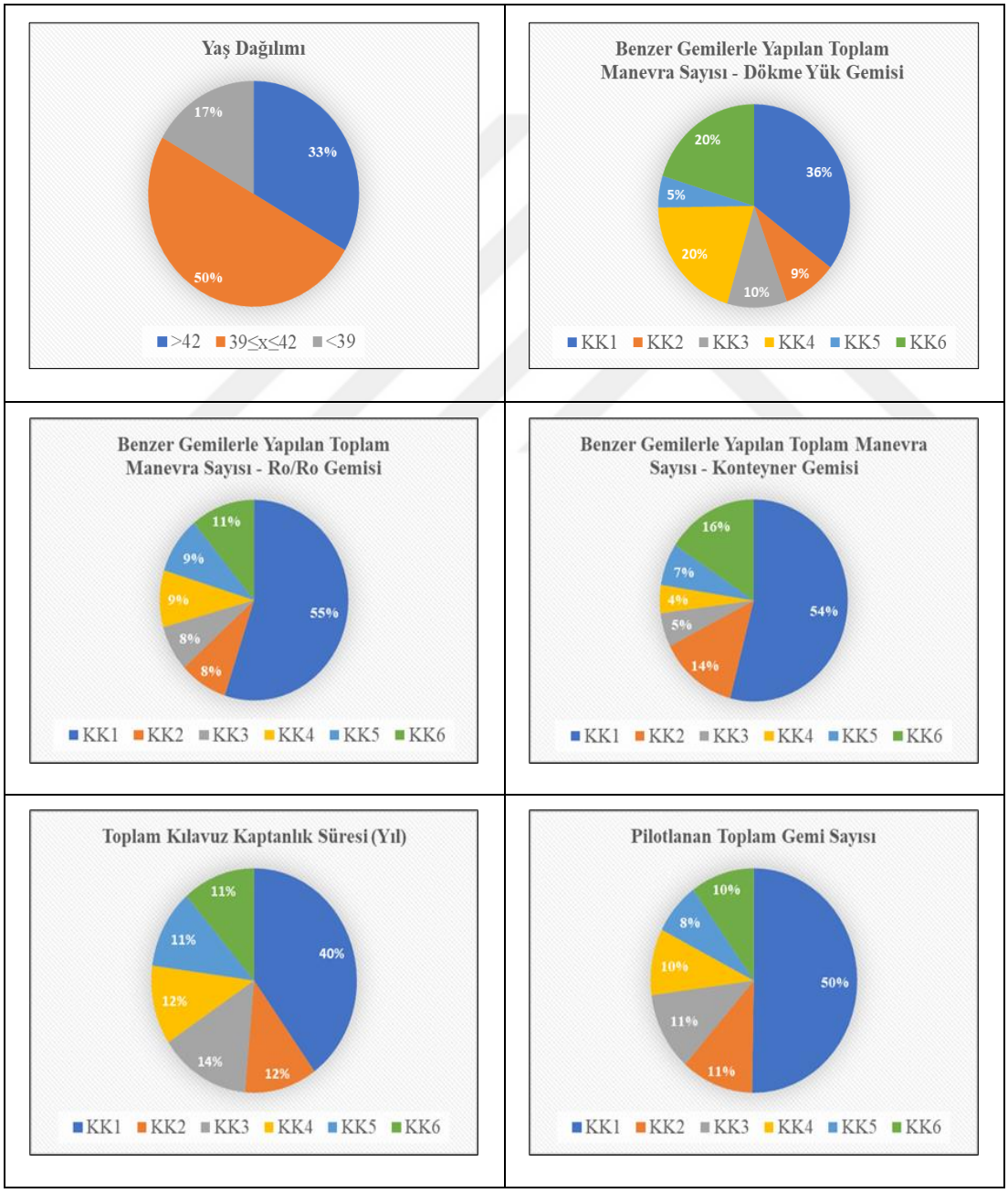
Çizelge 5.1 : Kılavuz kaptan demografik dağılım.

Kılavuz Kaptan	KB1	KB2 Dökme	KB2 Ro-Ro	KB2 Konteyner	KB3	KB4
KK1	45	70	300	120	7	2000
KK2	40	18	45	30	2	450
KK3	41	20	40	12	2.5	450
KK4	37	40	50	10	2	380
KK5	46	10	50	15	2	300
KK6	41	40	60	35	2	397

Şekil 5.8'de de görülebileceği gibi, kılavuz kaptanların demografik dağılımları incelendiğinde, bir kılavuz kaptan dışında, toplam kılavuz kaptanlık süresi (KB3) ve bugüne kadar pilotlanan toplam gemi sayısı (KB4) açısından benzer deneyime sahip

oldukları görülmektedir. Ancak, gemi tipleri bazında hazırlanan dağılım grafikleri incelendiğinde farklılıklar gözlemlenmektedir.

Gemi tiplerindeki tecrübenin bu farklılıkları gidermek ve daha kapsamlı, karmaşık değerlerin analizini sağlamak amacıyla, emisyon değerlerinin pilotların demografik verileriyle ilişkilendirilmesine yönelik iki farklı katsayı hesaplanmıştır. Birinci katsayı (C1), benzer türde gemilerle gerçekleştirilen manevra sayısının, pilotun hizmet süresine (yıl) oranını temsil etmektedir. İkinci katsayı (C2) ise benzer türde gemilerle yapılan manevraların, toplam manevra sayısına oranını ifade etmektedir.



Şekil 5.8 : Manevralara katılan kılavuz kaptanlara ait demografik grafikler.

Kılavuz kaptanların manevralarında ürettikleri emisyonları daha iyi karşılaştırabilme amacıyla oluşturulan Şekil 5.9'daki tabloda, değerler renk kodlamasıyla beraber sunulmuştur. Tabloda, kılavuz kaptanların demografik bilgileri toplu olarak verilmiş, ana gemi ve römorkörlere ait ENTEC ve EPA metodolojilerine göre hesaplanmış emisyon ortalamaları da gösterilmiştir. Ayrıca, ana gemi ve römorkörlerin emisyonlarının toplamına ilişkin ENTEC ve EPA metodolojisindeki ortalama emisyon değerleri de yer almaktadır. Tabloda, manevraların gemi tipleri, yaklaşım yerleri ve yanaşma taraflarının farklılığı nedeniyle oluşan toplam emisyon her bir gemi tipi için ilgili manevra süresine bölünerek dakika başına düşen emisyon hesaplanmış; bu sayede daha anlamlı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu tabloya göre en koyu kırmızı renk en yüksek değerleri gösterirken, en koyu yeşil renk en düşük değerleri temsil etmektedir. Ara değerler ise koyu yeşilden koyu kırmızıya giden bir renk tonlamasıyla gösterilmektedir.

Kılavuz Kaptan	Gemi Tipi	KB1*	KB2*	KB3*	KB4*	Toplam Emisyon / Süre		Toplam ENTEC/EPA Ortalaması		Ana Gemi ENTEC/EPA Ortalaması		Römorkörler ENTEC/EPA Ortalaması	
						Gerçek	Simülasyon	Gerçek	Simülasyon	Gerçek	Simülasyon	Gerçek	Simülasyon
KK1	Dökme	45	70	7	2000	7,91	9,38	355,86	321,48	111,97	101,52	243,90	219,96
KK2	Dökme	40	18	2	450	9,24	8,98	277,29	271,94	76,43	80,33	200,86	191,61
KK3	Dökme	41	20	2,5	450	8,80	8,25	308,16	300,70	92,95	84,20	215,20	216,50
KK4	Dökme	37	40	2	380	3,28	3,87	114,76	112,91	43,02	39,99	71,73	72,92
KK5	Dökme	46	10	2	300	9,44	8,66	283,10	277,68	89,42	81,94	193,68	195,74
KK6	Dökme	41	40	2	397	7,94	6,61	198,44	188,92	19,10	16,12	179,34	172,80
KK1	Ro-Ro	45	300	7	2000	3,20	4,50	143,88	134,94	57,80	50,96	86,08	83,97
KK2	Ro-Ro	40	45	2	450	3,81	2,62	133,20	137,78	47,12	41,99	86,08	95,79
KK3	Ro-Ro	41	40	2,5	450	5,29	4,64	185,26	153,73	70,49	62,50	114,77	91,23
KK4	Ro-Ro	37	50	2	380	11,30	7,10	226,06	213,07	46,73	42,28	179,34	170,79
KK5	Ro-Ro	46	50	2	300	2,50	4,45	137,33	133,38	51,24	51,89	86,08	81,49
KK6	Ro-Ro	41	60	2	397	3,69	3,60	129,06	136,11	42,98	42,14	86,08	93,97
KK1	Konteyner	45	120	7	2000	7,16	8,50	322,31	333,15	92,76	95,90	229,55	237,25
KK2	Konteyner	40	30	2	450	4,06	6,59	263,99	268,84	48,79	45,49	215,20	223,35
KK3	Konteyner	41	12	2,5	450	6,90	7,18	379,75	352,66	164,54	140,09	215,20	212,57
KK4	Konteyner	37	10	2	380	7,18	9,22	430,64	393,38	172,40	142,43	258,24	250,95
KK5	Konteyner	46	15	2	300	7,38	7,75	405,86	368,13	147,61	115,69	258,24	252,44
KK6	Konteyner	41	35	2	397	4,91	4,68	294,76	280,70	36,51	31,17	258,24	249,53
					Toplam	113,99	116,55	4589,71	4379,49	1411,88	1266,66	3177,83	3112,83

***Kişisel Bilgiler** --- **KB1**: Yaş, **KB2**: Benzer gemilerle yapılan toplam manevra sayısı, **KB3**: Toplam kılavuz kaptanlık süresi (yıl), **KB4**: Toplam pilotlanan gemi sayısı

Şekil 5.9 : Kılavuz kaptanlara göre manevralarda üretilen emisyon miktarları.

Gemi tipleri arasında yapılan kıyaslamada, Ro-Ro gemilerinin emisyon ortalamalarının en düşük, konteyner gemilerinin ise en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Konteyner gemilerinin maksimum makine güçlerinin, dökme ve Ro-Ro gemilerinden daha yüksek olduğu teknik verilerle doğrulanmıştır. Bu nedenle, konteyner gemilerinin emisyon değerlerinin daha yüksek olması beklenirken, dökme gemilerle Ro-Ro gemilerinin maksimum makine güçlerinin benzer olmasına rağmen, dökme gemilerinin emisyon değerlerinin daha yüksek olmasının nedeni, kılavuz kaptanların Ro-Ro gemi tipinde daha fazla manevra yapmaları (KB2) ve bu alanda

daha fazla deneyime sahip olmaları ve gemi makine reaksiyonları ile tekne tasarımlarının farklılığından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir.

Aynı tip gemilere hizmet veren römorkörlerin ortalama emisyonlarının manevra bazında karşılaştırılması, ilgili ana gemi tiplerinin emisyon sonuçlarına benzer bir tablo ortaya koymaktadır. Konteyner gemilerine hizmet veren römorkörlerde en yüksek ortalama emisyon değerleri gözlemlenirken, Ro-Ro gemilerine hizmet veren römorkörlerde en düşük emisyon değerleri kaydedilmiştir. Bu bulgular, "kılavuz kaptanların belirli gemi tiplerinde daha fazla manevra yapmalarının ve bu alandaki daha fazla deneyime sahip olmalarının emisyon üretimini azalttığı" hipotezini desteklemektedir. Şekil 5.9'da gösterildiği gibi, dakika başına emisyon hesaplanarak anlamlı bir sonuç elde edilmeye çalışılmış olsa da gemi tipleri ve makine farklılıkları nedeniyle homojen bir karşılaştırma yapılamamıştır. Bu nedenle, her gemi tipinin emisyon sonuçlarını kendi içinde değerlendirmek, kılavuz kaptanların manevra performanslarını analiz etmek açısından daha sağlıklı sonuçlar sunmaktadır.

C1 ve C2 katsayıları, gerçek ve simülasyon manevraları arasında elde edilen emisyon sonuçlarının benzerlik gösterdiği tespitine dayanarak, kılavuz kaptanların gerçek manevralarda ürettikleri dakika başına emisyon değerleri ile birlikte sunulmuştur. Bu şekilde, daha homojen bir karşılaştırma yapılabilmesi için gerekli verilerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Daha sonra her gemi tipi için emisyon sonuçlarına dair standart sapma hesaplanmıştır. Standart sapmayı hesaplamak amacıyla öncelikle emisyon sonuçlarının aritmetik ortalaması belirlenmiştir. Ardından her emisyon sonucunun bu ortalamadan farkının karesi alınmış, bu karelerin toplamı sonuç sayısının bir eksiğine bölünerek elde edilen değerin karekökü standart sapmayı vermiştir. Emisyon sonuçlarını sınıflandırmak için, ortalamadan standart sapma çıkarılarak elde edilen değerin altında kalan sonuçlar "düşük", ortalamaya standart sapma eklenerek bulunan değerin üstünde kalan sonuçlar "yüksek" ve bu iki değer arasında kalan sonuçlar "orta" olarak kabul edilmiştir. Bu yöntem, emisyon sonuçlarını dağılım özelliklerine göre gruplandırmada etkili bir araç olarak kullanılmıştır.

Sonuç olarak, Şekil 5.10 – Şekil 5.12'de gösterildiği üzere, standart sapmaya göre hesaplanan emisyon sonuçları; düşük emisyonlar için yeşil, orta emisyonlar için

turuncu ve yüksek emisyonlar için kırmızı renk kodlarıyla gösterilerek manevralardaki emisyon düzeyleri görsel olarak sunulmuştur.

Kılavuz Kaptan	Gemi Tipi	KB1*	KB2*	KB3*	KB4*	Toplam ENTEC/EPA Ortalaması		C1	C2	Toplam Emisyon / Süre
						Gerçek	Simülasyon			Gerçek Manevra
KK4	Dökme	37	40	2	380	114,76	112,91	20,00	0,105	3,28
KK1	Dökme	45	70	7	2000	355,86	321,48	10,00	0,035	7,91
KK6	Dökme	41	40	2	397	198,44	188,92	20,00	0,101	7,94
KK3	Dökme	41	20	2,5	450	308,16	300,70	8,00	0,044	8,80
KK2	Dökme	40	18	2	450	277,29	271,94	9,00	0,040	9,24
KK5	Dökme	46	10	2	300	283,10	277,68	5,00	0,033	9,44

C1= KB2 (Benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısı) / KB3 (Kılavuzluk hizmet süresi)
C2= KB2 (Benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısı) / KB4 (Kılavuzluk yapılan toplam gemi sayısı)

Şekil 5.10 : Dökme yük gemilerinde, C1 ve C2 katsayıları ile gerçek manevralarda üretilen emisyonların karşılaştırılması.

Kılavuz Kaptan	Gemi Tipi	KB1*	KB2*	KB3*	KB4*	Toplam ENTEC/EPA Ortalaması		C1	C2	Toplam Emisyon / Süre
						Gerçek	Simülasyon			Gerçek Manevra
KK5	Ro-Ro	46	50	2	300	137,33	133,38	25,00	0,167	2,50
KK1	Ro-Ro	45	300	7	2000	143,88	134,94	42,86	0,150	3,20
KK6	Ro-Ro	41	60	2	397	129,06	136,11	30,00	0,151	3,69
KK2	Ro-Ro	40	45	2	450	133,20	137,78	22,50	0,100	3,81
KK3	Ro-Ro	41	40	2,5	450	185,26	153,73	16,00	0,089	5,29
KK4	Ro-Ro	37	50	2	380	226,06	213,07	25,00	0,132	11,30

C1= KB2 (Benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısı) / KB3 (Kılavuzluk hizmet süresi)
C2= KB2 (Benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısı) / KB4 (Kılavuzluk yapılan toplam gemi sayısı)

Şekil 5.11 : Ro-Ro gemilerinde, C1 ve C2 katsayıları ile gerçek manevralarda üretilen emisyonların karşılaştırılması.

Kılavuz Kaptan	Gemi Tipi	KB1*	KB2*	KB3*	KB4*	Toplam ENTEC/EPA Ortalaması		C1	C2	Toplam Emisyon / Süre
						Gerçek	Simülasyon			Gerçek Manevra
KK2	Konteyner	40	30	2	450	263,99	268,84	15,00	0,067	4,06
KK6	Konteyner	41	35	2	397	294,76	280,70	17,50	0,088	4,91
KK3	Konteyner	41	12	2,5	450	379,75	352,66	4,80	0,027	6,90
KK1	Konteyner	45	120	7	2000	322,31	333,15	17,14	0,060	7,16
KK4	Konteyner	37	10	2	380	430,64	393,38	5,00	0,026	7,18
KK5	Konteyner	46	15	2	300	405,86	368,13	7,50	0,050	7,38

C1= KB2 (Benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısı) / KB3 (Kılavuzluk hizmet süresi)
C2= KB2 (Benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısı) / KB4 (Kılavuzluk yapılan toplam gemi sayısı)

Şekil 5.12 : Konteyner gemilerinde, C1 ve C2 katsayıları ile gerçek manevralarda üretilen emisyonların karşılaştırılması.

Şekil 5.10'da görüldüğü üzere, dökme yük gemilerinde dakika başına düşen emisyonun ortalaması 7,77, standart sapması ise 2,29'dur. Bu durumda, 5,48'in altındaki değerler düşük emisyon, 5,48 ile 10,06 arasındaki değerler orta emisyon, 10,06'nın üzerindeki değerler ise yüksek emisyon sınıfındadır. Dakika başına düşen emisyon miktarı açısından en düşük değer 3,28 kg iken, en yüksek değer 9,44 kg olarak kaydedilmiştir. Bu durum, kılavuz kaptanların dökme yük gemisi manevralarında

ürettikleri emisyonlar arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermekte olup, emisyon miktarında 2,88 kata kadar bir değişkenlik faktörü bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 5.11'de, Ro-Ro gemilerinde dakika başına düşen emisyonun ortalaması 4,97 ve standart sapması 3,24'tür. Bu durumda, 3,35'in altındaki değerler düşük emisyon, 3,35 ile 6,59 arasındaki değerler orta emisyon ve 6,59'un üzerindeki değerler yüksek emisyon olarak sınıflandırılmaktadır. Dakika başına düşen emisyon miktarı açısından en düşük değer 2,50 kg iken, en yüksek değer 11,30 kg olarak kaydedilmiştir. Bu durum, kılavuz kaptanların Ro-Ro manevralarında ürettikleri emisyonlar arasında kayda değer farklılıklar bulunduğunu ve emisyon miktarlarında 4,52 kata kadar değişkenlik faktörü gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, dökme yük gemilerinde de yüksek seviyede farklılıklar mevcuttur.

Şekil 5.12'de verilen tabloya göre, konteyner gemilerinde dakika başına düşen emisyonun ortalaması 6,27 ve standart sapması 1,41'dir. Bu durumda, 4,86'nın altındaki değerler düşük emisyon, 4,86 ile 7,68 arasındaki değerler orta emisyon, 7,68'in üzerindeki değerler ise yüksek emisyon sınıfındadır. Dakika başına düşen emisyon miktarı açısından en düşük değer 4,06 kg, en yüksek değer ise 7,38 kg olarak kaydedilmiştir. Bu durum, konteyner gemisi manevralarında kılavuz kaptanlar arasındaki emisyon miktarlarında 1,82 kata kadar bir değişkenlik faktörü bulunduğunu göstermektedir. Ancak, kılavuz kaptanlar arasındaki bu değişkenlik, konteyner gemilerinde dökme yük ve Ro-Ro gemilerine kıyasla daha azdır.

Üç farklı gemi tipi için dakika başına üretilen emisyon miktarları incelendiğinde, emisyon değerlerinde kayda değer farklılıklar tespit edilmiştir. Bu tür büyük farklılıkların, kılavuz kaptanların manevra alışkanlıklarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Her kılavuz kaptanın bireysel tecrübe ve alışkanlıklarına dayalı farklı manevra teknikleri uygulaması, gemi tipine bağlı olarak emisyon miktarlarında önemli değişikliklere yol açabilmektedir. Bu bağlamda, gemi tipi bazında daha fazla simülasyon çalışmasının yapılması ve benzer manevraların simülasyon ortamında test edilmesi, emisyona etki eden faktörlerin daha doğru şekilde tespit edilmesini sağlayacak ve böylece emisyonların azaltılmasında etkili bir referans oluşturacaktır.

Ayrıca, her manevrada minimum emisyon seviyesinin sağlanabileceği bir "ideal manevra paterni" belirlenerek kılavuz kaptanlara sunulması, emisyon miktarlarındaki

farklılıkları azaltmaya katkı sağlayabilir. Bu süreçte, kılavuz kaptanların çevreye duyarlı manevra teknikleri konusunda eğitimlerle desteklenmesi, bireysel emisyon üretim farklarının minimize edilmesine yardımcı olması hedeflenmektedir. Bu öneriler, kılavuz kaptanlar arasındaki emisyon farklarının azaltılmasına yönelik önemli bir adım teşkil edebilir ve denizcilik sektöründe daha sürdürülebilir bir emisyon yönetimine katkıda bulunabilir.

Dökme yük gemileriyle gerçekleştirilen manevralarda, C1 katsayısının azalmasıyla dakika başına emisyon oranlarında artış gözlemlenmiştir. Ro-Ro gemilerinde ise, bir kılavuz kaptan dışında, C1 katsayısının düşmesiyle emisyon oranlarında genel bir artış saptanmıştır. Konteyner gemilerinde de benzer şekilde emisyon artışı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, kılavuz kaptanların yıllık bazda gerçekleştirdiği manevra sayısının artmasıyla, benzer tipteki gemilerle emisyon yönetimini daha etkin bir şekilde uygulayabileceklerini ve dolayısıyla emisyon seviyelerinin azaltılabileceğini göstermektedir.

C2 katsayısı analizlerinde anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Bu bulgu, benzer gemilerle gerçekleştirilen toplam manevra sayısının, kılavuzluk hizmet süresince yapılan gemi sayısına oranının, emisyonlar üzerindeki etkisini açıklamakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Diğer bir deyişle, aynı tipte yıl boyunca yoğun bir şekilde manevra gerçekleştiren kılavuz kaptanların operasyonel performansları, sürekliliği düşük olan kılavuz kaptanlara kıyasla daha yüksek olup, bu durum emisyonların azalmasıyla ilişkilendirilebilir.

Bu durum, kılavuz kaptanların aynı gemi tipinde artan operasyonel tecrübesinin, daha verimli manevralar yapmalarını sağlayarak emisyon miktarını düşürebileceğini göstermektedir. Örneğin, belirli bir yılda düzenli olarak benzer tipte manevralar yapan bir kılavuz kaptanın, aynı tip manevraları belirli bir süre gerçekleştirdikten sonra uzun süre ara vermiş bir kaptana kıyasla daha düşük emisyon değerlerine sahip olabileceği öngörülmektedir. Ancak, çalışmamızda bu ilişkiyi net bir şekilde gözlemleyebilmek için daha fazla kılavuz kaptanla yapılan manevralara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tespiti doğrulamak adına, mevcut örneklem büyüklüğünün sınırlı olması nedeniyle daha fazla kılavuz kaptanla çalışmanın faydalı olacağı düşünülmektedir. Mevcut veri seti, yalnızca belirli sayıda kılavuz kaptan ve manevra örneği içerdiğinden, kılavuz kaptanların deneyim-emisyon ilişkisini daha kapsamlı değerlendirmek için daha geniş

bir örneklem gerekmektedir. Bu şekilde, kılavuz kaptanların aynı gemi tipiyle daha fazla manevra yapmasının emisyonları nasıl etkilediği hakkında daha güvenilir sonuçlar elde edilebilecek ve sektörde sürdürülebilir emisyon yönetimi için daha güçlü bir temel oluşturulabilecektir.

6. SONUÇ

Deniz taşımacılığı, küresel ticaretin %80'inden fazlasını karşılamakta olup CO_2, SO_X ve NO_X gibi emisyonlarda önemli bir paya sahiptir. Deniz taşımacılığındaki CO_2 emisyonları küresel düzeyde düşük bir paya sahip olsa da NO_X ve SO_X emisyonlarının küresel emisyonlar içerisindeki payı oldukça büyüktür. Bu durum, deniz taşımacılığının çevresel etkilerinin sadece CO_2 emisyonları ile sınırlı kalmadığını, aynı zamanda nitrojen ve kükürt bileşiklerinin küresel hava kalitesi üzerindeki önemli etkilerini de gözler önüne sermektedir.

Bununla birlikte, gerekli önlemler alınmazsa, CO_2 emisyonlarının 2050 yılına kadar %50 ila %250 oranında artması beklenmektedir. CO_2 emisyonlarındaki bu artış, diğer tüm emisyonların da artmasına yol açabilmektedir. Çünkü CO_2 salınımındaki artış, genellikle yakıt tüketiminin yükselmesinden kaynaklanmakta olup, bu durum aynı zamanda NO_X ve SO_X gibi zararlı gazların salınımının da artmasına yol açmaktadır.

Bu çerçevede, IMO, 2050 yılına kadar deniz taşımacılığında sera gazı emisyonlarını sıfıra indirerek sektörü karbon nötr bir yapıya dönüştürmeyi hedeflemektedir. Bu hedefe ulaşabilmek için, denizcilik sektöründe köklü değişiklikler yapılması ve sıkı önlemler alınması gereklidir. Bu doğrultuda, emisyon oluşturan tüm süreçlerin kapsamlı bir şekilde incelenmesi ve bu süreçlerin çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik etkin stratejiler geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Denizcilik sektöründe en büyük emisyon kaynakları gemiler ve limanlar olarak belirlenmektedir. Gemilerin liman süreçleri, genel olarak seyir ve liman operasyonları olarak iki ana kategoride incelenebilir. Liman süreçleri, gemilerin limanda gerçekleştirdiği tüm faaliyetlerin yanı sıra manevra operasyonlarını da kapsar. Manevra esnasında makinelerin yüksek kapasitede çalışması, özellikle kıyıya yakın bölgelerde hava kalitesini doğrudan etkilemektedir. Emisyonların yaklaşık %70'inin 400 km mesafeye kadar olan kıyı bölgelerinde gerçekleşmesi, manevra operasyonlarının çevresel etkilerini daha da önemli hale getirmektedir.

Literatür taraması, gemi ve römorkörlerin gerçek ve simülasyon tabanlı manevralarındaki emisyonları bir arada ele alan bir çalışmanın bulunmadığını göstermektedir. Gerçek ve simülasyon manevralarında oluşan emisyonların uyumu, gelecekteki çalışmalar için önemlidir; çünkü bu sayede simülasyon tabanlı manevralar kullanılarak emisyon tahminleri yapılabilir. Ayrıca simülatörler, kılavuz kaptanların emisyon azaltımı konusunda deneyim kazanmalarına olanak tanır. Gerçek manevralarda veri toplama zorlukları nedeniyle emisyon hesaplamaları güçtür; buna karşın simülatörler, veri elde etme sürecini kolaylaştırarak daha kolay emisyon analizlerinin yapılmasını sağlar. Bu sayede, manevra operasyonlarının çevresel etkileri daha kapsamlı ve maliyet etkin bir şekilde incelenebilir.

Bu çalışma, gerçek ve simüle edilmiş manevra operasyonlarından kaynaklanan CO_2 emisyonlarının tutarlılığını ve kılavuz kaptanların demografik özelliklerinin emisyonlar üzerindeki etkisini incelemektedir. Yaklaşık 100 manevra verisinden üç gemi tipi seçilmiş olup, simülasyon sisteminde de yalnızca bu gemilerin bulunması nedeniyle simülasyon çalışmaları aynı gemi tipleriyle yürütülmüştür. Simülasyon sistemine yeni gemi eklemek maliyetli olduğundan hem gerçek hem de simülasyon verilerinde aynı gemi tiplerinin kullanılması sağlanmıştır. Emisyon hesaplamaları için, altı kılavuz kaptanla üç gemi tipine ait toplam 18 gerçek manevra verisi toplanmıştır.

Gerçek manevraların tamamlanmasının ardından, benzer hava ve akıntı koşulları altında, benzer gemi ve römorkör özellikleri ile gerçek manevraları gerçekleştiren kılavuz kaptanların katılımıyla aynı manevralar, modellemesi yapılan limanın rıhtımlarında simülasyon ortamında tekrar uygulanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle limanın simülasyon ortamında birebir modellemesi yapılmış ve gerçek manevraların gerçekleştirildiği koşullar, simülasyon ortamında eksiksiz şekilde yeniden oluşturulmuştur. Yanaşma yönleri gerçek manevralarla uyumlu biçimde belirlenmiş, römorkör bağlama noktaları da gerçek manevralarla paralel şekilde düzenlenmiştir.

Gerçek ve simülasyon manevralarının tamamlanmasının ardından, “top-down” ve “bottom-up” (ENTEC ve EPA) metodolojileri kullanılarak gemi ve römorkör kaynaklı emisyon miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra, her bir manevraya ait gemi ve römorkörlerin emisyon değerleri toplanarak o manevra için üretilen toplam emisyon miktarı hesaplanmıştır. Bu işlem hem gerçek hem de simülasyon manevraları için gerçekleştirilmiştir.

Emisyon miktarları kullanılarak çeşitli tablolar oluşturulmuş ve analizler sonucunda, gerçek ve simülasyon manevraları arasındaki uyumun yanı sıra, farklı kılavuz kaptanların demografik özelliklerinin emisyon değerleri üzerindeki etkileri de kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, emisyon sonuçları ile ilgili anlamlı çıkarımlar yapılmıştır. Elde edilen bulgular, gözlemlenen eksiklikler ve gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sunulmaktadır:

1- Gemi ve römorkörler için, top-down, ENTEC ve EPA metodolojilerine göre yapılan emisyon hesaplamalarının manevra bazında alınan ortalamaları arasında %99 uyum sağlayan bir korelasyon katsayısı (0,9888) elde edilmiştir. Simülasyon manevralarının emisyon sonuçları, gerçek manevralarla oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bazı bireysel farkların, hesaplama yöntemlerindeki farklılıklar veya kılavuz kaptanların performansındaki değişkenliklerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu sonuçlar, emisyon tahmininde simülatör manevralarının, gerçek manevra verilerine dayalı tahminler yerine etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sayede, limanlar için emisyon tahminleri yapılırken, elde edilmesi güç olan gerçek manevra verilerine ihtiyaç duyulmadan, simülasyon manevraları ve modelleme yöntemleri ile kılavuz kaptanların katılımı sağlanarak, liman tesislerine yanaştırılması planlanan ya da yanaşmakta olan gemilerin emisyon miktarları tahmin edilebilecektir. Ayrıca, manevralarda ortaya çıkan emisyon miktarlarının azaltılabilmesi açısından kılavuz kaptanlarla simülatör ortamında emisyon odaklı manevra çalışmalarının etkin bir çözüm yöntemi olacağı değerlendirilmektedir. Bu sayede, kılavuz kaptanların aynı tür gemi ve manevralarda artan deneyimleri, operasyonel verimliliği artırarak emisyonları azaltma potansiyelini artıracaktır.

Manevralarda emisyon tahminleri yapılmış olmakla birlikte, bu çalışma kapsamında manevraların emniyetine ilişkin herhangi bir risk değerlendirmesi yapılmamıştır. Dolayısıyla ortaya çıkan sonuçlar, daha düşük emisyon değerleri elde edilen manevraların otomatik olarak daha emniyetli olduğu sonucunu ifade etmemektedir.

Gelecek çalışmalarda hem emisyon açısından en düşük hem de en emniyetli manevranın tespit edilmesi ve modellenmesi amacıyla, kılavuz kaptanların katılımıyla simülatör temelli bir çalışma gerçekleştirilecektir. Bu çalışma, emisyonları azaltırken aynı zamanda manevra emniyetini de dikkate alarak, her iki açıdan optimize edilmiş manevra stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

2- Gerçek ve simülasyon manevralarının toplam emisyon değerleri karşılaştırıldığında, genel bir yakınlık görülmekle birlikte, genellikle gerçek manevralarda elde edilen toplam emisyonların simülasyonlara kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılığın, gerçek manevralarda kılavuz kaptanların karşılaştığı stres, belirsizlik, baskı ve yorgunluk gibi faktörlerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca, bazı simülasyon manevralarında yüksek emisyon sonuçları elde edilmesi, kılavuz kaptanların simülasyon sistemine aşinalık eksikliğinden kaynaklanarak daha fazla deneme yapmalarını gerekebileceği değerlendirilmektedir. Manevra sayısının sınırlı olması göz önüne alındığında, gerçek ve simülasyon manevralarının emisyon üretimlerini daha kapsamlı bir şekilde karşılaştıracak ve emisyon farklarının sebeplerini, özellikle de stres faktörünün etkilerini inceleyecek bir analiz yapılması planlanmaktadır.

3- Çalışmada, gemi tiplerine göre manevra sırasında üretilen emisyon miktarları karşılaştırıldığında, beklendiği üzere en yüksek emisyon verisi konteyner gemilerinde, en düşük emisyon verisi ise Ro-Ro gemilerinde elde edilmiştir. Teknik veriler incelendiğinde, konteyner gemilerinin makine kapasitelerinin diğer gemi tiplerine göre daha büyük olması nedeniyle yüksek emisyon değerlerinin bu gemi tipinde yoğunlaşması olağandır. Bununla birlikte, yaklaşık olarak benzer makine gücüne sahip Ro-Ro ve dökme yük gemileri karşılaştırıldığında, dökme yük gemilerinin emisyon miktarlarının Ro-Ro gemilerine göre belirgin şekilde daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Manevra başına emisyon sonuçları açısından römorkörler incelendiğinde benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Konteyner gemilerine hizmet veren römorkörler, ortalama olarak en yüksek emisyon değerlerini üretirken, Ro-Ro gemilerine hizmet veren römorkörlerde en düşük emisyon değerleri kaydedilmiştir. Buna karşılık, dökme yük gemilerine hizmet veren römorkörlerin emisyon miktarlarının Ro-Ro gemilerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, kılavuz kaptanların dökme yük gemilerinde daha az manevra yapmalarından (KB2) kaynaklanan pratik eksikliğinden ileri geldiği düşünülmektedir. Dolayısıyla, simülasyon ortamında gerçekleştirilecek manevralar aracılığıyla kılavuz kaptanların manevra becerilerinin geliştirilmesi, bu gemi tiplerinde kılavuz kaptanlar kaynaklı emisyon miktarlarının azaltılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

4- Çalışmada incelenen gemi tiplerinin dakika başına ürettiği emisyon miktarları değerlendirildiğinde, benzer koşullar altında aynı tip gemilerle gerçekleştirilen manevralar arasında emisyon değerlerinde 4,52 kata kadar varan farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu büyüklükteki farklılıkların, kılavuz kaptanların manevra eğilimlerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Her bir kılavuz kaptanın bireysel tecrübe ve alışkanlıklarına bağlı olarak gerçekleştirdiği manevralar, gemi tipine göre emisyon miktarlarında önemli değişikliklere yol açabilmektedir. Bu nedenle, emisyon değerleri diğerlerine kıyasla yüksek olan kılavuz kaptanların, daha fazla simülatör çalışması yaparak benzer manevraları simülasyon ortamında test etmesi, emisyonların azaltılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

5- Dökme yük gemileriyle gerçekleştirilen manevralarda, "benzer türdeki gemilerle gerçekleştirilen manevra sayısının, kılavuz kaptanın hizmet süresi boyunca gerçekleştirdiği ortalama manevra sayısına oranı olan C1 katsayısının" azalmasıyla birlikte dakika başına düşen emisyon oranlarında bir artış gözlemlenmiştir. Ro-Ro gemilerinde ise, yalnızca bir kılavuz kaptan dışında, C1 katsayısındaki düşüşle emisyon oranlarında genel bir artış tespit edilmiştir. Konteyner gemilerinde de benzer bir eğilim gözlemlenmiş olup, emisyon değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu bulgular, kılavuz kaptanların yıllık bazda gerçekleştirdiği manevra sayısının artmasıyla, benzer tipteki gemilerle daha etkin bir emisyon yönetimi gerçekleştirebileceklerini ve dolayısıyla emisyon seviyelerinin düşürülebileceğini ortaya koymaktadır.

Özellikle aynı tipteki gemilerle yapılan manevra sayısının artması, kılavuz kaptanların daha verimli manevralar yapmalarını sağlamakta ve bu durum, operasyonel tecrübenin artması ile daha düşük emisyon oranlarına ulaşılabileceğine işaret etmektedir.

Bu gözlemi doğrulamak amacıyla, mevcut veri grubunun sınırlı olması nedeniyle daha fazla kılavuz kaptanla çalışmak faydalı olabilir. Çalışmanın asıl amacı, gerçek manevra esnasındaki emisyonlarla simülasyon manevrası sırasındaki emisyon miktarlarını karşılaştırmak olduğundan, farklı gemi tiplerinde toplam 18 manevra seçilmiştir. Ancak bu seçim, benzer gemi tiplerindeki manevra sayısının sınırlı kalmasına yol açmıştır. Kılavuz kaptanların deneyim-emisyon ilişkisini daha kapsamlı değerlendirebilmek için daha geniş bir veri havuzuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sayede, aynı gemi tipiyle yapılan manevraların emisyonlara etkisi hakkında daha

güvenilir sonuçlar elde edilebilir ve sürdürülebilir emisyon yönetimi için sağlam bir temel sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Adamo, F., Andria, G., Cavone, G., De Capua, C., Lanzolla, A. M. L., Morello, R., ve Spadavecchia, M. (2014). Estimation of ship emissions in the port of Taranto. *Measurement, 47*, 982-988.

Afsar, B., Elsurer Afsar, R., Kanbay, A., Covic, A., Ortiz, A., ve Kanbay, M. (2019). Air pollution and kidney disease: review of current evidence. *Clinical kidney journal, 12*(1), 19-32.

Akın, G. (2015). Küresel Isınma, Nedenleri Ve Sonuçları, Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi 46, 2 (2006) 29-43. Asseng S, et al. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nat Clim Chang, 5*, 143-147.

Aksay, C. S., Ketenoğlu, O., ve Kurt, L. (2005). Küresel Isınma ve İklim Değişikliği. *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi, 1*(25), 29-42.

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.

Artyszuk, J., ve Zalewski, P. (2021). Energy Savings by Optimization of Thrusters Allocation during Complex Ship Manoeuvres. *Energies, 14*(16), 4959.

Ay, C. (2020). *İstanbul boğazından geçen ticari gemilerden kaynaklanan emisyonun incelenmesi.* Fen Bilimleri Enstitüsü. (Doctoral dissertation)

Ay, C., Seyhan, A., ve Beşikçi, E. B. (2022). Quantifying ship-borne emissions in Istanbul Strait with bottom-up and machine-learning approaches. *Ocean Engineering, 258*, 111864.

Aygül, Ö., ve Baştuğ, S. (2020). Deniz taşımacılığı kaynaklı hava kirliliği ve insan sağlığına etkisi. *Journal of Maritime Transport and Logistics, 1*(1), 26-40.

Babadjouni, R. M., Hodis, D. M., Radwanski, R., Durazo, R., Patel, A., Liu, Q., ve Mack, W. J. (2017). Clinical effects of air pollution on the central nervous system; a review. *Journal of Clinical Neuroscience, 43*, 16-24.

Bacalja, B., Krčum, M., ve Slišković, M. (2020). A line ship emissions while manoeuvring and hotelling—A case study of port split. *Journal of marine science and engineering, 8*(11), 953.

Bassam, A. M., Phillips, A. B., Turnock, S. R., ve Wilson, P. A. (2015). *Ship voyage energy efficiency assessment using ship simulators.* Paper presented at the MARINE VI: proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering.

Beamish, L. A., Osornio-Vargas, A. R., ve Wine, E. (2011). Air pollution: An environmental factor contributing to intestinal disease. *Journal of Crohn's and Colitis, 5*(4), 279-286.

Beşikçi, E. B., Arslan, O., Turan, O., ve Ölçer, A. I. (2016). An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations. *Computers & operations research, 66*, 393-401.

Bilgili, L., ve Ölçer, A. I. (2024). IMO 2023 strategy-Where are we and what's next? *Marine Policy, 160*, 105953.

Bojar, D. (2019). The grass really is greener on the other side: Buying local and its shortcomings.

Bojić, F., Gudelj, A., ve Bošnjak, R. (2023). An Analytical Model for Estimating Ship-Related Emissions in Port Areas. *Journal of marine science and engineering, 11*(12), 2377.

Brown, I. N., ve Aldridge, M. F. (2019). Power models and average ship parameter effects on marine emissions inventories. *Journal of the Air & Waste Management Association, 69*(6), 752-763.

Buffaloe, G., Lack, D., Williams, E., Coffman, D., Hayden, K., Lerner, B., . . . Onasch, T. (2014). Black carbon emissions from in-use ships: a California regional assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics, 14*(4), 1881-1896.

Buhaug, Ø., Corbett, J., Endersen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., . . . Mjelde, A. (2009). Updated study on greenhouse gas emissions from ships. *Second IMO GHG Study. London, UK: International Maritime Organization*.

Calderón-Garcidueñas, L., Calderón-Garcidueñas, A., Torres-Jardón, R., Avila-Ramírez, J., Kulesza, R. J., ve Angiulli, A. D. (2015). Air pollution and your brain: what do you need to know right now. *Primary health care research & development, 16*(4), 329-345.

Chen, Q., Lau, Y.-y., Kanrak, M., Sun, X., Zhang, P., ve Tang, Y.-M. (2024). Using a bottom-up method to assess cruise ship activity impacts on emissions during 2019–2020 in China. *Heliyon, 10*(5).

Chin, C. S., Xiao, J., Ghias, A. M., Venkateshkumar, M., ve Sauer, D. U. (2019). Customizable battery power system for marine and offshore applications: trends, configurations, and challenges. *IEEE Electrification Magazine, 7*(4), 46-55.

Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., ve Renken, K. (2021). A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. *Sustainability, 13*(4), 1880.

Chu-Van, T., Ristovski, Z., Pourkhesalian, A. M., Rainey, T., Garaniya, V., Abbassi, R., . . . Brown, R. J. (2019). A comparison of particulate matter and gaseous emission factors from two large cargo vessels during manoeuvring conditions. *Energy Reports, 5*, 1390-1398.

Corbett, J. J., ve Koehler, H. W. (2003). Updated emissions from ocean shipping. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108*(D20).

de Winter, R., van Stein, B., Dijkman, M., ve Bäck, T. (2019). *Designing ships using constrained multi-objective efficient global optimization.* Paper presented at the Machine Learning, Optimization, and Data Science: 4th International Conference, LOD 2018, Volterra, Italy, September 13-16, 2018, Revised Selected Papers 4.

Degiuli, N., Martić, I., Farkas, A., ve Gospić, I. (2021). The impact of slow steaming on reducing CO2 emissions in the Mediterranean Sea. *Energy Reports, 7*, 8131-8141.

Deniz, C., ve Kilic, A. (2010). Estimation and assessment of shipping emissions in the region of Ambarlı Port, Turkey. *Environmental progress & sustainable energy, 29*(1), 107-115.

Diffenbaugh, N. S., ve Barnes, E. A. (2023). Data-driven predictions of the time remaining until critical global warming thresholds are reached. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 120*(6), e2207183120.

Ekmekçioğlu, A., Kuzu, S. L., Ünlügençoğlu, K., ve Çelebi, U. B. (2020). Assessment of shipping emission factors through monitoring and modelling studies. *Science of the Total Environment, 743*, 140742.

El-Taybany, A., Moustafa, M., Mansour, M., ve Tawfik, A. A. (2019). Quantification of the exhaust emissions from seagoing ships in Suez Canal waterway. *Alexandria Engineering Journal, 58*(1), 19-25.

Eni Live Oil Products. (2019). The right engine oil for your motorcycle.

Environmental Protection Agency. (2020). *Inventory Guidance: Ports Emissions Inventory Guidance: Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emissions*. Retrieved from https://www.epa.gov/state-and-local-transportation/port-emissions-inventory-guidance

Escusa dos Santos, L. F. (2024). How ship exhaust particles change cloud activity.

European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Retrieved from Publications Office of the European Union: https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019

Eyring, V., Köhler, H., Van Aardenne, J., ve Lauer, A. (2005). Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110*(D17).

Fan, A., Li, B., Yan, J., Yang, L., Shu, Y., Xiong, Y., ve Zhang, M. (2024). Analysing ship emissions under complex operating conditions: Insights from onboard measurement data. *Mar Pollut Bull, 209*(Pt B), 117280. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.117280

Fang, M.-C., Tsai, K.-Y., ve Fang, C.-C. (2018). A simplified simulation model of ship navigation for safety and collision avoidance in heavy traffic areas. *The Journal of Navigation, 71*(4), 837-860.

Finger, G., Schubert, A. U., Riebe, T., Fischer, S., Gluch, M., ve Baldauf, M. (2020). *Consumption and emission minimised ship manoeuvring.* Paper presented at the Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast.

Foretich, A., Zaimes, G. G., Hawkins, T. R., ve Newes, E. (2021). Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. *Maritime Transport Research, 2*, 100033.

Fowler, A., ve Hennessy, K. (1995). Potential impacts of global warming on the frequency and magnitude of heavy precipitation. *Natural Hazards, 11*, 283-303.

Franklin, B. A., Brook, R., ve Pope III, C. A. (2015). Air pollution and cardiovascular disease. *Current problems in cardiology, 40*(5), 207-238.

Friedman, A. (2024). The International Maritime Organization's Revised Greenhouse Gas Strategy: A Political Signal of Shipping's Regulatory Future. *The International Journal of Marine and Coastal Law, 1*(aop), 1-27.

Fuentes García, G., Sosa Echeverría, R., Baldasano Recio, J. M., W. Kahl, J. D., ve Antonio Durán, R. E. (2022). Review of top-down method to determine atmospheric emissions in port. Case of Study: Port of Veracruz, Mexico. *Journal of marine science and engineering, 10*(1), 96.

Geçili, D. (2017). Maritime pilots in straits of the Ottoman Empire. *KTÜ Sosyal Bilimler Dergisi, 7*(13), 111-122.

Genc, S., Zadeoglulari, Z., Fuss, S. H., ve Genc, K. (2012). The adverse effects of air pollution on the nervous system. *Journal of toxicology, 2012*(1), 782462.

Gil-Lopez, T., ve Verdu-Vazquez, A. (2021). Environmental analysis of the use of liquefied natural gas in maritime transport within the port environment. *Sustainability, 13*(21), 11989.

Goicoechea, N., ve Abadie, L. M. (2021). Optimal slow steaming speed for container ships under the EU emission trading system. *Energies, 14*(22), 7487.

Goldizen, F. C., Sly, P. D., ve Knibbs, L. D. (2016). Respiratory effects of air pollution on children. *Pediatric pulmonology, 51*(1), 94-108.

Grippo, A., Zhang, J., Chu, L., Guo, Y., Qiao, L., Zhang, J., . . . Mu, L. (2018). Air pollution exposure during pregnancy and spontaneous abortion and stillbirth. *Reviews on environmental health, 33*(3), 247-264.

Gualdi, S., Scoccimarro, E., ve Navarra, A. (2008). Changes in tropical cyclone activity due to global warming: Results from a high-resolution coupled general circulation model. *Journal of climate, 21*(20), 5204-5228.

Guo, B., Ruth, E., Austefjord, H., Bitner-Gregersen, E. M., ve Gramstad, O. (2017). *Study on Ship Manoeuvering in Adverse Sea State.* Paper presented at the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.

Haxhiu, A., Abdelhakim, A., Kanerva, S., ve Bogen, J. (2021). Electric power integration schemes of the hybrid fuel cells and batteries-fed marine vessels—An overview. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8*(2), 1885-1905.

Health Effects Institute. (2019). State of Global Air 2019.

Healy, R. M., O'Connor, I. P., Hellebust, S., Allanic, A., Sodeau, J. R., ve Wenger, J. C. (2009). Characterisation of single particles from in-port ship emissions. *Atmospheric Environment, 43*(40), 6408-6414.

Helbling, M., ve Meierrieks, D. (2023). Global warming and urbanization. *Journal of population economics, 36*(3), 1187-1223.

Holman, C. (1999). Sources of air pollution *Air pollution and health* (pp. 115-148): Elsevier.

Houghton, J. (2001). The science of global warming. *Interdisciplinary Science Reviews, 26*(4), 247-257.

Hussain, I., Wang, H., Safdar, M., Ho, Q. B., Wemegah, T. D., ve Noor, S. (2022). Estimation of shipping emissions in developing country: a case study of Mohammad Bin Qasim Port, Pakistan. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(19), 11868.

IARC. (2014). *IARC monograph on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 105: Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer (IARC).

Im, N.-k., Choe, B., ve Park, C.-H. (2019). Developing and applying a ship operation energy efficiency evaluation index using SEEMP: A case study of South Korea. *Journal of Marine Science and Application, 18*, 185-194.

IMO. (2012). *Model course 6.10: Train the simulator trainer and assessor*: ISBN 978-92-801-1559-8.

IMO. (2019). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL).

IMO. (2021). *Fourth IMO GHG Study*. Retrieved from https://www.imo.org

IMO. (2022). *Guidelines on the Reference Lines for Use with Operational Carbon Intensity Indicators (CII Reference Lines Guidelines, G2) (Resolution MEPC.353(78))*. Retrieved from https://www.imo.org

IMO. (2023). Updated timeline of key regulations in the maritime sector.

IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*: ipcc Geneva.

Jensen, S., Lützen, M., Mikkelsen, L. L., Rasmussen, H. B., Pedersen, P. V., ve Schamby, P. (2018). Energy-efficient operational training in a ship bridge simulator. *Journal of Cleaner Production, 171*, 175-183.

Jimenez, V. J., Kim, H., ve Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production, 366*, 132888.

Johnson, H., ve Styhre, L. (2015). Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 71*, 167-178.

Johnson, K., Miller, W., McCaffery, C., ve Zhu, H. (2019). *Evaluation of a modern Tier 2 ocean going vessel on two low sulfur fuels: Final report*. Retrieved from California Air Resources Board (CARB)

University of California, Riverside, CA:

Kampa, M., ve Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution, 151*(2), 362-367.

Karahalios, H. (2024). Evaluation of constraints for investment in NOx emission technologies: case study on Greek bulk carrier owners. *Maritime Business Review*.

Kim, A.-R., ve Seo, Y.-J. (2019). The reduction of SOx emissions in the shipping industry: The case of Korean companies. *Marine Policy, 100*, 98-106.

Kjartansson, S. (2012). A feasibility study on LPG as marine fuel.

Komar, I., ve Lalić, B. (2015). Sea transport air pollution. *Current Air Quality Issues, Rijeka: InTech*, 165-202.

Kumar, A. (2018). Global warming, climate change and greenhouse gas mitigation. *Biofuels: greenhouse gas mitigation and global warming: next generation biofuels and role of biotechnology*, 1-16.

Kweku, D. W., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K. A., Danso, K. B., Oti-Mensah, E. A., . . . Adormaa, B. B. (2018). Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. *Journal of Scientific research and reports, 17*(6), 1-9.

Law, L. C., Foscoli, B., Mastorakos, E., ve Evans, S. (2021). A comparison of alternative fuels for shipping in terms of lifecycle energy and cost. *Energies, 14*(24), 8502.

Lee, H., Park, D., Choo, S., ve Pham, H. T. (2020). Estimation of the non-greenhouse gas emissions inventory from ships in the port of Incheon. *Sustainability, 12*(19), 8231.

Lee, H., Pham, H. T., Chen, M., ve Choo, S. (2021). Bottom-Up Approach Ship Emission Inventory in Port of Incheon Based on VTS Data. *Journal of Advanced Transportation, 2021*(1), 5568777.

Lee, P. T.-W., Kwon, O. K., ve Ruan, X. (2019). Sustainability challenges in maritime transport and logistics industry and its way ahead (Vol. 11, pp. 1331): MDPI.

Lee, S.-S. (2024). Analysis of the effects of EEDI and EEXI implementation on CO2 emissions reduction in ships. *Ocean Engineering, 295*, 116877.

Lindstad, H., Eskeland, G. S., Psaraftis, H., Sandaas, I., ve Strømman, A. H. (2015). Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach. *Ocean Engineering, 110*, 94-101.

Lindstad, H. E., Rehn, C. F., ve Eskeland, G. S. (2017). Sulphur abatement globally in maritime shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 57*, 303-313.

Liu, T.-K., Sheu, H.-Y., ve Tsai, J.-Y. (2014). Sulfur dioxide emission estimates from merchant vessels in a port area and related control strategies. *Aerosol and Air Quality Research, 14*(1), 413-421.

López-Aparicio, S., Tønnesen, D., Thanh, T. N., ve Neilson, H. (2017). Shipping emissions in a Nordic port: Assessment of mitigation strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 53*, 205-216.

Lu, R., Turan, O., ve Boulougouris, E. (2013). *Voyage optimisation: prediction of ship specific fuel consumption for energy efficient shipping.* Paper presented at the 3rd International Conference onTechnologies, Operations, Logistics and Modelling for Low Carbon Shipping.

Lunde Hermansson, A., Hassellöv, I.-M., Grönholm, T., Jalkanen, J.-P., Fridell, E., Parsmo, R., . . . Ytreberg, E. (2024). Strong economic incentives of ship scrubbers promoting pollution. *Nature Sustainability*, 1-11.

Luo, W., Moreira, L., ve Soares, C. G. (2014). Manoeuvring simulation of catamaran by using implicit models based on support vector machines. *Ocean Engineering, 82*, 150-159.

Ma, W., Zhang, J., Han, Y., Mao, T., Ma, D., Zhou, B., ve Chen, M. (2023). A decision-making optimization model for ship energy system integrating emission reduction regulations and scheduling strategies. *Journal of Industrial Information Integration, 35*, 100506.

Makoś, P., Słupek, E., Sobczak, J., Zabrocki, D., Hupka, J., ve Rogala, A. (2019). *Dimethyl ether (DME) as potential environmental friendly fuel.* Paper presented at the E3S web of conferences.

Malabanan, L. C., ve Dela Cruz, L. T. (2021). An evaluation of MAAP's Train the Simulator Trainer and Assessor (IMO Model Course 6.10): Trainees' perspectives and reverberations.

Malek, K., Adam, J. C., Stöckle, C. O., ve Peters, R. T. (2018). Climate change reduces water availability for agriculture by decreasing non-evaporative irrigation losses. *Journal of Hydrology, 561*, 444-460.

MAN, E., Solutions. (2019). *MAN Emission Project Guide: MAN B&W Two-Stroke Marine Engines*: MAN Energy Solutions Copenhagen, Denmark.

McMichael, A. J., ve Haines, A. (1997). Global climate change: the potential effects on health. *Bmj, 315*(7111), 805-809.

Meca, V. L., d'Amore-Domenech, R., Crucelaegui, A., ve Leo, T. J. (2022). Large-scale maritime transport of hydrogen: economic comparison of liquid hydrogen and methanol. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10*(13), 4300-4311.

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

Merk, O. (2014). Shipping emissions in ports.

Mikkers, M., Henriqson, É., ve Dekker, S. (2012). Managing multiple conflicting goals in dynamic and complex situations: Exploring the practical field of maritime pilots. *Journal of Maritime Research*.

Mimura, N. (2013). Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. *Proceedings of the Japan Academy, Series B, 89*(7), 281-301.

Miola, A., ve Ciuffo, B. (2011). Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources. *Atmospheric Environment, 45*(13), 2242-2251.

Mizythras, P., Pollalis, C., Boulougouris, E., ve Theotokatos, G. (2017). *Simulation of a ship propulsion system performance during manoeuvring in shallow waters.* Paper presented at the ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference.

Moreira, C. A. B., Polezer, G., dos Santos Silva, J. C., de Souza Zorzenão, P. C., Godoi, A. F. L., Huergo, L. F., . . . Reis, R. A. (2024). Impact assessment of IMO's sulfur content limits: a case study at latin America's largest grain port. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-15.

Moreno-Gutiérrez, J., Calderay, F., Saborido, N., Boile, M., Valero, R. R., ve Durán-Grados, V. (2015). Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: A comparative analysis of current methods. *Energy, 86*, 603-616.

Mueller, N., Westerby, M., ve Nieuwenhuijsen, M. (2023). Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review. *Environmental Research, 216*, 114460.

Murcia González, J.-C. (2021). Analysis and measurement of SOx, CO2, PM and NOx emissions in port auxiliary vessels. *Environmental monitoring and assessment, 193*(6), 374.

NASA. (2024a). Global mean estimates based on land and ocean data. Goddard Space Flight Center.

NASA. (2024b). What's the difference between climate change and global warming? *NASA Science*. Retrieved from https://science.nasa.gov/climate-change/faq/whats-the-difference-between-climate-change-and-global-warming/

National Park Service. (2020, November 4, 2024). Climate change: Regular vs. rampant CO2 levels. Retrieved from https://www.nps.gov/jomu/learn/nature/climate-change.htm

Ni, P., Wang, X., ve Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel, 279*, 118477.

Norton, S., Hatley, J., Merrill, K., Brouwer, I., ve Correa, L. (2022). A Perspective on IMO Efficiency Measures: Opportunities for Improvement. *Marine Technology, 45*(2), 78-91.

Nunes, R., Alvim-Ferraz, M., Martins, F., ve Sousa, S. (2017). The activity-based methodology to assess ship emissions-A review. *Environmental pollution, 231*, 87-103.

Okada, T. (2018). *Ship maneuvering: Technical reference*. Retrieved from https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2018/04/Loss-Prevention-Bulletin-Naiko-Class-Vol.4_Ship-Maneuvering-Technical-Reference.pdf

Olaniyi, E. O., ve Viirmäe, M. (2016). The economic impact of environmental regulations on a maritime fuel production company. *Research in Economics and Business: Central and Eastern Europe, 8*(2), 58-84.

Özkulluk, I., ve Nas, S. (2023). Analysis of Factors Influencing Ship's Maneuvering Times. *Transactions on Maritime Science, 12*(02).

Pandey, D., Agrawal, M., ve Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental monitoring and assessment, 178*, 135-160.

Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Bitner-Gregersen, E., Shigunov, V., El Moctar, O., Soares, C. G., . . . Sprenger, F. (2015). *Energy efficient safe ship operation (SHOPERA).* Paper presented at the SNAME Maritime Convention.

Paulauskas, V., Filina-Dawidowicz, L., ve Paulauskas, D. (2020). The method to decrease emissions from ships in port areas. *Sustainability, 12*(11), 4374.

Paulauskas, V., Senčila, V., Paulauskas, D., ve Simutis, M. (2023). Impact of Port Clearance on shipping Safety, Energy Consumption and Green Ports Sustainability.

Pekşen, N. H., Pekşen, D. Y., ve Ölçer, A. (2014). Cold ironing yöntemi; Marport Limanı uygulaması. *Journal of ETA maritime science, 2*(1), 11-30-10.

Perera, L. P., ve Mo, B. (2016). Emission control based energy efficiency measures in ship operations. *Applied Ocean Research, 60*, 29-46.

Psaraftis, H. N. (2019). Decarbonization of maritime transport: to be or not to be? *Maritime Economics & Logistics, 21*, 353-371.

Register, L. s. (2022). MARPOL Annex VI, Chapter 3: Nitrogen oxides (NOx).

Roy, A., ve Chakraborty, M. (2024). Effects of ship emissions on Asian haze pollution, health, and IMO strategies. *Societal Impacts, 3*, 100055.

Rutherford, D., Mao, X., ve Comer, B. (2020). Potential CO_2 Reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index. *Working Paper*(2020-27).

Sakhvidi, M. J. Z., Lequy, E., Goldberg, M., ve Jacquemin, B. (2020). Air pollution exposure and bladder, kidney and urinary tract cancer risk: a systematic review. *Environmental pollution, 267*, 115328.

Sandurawan, D., Kodikara, N., Keppitiyagama, C., ve Rosa, R. (2011). A six degrees of freedom ship simulation system for maritime education. *International Journal on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer), 3*(2).

Sang, Y., Ding, Y., Xu, J., ve Sui, C. (2023). Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions. *Fuel, 352*, 129086.

Santos, U. d. P., Arbex, M. A., Braga, A. L. F., Mizutani, R. F., Cançado, J. E. D., Terra-Filho, M., ve Chatkin, J. M. (2021). Environmental air pollution: respiratory effects. *Jornal Brasileiro de Pneumologia, 47*(01), e20200267.

Saputra, H., Maimun, A., ve Koto, J. (2013). Estimation and distribution of exhaust ship emission from marine traffic in the straits of Malacca and Singapore using Automatic Identification System (AIS) data. *Jurnal Mekanikal*.

Sariöz, K., ve Narli, E. (2003). Assessment of manoeuvring performance of large tankers in restricted waterways: a real-time simulation approach. *Ocean Engineering, 30*(12), 1535-1551.

Schaub, M., Finger, G., Dahms, F., Hassel, E., Jeinsch, T., ve Kirchhoff, M. (2019). *Data-based prediction of particle emissions during manoeuvring of ships.* Paper presented at the 2019 International Interdisciplinary PhD Workshop (IIPhDW).

Schubert, A., Damerius, R., Finger, G., Fischer, S., Milbradt, G., Kurowski, M., . . . Jeinsch, T. (2020). *Consumption optimised manoeuvring method for ship automation.* Paper presented at the Conference Proceedings of iSCSS.

Schwarzkopf, D. A., Petrik, R., Hahn, J., Ntziachristos, L., Matthias, V., ve Quante, M. (2023). Future ship emission scenarios with a focus on ammonia fuel. *Atmosphere, 14*(5), 879.

Seddiek, I. S., ve Elgohary, M. M. (2014). Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SOx and NOx emissions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 6*(3), 737-748.

Senol, Y. E., ve Seyhan, A. (2024). A novel machine-learning based prediction model for ship manoeuvring emissions by using bridge simulator. *Ocean Engineering, 291*, 116411.

Seyhan, A., Ay, C., ve Deniz, C. (2023). Evaluating the emission reduction efficiency of automatic mooring system and cold ironing: the case of a port in Izmit Bay. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs, 15*(2), 227-245.

Shaketange, O. (2024). Exhaust scrubber systems onboard vessels.

Shih, C.-H., Huang, P.-H., Yamamura, S., ve Chen, C.-Y. (2012). Design optimal control of ship maneuver patterns for collision avoidance: a review. *Journal of Marine Science and Technology, 20*(2), 1.

Singh, A., ve Agrawal, M. (2007). Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology, 29*(1), 15.

Skjølsvik, K. O., Andersen, A. B., Corbett, J. J., ve Skjelvik, J. M. (2000). Study on greenhouse gas emissions from ships. *MT Rep. Mtoo A23-038. Trondheim, Norway: MARINTEK*.

Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., . . . Pandey, A. (2015). *Third IMO GHG Study 2014*. Retrieved from International Maritime Organization (IMO)
London, UK:

Song, S.-K., ve Shon, Z.-H. (2014). Current and future emission estimates of exhaust gases and particles from shipping at the largest port in Korea. *Environmental Science and Pollution Research, 21*, 6612-6622.

State of Global Air. (2022). State of Global Air.

Sürer, M. G., ve Arat, H. T. (2022). Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy, 47*(45), 19865-19875.

Svensson, E. (2011). *The Regulation of Global SOx Emissions from Ships: IMO proceedings 1988-2008*: Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

Şahan, D. (2017). Türkiye'de Taşımacılığın Çevresel Sürdürülebilirlik Çerçevesinde Analizi. *Politik Ekonomik Kuram, 1*(2), 1-15.

Tacar, Z., Sasaki, N., Atlar, M., ve Korkut, E. (2020). An investigation into effects of Gate Rudder® system on ship performance as a novel energy-saving and manoeuvring device. *Ocean Engineering, 218*, 108250.

Tai, H.-H., ve Chang, Y.-H. (2022). Reducing pollutant emissions from vessel maneuvering in port areas. *Maritime Economics & Logistics, 24*(3), 651.

Tokuslu, A. (2021). Assessment of Environmental Costs of Ship Emissions: Case Study on the Samsun Port. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ), 20*(5).

Tokuşlu, A. (2020). Bartın Limanı Gemi Emisyonlarının Envanterinin Oluşturulması ve Liman Emisyonlarının Çevresel Maliyetinin Hesaplanması. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 3*(4), 208-218.

Toscano, D., ve Murena, F. (2019). Atmospheric ship emissions in ports: A review. Correlation with data of ship traffic. *Atmospheric Environment: X, 4*, 100050.

Trodden, D., ve Haroutunian, M. (2018). Effects of ship manœuvring motion on NOX formation. *Ocean Engineering, 150*, 234-242.

Ueng, S.-K., Lin, D., ve Liu, C.-H. (2008). A ship motion simulation system. *Virtual reality, 12*, 65-76.

UNCTAD. (2022). Review of maritime transport 2023.

UNCTAD. (2023). Decarbonizing shipping *Review of Maritime Transport 2023*.

United Nations Environment Programme. (2024). Facts about climate emergency. Retrieved from https://www.unep.org/facts-about-climate-emergency doi:Retrieved June 13, 2024

Ustolin, F., Campari, A., ve Taccani, R. (2022). An extensive review of liquid hydrogen in transportation with focus on the maritime sector. *Journal of marine science and engineering, 10*(9), 1222.

Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W., ve Lenaerts, S. (2021). Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science, 14*(2), 815-843.

Vasilescu, M.-V., Dinu, D., Panaitescu, M., ve Panaitescu, F.-V. (2021). *Research on Exhaust Gas Cleaning System (EGCS) used in shipping industry for reducing SOx emissions.* Paper presented at the E3S Web of Conferences.

Wang, L., ve Li, Y. (2023). Estimation methods and reduction strategies of port carbon emissions-what literatures say? *Mar Pollut Bull, 195*, 115451.

Wang, Y., ve Wright, L. A. (2021). A comparative review of alternative fuels for the maritime sector: Economic, technology, and policy challenges for clean energy implementation. *World, 2*(4), 456-481.

Wang, Z., Zhou, S., Feng, Y., ve Zhu, Y. (2020). EGR modeling and fuzzy evaluation of Low-Speed Two-Stroke marine diesel engines. *Science of the Total Environment, 706*, 135444.

Wärtsilä. (2024). Navigation simulator NTPRO 5000. Retrieved from https://www.wartsila.com/marine/products/simulation-and-training/navigational-simulators/navigation-simulator-ntpro-5000

Whall, C., Scarbrough, T., Stavrakaki, A., Green, C., Squire, J., ve Noden, R. (2010). UK Ship emissions inventory. *Final Report, Entec UK Limited*.

Winebrake, J. J., Corbett, J., Green, E., Lauer, A., ve Eyring, V. (2009). Mitigating the health impacts of pollution from oceangoing shipping: an assessment of low-sulfur fuel mandates: ACS Publications.

Winnes, H., ve Fridell, E. (2010). Emissions of NOX and particles from manoeuvring ships. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 15*(4), 204-211.

Woo, J.-K., ve Moon, D. S.-H. (2014). The effects of slow steaming on the environmental performance in liner shipping. *Maritime Policy & Management, 41*(2), 176-191.

World Health Organization. (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease.

World Meteorological Organization. (2024). Global temperature likely to exceed 1.5°C above pre-industrial level temporarily in next 5 years. Retrieved from https://public.wmo.int/en/media/press-release/global-temperature-likely-exceed-15%C2%B0c-above-pre-industrial-level-temporarily-next-5-years doi:Retrieved June 13, 2024

World Ports Climate Initiative. (2010). *Carbon footprinting for ports: guidance document*. Retrieved from Carbon Footprinting Working Group:

WTO. (2024, May 29, 2024). Maritime transport services. Retrieved from https://www.wto.org/english/tratop_e/serv_e/transport_e/transport_maritime_e.htm

Xing, H., Spence, S., ve Chen, H. (2020). A comprehensive review on countermeasures for CO2 emissions from ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134*, 110222.

Xiufeng, Z., Yicheng, J., Yong, Y., Hongxiang, R., ve Xiuwen, L. (2012). *Ship motion modeling and simulation in Ship Handling Simulator.* Paper presented at the 2012 International Conference on Audio, Language and Image Processing.

Yalcin, E., Pehlivan, E. F., Cetin, B. A., ve Aymelek, M. (2023). Optimising ship manoeuvring time during port approach using a decision support system: a case study in Turkey. *Ships and Offshore Structures, 18*(12), 1713-1725.

Yapıcı, M., ve Koldemir, B. (2016). Yeni Teknoloji ve Alternatif Yakıt Uygulamalarının Hava Kirliliği Ile Römorkör Üretimine Etkilerinin Araştırılması. *Journal of ETA maritime science*.

Yoro, K. O., ve Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect *Advances in carbon capture* (pp. 3-28): Elsevier.

Zaraphonitis, G., Kanellopoulou, A., Papanikolaou, A., ve Shigunov, V. (2016). *Ship optimization for efficiency and maneuverability in adverse sea conditions.* Paper presented at the 6th International Maritime Conference on Design for Safety, Germany, Hamburg.

Zhang, C. (2023). *Energy Performance and Manoeuvring Modelling of Inland Waterway Vessels.* Department of Mechanics and Maritime Sciences, Chalmers University of Technology. (Doctoral dissertation)

Zhang, R., ve Liang, H. (2022). *Application of solar energy in ship power field.* Paper presented at the 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC).

Zhang, W., Zou, Z.-J., ve Deng, D.-H. (2017). A study on prediction of ship maneuvering in regular waves. *Ocean Engineering, 137*, 367-381.

Zhang, X., ve Aikawa, M. (2024). Health risks and air quality by PM2. 5 in the leeward area of the Asian continent in the preceding year of the MARPOL Treaty enforcement. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-9.

Zhuang, Z., Guan, B., Chen, J., Zheng, C., Zhou, J., Su, T., . . . Zhao, S. (2024). Review of nitrous oxide direct catalytic decomposition and selective catalytic reduction catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 150374.

Zincir, B. (2020). A short review of ammonia as an alternative marine fuel for decarbonised maritime transportation. *Proceedings of the ICEESEN2020, Kayseri, Turkey*, 19-21.

Zis, T. P. (2019). Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 119*, 82-95.

Zoubir, M., Gruner, M., ve Franke, T. (2023). “We go fast-It's their fuel”: Understanding energy efficiency operations on ships and marine vessels. *Energy Research & Social Science, 97*, 102992.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Levent KABA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma ve İşletme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022 – Devam : Safiport Derince Limanı, Kılavuz Kaptan
- 2022 – 2022 : Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü, İstanbul Boğazı, Gemi Trafik Operatörü
- 2021 – 2022 : Ambarlı Limanı, Marin Römorkör ve Kılavuzluk A.Ş., Kılavuz Kaptanlık Stajı
- 2021 – 2021 : Ditaş Deniz İşletmeciliği ve Tankerciliği A.Ş., Emniyet ve Denetleme Enspektörü
- 2018 – 2021 : Ditaş Deniz İşletmeciliği ve Tankerciliği A.Ş., Uzakyol Gemi Kaptanı
- 2015 – 2018 : Ditaş Deniz İşletmeciliği ve Tankerciliği A.Ş., Uzakyol Birinci Zabiti
- 2011 – 2015 : Ditaş Deniz İşletmeciliği ve Tankerciliği A.Ş., Uzakyol Vardiya Zabiti

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kaba, L., Şenol, Y. E., ve Seyhan, A.** 2024. A study on the comparison of real ship manoeuvre emissions with simulator manoeuvre emissions. In H. Göker (Ed.), 14. Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (ICAR) Tam Metin Kitabı (1. baskı, ss. 281–295). ISBN: 978-625-6671-63-8. https://www.icarcongress.org/tammetin.php