DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN DENEYSEL İNCELENMESİ: İZMİR KÖRFEZİ'NDE DAHİLİ TAŞIMACILIK ÜZERİNE BİR UYGULAMA

Mehmet Emin AYDIN

Şubat, 2024
İZMİR

GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN DENEYSEL İNCELENMESİ: İZMİR KÖRFEZİ'NDE DAHİLİ TAŞIMACILIK ÜZERİNE BİR UYGULAMA

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Anabilim Dalı, Deniz Ulaştırma Sistemleri Mühendisliği programı

Mehmet Emin AYDIN

Şubat, 2024
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MEHMET EMİN AYDIN tarafından **Doç. Dr. ALİ CEMAL TÖZ** yönetiminde hazırlanan "**GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN DENEYSEL İNCELENMESİ: İZMİR KÖRFEZİ'NDE DAHİLİ TAŞIMACILIK ÜZERİNE BİR UYGULAMA**" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Doç. Dr. Ali Cemal TÖZ

Danışman

.....

Doç. Dr. Burak KÖSEOĞLU

Jüri Üyesi

.....

Prof. Dr. Ebru Yeşim ÖZKAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Küçüklüğümden bu yana eğitim ve sosyal hayatımda bana yol gösteren, öğüt veren, beni doğru ve topluma yararlı bir birey olarak yetiştiren ve bana her zaman destek olan Anne ve Babama minnet borçluyum. Benimle aynı alanda eğitim gören beraber proje ve makale yazdığımız kardeşim Mehmet Sadık AYDIN' a bana desteklerinden ve diğer kardeşlerimede benim yanımda olduklarından dolayı teşekkür ederim. Bitirme tasarım projesinin hazırlanmasında yanımda olan ve her türlü bilgi, birikim ve deneyimini benimle paylaşan hocam ve aynı zamanda tez danışmanım Doç. Dr. Ali Cemal TÖZ' e, yüksek lisans eğitim sürecinde bana destek veren Doç. Dr. Mustafa NURAN' a, Araştırma görevlisi Dr. Murat PAMIK' a ve akademisyenlerimize, ayrıca tezimin deneysel olarak hazırlanması için gerekli izinleri veren İzdeniz A.Ş Genel Müdür V. Uzakyol Kaptan Ümit YILMAZ' a, İzdeniş A.Ş DPA ve aynı zamanda Operasyon Müdürü Uzakyol Kaptan Hakan KURTBOĞAN' a ve Teknik Müdür Uzakyol Başmühendis A.Kağan DURMUŞOĞLU' na teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel aşamada bana yardımcı olan M/S Dario Moreno Kaptanı Uzakyol Kaptan Yunus AKŞAHİN' e, Makine Personeli Doğukan GÜLFİDAN' a ve Güverte Personeli Sedat Veli ŞAHİN' e şükranlarımı borçluyum.

Mehmet Emin AYDIN

GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN DENEYSEL İNCELENMESİ: İZMİR KÖRFEZİ'NDE DAHİLİ TAŞIMACILIK ÜZERİNE BİR UYGULAMA

ÖZ

Dünyada uluslararası ticaretin büyük çoğunluğu deniz yoluyla yapılmasından dolayı dünya ticaret filosu her geçen yıl daha da artmaktadır. Bununla birlikte deniz taşımacılığı her ne kadar diğer taşımacılık türlerine göre daha temiz bir taşımacılık türü olsa da gemilerde kullanılan fosil yakıtlar nedeniyle gemiler tarafından oluşturulan emisyonlar hava kirliliği üzerinde önemli bir yere sahiptir. Gemilerin küresel iklim değişikliği üzerinde ciddi etkileri vardır. Emisyonlar; atmosferde biriken sera gazlarının etkisiyle küresel ısınmaya, asit yağmurlarına ve temiz hava kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır. Yukarıda sayılan her bir etken insan ve canlı sağlığı üzerinde olumsuz etkilerinin olmasının yanı sıra dünyadaki yaşam ve doğa üzerinde de yıkıcı etkilere neden olmaktadır. Limanların konumları yaşam yerleri ile iç içe olması veya yaşam yerlerine çok yakın olmasından dolayı gemi kaynaklı emisyonlar bu bölgelerde yaşayan insanların sağlığını daha fazla etkilemektedir.

Deniz taşımacılığının artmasına bağlı olarak deniz araçlarının çevreye verdikleri tahribat ve zararlarda artmıştır. Oluşan bu zararları azaltmak, denetim ve kontrol altında tutmak amacıyla uluslararası denizcilik örgütleri, çevre kuruluşları ve ülkeler birtakım düzenlemeler hazırlayarak yürürlüğe koymuşlardır. IMO (uluslararası denizcilik örgütü), EEA (Avrupa çevre ajansı), CARB (California Air Resources Board - Kaliforniya Hava Kaynakları Kurumu), gemi egzoz emisyonlarına odaklanarak çevre koruma alanında öncü düzenlemeleri belirlemektedir.

IMO tarafından oluşturulan MARPOL Kısım VI Gemi Bacası Gazlarından Kirlenmenin Önlenmesi Sözleşmesinde egzoz gazından çıkan başlıca Azot oksit (NO_X), Karbonoksit (CO_X), Kükürtoksit (SO_X) ve Hidrokarbon (HC) gibi dünya genelinde emisyonların kontrol altına alınması amacıyla düzenlemeler oluşturulmuş ve hava kirletici gazlar için belli sınır değerler getirilmiştir. Türkiye ise MARPOL Ek VI sözleşmesine 2014 yılında taraf olmuştur. Böylece ülkemizde de gemi kaynaklı emisyonların ölçülmesi, incelenmesi, değerlendirilmesi ve bu emisyonların azaltılması

için değişik metotların geliştirilmesi önem kazanmıştır. MARPOL Ek VI limitlerine uygunluğun sağlanabilmesi için egzoz emisyonlarının düzenli olarak ölçülmesi ve denetlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, deniz araçlarından kaynaklanan emisyonların belirlenmesi için egzoz emisyon ölçümleri yapılmalıdır. Gerçekleştirilen bu ölçümlerle birlikte, deniz araçlarından yayılan ortalama emisyon miktarı hesaplanarak gemilerin MARPOL Ek VI limitleri içerisinde olup olmadığı kontrol edilir. Gemi emisyon ölçümleri, NOX teknik rehberinde belirtilen standartlara uygun bir şekilde yapılır. Ancak, deniz araçlarının egzoz emisyonlarının MARPOL Ek VI limitlerine uygunluğunun denetlenmesine ilişkin kural ve prosedürler de yine bu NOX teknik dokümanında detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Bu kapsamda belirlenen kurallar ve prosedürler, denetim süreçlerinin etkin ve standartlara uygun bir şekilde yürütülmesini sağlamak amacıyla belirlenmiştir.

Deniz araçlarının egzoz emisyonları üzerindeki etkilerin anlaşılabilmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, emisyon faktörlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmalar, çeşitli deniz araçları tarafından atmosfere salınan kirleticilerin miktarını ölçerek, bu araçların emisyon profillerini tanımlamayı amaçlar. Elde edilen emisyon faktörleri, belirli bir deniz aracının belirli bir işletme koşulu altında ürettiği emisyonların nicel bir temsilini sağlar. Bu faktörler, bölgesel veya küresel düzeyde deniz taşımacılığının çevresel etkilerinin değerlendirilmesine olanak tanır. Bu çalışmalar, deniz araçlarından kaynaklanan kirliliğin çevresel, atmosferik, insan sağlığı ve ekosistemler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla önemli veriler sunar. Elde edilen bilgiler, sürdürülebilir deniz taşımacılığı uygulamalarının geliştirilmesi, çevresel düzenlemelerin yapılması ve genel olarak hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi konularda karar alıcıları bilgilendirir.

Bu çalışmada Ege Denizi İzmir Körfezinde yolcu taşımacılığı yapan bir vapurdan yayılan egzoz emisyonları deneysel metotlarla belirlenmiştir. Vapur egzoz emisyonlarının ölçümleri sonucunda NO_X egzoz emisyonu 6.23 (g/kWh) olarak belirlenmiştir. IMO kurallarında belirtildiği gibi, vapur inşaa edildiği tarihe göre seviye 2 NO_X teknik rehberindeki sınırlara tabidir. Dario Moreno vapurunun ana makinesinin devri, 1800 rpm değeri üzerinden yapılan hesaplamalarda elde edilen sonuçlar doğrultusunda vapurun inşa yılı ve makine özellikleri dikkate alındığında

vapurun tabii olduğu NO_X egzoz emisyon sınırı 7.84 (g/kWh) olarak tespit edilmiştir. Farklı makine yük durumlarında ölçülen NO_X emisyon standartlarına göre hesaplanan Spesifik NO_X emisyon değeri 6.23 (g/kWh), seviye 2 NO_X limitlerine uygun olduğu tespit edilmiştir. Türkiye Cumhuriyeti Ulusal Mevzuatı denizcilik dizeli yakıtı kükürt içerik sınırlamalarına göre vapurdaki dizel yakıtın kükürt içerik düzeyi kütlece yüzde 0.1' i aşmamalıdır. Egzoz ölçümü gerçekleştirilen bir vapurda kullanılan dizel yakıtın kükürt içeriği yüzde 0.07 olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla vapurda kullanılan yakıt ulusal mevzuata ve IMO'nun belirlediği yakıt kükürt içeriğine uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca egzoz emisyon ölçüm sonuçlarına göre CO 0.930 (g/kWh), CO_2 894.910 (g/kWh) emisyon değerleri olarak tespit edilmiştir.

Bu araştırmada, vapurdan kaynaklanan egzoz emisyon miktarı, teorik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen deneysel ölçümlerle elde edilen verilere dayanarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, incelenen vapurun tek bir seferinde meydana gelen egzoz emisyon değerlerini belirleme amacını taşımaktadır. Son olarak yıllık vapurdan yayılan egzoz emisyon miktarı aylık olarak NO_x, CO_2, CO, SO_2 emisyon değerleri hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deniz taşımacılığı, Emisyonlar, Egzoz gazları, İzmir körfezi.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHIP-SOURCED EMISSIONS: A STUDY ON INTERNAL TRANSPORTATION IN IZMIR BAY

ABSTRACT

Since the majority of international trade being conducted by sea, the world trade fleet goes to grow each year. However, although maritime transportation is a cleaner type of transportation compared to other transportation types, emissions created by ships due to fossil fuels used on ships have an important place on air pollution. Ships have serious effects on global climate change. Emissions; With the effect of greenhouse gases accumulating in the atmosphere, it causes global warming, acid rain and deterioration of clean air quality. Each of the factors listed above cause negative effects on human and living health, as well as destructive effects on life and nature in the world. Emissions from ships affect the health of the people living in these regions more because the locations of the ports are intertwined with the living areas or are very close to the living areas.

Due to the increase in maritime transport, the damage and damage caused by sea vehicles to the environment has increased, international maritime organizations, environmental organizations and countries have prepared and put into effect some regulations in order to reduce these damages and keep them under control and control. IMO (international maritime organization), EEA (European environmental agency), CARB (California air resources agency) limits are the main regulations that limit ship exhaust emissions.

In the MARPOL Annex VI Convention for the Prevention of Air Pollution from Ship Exhaust Gases by IMO, regulations regarding the global and regional limitation of emissions such as Nitrous Oxide (NOX), Carbon Oxide (COX), Sulfur Oxide (SOX) and Hydrocarbon (HC) from the exhaust gas have been made and the limit for emissions has been made. values are specified. On the other hand, Turkey acceded to the MARPOL Annex VI agreement in 2014.

Thus, it has gained importance in our country to measure, examine and evaluate ship-sourced emissions and to develop different methods to reduce these emissions. Exhaust emission measurements must be made in order to ensure that the emissions

are inspected for compliance with the MARPOL Annex VI limits. With the measurements made, the average amount of emissions emitted from the marine vehicles is determined and the compliance of the marine vehicles with the limits is evaluated. Exhaust emission measurements of ships are carried out as specified in the NOX technical document, and the rules and procedures regarding the inspection of the compliance of the exhaust emissions of marine vehicles with the MARPOL Annex VI limits are given in the NOX technical document.

Emission factors are determined with the help of studies in which exhaust emissions of marine vehicles are examined experimentally. With these factors, the amount of exhaust emissions emitted in certain regions or globally in a certain time is calculated by theoretical methods. Thanks to the emission data obtained through the studies, the effects of pollution caused by sea vehicles on the environment, the atmosphere, and the health of humans and other living things can be examined.

Exhaust emission factors are developed by experimentally making exhaust emissions from marine vehicles. These factors have been determined and published by the studies of different institutions and organizations.

In this study, exhaust emissions from a ferry carrying passengers in the Aegean Sea, Izmir Bay, were determined by experimental methods. As a result of the measurements of the steamer exhaust emissions, the NOX exhaust emission was determined as 3.020 (g/kWh). As stated in IMO rules, the ship is subject to level 2 NOX limits based on the date of construction. As a result of the calculation based on 1800 rpm, which is the ship's main engine speed, the NOX exhaust emission limit that the ferry must comply with has been determined as 7.84 (g/kWh). The Specific NOX emission value of 3.020 (g/kWh), calculated according to the NOX emission values measured at different machine loads, was found to comply with the level 2 NOX limits. According to the Turkish National Legislation maritime diesel fuel sulfur content limits, the sulfur content of the diesel fuel used in the ferry should not exceed 0.1 percent by mass. The sulfur content of the diesel fuel used in the steamboat with exhaust measurement was determined as 0.07 percent. Therefore, it has been seen that the fuel used in the ferry complies with the national legislation and the fuel sulfur content determined by IMO.

In addition, according to the exhaust emission measurement results, the emission values of CO 0.244 (g/kWh) and CO2 405,820 (g/kWh) were determined.

In this study, the amount of exhaust emission emitted from the steamer was calculated according to the data obtained from the experimental measurements by considering the theoretical methods. In these calculations, the exhaust emission values of the ferry in question were determined once. Finally, the annual exhaust emission amount emitted from the steamer, monthly NOx, CO2, CO, SO2 emission values were calculated.

Keywords: Marine transportation, Emissions, Exhaust gases, Izmir bay.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vii
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
TABLOLAR LİSTESİ xiii
KISALTMALAR xv

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

1.1 Gemi Kaynaklı Egzoz Emisyonları 5
1.2 Egzoz Emisyon Oluşumu ve Türleri 6
1.2.1 Karbon Dioksit Emisyonu (CO2) 7
1.2.2 Karbon Monoksit Emisyonu (CO) 10
1.2.3 Azot Oksit Emisyonu (NOx) 11
1.2.4 Kükürt Oksit Emisyonu (SOx) 13
1.2.5 Hidrokarbon Emisyonları (HC) 15
1.2.6 Partikül Madde Emisyonu (PM) 16
1.2.7 Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar 17
1.3 Deniz Araçlarında Egzoz Emisyon Limit ve Kuralları 17
1.3.1 MARPOL 73/78 Uluslararası Gemi Kaynaklı Deniz Kirliliğini Önleme Sözleşmesi 18
1.3.2 MARPOL Ek VI Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliği Önleme Kuralları 18
1.3.2.1 NOx Emisyon Standartları 19
1.3.2.2 SOx ve Partikül Madde Emisyon Limit ve Standartları 22

BÖLÜM İKİ - EGZOZ EMİSYONLARININ ÖLÇÜM VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ 25

2.1 Teorik inceleme 25
2.1.1 Yukarıdan Aşağıya Emisyon Hesaplama Yöntemi 25
2.1.1.1 Metodoloji 26
2.1.1.2 Düzey 1 Yaklaşımı 26
2.1.1.3 Düzey 2 Yaklaşımı 28
2.1.1.4 Düzey 3 Yaklaşımı 31
2.1.2 Aşağıdan Yukarıya Emisyon Hesaplama Yöntemi 32
2.2 Deneysel İnceleme 35
2.2.1 NOx Teknik Koduna Göre Egzoz Gazı Emisyon Hesaplamaları 35
2.2.1.1 Karbon Monoksit ve Karbon Dioksit (CO ve CO_2) Analizörü 41
2.2.1.2 Hidrokarbon (HC) Analizörü 41
2.2.1.3 Azot Oksitler (NOx) Analizi 41
2.2.1.4 Oksijen (O_2) Analizi 42
2.2.2 Ölçümlerde Belirsizlik Analizi 47
2.2.2.1 Rastlantısal Hata 48
2.2.2.2 Sistematik Hatalar 48

BÖLÜM ÜÇ - BİR YOLCU VAPURUNDAN KAYNAKLANAN EGZOZ EMİSYONLARI ANALİZİ 51

3.1 Araştırmanın Amacı 51
3.2 Araştırmanın Önemi 51
3.3 Araştırma Sahası 51
3.4 Araştırmanın Yöntemi 55
3.5 Araştırmanın Bulguları 57
3.6 Spesifik Emisyon Değerleri 61

BÖLÜMDÖRT - SONUÇ 62

KAYNAKLAR 64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Uluslararası taşımacılık kaynaklı CO2 emisyonu 9

Şekil 1.2 Dünya emisyon kontrol alanları 14

Şekil 1.3 2000-2030 Avrupa'da SO2 emisyonları 15

Şekil 1.4 MARPOL Ek VI NOx emisyon limitleri 21

Şekil 1.5 MARPOL EK VI sülfür limit grafiği 23

Şekil 1.6 Deniz SOx teknolojileri egzoz gazı temizleme sistemi 24

Şekil 2.1 Emisyon hesaplama yöntemi belirlemek için kullanılabilecek ilişki ağacı 26

Şekil 2.2 Emisyon ölçüm sistemi 40

Şekil 3.1 İzmir körfezi iç hatlar 52

Şekil 3.2 M/S dario moreno vapuru 52

Şekil 3.3 M/S dario moreno vapuru ana makine yerleşimi 53

Şekil 3.4 M/S dario moreno gemisi makine dairesi genel görünümü 54

Şekil 3.5 Testo 350 maritime çlçüm cihazı 55

Şekil 3.6 ölçüm probunun yerleşimi 56

Şekil 3.7 Ölçümler öncesinde kalibre ayarlarının kontrolü 56

Şekil 3.8 Ölçümler sırasında ortam sıcaklığı ve ortam nemi ölçümü 57

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1 Atmosfer havasının yapısı 6

Tablo 1.2 Gemi yakıtı kimyasal bileşen oranları 7

Tablo 1.3 Seyir durumunda CO2 emisyonu..... 8

Tablo 1.4 Belirli bir rotada tahmini CO2 emisyon hesabı 8

Tablo 1.5 Uluslararası deniz taşımacılığı kaynaklı CO2 emisyon miktarları 9

Tablo 1.6 Ülkelerin atmosfere yaydığı yıllık karbon dioksit miktarlarının dağılımı (milyon ton) 10

Tablo 1.7 Farklı hava yakıt karışımında emisyon oranları 13

Tablo 1.8 Partikül madde kaynakları 16

Tablo 1.9 Nominal motor devrine göre NOx limit değerleri 20

Tablo 1.10 MARPOL Ek VI Düzenleme 14 yakıt sülfür limiti..... 22

Tablo 2.1 Düzey 1 emisyon faktörleri..... 28

Tablo 2.2 Düzey 2 NOx, PM ve SFC için değişik makine tipindeki yakıt türüne göre EF 29

Tablo 2.3 Küçük gezi tekneleri için emisyon faktörleri..... 30

Tablo 2.4 Düzey 3 ana ve yardımcı makineler için NOx emisyon faktörleri 32

Tablo 2.5 Ana makine ve yardımcı makine için emisyon faktörleri..... 34

Tablo 2.6 Kirletici gazlar için emisyon faktörleri..... 35

Tablo 2.7 Sabit devirli ana makine için E2 test döngüsü koşulları..... 37

Tablo 2.8 Ham egzoz gazı emisyonları yoğunluğu standartları..... 39

Tablo 3.1 M/S Dario Moreno vapuru özellikleri 53

Tablo 3.2 Yakıt analiz raporu..... 54

Tablo 3.3 Baudouin ana makine karakteristikleri 57

Tablo 3.4 Makine %25 yükte iken ölçülen parametreler 58

Tablo 3.5 Hesaplanan emisyon değerleri (%25) 58
Tablo 3.6 Makine %50 yükte iken ölçülen parametreler 59
Tablo 3.7 Hesplanan emisyon değerleri (%50) 59
Tablo 3.8 Makine %75 yükte iken ölçülen parametreler 59
Tablo 3.9 Hesaplanan emisyon değerleri (%75) 60
Tablo 3.10 Makine %100 yükte iken ölçülen parametreler 60
Tablo 3.11 Hesaplanan emisyon değerleri (%100) 60
Tablo 3.12 Spesifik emisyon değerleri 61

KISALTMALAR

EPA	: Çevre Koruma Ajansı
HFO	: Deniz Tipi Ağır Yakıt
IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
ISO	: Uluslar Arası Standartlar Organizasyonu
MDO	: Deniz Dizel Yakıtı
MGO	: Deniz Dizel Yakıtı
PM	: Partikül Madde
Ppm	: Milyonda bir birim
PAH	: Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar
EF	: Emisyon Faktörleri
CARB	: Kaliforniya Hava Kaynakları Kurumu
EEA	: Avrupa Çevre Ajansı

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Dünya deniz taşımacılığının her geçen yıl artmasına paralel olarak gemi sayısına duyulan ihtiyaç ta artmaktadır. Yapılan araştırmalarda dünya denizcilik filosunda yer alan gemi sayısı dikkate değer bir şekilde artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Dünya ticaret gemi filosunun yıllara göre dağılımını incelediğimizde, toplam gemi sayısı Tanker, Dökme yük, Konteyner, Kuru yük ve Yolcu gemileri dâhil olmak üzere 1990 yılında 662.744 - 2006 yılında 944.948 - 2010 yılında 1.234.153 - 2019 yılında ise 1.881.589 sayıya ulaşmıştır (İstanbul-Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz deniz ticaret odaları, 2019). Bunun yanında dünyada yaşanan olumsuz durumlar nedeniyle 2020 yılında yeni gemi inşaatı yok denecek kadar azalmıştır ve dünyadaki toplam gemi sayısında ciddi bir artış gözlemlenmemiştir. 1990-2019 yılları arasında gemilerdeki artış trendi ile birlikte küresel deniz taşımacılığı filosunun tükettiği yakıt miktarı 2 katına yakın bir artış gösterirken, aynı zaman periyodunda deniz taşımacılığındaki ticaret hacmi, nakliyat yükü ve ulaşım mesafesi dikkate alındığında yaklaşık 5 kat artış göstermiştir (Third IMO Greenhouse Gas Study, 2014). Küresel salgına neden olan Covid 19 hastalığı sektörü yavaşlatmış olsa da bu olumsuz durumun ortadan kalkmasıyla dünya ticareti 2020 öncesine göre çok daha hızlı bir şekilde artacağı ve artan ticarete bağlı olarak dünyada ihtiyaç duyulan gemi sayısının da artacağı öngörülmektedir. Yapılan araştırmalarda deniz taşımacılığı diğer taşımacılık türlerine göre taşınan yük miktarı, iş hacmine ve çevreye verdikleri emisyon miktarına bağlı olarak daha temiz bir taşımacılık türüdür. Ancak gelişen ekonomiler deniz taşımacılığının da artmasına neden olmaktadır. Bu durum gemileri önemli ölçüde çevre kirleticisi kaynağı haline getirirken deniz araçları emisyonları, minimum regülasyon getirilen emisyon olarak durmaktadır (Eyring, Köhler, Aardenne, & Lauer, 2005).

Deniz taşımacılığındaki belirgin artış ve deniz trafiğindeki yoğunluk, çeşitli düzenlemeler ve kuralların uygulanmasıyla birlikte, gemi kaynaklı emisyonlar ve çevresel etkileri üzerine yapılan çalışmalarda önemli bir yer bulmuştur. Analitik metotların kullanılmasıyla gerçekleştirilen hesaplamalarda, gemi kaynaklı SO_x, SO_2, NO_x ,NO_2, CO, CO_2 ve Partikül madde emisyonları, küresel ölçekte veya spesifik

bölgeler için detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir ((Corbett, ve diğerleri, 2007); (Corbet, Fishbeck, & Pandis, 1999); (Eyring, Köhler, Aardenne, & Lauer, 2005); (Ergin, 2011); (Goldsworthy & Goldsworth, 2015)) . Bu çalışmalar, deniz taşımacılığının çevresel etkilerini anlamak ve bu alanda sürdürülebilirlik amacıyla etkili çözümler geliştirmek için gerçekleştirilmekte ve bu konuda devam eden araştırmalara ışık tutmaktadır.

Dünya ekonomisinde beklenen büyüme ve buna bağlı olarak artan ulaşım ve taşımacılık talebi nedeniyle önlem alınmazsa emisyonların 2050 yılına kadar iki katından fazla artması beklenmektedir. Deniz taşımacılığından kaynaklanan emisyonlar, bugün küresel sera gazı emisyonlarının %3'ünü oluşturmakta olup 2050 yılına kadar %5'e yükselmesi beklenmektedir. Bu, uluslararası anlaşmada kabul görmüş küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutma hedefiyle uyuşmamaktadır. Bu hedefi sağlayabilmek için dünya çapında emisyonların 2050 yılına kadar 1990 emisyon değerlerinin yarısının altına inmesi gerekmektedir (European Commission, 2013).

Enerji tüketimini ve emisyonları hesaplamak için dört yöntem (EPA, IMO, Jalkanen ve MAN) kullanılır. Deneysel çalışmalara dayanarak daha gerçekçi bir yöntem belirlenir. Amaç, daha iyi enerji yönetimi için ihtiyaç duyulan verileri elde etmek için en uygun yöntemi her tür gemiye uygulanabilecek olanını belirleyerek yöntemler arasındaki farkları incelemektir. Dolayısıyla gemilerin yakıt tüketimini ve emisyonlarını daha güvenilir bir şekilde ölçmek amacıyla, farklı tahmin yöntemleri kullanımdadır ancak deniz emisyonlarını ölçmenin en iyi yolu konusunda hala devam eden tartışmalar olmasının yanında yaygın olarak iki yöntem tercih edilmektedir bunlar,

Yukarıdan Aşağıya yöntemi
Aşağıdan Yukarıya yöntemi

Yukardan Aşağıya Yöntemi: Yakıt tüketimini temel alan bu yöntem ile gemilerin tükettiği birim ton başına belirlenmiş katsayı ile çarpılarak çevreye verilen emisyon miktarı hesaplanmaktadır.

Aşağıdan Yukarı Yöntemi: Bu metodoloji yaklaşımında, gemilerin hareketlerine ve kullanılan makine tipine odaklanarak, geminin aldığı mesafe, hızı, makine tipi, gücü

ve g/kWh başına yaydığı emisyon verileri kullanılarak gemilerin emisyon değerleri hesap edilmektedir. Bunun yanında, gemilerden kaynaklanan emisyonların detaylı ve doğru bir şekilde saptanabilmesi için geminin işletim şartları, tükettiği yakıt miktarı, yakıtın türü, makinenin türü, makinenin yükü, deniz aracının yaşı gibi detaylı bilgiler de dikkate alınmaktadır. Bu yöntem, çevresel etkilerin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımak için gemi özelinde detaylandırılmış verileri kullanarak emisyon hesaplamalarını gerçekleştirir.

Bahsedilen metodolojilerin temelini emisyon faktörleri (EF) oluşturmaktadır. Bu faktörler, gemi kaynaklı emisyonların belirlenmesinde kullanılan kritik parametrelerdir.

Gemi emisyonları ile ilgili ölçümler,

Kütle dengesi yöntemi,

Fiziksel / kimyasal hesaplamalar

Kullanımdaki gemilerin doğrudan yığın örneklemesi

Kullanımdaki gemilerden yayılan dumanların durdurulması

İle belirlenebilmektedir (Gutiérrez, ve diğerleri, 2018); (Cappa, ve diğerleri, 2014). Çeşitli çalışmalar, toplam PM ve farklı PM türleri için EF'lerin farklı gemiler arasında oldukça değişken olabileceğini göstermektedir. Son dönemde, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa'da ulusal ve uluslararası çevre kuruluşları tarafından gemilerin emisyon ölçümleri konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş, bu çerçevede salım katsayıları belirlenip saptanmıştır (Trozzi & Vaccaro, 2006); (EPA, 2000); (Van Aardenne, Colette, Degraeuwe, Hammingh, & De Vlieger, 2013). Fakat yapılan emisyon ölçüm çalışmalarında limanda elde edilen sonuçlar ile analitik olarak hesaplanan emisyon sonuçları arasında kayda değer bir sapma olduğu ve bazı hataların olduğu görülmüştür (Ding, Fu, & Ge, 2013), (Corbett J. J., 2004). Gemi emisyon faktörleri belirleme çalışmaları neticesinde gözlenen (EF) yaygın kullanılan gemiler ile çalışmaların yapıldığı bölgelerde çalışan gemi tipleri için hassas sonuçlar üretirken, limanlar ve iç sular gibi bölgelerde, çalışma koşulları ve gemi tiplerinin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. (Ding, Fu, & Ge, 2013); (Cappa, ve diğerleri, 2014). Bu durum göz önüne alındığında belirli bir tür için birden fazla ölçüm tekniği kullanılarak tek bir gemiden salınan emisyonların ayrıntılı karakterizasyonu,

ölçülen EF'lerin belirlenmesinde metodolojik farklılıkların oynadığı rolün anlaşılmasını kolaylaştırabilmektedir.

IMO gemilerden kaynaklanan hava kirliliğinin önlenmesine ilişkin yönetmelikler 1997 protokolü ile MARPOL EK VI belirlenmiştir. Burada gemi egzozlarından kaynaklanan emisyonlara (NO_X ve SO_X) ilişkin limitler belirlenmiş ve üye olan devletler tarafından onaylanmıştır. IMO, gemilerin belirlenen emisyon limitlerine uygunluğunu denetlemek için emisyon ölçümleri yapmakta ve bu sınırlamalara uyan deniz araçlarına, emisyon limitlerine uygunluğu gösteren onay belgelerini düzenleyerek vermektedir. Ek olarak gemi kökenli emisyonları minimize etmeyi hedefleyen düzenlemeler kapsamında, emisyon önleyici ve azaltıcı sistemleri değerlendirmek amacıyla gemilerde emisyon ölçümleri gerçekleştirilmektedir (IMO, 2008). Örnek olarak; Agrawal ve arkadaşları (2008) de gerçekleştirdikleri bir araştırmada CARB tarafından hayata geçirilen; kıyı bölgelerinde gemi kaynaklı emisyonların azaltılması için kıyılarda gemi süratinin düşürülmesi durumunu araştırmışlardır. Daha önceki bir araştırmada yakıtın emisyonlar üzerindeki etkisi deniz araçlarında emisyonların ölçülmesiyle değerlendirilmiştir (Roskilly, Nanda, Wang, & Chirkowski, 2008); (Winnes & Fridell, 2009). 2010 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, araştırmacı Jayaram, gemilerdeki emisyon düşürücü ve filtreleme teknolojilerini değerlendirmiş ve yaptığı emisyon analiz testleri ile bu sistemlerin etkinliği incelenmiştir.

MARPOL Ek VI Yönetmelik 13 kısmında geçen NOx Emisyon Kontrolü Teknik Dokümanı; gemiye monte edilmiş 130 kW'tan fazla güç çıkışına sahip her dizel deniz motoru için geçerlidir. Ek olarak, Pistonlu İçten Yanmalı Makinelerin Egzoz Gazı Emisyonları Ölçümü Standardı (ISO 8178), deniz araçlarında uygulanan emisyon ölçüm çalışmalarında kullanılan belgelendirilmiş önemli bir teknik standarttır. NOx Teknik Dokümanı ve ISO 8178 Standardı, deniz araçlarında kontrol edilecek faktörleri ve gemi egzozunda bulunan hava kirleticileri hesaplamalarını ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Gemilerden kaynaklı atmosfere yayılan kirletici gazların miktarının belirlenmesi, gemi bünyesinde oluşturulan güç, baca gazı yoğunluğunun, NOx Teknik kodunda belirtilen motor karakteristiklerini ve yanma sonucu oluşan atık gaz akış miktarı ölçümünü içermektedir (IMO, 2008)

Bu çalışmanın amacı İzmir Körfezi'nde çalışan yolcu taşımacılığı yapan bir vapurda egzoz emisyon değerlerinin ölçülerek vapurdan yayılan zararlı gaz emisyonlarını belirlemektir. Vapurda farklı makine yüklemesi yapılarak (%25-%50-%75-%100) NO_X Teknik Kodunda belirtildiği şekilde vapurdan yayılan emisyonlar, g/kWh başına vapurdan salınan kirletici egzoz gazları türünden belirlenmiştir. Bu çalışma sonuncunda hesaplanan değerler incelendiğinde çevre ve canlılar üzerinde büyük etkisi olan emisyon değerlerini düşürerek veya tamamen sıfıra indirerek sürdürülebilir çevre oluşturmak için tamamen elektrikli gemi motorlarının güç kaynağı olarak vapurlara entegrasyonu yapılıp şehir hatlarında kullanılması öneri olarak sunulmuştur.

1.1 Gemi Kaynaklı Egzoz Emisyonları

Günümüzde dünya denizcilik taşımacılığında yer alan gemiler konteyner, ham petrol tankerleri, dökme yük ve yolcu gemileri gibi büyük gemilerden oluşmaktadır. Bu büyük gemileri sevk etmek için güçlü motorlara ihtiyaç duyulur. Dünya ticaret filosunun yaklaşık %85 iki zamanlı makinelerle geriye kalan kısmı da dört zamanlı makinelerle çalışmaktadır. Genel olarak gemilerin %85 inden fazlası doğrudan pervaneye bağlı büyük, düşük devirli makinelerle sevk edilmektedir (Anantharaman, Garaniya, & Khan, 2015). Ayrıca gemilerin %66 sı ağıır devirli, %32 si orta devirli ve %2 si yüksek devirli makinelere sahiptir (Corbett & Fishbeck, 2003). Büyük gemilerde iki zamanlı makinelerin seçilmesinin nedeni daha fazla güç üretebilmesi, daha az bakım ve onarım maliyeti, daha güvenli olması ve daha hafif olmasıdır. Ancak düşük devirli makinelerin dezavantajı bu makinelerde yakıt iyi yanmadığından dolayı emisyon miktarı ve egzoz dumanı yoğunluğunun yüksek olmasıdır. Bu nedenle, gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonlarının önemli bir kısmı, gemilerde kullanılan ana ve yardımcı dizel motorlardan kaynaklanmaktadır. Bu bölümde, çalışmanın odaklandığı konular arasında gemi kaynaklı hava kirleticilerinin meydana gelmesi, hava kirleticilerinin çeşitleri, zararları ve gemi emisyonlarıyla ilgili kurallar, limitler ve düzenlemeler detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

1.2 Egzoz Emisyon Oluşumu ve Türleri

Gemilerde sevk sistemine güç sağlamak ve gemilerde gerekli enerji için elektrik üretmek amacıyla dizel makineler kullanılmaktadır. Bu makinelerde tüketilen yakıt ağırlıklı olarak hidrokarbonlardan ve belli oranlarda kükürt, azot ve oksijenden meydana gelen kompleks bir karışımdır. Ancak dizel yakıtlar içerisinde büyük ticaret gemilerinde kullanılan deniz dizeli yakıtların en viskozudur ve daha yüksek düzeyde kükürt içerir. Aynı zamanda bu yakıt %10'dan fazla Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH) içerebilir (Küçükşahin, 1999). Damıtık yakıt, optimal bir yanma sürecinde karbon dioksit ve su buharı üreten hidrokarbon karışımıdır. Fakat tamamlanmayan yanma olması durumunda yakıtın bir kısmı yanmamış hidrokarbonlar olarak bacadan atmosfere salınır. Öte yandan optimum değerin üzerinde basınç ve sıcaklık altında bileşen maddeler arasındaki tepkimeler, makine yağlama yağı, yakıt katkı maddeleri ve içindeki hidrokarbon olmayan bileşenlerinin yanması sonucu istenmeyen emisyonların oluşumuna neden olmaktadır. Örneğin silindirlere fazla hava girmesi veya yanma olayı anında ortaya çıkan yüksek sıcaklıktan dolayı azot oksitler oluşurken yakıtın içinde bulunan kükürtte kükürt oksitleri meydana getirmektedir. Yaygın kirleticiler arasında tepkimeye girmeden çıkan (HC), (CO), (NOx) (SOx) bileşiklerinin yanı sıra tam yanmamış yakıt katkı maddeleri veya partikül madde (PM) bulunur (Küçükşahin, 1999); (Majewski & Khair, 2006). İçten yanmalı motorlar için yanma havası kimyasal bileşimi atmosfer havası kimyasal yapısıyla benzerdir. Bu durumda atmosfer havasının yapısı Tablo 1.1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 1.1 Atmosfer havasının yapısı

Element ve Bileşikler	Havadaki Oranı
Azot [N]	%78,900
Oksijen [O_2]	%20,950
Argon [Ar]	%0.990
Su buharı ve Diğerleri	< %0.10

Gemilerdeki dizel yakıtlar damıtık ve ağır artık yakıtlar kullanılmaktadır. Dizel yakıtlar hafif kısa karbon zincirli, açık renkli ağır yakıtlara göre temiz sayılabilecek olan yakıtlardır. Bilinen tipleri benzin ve motorindir. Bu yakıtlar çoğunlukla küçük makineli hız ve performans aranan gezinti ve sürat teknelerinde tercih edilmektedir.

Büyük makineli, gücün hıza göre daha önemli olduğu ticari gemilerde, kara araçlarında kullanılan motorine göre biraz daha düşük kalitede ve maliyette olan, marine diesel oil (MDO) ve marine gas oil (MGO) olarak bilinen yakıt tipleri kullanılmaktadır. Ağır yakıtlar ise rafineride petrolün işlenmesinde sona kalan sıvı kısımdır çok yoğun ve koyu renklidir, kimyasal olarak da uzun karbon zincirli yapıya sahiptir. Viskozitesi (akışkanlık direnci) yüksektir. Kullanımı esnasında ısıtılması ve uygun koşullara getirilmesi gerekmektedir. Yakıt tüketimi fazla olan yüksek güçlü ağır devirli iki zamanlı dizel makinelerle hareket ettirilen gemiler çoğunlukla (HFO) ağır artık yakıt kullanmaktadırlar. Dizel yakıtlar ile ağır yakıtların içerdiği elementler Tablo 1.2' de verilmektedir.

Tablo 1.2 Gemi yakıtı kimyasal bileşen oranları

	Karbon [C]	Hidrojen [H]	Azot [N]	Oksijen [O]
Damıtık Yakıt	%86.2	%13.6	%0.0	%0.0
Ağır yakıt	%86.1	%10.9	%0.4	%0.0

Dizel makinelerde yakıt tutuşma sıcaklığına ulaşacak kadar sıkıştırılmış yüksek basınç altındaki pistona püskürtülür, yanma odasına püskürtülen atomize dizel yakıt kendiliğinden tutuşur ve iş meydana gelir (Küçükşahin, 1999). Dizel makinelerde yakıt – hava karışımından sonra meydana gelen yanma ile her bir silindirde sırasıyla ısı, iş ve egzoz gazı meydana gelmektedir. Bu işlemler sırasında silindire sızabilen az bir miktar yağlama yağı da yakılmaktadır.

1.2.1 Karbon Dioksit Emisyonu (CO2)

Karbondioksit renksiz, kokusuz, tatsız boğuculuk özelliği olan ağırlığı atmosfer havasından yaklaşık yüzde elli fazla olan gaz türüdür. Atmosfere çeşitli yollarla karışan CO2 miktarı değişiklik göstermektedir. Ancak atmosfere karışan CO2' nin yaklaşık %85i fosil yakıtların (petrol ve türevleri) yanması sonucunda su ile birlikte oluşan bileşiktir. Örnek olarakta bir dizel yakıtın yanması ile oluşan bileşiklerin kimyasal denklemi Denklem 1.1' de gösteriliştir.

$$4C_{12}H_{23} + 71O_2 \rightarrow 48CO_2 + 46\,H_2O \qquad (1.1)$$

IAMU tarafından 2016 yılında yapılan araştırma projesinde 4 zamanlı orta devirli 450 kW gücünde olan yardımcı bir makinede tüketilen yakıttan kW/s başına oluşan karbondioksit miktarı 850 g olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca T.Rozzi (1998) yaptığı çalışmada değişik devirli makinelerde birim ton yakıt başına oluşan CO_2 miktarını ölçmüştür. Bu değerler Tablo 1.3' de verilmiştir.

Tablo 1.3 Seyir durumunda CO2 emisyonu

Makine tipi		CO2 Miktarı (kg/ton yakıt)
Düşük devirli dizel makine	:	3200
Orta devirli dizel makine	:	3200

Tablodaki değerler seyir halinde hesaplanmış emisyon ölçüm değerleri olup, liman ve manevra durumları dahil edilmemiştir. Gemilerde yakılarak tüketilen yakıta bağlı olarak oluşacak CO_2 miktarı da artar. Logward uygulamasında Karbon Emisyon Hesaplayan bir site kullanıma açmış, nakliyenin çevresel etkisini göstermek için geliştirmiştir. Bu çalışmada bu uygulamayı kullanarak Shangai – İzmir arasında 23000 TEU kapasiteli bir konteyner gemisinin ne kadar CO_2 yaydığı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonuçları aşağıda Tablo 1.4' te verilmiştir.

Tablo 1.4 Belirli bir rotada tahmini CO2 emisyon hesabı

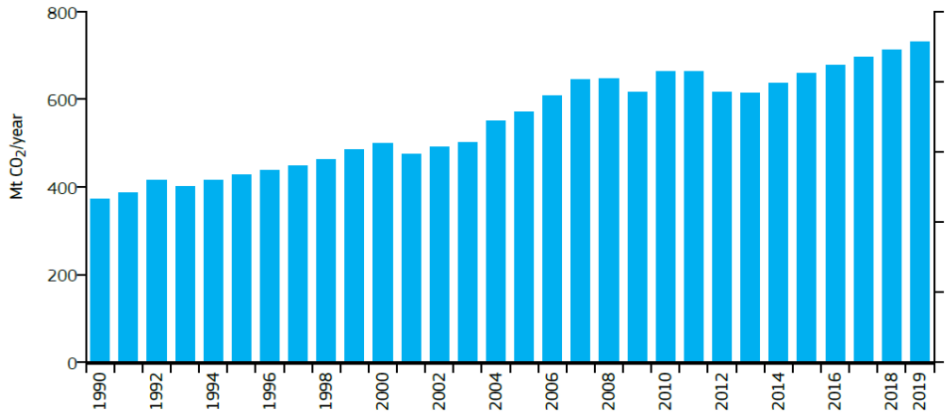
Kalkış Limanı:	:	CNSHG - Shangai limanı	Çin
Varış Liman	:	İzmir Limanı	Türkiye
Mesafe	:	7892 mil	
CO_2 emisyonu (ton)	:	29115.5 ton	

(EDGAR) Emisyon bilgi tabanı (Olivier, Bouwman, Van der mass, & Berdowski, 1994) yayınladığı CO_2 ve küresel ısınmaya neden olan gaz emisyonları 2020 çalışma raporundaki verilere göre, petrol ürünlerinin kullanılmasıyla havaya CO_2 gazının yayılmasında en çok enerji üretim sanayisinden sonra ulaştırma sektörü yer almıştır. Küresel alanda faaliyet gösteren denizcilik lojistiği kaynaklı 2019 yılında havaya bırakılan CO_2 gazı 730.263 Mton olmuştur. 1990'dan 2019 yılına kadar dünya deniz taşımacılığından kaynaklanan CO_2 emisyonu miktarı Tablo 1.5' te gösterilmektedir (Crippa, ve diğerleri, 2020).

Tablo 1.5 Uluslararası deniz taşımacılığı kaynaklı CO2 emisyon miktarları

Yıl		Mt CO2/yıl
2019	:	730.263
2018	:	713.432
2005	:	571.500
1990	:	371.276

EDGAR 2020' deki raporunda ülkelerin havaya saldıkları CO_2 gaz miktarının 2019' da 37,887 milyar ton olduğunu belirtmiştir. Dünya atmosferini en fazla kirleten ülkerin başında Çin Halk Cumhuriyeti, Amerika Birleşik Devletleri, AB, Bharat ve Rusya gelmektedir. Endüstriyel üretimin yoğun olduğu Çin' in 2019'da 11,535,20 milyar ton Karbon emisyonları ile dünya genelinde en fazla çevreyi kirleten ülke iken, Türkiye'nin bu çevre kirliliğindeki emisyon gaz miktarı 417,05 milyon ton olmuştur. Ayrıca dünya denizcilik taşımacılığında dünya genelinde toplam CO_2 emisyon miktarı Şekil 1.1' de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Uluslararası taşımacılık kaynaklı CO2 emisyonu

Bazı ülkelerin CO_2 emisyon değerleri yıllara göre değişimi ve ülkelerin sıralaması Tablo 1.6'da sunulmuştur.

Tablo 1.6 Ülkelerin atmosfere yaydığı yıllık karbon dioksit miktarlarının dağılımı (milyon ton)

Yıllara göre ülkeler bazında atmosfere yayılan CO_2 miktarı (milyon ton)							
Sıra	Ülkeler	1990	2000	2010	2018	2019	2022
1	Toplam	22,683.30	25,699.80	33,971.15	37,668.11	38,016.57	34214,9
2	Hava taş.	258.31	354.52	457.47	605.39	627.48	665,0
3	Deniz taş.	371.28	498.43	662.89	713.43	730.26	710,7
4	Almanya	1,018.22	871	817	751,4	702,6	644,0
5	Amerika	5,065.06	5,917.36	5,567.64	5,243.74	5,107.26	4713,0
7	Brezilya	228	362	447	480,0	478,2	467,4
8	Çin	2,404.74	3,682.48	9,160.79	11,157.07	11,535.20	10668,0
9	Fransa	386	402	380	321,3	314,7	296,0
11	Güney Kore	270.65	483.72	597.80	673.40	651.87	452,0
12	Hollanda	161	176	185	161,9	156,4	140,1
13	Hong Kong	34	41	43	44,9	44,0	40,0
14	India	600	994	1,761.40	2,556.55	2,597.36	2442,0
15	İngiltere	588.07	552.98	502.39	373.47	364.91	330,0
17	Japonya	1,149.47	1,241.63	1,197.43	1,178.86	1,153.72	1031,0
18	Kanada	453	557	567	593,3	584,9	536,0
19	Kosta Rika	3	5	7	8,6	9,0	8,0
20	Kuzey Kore	131.82	73.83	52.84	41.41	42.17	38,1
21	Norveç	37.32	42.84	46.72	48.65	47.99	42,0
22	Pakistan	65.33	109.38	152.76	220.69	223.63	201,3
23	Peru	20.87	29.Oca	45.28	55.81	56.29	51,1
24	Rusya	2,393.66	1,675.16	1,731.63	1,805.77	1,792.02	1577,0
25	Suudi Arabistan	173.02	264.29	478.17	605.31	614.61	626,0
26	Türkiye	150.16	227.41	308.80	422.21	415.78	393,0
27	Vietnam	20.48	56.37	155.22	257.38	305.25	270,2

1900'lü yılların başında CO_2 gazının havadaki yoğunluğu 290 ppm iken 2006 yılında 381 ppm seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Bilimsel çalışmaların sonucunda havadaki CO_2 gazının güvenli üst sınırı olan 350 ppm'in geçtiği anlaşılmıştır. Önlem alınmaz ise 50 yıl içinde bu sayının 500 ppm'ye ulaşması beklenmektedir (Tezcan, Atılgan, & Öz, 2011). Son olarak NASA 2020 yılının Şubat ayında yayınladığı verilere göre havadaki CO_2 gazı yoğunluğunun 413 ppm olduğu bildirilmiştir (NASA, 2020). CO_2 salınımının giderek arttığı bilimsel çalışmalar sonucu tespit edilmiştir. Bu durumun yakın gelecekte dünyadaki canlı yaşamının ve çevre koşullarının üstünde olumsuz etkilerinin artacağı unutulmamalıdır.

1.2.2 Karbon Monoksit Emisyonu (CO)

Karbon monoksit (CO), organik maddelerin ortamdaki hava eksikliği veya yanma sıcaklığının yetersiz olduğu durumlarda eksik yanması sonucu oluşan renksiz, kokusuz

ve tatsız zehirli bir gazdır. Dizel motorlarda yanma odasında ideal hava yakıt karışımının oluşmaması ve yanma sıcaklığının yeterince yükselmemesi başlıca CO oluşma sebebidir. CO bileşiğinin molekül ağırlığı havanınki ile neredeyse eş değerdedir, bundan dolayı havada yaklaşık iki aydan fazla süre askıda kalabilmektedir. Global ölçekte yıllık karbon monoksit salınımının %70 i ulaşım araçlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca birinci derece emisyonlar içinde olan CO gazı deniz araçlarının içten yanmalı makinelerinde petrol türevi yakıt kullanılmasıyla meydana gelmektedir. Yüksek devirli makinelerde düşük devirli makinelere nazaran CO gazı salınımı daha düşüktür. Bunun nedeni ise yüksek devirli makinelerde gerekli yanma sıcaklığı düşük devirli makinelere göre daha iyi olmasıdır (Aygül & Baştuğ, 2020).

Yapılan bilimsel araştırmalara göre karbon monoksit gazı insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Örneğin CO gazı kişilerde, nefes darlığı, yorgunluk, halsizlik gibi etkiler oluşabilmektedir. CO gazına uzun süre maruz kalındığında özellikle yaşlı insanlarda konjestif kalp yetmezliği hastalığının oluştuğu raporlanmıştır (Bernstein, ve diğerleri, 2008).

1.2.3 Azot Oksit Emisyonu (NOx)

NO_X, oksijen ve azotun yüksek sıcaklıklarda yanması sırasında kimyasal reaksiyon ile meydana gelen bir bileşiktir. Dizel motorlarda NOx oluşumu önemli ölçüde silindir içi sıcaklığa bağlı olarak gerçekleşmektedir. Silindir içi sıcaklığın yaklaşık olarak 1500 ^oC'yi aştığı durumlarda silindir içerisine alınan yanma havasında bulunan N_2 gazı oksijen ile tepkimeye girerek NO_X emisyonlarını oluşturmaktadır.

Ayrıca Sıcaklıktaki artışa bağlı olarak NOx emisyonlarında da artış meydana gelmektedir. 1700 ^oC den sonra sıcaklıkta meydana gelen %1 oranındaki her bir artış NOx emisyonlarında %20 oranında artışa neden olmaktadır. Termal NO oluşumları sıcaklığa bağlı olarak Arrhenius tipi denklemlerle ifade edilir Denklemler 1.2 ve 1.3' te olduğu gibidir.

$$k_1 = A_1\, exp\left[-\frac{E_{a,1}}{RT}\right] \tag{1.2}$$

Denklem 1.2' den denklem 1.3 elde edilir.

$$\frac{dk_1}{k_1} = \frac{E_{a_1}}{R} \cdot \frac{dt}{T^2} \tag{1.3}$$

Bu durum aynı zamanda dizel motor mekanizmalarının yüksek sıcaklık duyarlılığı ile karakterize olduğu anlamına gelir (Seykens, 2010).

Azot oksit oluşumunu gösteren Denklem 1.4 ve 1.5 aşağıda verilmiştir.

$$N_2 + O \rightarrow NO + N \tag{1.4}$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \tag{1.5}$$

Yanma sonucu sıcaklık dışında, silindirde meydana gelen termodinamik durumlar, yanma hızı, yanmış gazların sıcaklığa maruz kaldıkları sürede NO_X oluşumunda belirleyici rol üstelenen parametrelerdir. Bu parametrelere etkisi olan her motor özelliği NO_X oluşumunda etkilidir. Bu özelliklere örnek olarak motorun yanma odası geometrisi, yakıt püskürtme basıncı, sıkıştırma oranı, yakıt tipi ve motor devri gibi özellikler düşünülebilir. Yanma sıcaklığı oranı dışında Azot oksit emisyonları yanma odasındaki hava-yakıt oranının bir fonksiyonu olarak ta oluşmaktadır. Dizel yakıt-hava karışımlarının yanması sonucu oluşabilecek ürünler denklem 1.6' da verilmiştir.

$$C_{17}H_{34} + 25{,}5\lambda(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2, CO, CH_4, CHO, C, SO_2, SO_3, H_2O, NO, NO_2 \tag{1.6}$$

Hava- yakıt karışımının oranı belirten Denklem 1.7 de gösterilmiştir.

$$\emptyset = \frac{\left[\frac{A}{F}\right]_{gerçek}}{\left[\frac{A}{F}\right]_{stoykiyometrik}} \tag{1.7}$$

Bu değer dizel motorda meydana gelen yanma tepkimesindeki bileşen miktarı, kuramsal açıdan ölçülen yanma tepkimesindeki bileşen miktarını belirtir. Ayrıca makine özellikleri, silindir tipi ve makinedeki potansiyel arızalar azot oksitlerin meydana gelmesine neden olabilmektedir. Yanma odasında stoykiyometrik hava-yakıt oranı, gerçek hava-yakıt oranından fazla olursa, oluşabilecek NO_X emisyonları azalmaktadır. Motorda hava yakıt karışımlarının katsayılarına göre emisyon oluşumu Tablo 1.7' de sunulmuştur.

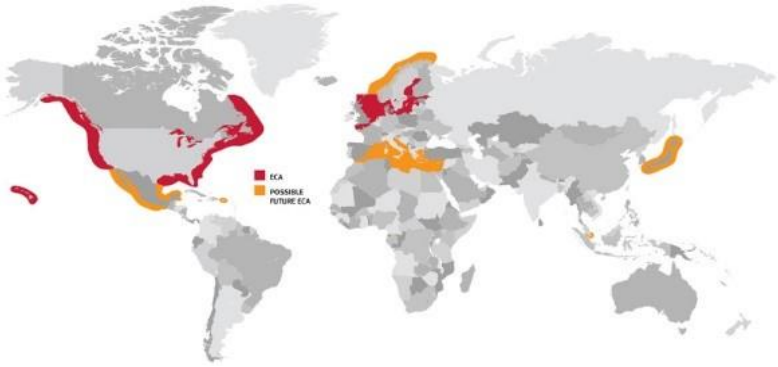
Tablo 1.7 Farklı hava yakıt karışımında emisyon oranları

Karışım		NO_X
%10 zenginleştirilmiş	:	5
stoykiyometrik	:	10
%10 daha fakir	:	20

1.2.4 Kükürt Oksit Emisyonu (SOx)

SO_2 gazı petrol, doğal gaz ve kömür gibi içeriğinde yüksek oranda karbon ile az miktarda kükürt içeren fosil yakıtların yanması sonucu oluşan renksiz ve kokusuz zehirli bir gazdır. Atmosferde yaklaşık 40 gün kalabilen kükürt oksit gazı en çok sanayi tesislerinden yayılmakla beraber ulaşım araçlarında özellikle deniz taşımacılığında gemilerin dizel motorlarında kullanılan fosil yakıtın yanmasıyla da SO_2 gazı oluşmaktadır. Dizel motorlarda yakıtın yanmasıyla sadece SO_2 değil aynı zamanda SO_3 gaz bileşiği de oluşmaktadır.

Dünya Deniz taşımacılığındaki gemilerde kullanılan fosil yakıtların yüksek oranda kükürt içermesi gemileri küresel hava kirliliğinde önemli SO_2 emisyon kaynağı haline getirmiştir. Dünyada toplam SO_2 emisyonlarının yaklaşık %3-4'ü okyanusta seyreden gemilerden kaynaklanmaktadır (Sinha , ve diğerleri, 2003). MARPOL 73/78 Ek-VI'nın 14. düzenlemesi gemilerden kaynaklı SO_X emisyonu ile ilgili sınırlamaları içermektedir. Ayrıca IMO 1 Ocak 2020 tarihinden itibaren geçerli olan deniz yakıtlarındaki kükürt oranları ile ilgili yeni sınırlandırmalar getirmiştir. Bu sınırlandırmalara göre IMO belirlemiş olduğu Emisyon Kontrol Alanlarının (Emission Control Areas, ECA_S) dışında kalan bölgelerde gemilerin kullandıkları fosil yakıt içindeki kükürt oranının %0.5'i geçmeyeceği kararlaştırılmıştır. Şekil 1.2' de Dünya emisyon kontrol alanları gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Dünya emisyon kontrol alanları

Emisyon Kontrol Alanları

Gelecekte emisyon kontrol alanları

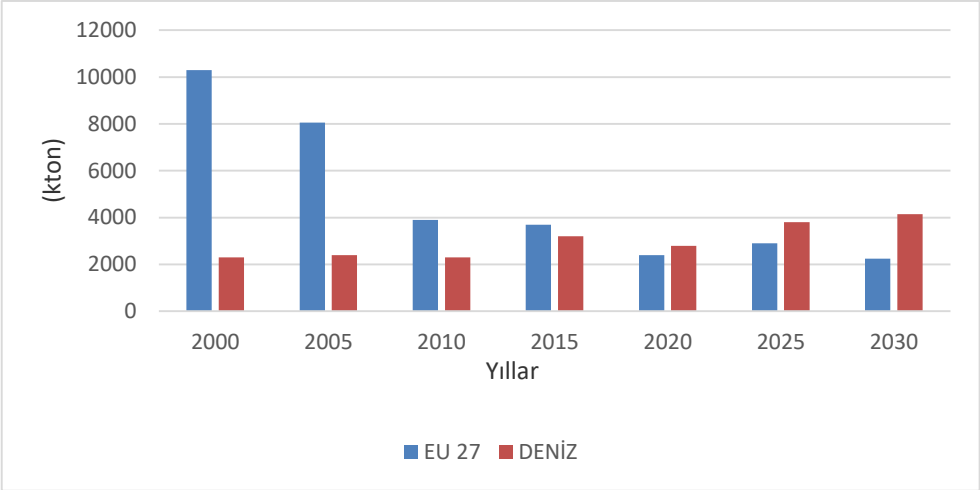
Atmosfere yayılan SO_2 ve SO_3 gazları, havada veya yerde H_2O ile tepkimelere girerek asit yağmurlarına sebep olmaktadır. S ve SO_X 'in su ve oksijenle olan tepkime denklemleri aşağıda Denklem 1.8, 1.9 ve 1.10' da gösterilmiştir.

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3 \tag{1.8}$$

$$H_2SO_3 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2SO_4 \tag{1.9}$$

$$S+O_2 \rightarrow SO_2 \tag{1.10}$$

SO_X emisyonu yakıt içindeki kükürt miktarıyla doğrudan ilişkilidir, dolayısıyla yakıtın içindeki kükürt oranın düşürülmesiyle kükürt oksit bileşimli emisyonları azaltmak mümkündür. Kükürt oksitler insan sağlığına ve çevreye önemli ölçüde zarar vermektedir. Oluşan Kükürt oksitler solunum yolu hastalıklarına yol açabilmektedir (Uçar, 2014). Avrupa birliğine üye ülkeler SO_2 emisyon sınırlandırmaları kapsamında IMO sınırlandırmaları sözleşmesini imzalayarak kabul etmişlerdir. Şekil 1.3 Avrupa Birliği'nin 2030 yılına kadar SO_X emisyon sınırlandırılmış değerlerini göstermektedir.



Şekil 1.3 2000-2030 Avrupa'da SO2 emisyonları

1.2.5 Hidrokarbon Emisyonları (HC)

Hidrokarbonlardan oluşan yakıtın az bir kısmı silindirde yanmadan ya da kısmen yanması sonucu oluşan ve egzoz gazı ile dışarı atılan yakıt parçacıklardır. Bunun yanında yağlama yağı da pistona sızdığında bu yağın kısmen yanmasıyla da hidrokarbon oluşumuna neden olur. Oksijence fakir yanma havası ve düşük sıcaklıklar ideal yanmama durumuna yol açan en önemli nedenleridir. Hidrokarbon emisyonları, farklı içerikleriyle çeşitli konfigürasyonlarda olabilir. Örneğin H, C, N, S ve O ve metandan (CH_4) daha uzun hidrokarbon zincirlerine kadar farklı boyutlarda olabilir. Gazlı ve gazsız hidrokarbonları ayırt etmek için sıcaklık değerlerine bakılır. Gazlı hidrokarbonlar 190°C den daha yüksek sıcaklıkta gaz fazında bulunurken daha düşük sıcaklıklarda sıvı veya katı hallerde olabilmektedirler. HC emisyonları normalde düşük yüklerde ve rölantide en yüksektir, dolayısıyla düşük yüklerde zayıf yakıt hava karışımları olduğundan tam yanma gerçekleşmeyebilmektedir. Ayrıca silindire aşırı yakıt yüklemesi de başka bir hidrokarbon emisyonu kaynağıdır. Yanma işleminin ilerleyen aşamalarında yanmamış yakıt sıcak gazlar karıştığında başlangıçta yanmamış olan yakıtın bir kısmı tamamen veya kısmen yanabilir. Bu durum HC emisyonları makinenin durumuna bağlı olduğunu gösterir. Yani aşınmış valflere ve enjektörlere sahip, kötü bakımı yapılmış bir motordan büyük ölçüde etkilenir; kötü motor zamanlaması, kirli hava filtreleri vb. HC emisyonlarını önemli ölçüde artırabilir (Green ship of the future, 2020).

1.2.6 Partikül Madde Emisyonu (PM)

Partikül madde, organik ve inorganik kökenli çok çeşitli oldukça küçük partiküller için kullanılan bir tanımdır. Karbon, metaller, kül, kurum (neredeyse tamamen elementel karbon), sülfatlar ve nitratlar gibi asitler ve karbonatlar içerebilirler. Bazı PM'ler kısmen yanmış veya yanmamış hidrokarbon malzemeden (yakıt ve yağlama yağı) oluşur, dolayısıyla PM ve HC tanımları arasında bir örtüşme vardır. Yakıt ve madeni yağdan kaynaklanan kül, yayılan PM'nin yalnızca küçük bir bileşenidir ve esas olarak bu yağlarda bulunan metallerden (vanadyum ve nikel) gelir. Hava kalitesi açısından da polen, sporlar, virüsler, kalıntılar, okyanus tuzu spreyi ve toz partiküller olarak sınıflandırılır, ancak burada ele alınan partikül madde akaryakıtın yanması sonucu oluşan parçacıklardır. Diğer taraftan volkanlar ve orman yangınları diğer doğal olaylar sonucu oluşan PM emisyonu kaynaklarıdır. Ancak fosil yakıtların yakılmasıyla insan faaliyetinin neden olduğu partikül madde emisyonu, çevre ve canlı yaşamı koşulları üzerinde büyük etkisi vardır. Partikül maddeler, katı partiküllerin sıvı damlacıkları ile karışımı olan havada askıda kalabilen parçacıklardır. Boyutlarındaki farklılıklarından dolayı bazı parçacıklar gözle görülebilirken bazıları çıplak gözlerle fark edilmeyecek küçüklüktedir (US EPA, 2009).

Son 15 yıldır uydularla yapılan gözlem sonucu havadaki Partikül madde düzeyi incelenmiştir. Bu gözlemlere dayanarak Avrupa kıtasındaki değerler incelendiğinde 2003' te Türkiye Cumhuriyeti hava sahasındaki PM miktarı AB' den %5.6 daha yüksek olduğu ve bu oranın 2018 yılında %33.4 seviyesine yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu süre içinde Avrupa birliği regülasyon ve kısıtlamalarla PM seviyesini %14.2 azaltırken Türkiye Cumhuriyetinde ise %8.4 daha da yükseldiği görülmüştür. Türkiye tarafından hiçbir önlem alınmadan bu şekilde devam etmesi durumunda hava sahasının yakın gelecekte ciddi sorunlarla karşı karşıya kalacağı açıktır. Tablo 1.8' de PM gruplarının bileşenleri gösterilmiştir.

Tablo 1.8 Partikül madde kaynakları

Partikül maddeler	
Antropojenik Kaynaklar	Kara yollarından kaynaklı tozlar
Endüstriyel faaliyetler	Biyokütle yanması
Kömürlerin yanması	Odunların yakılması
İnşaat işleri	Doğal Kaynaklar

Metal mineral ve petrokimya işleme	Volkanik Patlamalar
Motorlu Taşıtlar	Orman yangınları
Deniz spreyleri	Toz fırtınaları

1.2.7 Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar

Karbon ve hidrojenden oluşan kimyasal bir bileşiktir. Organik bileşiklerin yeterli oksijen ve sıcaklığın sağlanamadığı durumlarda tam yanmamasından dolayı meydana gelirler (Alver, E.; Demirci, A.; Özcimder, M., 2012). PAH' lardan bazıları Kanserojen, Mutajen ve Teratojen olarak bilinirler, dolayısıyla bunların insan sağlığı üzerinde oldukça tehlikeli olup tehdit oluştururlar. Genellikle PAH'ların suda çözünürlükleri zayıftır, molekül ağırlık ve büyüklükleri arttıkça etkileri de artmaktadır. PAH'ların ana kaynakları iki türdür. Birincisi doğal olarak gerçekleşen volkanik patlamalar ve orman yangınları sonucu oluşanlar doğal olanlara örnek teşkil eder, diğer taraftan insan kökenli sebepler ise petrol ürünü yakıt kullanan motorlu araçlar, endüstriyel ve kimyasal kaynaklardır. Ağır metal işleme sanayileri, çimento fabrikaları, çöp yakılma tesisleri, asfalt üretimi, petrol rafineleri endüstriyel kaynaklara örnek gösterilebilir. Burada dikkat çekici durum ise sigara dumanı diğerlerine göre çok az miktarda olmasına rağmen insan sağlığına etkileri ve verdiği zarar diğerlerine göre çok daha fazladır (Alver, E.; Demirci, A.; Özcimder, M., 2012).

1.3 Deniz Araçlarında Egzoz Emisyon Limit ve Kuralları

Gemi ve diğer deniz araçlarından kaynaklanan çevre kirliliği; uluslararası kuruluşlar, yerel idareler veya Çevre örgütlerinin kabul ettiği sözleşmeler ve yönetmeliklerle belirlenen kurallar ve sınırlamalar, gemi emisyonlarının kontrol edilmesinde etkili bir rol oynamaktadır. Buna dayanarak Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından önemli bir adım atılmış ve MARPOL (73 / 78) sözleşmesi geliştirilmiştir. Bu sözleşme çevre ve deniz kirliliği üzerine düzenlenmiş devrim niteliği taşıyan en önemli sözleşmedir. Dünyanın birçok ülkesinde bu sözleşme tanınmaktadır. Türkiye de bu sözleşmeye taraftır. Ayrıca diğer ülkeler kendi kara sularında gemi egzoz emisyonları ile ilgili düzenlemiş olduğu limit ve kuralları uygulamaktadırlar.

1.3.1 MARPOL 73/78 Uluslararası Gemi Kaynaklı Deniz Kirliliğini Önleme sözleşmesi

Petrol ürünlerinin sanayilerde yoğun kullanılmaya başlanmasından itibariyle 19. Yüzyılın sonlarında dünya da petrol tankerleri gözükmüş, zamanla boyut ve kapasitelerinin artmasının yanında sayıları da önemli ölçüde artmaya başlamıştır. Kapasiteleri başlarda 300 -500 ton iken 1915'lerde 15.000 ton 1960 yıllarında ise 200.000 tonlara ulaşmış olan tanker gemiler günümüzde 500.000 tona ulaşmıştır. (T.C. Ulaştırma Bakanlığı, 2021). Bu durum 1920 yıllarından itibaren denizlerde gemi kaynaklı kirlilikler gözükmeye başlamıştır, ayrıca kazalar ve kirlilik olayları artması nedeniyle MARPOL Sözleşmesi geliştirilmiştir.

1997 yılında, gemilerden kaynaklanan hava kirliliği konularını düzenleyen yeni bir protokol yapılmış, bu protokol Sözleşmeye Ek VI'yı eklemiştir. 1997 Protokolü dünyada 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir.

Türkiye, MARPOL 73/78 Sözleşmesinin I, II ve V. Eklerine, 1990 tarihinde taraf olmuştur. Sözleşmenin I, II ve V. Ekleri, Ülkemiz açısından 10 Ocak 1991 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Türkiye'nin MARPOL 73/78 Sözleşmesinin III, IV ve VI Eklerine (1997 Protokolüne) taraf olması için çalışmalar devam etmektedir.

1.3.2 MARPOL Ek VI Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliği Önleme Kuralları

Gemilerden kaynaklanan hava kirliliği, birçok alanda nüfusun karşılaştığı genel hava kalitesi sorunlarının başında gelmekte ve aynı zamanda doğal çevreyi etkileyen kümülatif bir etkiye neden olmaktadır. Örneğin hem çevreye hem insan sağlığına oldukça zararlı olan sert asit yağmurlarına neden olduğu gibi. Ancak bu durumu kontrol altına almak için IMO düzenlemeler getirmiştir bunlardan MARPOL 73/78 ek VI sözleşmesi 19 Mayıs 2005 tarihinde geçerli olmaya başlamıştır.

2008 yılında revize edilen Ek VI 2010 yılında 53 ülke tarafından onaylanmıştır. (Emission Standards, 2021).

MARPOL Ek VI sözleşmesinde olan temel değişiklikler, küresel düzeyde SO_X, NO_X ve PM emisyonlarını aşamalı olarak azaltma ve zararlı gaz salımlarını belirlenmiş

deniz alanlarında kayda değer miktarda düşürmek amacıyla emisyon kontrol alanlarının (ECA'lar) belirlenmesine ilişkin yeni düzenlemeler getirmektedir.

400 GRT ve daha büyük tonajda uluslararası sefer yapan tüm gemileri, sabit ve yüzer sondaj üniteleri ile diğer platformları kapsayan bu Ek ile gemi yakıtının kükürt ve sülfür oranı sınırlandırılmış, gemi bacalarının SO_X emisyonunu sınırlandırmaya imkân veren sistemler ile donatılması zorunlu hale getirilmiştir.

1 Ocak 2000 ve daha sonra inşa edilen gemilere takılmış olan 130 kW ve üstü güce sahip olan tüm yeni gemi dizel motorlarının NOx emisyonu bakımından gerekliliklere uygun olması şartı getirilmiş ve Ek VI kapsamındaki gemiler için "Uluslararası Hava Kirliliğini Önleme Sertifikası (IAPP)'nın düzenlenmesi zorunlu hale getirilmiştir. SO_X, NO_X ve partiküllerin salınımlarının daha sıkı bir şekilde sınırlandırıldığı özel emisyon kontrol alanları (ECAs) belirlenmiştir. 2013 yılında yürürlüğe giren yeni kurallarla tüm sera gazı emisyonları salınım miktarlarında ciddi azaltmalara gidilmiştir.

MARPOL Ek VI revize edilmiş sözleşme uyarınca, küresel kükürt limiti, 1 Ocak 2020 tarihi itibariyle mevcut %3,50'den %0,50'ye düşürülmesi kararı alınmıştır. ECA' larda SO_X ve partikül madde için geçerli olan limitler ise 1 Ocak 2015 tarihi dahil %0,10 olarak belirlenmiştir.

Ozon tabakasına zarar veren maddeler, uçucu organik bileşikler, alım tesisleri ve gemilerde kullanılan akaryakıt kalitesi ile ilgili düzenlemelerde revizyonlar yapılmıştır. Gözden geçirilmiş önlemlerin, özellikle liman kentlerinde ve kıyı topluluklarında yaşayan insanlar için, atmosferik çevre ve insan sağlığı üzerinde olumlu etkiler yapması beklenmektedir (IMO, 2019).

1.3.2.1 NOx Emisyon Standartları

MARPOL Ek VI yönetmelik 13, içten yanmalı motorlara bağlı NOx sürüm limitleriyle ilgilidir. Seviyelere göre belirlenen bu değerler seviye I 2000 ile 2011 yılları arasında inşa edilen gemiler, seviye II 2011 ile 2016 yılları arasında inşa edilen gemiler ve seviye III 2016 yılından sonra inşa edilen gemiler için geçerlidir. Söz konusu düzenleme Tablo 1.9' da belirtilen durumlar için uygulanır. NOX teknik

dokümanı Tablo 1.9' da verilen, deniz aracının imal yılına ve motor devrine dayalı geminin NOx limit değerlerini belirtmektedir.

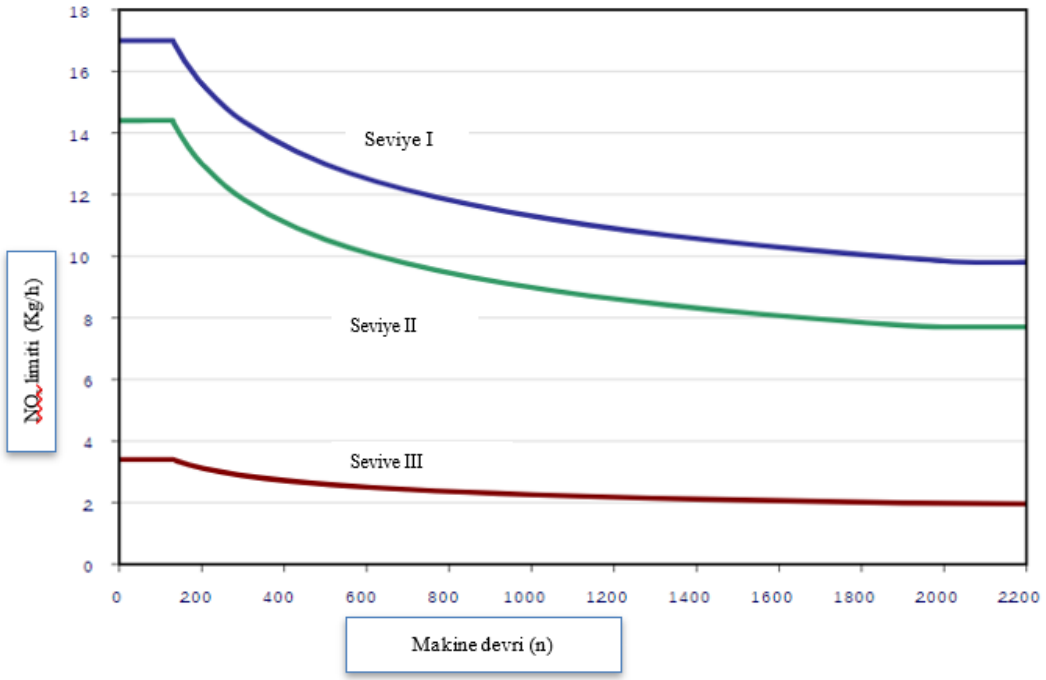
Tablo 1.9 Nominal motor devrine göre NOx limit değerleri

Seviye	**Gemi Yapım Tarihi Veya sonrası**	**Toplam ağırlıklı çevrim emisyon limiti (g/kWh) n = motorun nominal hızı (rpm)**		
		n < 130	130 ≤ **n** < 2000	**n** ≥ 2000
I	1 Ocak 2000	17.0	$45\times n^{(-0.2)}$ ör., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 Ocak 2011	14.4	$44\times n^{(-0.23)}$ ör.., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 Ocak 2016	3.4	$9\times n^{(-0.2)}$ ör., 720 rpm – 2.4	2.0

Dolayısıyla MARPOL Ek VI 13. Düzenlemeye göre NO_X emisyon limitleri ile ilgili kurallar aşağıdaki durumlar için uygulanmaktadır.

- 1 Ocak 1990 yılından itibaren imal edilen deniz araçlarına kurulumu yapılan, 5000 kW üzeri ve silindir hacmi 90 lt ve üstü olan dizel motorlar
- 1 Ocak 2000 yılından itibaren büyük bir değişime uğramış, 130 kW ve üzeri gücünde olan dizel motorlar.
- 1 Ocak 2000 yılından itibaren imal edilen deniz araçlarına kurulumu yapılan 130 kW ve üzeri gücünde olan dizel motorlar.

Seviye III 2016 yılından sonra imal edilen ve ECA bölgelerinde çalışan deniz araçlarını kapsamaktadır. Ancak MARPOL kural 13.5.2 göre bazı küçük gemilerin Seviye III motorları takması zorunlu değildir. Tablo 1.9 da belirtilen durum ve değerlerin grafiksel gösterimi Şekil 1.4’ te gösterilmiştir (McGill, R., William (Bill), R., kim, W., 2013).



Şekil 1.4 MARPOL Ek VI NOx emisyon limitleri

NO_X limitleri deniz aracına monte edilmiş 130 kW üzeri güç çıkışına sahip içten yanmalı motorlar için geçerlidir. İki istisna vardır: bu istisnalar

1- Yalnızca acil durumlar için kullanılan motorlar,
2- Bu motorların alternatif bir NO_X kontrol önlemine tabi olması durumunda geçerlidir.

Değişiklikler, 1 Ocak 2016 yılı ve sonraki tarihlerde imal edilen ve Kuzey Amerika Emisyon Kontrol Alanında veya ABD Karayip Denizi Emisyon Kontrol Alanında faaliyet gösteren bir gemiye kurulu bir deniz dizel motoruna uygulanacak Seviye III NO_X standartlarını sağlamaktadır. Buna ek olarak Seviye III gereklilikleri NO_X kontrolü için belirlenebilecek diğer emisyon kontrol alanlarında çalıştırıldığında dizel motorlar için geçerli olacaktır. Seviye III, emisyon kontrol alanının Deniz Çevre Koruma Komitesi (MEPC) tarafından kabul edildiği tarihte veya bu tarihten sonra Seviye III NO_X emisyon kontrol alanını belirleyen değişiklikte belirtilebilecek daha sonraki bir tarihte inşa edilen gemiler için geçerli olacaktır.

Ayrıca, Seviye III standartları, 1 Ocak 2021'den önce inşa edilmiş, 500 grostondan az, 24 m veya daha uzun, özel olarak tasarlanmış ve yalnızca rekreasyon amaçlar için

kullanılan bir gemiye monte edilmiş deniz dizel motorlar için geçerli değildir (IMO, 2019).

1.3.2.2 SOx ve Partikül Madde Emisyon Limit ve Standartları

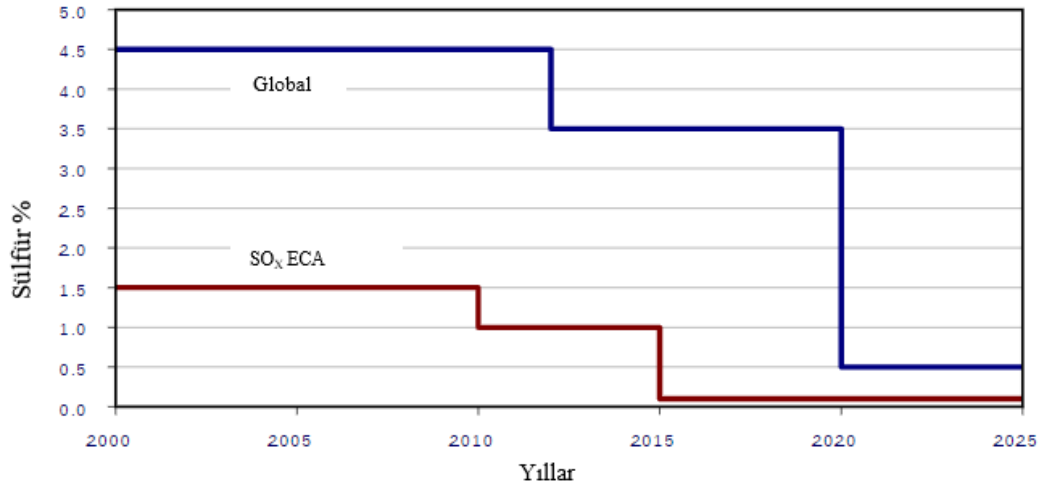
Gemi dizel motorlarından salınan SOx gazı özellikle gemilerle ilgili yakıtın içinde yer alan kükürt oranına sınırlamalar koyarak denetim altında tutulmaya çalışılmaktadır. 1 Ocak 2020'de, gemilerde kullanılan akaryakıttaki kükürt içeriğine ilişkin yeni bir sınır yürürlüğe girerek, hava kalitesini iyileştirmek, çevreyi ve insan sağlığını korumak için önemli bir dönüm noktası olmuştur. IMO (ECAs) dışında çalışan gemilerde kullanılan akaryakıttaki sülfür oranını 1 Ocak 2020'de Dünya genelinde kullanılan tüm denizcilik yakıtları için geçerli olan yakıtın kükürt içeriğinin kütlesel olarak limitini (egzoz gazı temizleme ekipmanı veya alternatif yakıt kullanan gemiler hariç) %3,5'ten %0,5'e düşürülmesini kararlaştırmıştır.

Gemilerde kullanılan akaryakıt içindeki sülfür limit oranları MARPOL ek VI belirtilen ve yıllara göre düzenlenmiş hali Tablo 1.10’ da gösterildiği gibidir (IMO, 2008).

Tablo 1.10 MARPOL Ek VI Düzenleme 14 yakıt sülfür limiti

<table>
<tr><th rowspan="2">Yıl</th><th colspan="2">Yakıt içindeki Sülfür Limiti (% m/m) (kütlece</th></tr>
<tr><th>SOx ECAs için</th><th>Global</th></tr>
<tr><td>2000</td><td>1,50%</td><td rowspan="2">4,50%</td></tr>
<tr><td>2010/7</td><td rowspan="2">1%</td></tr>
<tr><td>2012</td><td rowspan="2">3,50%</td></tr>
<tr><td>2015</td><td rowspan="2">0,10%</td></tr>
<tr><td>2020</td><td>0,50%</td></tr>
</table>

Küresel çapta yürürlükte olan sınırlamaları minimum seviyeye getirip uygulanması amacıyla bazı özel bölgeler SOx emisyon alanları (SECA) olarak duyurulmuştur. Bu özel bölgelerde, deniz araçlarının kullandığı yakıtların içindeki kükürt miktarı 2000 yılından 1 Temmuz 2010’ a kadar %1.5 değeri belirlenmiş. 1 Temmuz 2010 tarihinden 1 Ocak 2015 tarihine kadar sülfür limiti %1' e düşürülmüş daha sonra 1 Ocak 2015 tarihi itibariyle uyulması gereken limit %0.1 olarak ilan edilmiştir. Bahsedilen sınır değerler Şekil 1.5' te gösterilmiştir.



Şekil 1.5 MARPOL EK VI sülfür limit grafiği

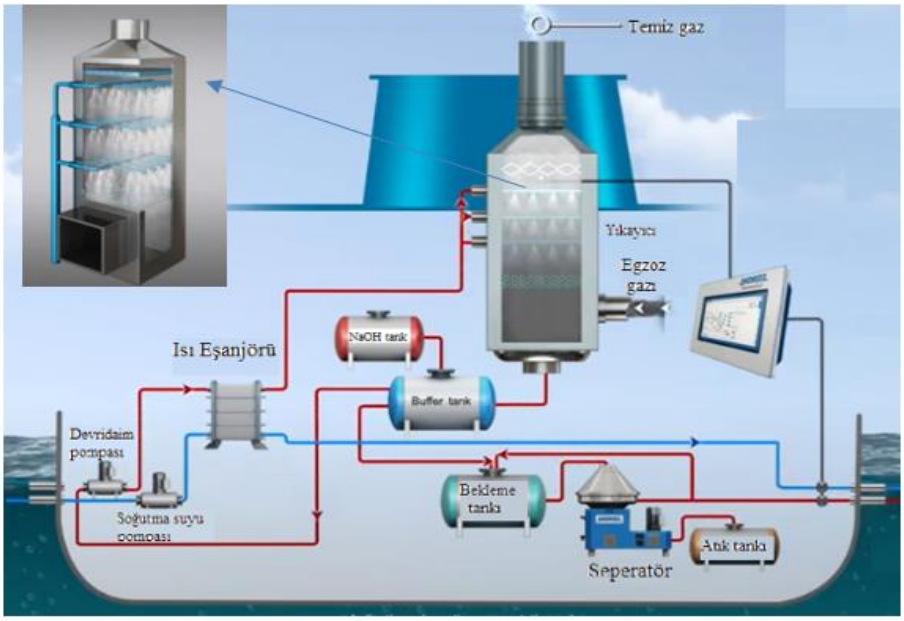
IMO tarafından belirlenen emisyon kontrol alanlarında (ECA_S) yürürlükte olan %0,10 kükürt limiti ile sınırlandırılmış alanlar vardır bu alanlar aşağıda belirtilmiştir.

1- Baltık Denizi bölgesi;
2- Kuzey Denizi bölgesi;
3- Kuzey Amerika bölgesi (Birleşik Devletler ve Kanada açıklarındaki belirlenmiş kıyı bölgelerini kapsar);
4- Amerika Birleşik Devletleri Karayip Denizi bölgesi (Porto Riko ve Amerika Birleşik Devletleri Virjin Adaları civarında).

Ayrıca Akdeniz'e kıyısı olan ülkeler Doğu Akdeniz in özel bölge ilan edilmesi için çalışmalar yapmaktadır çünkü DSÖ raporları, "en yüksek ortam hava kirliliği seviyesinin Doğu Akdeniz Bölgesi'nde olduğunu" göstermiştir dolayısıyla Akdeniz bölgesinin Emisyon Kontrol Alanı (ECA) olarak atanması gerekli olduğu açıktır (IMO, 2019).

Egzoz gazı temizleme sistemleri (EGCS), diğer adıyla yıkayıcılar aracılığıyla kükürt emisyonlarını azaltmak için (SECA bölgelerinde ve küresel olarak) alternatif önlemlere de izin verilmektedir. Örneğin, kükürt oranı %0,5 olan yakıtı kullanmak yerine, yüksek kükürt oranına sahip yakıt kullanılabilir, ancak bu gemilere egzoz gazı temizleme sistemi takılarak SO_X emisyonu temizlemesi gerekecektir. Bunun yanında

SO_X emisyonu sınırlamak için başka teknolojik yöntemlerde kullanabilir. Şekil 1.6' da bir egzoz gazı temizleme teknoloji sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1.6 Deniz SOx teknolojileri egzoz gazı temizleme sistemi

ECGS den sonra atık gaz içindeki Kükürt oksit oranı, SOx in olması gereken sınır değerler kullanılarak belirlenir. Örneğin; %1,5 yakıt kükürt limitlerinin uygulandığı bir bölgede yüksek kükürt içeriğine sahip yakıt kullanılması durumunda SO_2 emisyon değeri 6 g/kWh değerinden küçük olmalıdır. Bu değerin hesaplanması için Denklem 1.11 de olduğu gibidir.

$$SO_2 = 4 \times \% S \tag{1.11}$$

Burada;

SO_2: kükürt oksit emisyon değeri (g/kWh),

S: yakıt kükürt içeriğidir (% m/m)

BÖLÜM İKİ
EGZOZ EMİSYONLARININ ÖLÇÜM VE HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Bu bölümde egzoz gazı emisyonlarının ölçüm ve hesaplama yöntemlerinden bahsedilmektedir.

2.1 Teorik inceleme

Gemilerden yayılan salımların kuramsal ölçüm metodu çoğunlukla bölgesel olmakla beraber küresel çapta birden fazla deniz aracından kaynaklanan emisyon oranının tespit edilebilmesi amacıyla tercih edilmektedir. Emisyonların kuramsal tespit edilebilmesi amacıyla kullanılan birden fazla yöntem vardır. Yöntemler, yakıt harcamını baz alan yukardan aşağıya yöntemi ve motor gücünü referans alan aşağıdan yukarıya yöntemidir. Bahsedilen yöntemlerle yapılan emisyon ölçüm hesaplamalarında belirlenmiş emisyon faktörleri kullanılmaktadır.

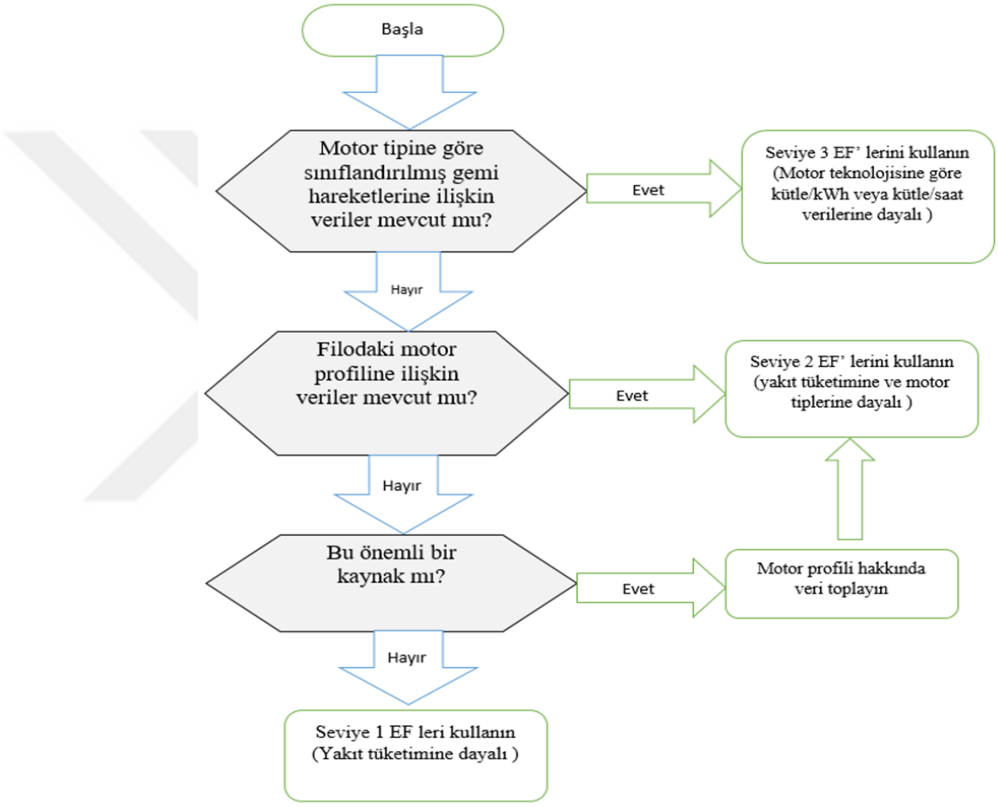
Bu yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen emisyon hesaplamaları 1990'lı yıllarda ortaya çıkmıştır (Corbet, Fishbeck, & Pandis, 1999). Yapılan çalışmalar sayesinde gemilerde kullanılan yakıt ve makineler ile ilgili detaylı veriler toplanmıştır. Böylece daha iyi sonuç veren çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca kuramsal şekilde salımların tespit edilmesi amacıyla kaynaklar revize edilmekte ve geliştirilerek yöntemlerin daha hassas olmasını sağlamaktadır. 2010 yılında Trozzi ve 2013 yılında da Van Aardenne yukarıda bahsedilen yöntemlerin daha hassas ölçme yöntemleri göstermişlerdir.

2.1.1 Yukarıdan Aşağıya Emisyon Hesaplama Yöntemi

Bu yöntemle emisyonların belirlenmesi için deniz araçlarında kullanılan yakıt ve deniz aracının harcadığı 1000 litre yakıt sonucu açığa çıkan emisyon miktarı baz alınmaktadır. Deniz araçlarımın harcadığı yakıt miktarı, EF ile çarpılarak bu araçlardan salınan emisyon miktarı hesaplanmaktadır. Bazı araştırmacılar yukardan aşağıya yöntemi için Düzey 1, Düzey 2 ve Düzey 3 yaklaşımlarını sunmuşlardır. Gemilerle ilgili derinlemesine bilgi gerektirmeyen en temel yaklaşım ilk düzey metottur. Düzey derecesi yükseldikçe ihtiyaç duyulan bilgilerde artmaktadır.

2.1.1.1 Metodoloji

Gemi hareketlerinden kaynaklanan emisyonları tahmin etme yöntemlerini seçmek için bir prosedür sunmaktadır. Bu prosedür bir algoritma oluşturmaya benzemektedir. Dolayısıyla emisyon hesabı için hangi seviye EF kullanılacağına karar verilmesi için bir araştırma ağacı oluşturulur bu ilişki ağacı Şekil 2.1' de gösterilmiştir (Trozzi, Emission estimate methodology for maritime navigation, 2010).



Şekil 2.1 Emisyon hesaplama yöntemi belirlemek için kullanılabilecek ilişki ağacı

Genel bir ifade ile emisyon hesaplaması için kullanılan temel denklem aşağıdaki gibidir.

$$\text{Emisyon} = \text{Yakıt Tüketimi} \times \text{Emisyon Faktörü}$$

2.1.1.2 Düzey 1 Yaklaşımı

Değişik yakıt türlerinin gemi hareketinin her aşaması için EF' lerinin bilinmesi durumunda gemilerden yayılan egzoz emisyonları bu yöntemle hesaplanabilmektedir.

Ticari gemiler için, metodoloji, gemi seferi bazında emisyonları toplayarak gemi hareketlerinden kaynaklanan emisyonları hesaplar. Tek bir sefer için emisyon hesaplamak için denklem 2.1' de genel hali verilmiştir (Trozzi, Emission estimate methodology for maritime navigation, 2010).

$$E_{sefer} = E_{liman} + E_{manevra} + E_{seyir} \quad (2.1)$$

Düzey 1 yaklaşımında emisyonlar tam bir yolculuk için emisyon değerleri Denklem 2.2 ve 2.3 kullanılarak hesaplanabilir (Aardenne, Van J.; Clotte , A.; Degraeuwe, B.; De Vieger, I.; Hammingh, .; Viana, M., 2013).

$$E_i = \sum_m (FC_m \times EF_{i,m}) \quad (2.2)$$

$$FC = \sum_{makine} SFC\,[g/kWh] \times P_{Kurulu\ makine}\,[kW] \times LF(\%) \times T(h) \quad (2.3)$$

Burada;

E_i	:	Her bir salım türü "i" için salınan emisyon miktarı (kg),
FC	:	Yakıt Harcam (ton),
EF	:	Emisyon faktörü (kg/ton),
SFC	:	Belirli yakıt tüketimi
LF	:	Makine yük faktörü
T	:	Zaman (saat)
i	:	kirletici (emisyon türü).

Tablo 2.1 Düzey 1 emisyon faktörleri

EF: emisyon faktörü	kod	isim		
NFR Kaynak kategorisi	1.A.3.d.i	uluslar arası taşımacılık		
Emisyon türü	EF (HFO)	EF (MDO/MGO)	EF (Benzin)	Birim
NO_X	79,5	78,5	9,4	Kg/Ton yakıt
SO_X	20xS	20xS	20,0	Kg/Ton yakıt
CO	7,40	7,4	573,9	Kg/Ton yakıt
CO_2	3114	3114	.	Kg/Ton yakıt
CH_4	0.05	0,05	.	Kg/Ton yakıt
NMVOC	2,70	2,80	181,50	Kg/Ton yakıt
PM_{10}	6,2	1,5	9,5	Kg/Ton yakıt
$PM_{2,5}$	5,6	1,4	9,5	Kg/Ton yakıt

NO_X ve NMVOC emisyonu orta devirli motorun 2000 devirdeki değeridir.

SO_X emisyonu Denklem 2.4' e göre hesaplanmaktadır.

$$EF_{SOx} = 20 \times S \tag{2.4}$$

Burada ;

EF_{SOx} : Kükürt oksit emisyon faktörü (Kg/ton yakıt)

S : Yakıt içerisindeki kükürt miktarı (%)

2.1.1.3 Düzey 2 Yaklaşımı

Düzey 2 yaklaşımı, Düzey 1' den daha iyileştirilmiş bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım da Düzey 1 gibi, yakıt harcamını temel almaktadır. Fakat yakıt çeşidi, içeriği, özelliği ve gemi makine tipi (yavaş, orta veya yüksek hızlı motorlar) bu yöntemde hesaplamalarda dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşım için kullanılan algoritma ise Denklem 2.5 te gösterildiği gibidir.

$$E_i = \sum_n \left(\sum_j FC_{n,j} \times EF_{i,n,j} \right) \tag{2.5}$$

Burada;

E_i	:	Yıllık emisyon miktarı (ton)
$FC_{m,j}$	:	Her bir makine tipi "j" için yakıt harcamı (ton)
$EF_{i,m,j}$	:	Motor tipi "j" "m" yakıt türü kullanan gemilerin kirletici i için ortalama emisyon faktörü,
i	:	Kirletici
j	:	Makine tipi
n	:	Yakıt türü (MDO/MGO), benzin

Tablo 2.2' de gemilerdeki yakıt, motor çeşidine ve gemi inşaa tarihine göre EF' leri ve PM' ler verilmiştir. Tabloda verilen değerler (EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook,2013) çalışmasından alınmıştır (Trozzi,2013).

Tablo 2.2 Düzey 2 NOx, PM ve SFC için değişik makine tipindeki yakıt türüne göre EF

Düzey 2 varsayılan emisyon faktörleri							
Makine tipi	**Yakıt türü**	**NOx**			**PM10**	**PM2,5**	**özgül yakıt tüketimi**
		2000 kg/ton	**2005** kg/ton	**2010** kg/ton	kg/ton	kg/ton	g yakıt/ kWh
Gaz türbini	Fuel oil	20	19,3	18,6	0,3	0,3	305
	MDO/MGO	19,7	19	18,3	0	0	290
Yüksek D. dizel	Fuel oil	59,6	57,7	55,6	3,8	3,4	213
	MDO/MGO	59,1	57,1	55,1	1,5	1,3	203
Orta D. dizel	Fuel oil	65,7	63,4	61,3	3,8	3,4	213
	MDO/MGO	65	63,1	60,6	1,5	1,3	203
Düşük D. dizel	Fuel oil	92,8	89,7	86,5	8,7	7,8	195
	MDO/MGO	91,9	88,6	86,5	1,6	1,5	185
Buhar türbini	Fuel oil	6,9	6,6	6,4	2,6	2,4	305
	MDO/MGO	6,9	6,6	6,4	1	0,9	290

Küçük tekneler için Düzey 2 EF' leri tablo 2.3' te gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Küçük gezi tekneleri için emisyon faktörleri

Seviye 2 emisyon faktörleri				
Yakıt	**Kirletici**	**Birim**	**Konvansiyone**	**2003/44/EC**
Dizel	NOX	kg/ton yakıt	38,4	32,8
	CO	kg/ton yakıt	19,80	18,6
	NMVOC	kg/ton yakıt	7,45	3,71
	TSP	kg/ton yakıt	4,60	3,71
	PM10	kg/ton yakıt	4,60	3,71
	PM2.5	kg/ton yakıt	4,60	7
	NH3	kg/ton yakıt	7,00	
Benzin 2 Zamanlı	NOX	kg/ton yakıt	3,27	
	CO	kg/ton yakıt	481,00	
	NMVOC	kg/ton yakıt	233,00	
	TSP	kg/ton yakıt	12,60	
	PM10	kg/ton yakıt	12,60	
	PM2.5	kg/ton yakıt	12,26	
	NH3	kg/ton yakıt	3,00	
Benzin 4 Zamanlı	NOX	kg/ton yakıt	26,80	25,8
	CO	kg/ton yakıt	851,00	348
	NMVOC	kg/ton yakıt	26,70	29,2
	TSP	kg/ton yakıt	188,00	188
	PM10	kg/ton yakıt	188,00	188
	PM2.5	kg/ton yakıt	188,00	188
	NH3	kg/ton yakıt	5,00	5

NMVOC faktörleri, orijinal HC değerinin %98'i olarak türetilmiştir. Emisyonlar büyük ölçüde gemi tipinden (konteyner, tanker, yolcu vapuru vb.) ziyade gemide kurulu motor tipine ve kullanılan yakıta bağlıdır.

Emisyonları tahmin etmek için aşağıda verilen adımları takip etmek gerekir.

1. Limana giriş yapan her bir gemi tipi için gemi bilgilerini toplamak
2. Gemi tipine göre kurulu olan toplam makine gücünü hesaplamak
3. Her bir gemi için kurulu toplam gücü, motor devir/yakıt sınıfına göre ayırmak
4. 3. Adımda elde edilen değerlerin toplamı olarak motor devri/yakıt sınıfına göre toplam gücü hesaplamak
5. İstatistiksel olarak yakıt tüketimini farklı motor devri/yakıt sınıfına atamak için yakıt kullanımının kurulu toplam güçle orantılı olduğunu varsaymak
6. Daha sonra tablo 2.3' te verilen emisyon faktörleri kullanılarak ulusal emisyonlar tahmin edilir.

2.1.1.4 Düzey 3 Yaklaşımı

Düzey 1 ve Düzey 2' de olduğu gibi Düzey 3 yaklaşımında da yakıt tüketimi temel alınmaktadır. Ancak Düzey 3 yaklaşımı diğerlerine göre daha çok geliştirilmiştir. Gemilerden yayılan emisyonlar geminin farklı hareket ve durumuna bağlı olarak incelenmektedir. Gemi operasyonları liman, manevra ve seyir gibi üç aşamada incelenmektedir. Bu üç aşamadaki faaliyetten oluşan emisyonları hesaplayarak gemilerden yayılan toplam emisyon miktarı elde edilmektedir. Toplam emisyon hesabı Denklem 2.6' ya göre yapılmaktadır.

$$E_{Sefer} = E_{Liman} + E_{\ Manevra} + E_{Seyir} \tag{2.6}$$

Gemi operasyonları yakıt ve motor çeşidine göre, baca gazı salımlarının hesaplanması Denklem 2.7' e göre yapılmaktadır.

$$E_{sefer} = \sum_{p} (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p}) \tag{2.7}$$

Burada;

E_{sefer}	:	Seferlik emisyon miktarı (ton),
FC	:	Yakıt harcamı (ton),
EF	:	Emisyon faktörü (kg/ton),
i	:	Emisyon çeşidi,
m	:	Yakıt çeşidi
j	:	Motor çeşidi
p	:	Gemi operasyonları

Tablo 2.4' te ana makine ve yardımcı makineneler için Gemi operasyonları yakıt ve motor çeşidine göre, ve zaman göre EF' leri Düzey 3 yaklaşımı için verilmiştir.

Tablo 2.4 Düzey 3 ana ve yardımcı makineler için NOx emisyon faktörleri

				Emisyon Faktörleri			
Makine tipi	Hareket türü	Makine tipi	Yakıt Türü	NOx (kg/ton)			PM10, PM2,5
				2000	2005	2010	
Ana Makine	Sefer	Y.D dizel	BFO	59,6	57,7	55,6	3,8
			MDO/MGO	59,1	57,1	55,1	1,5
		O.D. Dizel	BFO	65,7	63,4	61,3	3,8
			MDO/MGO	65	63,1	60,6	1,5
		D.D dizel	BFO	92,8	89,7	86,5	8,7
			MDO/MGO	91,9	88,6	86,5	1,6
	Manevra Liman	Y.D dizel	BFO	43,6	42,3	40,6	10,3
			MDO/MGO	43	41,7	40,1	4
		O.D. Dizel	BFO	47,9	46,2	44,6	10,3
			MDO/MGO	47,5	45,7	44,3	4
		D.D dizel	BFO	67,4	65,1	62,9	11,2
			MDO/MGO	66,7	64,2	62,1	4,4
Yardımcı Makine	Seyir Manevra Liman	Y.D. Dizel	BFO	51,1	49,4	47,6	3,5
			MDO/MGO	50,2	48,6	46,8	1,4
		O.D dizel	BFO	64,8	62,5	60,4	3,5
			MDO/MGO	64,1	62	59,7	1,4

Tabloda yer alan bazı kısaltmalar

Y.D yüksek devirli,

O.D orta devirli ve

D.D ise düşük devirli olarak kısaltılmıştır.

2.1.2 Aşağıdan Yukarıya Emisyon Hesaplama Yöntemi

Aşağıdan yukarıya emisyon hesaplama yönteminde gemilerden yayılan emisyonların belirlenmesi için gemi hareket verilerinin yanı sıra gemilerle ilgili teknik bilgilere (gemide kurulu olan toplam güç, yük faktörü ve gemi hareketlerindeki toplam zamanı) dayanmaktadır. Bu yöntemle Aşağıdan yukarıya egzoz emisyon hesabı formülü Denklem 2.8' de verilmişti (Trozzi, 2010).

$$E_{Sefer\ i,j,m} = \sum_{p} \left[T_P \sum_{e} (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p}) \right] \quad (2.8)$$

Burada;

E_{sefer} : Seferlik emisyon miktarı (ton),

EF	:	Emisyon faktörü (g/kWh),
LF	:	Motor yük faktörü,
P	:	Motor gücü,
T	:	Süre (saat),
e	:	Motor sınıfı (ana makine, yardımcı makine),
i	:	Emisyon çeşidi,
j	:	Motor çeşidi,
m	:	Yakıt çeşidi,
p	:	Gemi hareket türü.

Eğer sefer süresi bilinmiyor ise değerler Denklem 2.9' a göre hesaplanır.

$$T_{seyir} = \frac{X}{V_{ort}} \tag{2.9}$$

Burada;

T_{seyir}	:	Seyir süresi (saat),
X	:	Seyirde gidilen mesafe (km),
V_{ort}	:	Ortalama seyir hızı (km/saat).

Küçük teknelerden kaynaklanan emisyonları tahmin etmek için, ayrı ulusal aktivite istatistiklerinin toplanamadığı durumlarda, verilerin bu teknelerin sayısına ilişkin verilerden türetilmesi gerekir. Burada tekne tipine, yakıt tipine, motor tipine, teknoloji katmanına ve yük faktörleri için aktivite verilerine ve tahmini yıllık kullanım saatlerine göre türetilir. Yakıt türü başına yakıt tüketimi ve emisyonlar aşağıda belirtilen Denklem 2.10' daki gibi tahmini hesaplama yapılabilmektedir.

$$E_{i,m} = \sum_{b}\sum_{e}\sum_{z}\left(N_{b,e,z} \times T_{b,e,z} \times P_{b,e,z} \times LF_{b,e,z} \times EF_{b,e,z}\right) \tag{2.10}$$

Burada;

E	:	küçük teknelerin yıllık emisyonları (ton)
N	:	Tekne sayısı
T	:	Her bir teknenin yıllık ortalama operasyon süresi (saat/gemi)

P	:	Nominal motor gücü (kW)
LF	:	Motor yük faktörü (%)
EF	:	Emisyon faktörü (g/kWh)
b	:	Gemi tipi
e	:	Makine tipi (içten yanmalı, 2 zamanlı, 4 zamanlı)
i	:	Kirletici
m	:	Yakıt türü
z	:	Teknoloji kaymanı (geleneksel, 2003/44/EC)

Tablo 2.5 Ana makine ve yardımcı makine için emisyon faktörleri

				Emisyon Faktörleri			
Makine tipi	Hareket türü	Makine tipi	Yakıt Türü	NOx (kg/ton)			PM10, PM2,5 (kg/ton)
				2000,0	2005,0	2010,0	
Ana Makine	Sefer	Y.D dizel	BFO	12,7	12,3	11,8	0,8
			MDO/MGO	12,0	11,6	11,2	0,3
		O.D. Dizel	BFO	14,0	13,5	13,0	0,8
			MDO/MGO	13,2	12,8	12,3	0,3
		D.D dizel	BFO	18,1	17,5	16,9	1,7
			MDO/MGO	17,0	16,4	15,8	0,3
	Manevra ve Liman	Y.D dizel	BFO	10,2	9,9	9,5	2,4
			MDO/MGO	9,6	9,3	8,9	0,9
		O.D dizel	BFO	11,2	10,8	10,4	2,4
			MDO/MGO	10,6	10,2	9,9	0,9
		D.D dizel	BFO	14,5	14,0	13,5	2,4
			MDO/MGO	13,6	13,1	12,7	0,9
Yardımcı Makine	Seyir Manevra Liman	Y.D dizel	BFO	11,6	11,2	10,8	0,8
			MDO/MGO	10,9	10,5	10,2	0,3
		O.D dizel	BFO	14,7	14,2	13,7	0,8
			MDO/MGO	13,9	13,5	13,0	0,3

Tablo 2.5' te geminin 3 ayrı durumuna bağlı, gemi ana makine ve jeneratörler ait NOx ve PM emisyon faktörleri sunulmuştur.

Aşağıdan yukarıya yönteminde diğer emisyon faktörleri değişik çalışmalardan alınan NO_X, SO_2, CO_2, CO ve HC emisyonları Tablo 2.6’ da verilmiştir.

Tablo 2.6 Kirletici gazlar için emisyon faktörleri

Emisyon Faktörleri (EF) [g/kWh]					
Gemi Faaliyeti	NOx	SO2	CO2	HC	CO
Seyir	13,2	1,0	697	0,46	0,54
Manevra	11,8	1,0	747	0,97	0,54
Liman	13,2	1,0	725	0,5	0,54

2.2 Deneysel İnceleme

Gemi ve motorlu taşıtlarda uygulanan egzoz emisyon ölçümleri, fosil yakıtla çalışan gemilerden yayılan egzoz içeriğindeki emisyon miktarını belirlemek, motorlu taşıtların, tekne ve gemilerin belirlenmiş salım sınırları arasında olup olmadığını tespit etmek, kirletici gazların filtrasyonu ve makinelerin verimini değerlendirerek yararlanılan faktörleri saptamayı amaçlamıştır.

Gemilerin egzoz emisyonlarının belirlenmesi işlemi zorlu bir süreçtir, çünkü bu işlem için birden çok parametrenin kontrol edilmesi, ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekir. Gemilerde egzoz emisyon ölçümü ve değerlendirilmesi NOX Teknik koduna uyumlu olacak biçimde yapılmalıdır. NOX teknik kodunun amacı, motor üreticileri, gemi sahipleri ve idarelerin, geçerli olan tüm deniz dizel motorlarının ilgili sınırlayıcı NOx emisyon değerlerine uygun olduğunu sağlamak için motorların test, denetim ve sertifikasyonu için zorunlu prosedürleri sunmaktır. Bu prosedürler, MARPOL Ek VI'nın 13. düzenlemesinde belirtilen NOx emisyon limitlerine uyumluluğu sağlamak için tasarlanmıştır. Denizde hizmette olan gemilerdeki dizel motorlarının gerçek ağırlıklı ortalama NOx emisyonunu kesinlikle belirlemenin zorlukları, uygun NOx emisyonlarına uyumu sağlamak için tanımlanmış basit ve pratik bir dizi gereksinim oluşturulurken dikkate alınmıştır.

2.2.1 NOx Teknik Koduna Göre Egzoz Gazı Emisyon Hesaplamaları

NO_X teknik koduna ait dokümanın amacı deniz dizel motorlarının NO_X emisyonu limitlerine uygunluğun denetlenmesi, araştırma ve sertifikalandırma gerekliliklerini belirlemektir. Egzoz ölçüm prosedürleri NO_X teknik dokümanında detaylı anlatılmaktadır. Dolayısıyla ek VI düzenleme 13' ün geçerli olduğu herhangi bir

gemide kurulu veya kurulması planlanan, 130 kW'tan fazla güç çıkışına sahip tüm dizel motorlar için geçerlidir. NO_X dokümanı geminin çalışma koşullarına bağlı olarak egzoz emisyonu belirleme işlemini tanımlamaktadır. Bu dokümana göre Gemi egzoz emisyonun belirlenirken Motor karakteristikleri kontrol metodu, sadeleştirilmiş ve direkt ölçüm yöntemleridir. Gemi egzoz emisyon ölçümleri yapılırken en kapsamlı sonuçlar veren doğrudan ölçüm yöntemi tercih edilmektedir. Ancak Doğrudan gaz akışı ölçümü oldukça zor bir iştir. Emisyon değeri hatalarına neden olacak ölçüm hatalarını minimize etmek için önlemler alınmalıdır. Bu çalışmada da doğrudan ölçüm yöntemi dikkate alınarak ölçüm yapılmıştır.

Direkt ölçüm yöntemi, makine çalışma koşulları, egzoz parametreleri ve çevre koşullarının eş zamanlı ölçülmeleri gerekir, dolayısıyla ölçüm yapılırken bu parametrelere dikkat edilerek hassasiyet gösterilmelidir. Ölçümlerdeki hesaplama birmi (g/kWh) olarak verilmiştir. Deniz araçlarından salınan NO_X, SO_X SO_2, CO_2, CO, HC egzoz emisyonları ve O_2 gazı hesabı Denklem 2.11' de belirtildiği şekilde yapılır.

$$gaz_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}(q_{mgas_i} \times W_{Fi})}{\sum_{i=1}^{i=n}(P_i \times W_{Fi})} \tag{2.11}$$

Denklemde;

gaz_x : EF için salım miktarı (g/kWh),

q_{mgasi} : Egzozdan kaynaklanan kütlesel akış (g/h),

W_{Fi} : Ağırlık faktörü

p_i : Makine gücü

Deniz araçlarından salınan emisyon değerleri motorların değişik hız ve yüklerinde edinilen değerler ile Makinenin çeşitli hız ve yük durumlarına denk gelen değişen $W_{Fİ}$ değerleri dikkate alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Gemilerin daha yoğun çalıştığı makine hız ve yüklerinde ağırlık faktörleri daha yüksek değerler alırken, manevra ve liman faaliyetleri sırasında daha düşük değerler alabilmektedir. Bunun dışında ana makine ve yardımcı makineler için de değişik hız ve yüklerde ölçüm yapılmaktadır. Dolayısıyla geminin sevk sistemi dikkate alındığında farklı makine hız ve yüklerinde emisyon ölçümleri alınabilmektedir.

NO_X teknik dokümanında ana makine ve yardımcı makinelerde ölçüm yapılması için olması gereken makine hız ve yük değerleri verilmektedir. Verilen bu değerler denklem 2,11' e göre ilişkili ağırlık faktörü ile çarpılarak işlem Her ölçüm noktasında işlem tekrarlanarak ilerlenir. Aynı biçimde motor fren gücü ölçülerek emisyon değerleri elde edilebilmektedir. Edinilen emisyonun toplam değeri kurulu kümülatif güce bölünmesiyle deniz araçlarından salınan egzoz kirleticileri her bir çeşidi için güç başına düşen emisyonlar saatlik olarak hesaplanır. teorik olarak sunulan değerler değişen koşullar ya da olumsuz şartlardan dolayı daima uyumlu olmayabilir. Dolayısıyla analizler optimum koşullar altında yapılmalıdır. Sabit devirdeki gemi ana motoru için analiz yapmak için ihtiyaç duyulan yük ve hız değeri Tablo 2.7' de verildiği gibidir.

Tablo 2.7 Sabit devirli ana makine için E2 test döngüsü koşulları

E2 test döngüsü	Hız	n	:	100%	100%	100%	100%
	Güç	P	:	100%	75%	50%	25%
	Ağırlık faktörü	W_F	:	0,2	0,5	0,15	0,15

Sabit devirli Ana makine (dizel-elektrikli tahrik sistemi dâhil), değişken adımlı pervane setleri için E2 test döngüsü şartları uygulanmalıdır.

(P) Makine gücü NO_X teknik kodunda belirtilen yöntemlerden biri kullanılarak ölçülmelidir. Makine gücü aynı zamanda fren gücünü ifade etmektedir. NO_X dokümanında motor gücü ölçümü için üç yöntem önerilmektedir. Bunlar aşağıda verildiği şekildedir.

- Şafttan direk fren gücü saptamak.
- Şafttan direk fren gücü saptanamıyor ise şaft üzerinde en uygun açık olan alandan ölçüm yapılıp arada kalan yardımcı elemanları dikkate alarak fren gücü tespit etmek
- Nomogroflardan hesaplamak

Motor çıkışında her zaman şafttan tam güç alınamayabilir, bu durumda makine fren gücü hesaba katılarak hesaplamalar yapılır. Motor gücü güçte kayıplara neden olan öğelerin ardından ölçülmekte ise bu öğelerden kaynaklanan güç kaybı belirlenip makine fren gücü bulunmalıdır. Burada Denklem 2.12 makine fren gücü için kullanılan formülü ifade etmektedir.

$$P = P_m + P_{aux} \tag{2.12}$$

Denklemde;

P : Toplam güç

P_m : Makine gücü

P_{aux} : Yardımcı elemanların güc

Egzoz emisyon ölçümü yapılırken makine gücünde anlık değişmeler meydana gelebilmektedir. Makinede oluşan anlık güç değişimleri Denklem 2.13, 2.14 ve 2.15 te gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. NO_X Teknik kodu dokümanında verilen bilgilere göre; denklem 2.15' teki varyans güç faktörü %5'ten az olmalıdır.

$$Ave = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^{N} x_j \tag{2.13}$$

$$SD = \sqrt{\left(\frac{1}{1-N} \times \sum_{i=1}^{N} (x_i - Ave)^2\right)} \tag{2.14}$$

$$\%\, COV = \frac{SD}{Ave} \times 100 \tag{2.15}$$

Denklemde;

Ave : Ortalama değer

SD : Standart sapma

N : Veri noktası sayısı (toplam)

COV : Varyans güç faktörü (%)

Denklem 2.11' de yer alan egzoz emisyon debisi Denklem 2.16' ya göre hesaplanmaktadır.

$$q_{mgaz} = u_{gaz} \times c_{gaz} \times q_{mew} \times k_{hd} \tag{2.16}$$

Diğer emisyonlar ve egzoz içeriğindeki Oksijenin kütlesel akışı Denklem 2.17 kullanılarak belirlenmektedir.

$$q_{mgaz} = u_{gaz} \times c_{gaz} \times q_{mew} \tag{2.17}$$

$$u_{gaz} = \frac{\rho_{gaz}}{\rho_{egaz} \times 1000} \tag{2.18}$$

Denklemde;

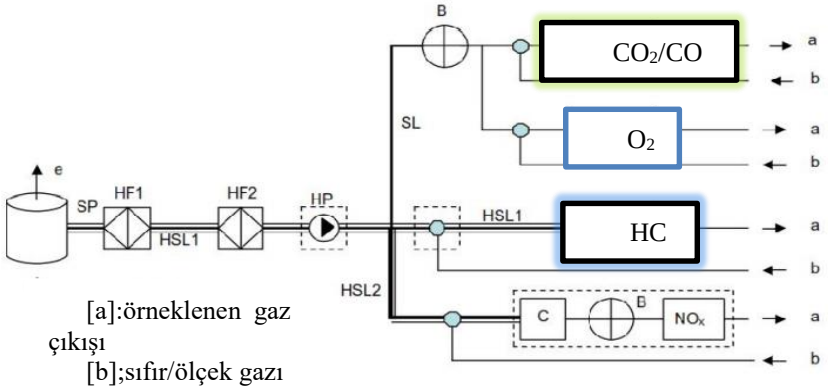
q_{mgaz}	:	Egzoz emisyon debisi
q_{mew}	:	Egzoz gazı kütle debisi
u_{gaz}	:	Egzoz gazı yoğunluğu
c_{gaz}	:	Egzoz emisyonu konsantrasyonu (ppm)
ρ_{gaz}	:	Egzoz gazı konsantrasyonu
ρ_{egaz}	:	Egzoz emisyon bileşenleri konsantrasyonları

NO_X Teknik kodu dokümanında yer alan standart denizlerde kullanılan yakıt çeşitleri (Marine Diesel/Gas Oil ve Heavy Fuel Oil) için baca gazı emisyon bileşenleri ve yoğunlukları Tablo 2.8' de gösterilmektedir. Tabloda verilen emisyon yoğunluk değerleri IMO standartlarında ham (işlenmemiş) egzoz gazı için geçerlidir.

Tablo 2.8 Ham egzoz gazı emisyonları yoğunluğu standartları

		bileşen veya kirletciler				
Yakıt	ρ birimi $[kg/m^3]$	NOx	CO	CO_2	SO_2	O_2
Dizel	1,2943	2,053	1,25	1,9636	2,926	1,4277
Ağır yakıt	1295					

CO, CO2, NOx, HC ve O2 gibi egzoz emisyon bileşenleri konsantrasyonlarının belirlenmesi için bir egzoz gazı analiz sistemine dahil edilen bileşenler Şekil 2.2' de gösterilmektedir. Numune alma gazı hattındaki tüm bileşenler, ilgili sistemler için belirtilen sıcaklıklarda muhafaza edilmelidir.



Şekil 2.2 Emisyon ölçüm sistemi

SP	:	Ham egzoz gazı analizleme ucu
HF1	:	Isıtmalı ön filtre (opsiyonel)
HSL1	:	Isıtmalı örnekleme hattı
HF2	:	Isıtmalı filtre
HP	:	Isıtmalı örnekleme pompası (isteğe bağlı)
SL	:	CO, CO_2 ve O_2 için numune alma hattı
HSL2	:	Isıtmalı NOx numune hattı
HC	:	hidrokarbon analizörü
NO_X	:	Azot oksit analizörü
C	:	Dönüştürücü
B	:	Soğutma ünitesi

Bir egzoz gazı analiz sistemi belirlenmiş özelliklerden oluşmalıdır. Bu özellikler şöyle sıralanabilir, uç paslanmaz çelik, düz, kapalı uçlu, çok delikli olmalıdır. Uç İç çapı, numune alma hattının iç çapından büyük olmamalıdır. Ucun duvar kalınlığı 1 mm'den fazla olmamalıdır. Yaklaşık olarak aynı akışı analizlemek için boyutlandırılmış üç farklı radyal düzlemde en az üç delik olmalıdır.

Analizleme hattı, tek bir uçtan ayrık noktalara ve HC analizörüne bir gaz örneği sağlar. Numune alma hattı paslanmaz çelikten veya PTFE'den yapılmış olmalıdır. Ayrıca analizleme hattının iç çapı minimum 4 mm, maksimum 13,5 mm olmalıdır.

Analizleme ucundaki egzoz gazı sıcaklığı 190°C'den az olmamalıdır. Analizleme ucu ile baca gazı yoğuşmasını engellemek için analiz yolunun rezistanslı olduğuna dikkat edilmelidir. Isıtılmış filtre ve HC analizöründen hemen önce 190°C gaz sıcaklığı korunmuş olmalıdır.

Analizörler, egzoz gazı bileşenlerinin konsantrasyonlarını ölçmek için gereken doğruluğa uygun bir ölçüm aralığına sahip olmalıdır. Analizörlerin, ölçülen konsantrasyon tam ölçeğin kullanılan ölçüm aralığını ifade ettiği durumlarda tam ölçeğin %15 ila %100'ü arasında olacak şekilde çalıştırılması önerilir. Tam ölçek değeri 155 ppm veya daha az ise veya tam ölçeğin %15'inin altında yeterli doğruluk ve çözünürlük sağlayan okuma sistemleri (bilgisayarlar, veri kaydediciler) kullanılıyorsa, tam ölçeğin %15'inin altındaki konsantrasyonlar da kabul edilebilir. Bu durumda, kalibrasyon eğrilerinin doğruluğunu sağlamak için ek kalibrasyonlar yapılmalıdır. Ayrıca ekipmanın elektromanyetik uyumluluğu (EMC), ek hataları en aza indirecek şekilde olmalıdır.

2.2.1.1 Karbon Monoksit ve Karbon Dioksit (CO ve CO_2) Analizörü

Karbon monoksit analizörü, dağılmayan kızılötesi (NDIR) absorbsiyon tipinde olacaktır.

2.2.1.2 Hidrokarbon (HC) Analizörü

Hidrokarbon analiz cihazı, detektör, valfler, boru tesisatı ve ilgili bileşenleri 190ºC ± 10ºC'lik bir gaz sıcaklığını muhafaza edecek şekilde ısıtılan ısıtmalı alev iyonizasyon dedektörü (HFID) tipinde olmalıdır.

2.2.1.3 Azot Oksitler (NOx) Analizi

Azot oksit analiz cihazı, kuru bazda ölçüldüğü takdirde, bir NO_2/NO dönüştürücülü kemilüminesan dedektör (CLD) veya ısıtılmış kemilüminesan dedektör (HCLD) tipinde olmalıdır. Islak esasa göre ölçülürse, suyla söndürme kontrolünün yerine getirilmesi şartıyla, konvertörü 55°C'nin üzerinde muhafaza edilen bir HCLD kullanılmalı. Hem CLD hem de HCLD için, numune alma yolu, kuru ölçüm için

dönüştürücüye ve ıslak ölçüm için analizöre kadar 55°C ila 200°C duvar sıcaklığında muhafaza edilmelidir.

2.2.1.4 Oksijen (O_2) Analizi

Oksijen analizörü paramanyetik dedektör (PMD), zirkonyum dioksit (ZRDO) veya elektrokimyasal sensör (ECS) tipinde olacaktır. ZRDO, çift yakıtlı veya gaz yakıtlı motorlar için kullanılmayacaktır.

Egzoz gazı kütle debisi belirlenebilmesi için NO_X Teknik kodu dokümanında üç yöntem önerilmektedir.

- Direkt hesaplama yöntemi
- Yakıtla hava karışımı ölçme metodu
- Karbon dengesi yöntemi

Direkt hesaplama yöntemi, ISO, EPA veya diğer uluslararası kuruluşların yayınladığı kriterlere uyacak biçimde baca gazı şekilde egzoz gazı akışındaki kütlesel miktarı tespit etme yöntemlerini kapsamaktadır. Türk ve Uluslararası standartlarının 10780 sayılı mevzuatında yer alan bilgiye göre bacada hacimsel egzoz gazı kütle debisi hesaplanması Denklem 2.19, 2.20 ve 2.21 de gösterildiği gibidir.

$$\Delta\,\bar{P} = \frac{1}{n^2} \times \left(\sum_{i=1}^{n} \sqrt{\Delta P_i} \right)^2 \tag{2.19}$$

$$\bar{v} = K \times C \times (T_s \times \Delta\bar{P} \div P_e \times M_s)^{1/2} \tag{2.20}$$

$$q_{vs} = \bar{v} \times A \tag{2.21}$$

Denklemlerde;

ΔP_i : Belirli i noktasında basınç farkı (kPa)

$\Delta\,\bar{P}$: Pitot tüpü için ortalama diferansiyel basıncın değeri (kPa)

C : 129 (m/s) x(kg/molxK))$^{1/2}$

K : Pitot tüpü katsayısı

T_S : Ortalama baca gazı sıcaklığı (^oC)

Pe : Mutlak gaz basıncı (kPa)

A : Baca alanı (m^2)

$\bar{v}$: Baca koşullarında hız (m/s)

Yakıt – Hava ölçüm yöntemi ile uluslararası standartlara uygun bir şekilde motorda yakılan yakıt ve motor giriş havası debisi tespit edilerek egzoz gazı kütle debisi hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar Denklem 2.22 de gösterildiği şekilde belirlenmektedir.

$$q_{mew} = q_{maw} + q_{mf} \tag{2.22}$$

Denklemde;

q_{mf} : Makinede yakılan yakıt

q_{maw} : Makine giriş havası debisi

q_{mew} : Egzoz gazı kütle debisi

Ayrıca makinenin yaktığı yakıt hesaplandıktan sonra, karbon dengesi yöntemiyle baca gazı kütlesel akışı hesaplanır.

$$q_{mew} = q_{mef} \times \left(\left(\frac{1.4 \times (w_{BET} \times w_{ALF})}{\left(\left(\frac{1.4 \times w_{BET}}{f_c} \right) + (w_{ALF} \times 0.08936) - 1 \right) \times \frac{1}{1.293} + f_d} + (w_{ALF} \times 0.08936) \right) \times \left(1 + \frac{H_a}{1000} \right) + 1 \right) \tag{2.23}$$

W_{ALF} : Yakıt hidrojen içeriği

W_{BET} : Yakıt karbon içeriği

Denklemde yer alan f_c ve f_d hesaplanması ise Denklem 2.24 ve 2.25 teki gibidir.

$$f_{fd} = -0.055593 \times w_{ALF} + 0.008002 \times w_{DEL} + 0.0070046 \times w_{EPS} \quad (2.24)$$

$$f_c \left(C_{CO_{2,d}} - C_{CO_{2,ad}}\right) \times 0.5441 + \frac{C_{CO_d}}{18522} + \frac{C_{CH_w}}{17355} \quad (2.25)$$

Denklemde;

Gaz analizörü kullanılarak C_{CO2} karbondioksit, C_{CO} karbon monoksit ve C_{HC} konsantrasyon değerleri bulunur. Bunlardan karbon dioksit ve karbon monoksit nemsiz bazda HC yoğunluk miktarı ise nemli bazda belirlenen değerlerdir. Ortam havasındaki ($C_{CO2,ad}$) oranı %0.03 verilmektedir.

Egzoz emisyonları belirlenirken bazı parametrelerin ölçümleri ıslak ya da kuru baz olarak yapılabilmektedir. Emisyonların yoğunluklarını tespit etmek amacıyla elde edilen değerler baz türüyle formüllerde ihtiyaç duyulan baz türünün değişik olması durumunda ıslak baz – kuru baz dönüşümü yapılmalıdır. Baz dönüşümünde kullanılan Denklem 2.22 de verilmiştir.

$$C_w = k_w \times c_d \quad (2.22)$$

Denklemde;

k_w : Kuru baz – Islak baz düzeltme faktörü

c_w : Islak baz

c_d : Kuru baz

(kw) faktörü makinelerde tam yada yetersiz yanma olayı meydana gelmesi halinde alternatif yöntemlerle hesaplanmaktadır. Makinelerde yanma olayının eksiksiz olması halinde (kw) denklem 2.27’ ye ya da Denklem 2.28' e göre hesaplanmaktadır.

$$k_{wr1} = \left(1 - \frac{1.2442 \times H_a + 111.19 \times w_{ALF} \times \frac{q_{mf}}{q_{mad}}}{773.4 + 1.2442 \times H_a + \frac{q_{mf}}{q_{mad}} \times f_{fw} \times 1000}\right) \times 1.008 \quad (2.27)$$

$$k_{wr1} = \left(1 - \frac{1.2442 \times H_a + 111.19 \times w_{ALF} \frac{q_{mf}}{q_{mad}}}{773.4 + 1.2442 \times H_a + \frac{q_{mf}}{q_{mad}} \times f_{fw} \times 1000}\right) \times \frac{p_b}{p_b - p_r} \quad (2.28)$$

Buradaki denklemlerde;

k_w	:	Düzeltme faktörü
f_{fw}	:	Kuru bazda yakıt faktörü
H_a	:	kg kuru hava başına (gram) su cinsinden alınan havanın mutlak nemi
p_a	:	Giriş havasının doymuş buhar basıncı, (kPa)
p_b	:	Toplam barometrik basınç (kPa)
p_r	:	Analiz sisteminin soğutulmasından sonraki su buharı basıncı (kPa)
ta	:	Giriş havasının sıcaklığı

$$p_a = (4.856884 + 0.2660089 \times t_a + 0.01688919 \times {t_a}^2 - 7.477123 \times 10^{-5} \times {t_a}^3 + 8.10525 \times 10^{-6} \times {t_a}^4 - 3.115221 \times 10^{-8} {t_a}^5) \times \frac{101.32}{760} \quad (2.29)$$

$$f_{fw} = 0.055594 \times w_{ALF} + 0.0080021 \times w_{DEL} + 0.0070046 \times w_{EPS} \quad (2.30)$$

$$H_a = 6.22 \times p_a \times R_a/(p_b - 0.01 \times R_a \times p_a) \quad (2.31)$$

Egzoz gazı çıkışının doğrudan ölçüm yöntemine göre belirlendiği bir veya daha fazla mod noktasında eksik yanma olması durumunda (CO veya HC nun 100 ppm'

den fazla olması) kuru baz – ıslak baz düzeltme faktörü için denklem 2.32, 2.33, ve 2.34 kullanılmaktadır (Denklem 2.32 de verilen CO ve CO_2 değerlerinin birimi % olarak dikkate alınmalıdır).

$$k_{wr2} = \frac{1}{1 + a \times 0.005 \times \left(CO_{2_d} + CO_d\right) - 0.01 \times C_{H_2 d} + k_{w2} - \frac{p_r}{p_b}} \tag{2.32}$$

$$a = 11.9164 \times \frac{w_{ALF}}{w_{BET}} \tag{2.33}$$

$$C_{H_{2d}} = \frac{0.5 \times a \times c \times CO_d \times \left(c_{CO_d} + c_{CO_{2d}}\right)}{c_{CO_d}\, 3 \times c_{CO_{2d}}} \tag{2.34}$$

$$k_{w2} = \frac{1.608 \times H_a}{1000 + (1.608 \times H_a)} \tag{2.35}$$

Buradaki denklemlerde;

k_{w2}	:	Kuru baz – ıslak baz düzeltme faktörü kat sayısı
CH_{2d}	:	Kuru baz için hidrojen konsantrasyonu
a	:	Molar hidrojen oranı
c_{CO}	:	Kuru karbon monoksit konsantrasyonu değeri (%)
c_{CO2}	:	Kuru karbon dioksit konsantrasyonu (%)
k_{wa}	:	Makine giriş havası kuru baz düzeltme faktörü

Makinelere emme havasının nemli ya da kuru olması durumunda düzeltici katsayı 2.36' da verilen denklemle hesaplanır.

$$k_{wa} = 1 - k_{w2} \tag{2.36}$$

Hava şarj cihazına enjekte edilen su veya buhar (hava nemlendirmesi) bir emisyon kontrol cihazı olarak kabul edilir ve bu nedenle nem düzeltmesi için dikkate alınmaz. Şarj soğutucusunda yoğuşan su, şarj havasının nemini değiştirebilir ve bu nedenle nem düzeltmesi için dikkate alınmalıdır.

Sıkıştırma ateşlemeli içten yanmalı motorlar için nemlilik faktörü Denklem 2.37'ye göre hesaplanmaktadır, ayrıca orta seviye hava soğutuculu turboşarjlı motorlarda ıslaklık katsayısı için de alternatif formül 2.38 denkleminde verilmiştir.

$$k_{hd} = \frac{1}{1 - 0.0182 \times (H_a - 10.71) + 0.0045 \times (T_a - 298)} \tag{2.37}$$

$$k_{hd} = \frac{1}{1-0.012\times(H_a-10.71)-\frac{275}{10000}\times(T_a-298)+\frac{285}{10000}\times(T_{SC}-T_{SCRef})} \tag{2.38}$$

$$H_a = \left(\frac{6.22 \times p_a \times R_a}{P_b - 0.01 R_a \, p_a}\right) \tag{2.39}$$

$$H_{SC} = 6.22 \times P_{SC} \times 100/(P_c - P_{SC}) \tag{2.40}$$

Ha, Hsc'den büyük ise, denklem 2.38 de Ha yerine Hsc kullanılacaktır.

Denklemlerde

T_{SC}	:	Şarj havası sıcaklığı
T_{SCRef}	:	25 ^{o}C'lik deniz suyu sıcaklığına denk gelen şarj havası sıcaklığı bu değer üretici tarafından belirlenmektedir
T_a	:	Hava filtresi girişindeki hava sıcaklığı (K)
H_a	:	Makine giriş havası mutlak nemliliği (kg kuru hava başına)
P_{SC}	:	Yanma havası basıncı, (kPa)
P_C	:	şarj havasının nemi, (g su başına kg kuru hava)
H_{SC}	:	Yanma havası mutlak nemliliği

2.2.2 Ölçümlerde Belirsizlik Analizi

Genellikle ölçümler sonucu hesaplanan değerler, ölçümü yapılan belirli bir niceliğin değerinin yaklaşık değerinin tahmin edilmesiyle elde edilir. Dolayısıyla

sonucun eksiksiz olması için sonuca nicel bir ölçüm belirsizliği dâhil edilmesiyle tamamlanır. Bir ölçümün sonucunun belirsizliği genellikle, Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Komitesi (CIPM) yaklaşımında sayısal değerlerini tahmin etmek için kullanılan yönteme göre iki kategoride gruplandırılabilen birkaç bileşenden oluşur: bunlar

A. İstatistiksel yöntemlerle değerlendirilenler
B. Diğer yöntemlerle değerlendirilenlerdir

Belirsizlik bileşeninin hangi kategoriye dâhil edileceğine karar vermek bazen o kadar kolay olmayabilmektedir bu nedenle, genellikle belirsizlik bileşenleri "rastlantısal ve " veya "sistematik" olarak sınıflandırılır. Ancak rastlantısal ve sistematik terimleri yanlış anlaşılmalara neden olabildiğinden dolayı bunların yerine "rastgele bir etkiden kaynaklanan belirsizlik bileşeni" ve "Sistematik bir etkiden kaynaklanan belirsizlik bileşeni" şeklinde adlandırılması daha uygun olmaktadır. (Taylor & Kuyatt, 1994)

Yapılan her ölçüm değeri belli oranda hata içermektedir, ölçüm sonuçlarını etkileyen bu hatalar rastlantısal ve sistematik hatalardır.

2.2.2.1 Rastlantısal Hata

Ölçüm cihazının kesinlik sınırlamaları nedeniyle ölçülen verilerdeki iki yönlü istatistiksel dalgalanmalardır. Rastgele hatalar istatistiksel analiz yoluyla değerlendirilebilir. Deney şartları sabit tutulup birden çok ölçüm yapılmasıyla alınan ölçümler neticesinde ölçülen değerlerin ortalama değerinden sapma değeri bulunmasıyla rastlantısal hata belirlenir.

2.2.2.2 Sistematik Hatalar

Yapılan ölçümler süresince sabit olan sürekli olarak aynı yönde olan tekrarlanabilir hatalardır. Bu hataların tespit edilmesi zordur ve istatistiksel olarak analiz edilemez. Bir standarda göre kalibrasyon yapılırken sistematik bir hata tanımlanırsa, etkiyi telafi etmek için bir düzeltme faktörü uygulamak sapmayı azaltabilir. Rastgele hatalardan farklı olarak, gözlem sayısı artırılarak sistematik hatalar tespit edilemez veya azaltılamaz.

Gemilerde emisyon ölçümleri belirli şartlarda gerçekleştirilmektedir. Belirlenen makine yükünde belli zaman dilimlerinde ölçümler alınır. Ama bazı dış etkenler ve değişen şartlar nedeniyle rastlantısal hatalar oluşabilmektedir. Rastlantısal hatalar ise ölçümlerden derlenen verilerin ortalamadan sapma değeri şeklinde belirlenmiştir.

Sistematik hatalar ise yukarda bahsedildiği üzere kusurlu cihaz kalibrasyonu, çevresel parazitler, gözlemsel hatalar vb. durumlardan kaynaklanır (Taylor & Kuyatt, 1994). Sistemsel ölçüm hataları 2.41 denkleminde verilen formül ile saptanmaktadır. (ASME, 2005).

$$b_R = \left(\sum_{i=1}^{l} (\theta_i \times b_{\bar{x}\imath})^{\,2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.41}$$

Denklemde;

b_R : Toplam sistematik hata,

θ_i : i bileşenine bağlı parçalı türev,

$b_{\bar{x}\imath}$: i bileşenine bağlı sistemsel hata

2.41 denkleminde baca gazının kütlesel akışın tekrar düzenlenmesiyle Denklem 2.42 bulunur. Ölçüm sonuçlarını etkileyen sistematik hatalar başlıca baca alanı ve hız ölçümü hesabı hatalarından gelmektedir.

$$B_{qmew} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{mew}}{\partial V} \times B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial q_{mew}}{\partial r} \times B_r \right)^2} \tag{2.42}$$

Emisyon kütle debisi için sistematik hata hesabı denklem 2.43' e göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada sistematik hatalar, egzoz kütlesi debisi ile emisyonların yoğunluğu sistemsel hatalardan meydana gelmektedir. Emisyonların yoğunluk ölçümü hataları egzoz gazı analizörü sistemsel hatalarından kaynaklanmaktadır, bir diğer ise gaz analizörü sistematik hatasıdır ve Denklem 2.44' e göre hesaplanmaktadır.

$$B_{q_{mgaz}} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{mgas}}{\partial c_{gas}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{mgaz}}{\partial q_{mew}} \times B_{qmew}\right)^2} \quad (2.43)$$

$$B_{c_{gaz}} = \sqrt{B_{lin}^2\, B_{span}^2 + B_{zero}^2 + B_{rep}^2} \quad (2.44)$$

Ölçülen emisyonların değerini sistemsel olarak etkileyen hata 2.45' te gösterilen denklemle ölçülebilmektedir. Sonuçları etkileyen sistemsel hatalar emisyonların kütlesel akış hatası şafttan ölçülen gücün sistemsel hatasıdır.

$$B_{gas} = \sqrt{\left(\frac{\partial gas}{\partial q_{mgas}} \times B_{qmgas}\right)^2 + \left(\frac{\partial gas}{\partial p} \times B_p\right)^2} \quad (2.45)$$

Hesaplamaları etkileyen bütün standart belirsizlikler 2.46 denkleminde gösterilen formülle belirlenmektedir (TURKAK, 2015).

$$u_{\bar{x}} = \sqrt{(b_{\bar{x}})^2 + (s_{\bar{x}})^2} \quad (2.46)$$

Son adım olarak genişletilmiş belirsizlik Denklem 2.47'ye göre hesaplanmaktadır.

$$U(\bar{x}) = k \times u(\bar{x}) \quad (2.47)$$

$U_{\bar{x}}$: Genişletilmiş belirsizlik

k : Belirsizlik değerinin güven aralığı

$u_{\bar{x}}$: Birleştirilmiş belirsizlik

Genel yaklaşım ile tercih edilen güven aralığı %95'tir.

- %95 güven aralığı için kapsam faktörü 2'dir.
- %99 güven aralığı için kapsam faktörü 3'tür (TURKAK, 2015).

BÖLÜM ÜÇ
BİR YOLCU VAPURUNDAN KAYNAKLANAN EGZOZ EMİSYONLARI ANALİZİ

Bu bölümde Ege Denizi İzmir Körfezinde yolcu taşımacılığı yapan bir yolcu vapurundan kaynaklanan egzoz gazlarının ölçümü gerçekleştirilmiştir.

3.1 Araştırmanın Amacı

Bu çalışma, özellikle İzmir gibi büyük nüfuslu şehirlerde, yurtiçi nakliyeden kaynaklanan hava kirliliğine dikkat çekmeyi amaçlamaktadır. Bunun için öncelikle gemilerin her birinin günlük sefer detayları ve teknik bilgileri İzmir Körfezi'nin iç kesimlerinde bulunan yolcu vapurlarının teknik özellikleri İzdeniz A.Ş den toplanmıştır. Daha sonra, her bir rota ve her bir operasyon modu için gemilerden kaynaklanan emisyonlar, gemi faaliyetlerine dayalı olarak deneysel olarak çalışma yapılmıştır. Ölçüm sonuçları NOx teknik dokümanında belirtilen referans değerler arasında olup olmadığı araştırılmıştır.

3.2 Araştırmanın Önemi

Özellikle yoğun nüfusun yer aldığı bölgelerde yapılan dâhili deniz taşımacılığından kaynaklanan emisyonların ölçülmesi bölgenin hava kalitesi ve halk sağlığı açısından çok önemlidir. Bu bağlamda İzmir Körfezinde dâhili taşımacılıkta kullanılan vapurların hava kalitesini ne derece etkilediğini vapurlardan yayılan emisyonların çevre ve canlılar üzerindeki olumsuz etkilerini değerlendirmek ayrıca yapılan deneysel çalışmanın sonucunda elde edilen emisyon değerleri ile ilgili verilerle daha önce modelleme yöntemleri ile teorik olarak elde edilen verilerin kıyaslanarak daha doğru verilere ulaşılması açısından büyük önem arz etmektedir.

3.3 Araştırma Sahası

İzmir Körfezi'nin iç kesimlerinde yolcu taşımacılığında kullanılan vapurlar belirtilen rota ve operasyon modları göz önüne alınarak araştırma sahası olarak

belirlenmiştir. Şekil 3.1'de İzmir Körfezi'nde iç hatlarda kullanılan güzergâhlar gösterilmiştir. Bu amaçla İzdeniz A.Ş.'ye bağlı yeni tip vapurlardan olan M/S Dario Moreno vapuru araştırma sahası için seçilmiş, her bir rota ve her bir operasyon modu için gemiden kaynaklanan emisyonlar, vapur düzenli sefer tarifesinde belirtilen güzergâhta seyir, manevra ve iskele' de bekleme süreleri boyunca düzenli ve hassas bir şekilde emisyon ölçümleri yapılmıştır. Vapura ait görsel Şekil 3.2' de sunulmuştur. Ölçüm yapılan vapurun özellikleri ise Tablo 3.1' de sunulmuştur.



Şekil 3.1 İzmir körfezi iç hatlar



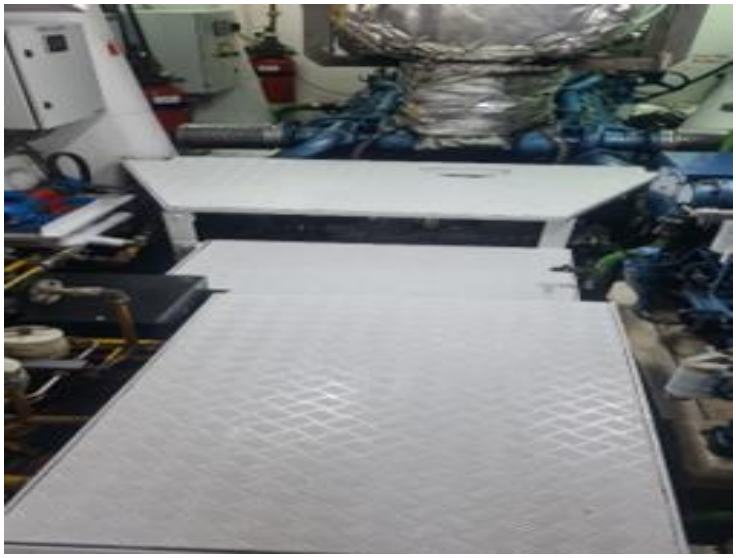
Şekil 3.2 M/S dario moreno vapuru

Tablo 3.1 M/S Dario Moreno vapuru özellikleri

Parametreler	*Değeri*
Tam boy	39 m
Dikmeler arası boy	38,12 m
Genişlik	11,6 m
Gros Tonilatosu	486 GT
Net Tonilatosu	146 T
Pervaneler	2 x CPP
Maksimum hızı	20 Knot
Manevra hızı	8 Knot
Ana Makineler	2x736 kW
Jeneratörler	2x106 kW
Yakıt kapasitesi	9,38 m^3
Yolcu kapasitesi	426 kişi
İnşaa edildiği yıl	02.02.2015
Bağlama limanı	İzmir



Şekil 3.3 M/S dario moreno vapuru ana makine yerleşimi



Şekil 3.4 M/S dario moreno gemisi makine dairesi genel görünümü

Şekil 3.3'te ölçümü yapılacak olacak olan ana makinelerin bulunduğu M/S Dario Moreno vapurunun ana makinesi gösterilmiştir. Şekil 3.4'te ise ölçümü yapılan ana makinenin makine dairesinde genel yerleşimi gösterilmiştir. Vapurda ana makinelerde ve jeneratörlerde ortak yakıt harcanmaktadır. Harcanan yakıtla ilgili Tablo 3.2' de analiz raporu paylaşılmıştır.

Tablo 3.2 Yakıt analiz raporu

Özellik	**Birim**	**Referans sınır değerleri**		**Ölçüm belirsizliği** + -	**Ölçüm sonucu**	**Analiz yöntemi**
		En az	En çok			
Distilasyon 95%	°C		360.0	+/- 1.3	355.5	TS EN ISO 3405
250 °C	%v/v		<65	+/- 1.0	34.7	TSENISO 3405
350 °C	%v/v	85.0			93.6	TS EN ISO 3405
Kükürt içeriği	mg/kg		10.0		9.0	TS EN ISO 20846
Parlama noktası	°C	>55		+/- 1.7	58.5	TS EN ISO 2719
Setan indisi		46			53.9	TS EN 116
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C		5		-8	TS 6147 EN ISO 12837
Su içeriği	%m/m		0.02		0.007	TS EN 12662
Toplam kirlilik	mg/kg		24		<12	TS EN ISO 12185
Yoğunluk 15°C	kg/m^3	820.0	845.0		831.8	TS EN 12916

3.4 Araştırmanın Yöntemi

Araştırma yöntem olarak TESTO 350 Maritime elektronik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz MARPOL Bölüm VI ve NOx Teknik Dokümanına uygun egzoz emisyonlarını ölçmek amacıyla imal edilen taşınabilir ilk gaz analizörüdür.

Testo 350 maritime ölçüm cihazının genel görünümü Şekil 3.5'te verilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce ana makine egzoz gazı baca devresi üzerindeki ölçüm noktası, ölçüm standartlarına uygun mesafede ayarlanarak cihaza ait ölçüm probu Şekil 3.6'da ki gibi devreye bağlanmıştır. Ölçümler öncesinde kalibre ayarlarının yapılması Şekil 3.7'de verilmiştir. Son olarak makine dairesi ortam sıcaklığı ve ortam neminin ölçüm değerleri Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.5 Testo 350 maritime çlçüm cihazı



Şekil 3.6 ölçüm probunun yerleşimi



Şekil 3.7 Ölçümler öncesinde kalibre ayarlarının kontrolü



Şekil 3.8 Ölçümler sırasında ortam sıcaklığı ve ortam nemi ölçümü

3.5 Araştırmanın Bulguları

Ölçümler belirli makine yüklerinde (%25 - %50 - %75 - %100) E2 Test şartlarına uygun olarak yapılmıştır. Ölçümler yapılmadan önce test cihazının kalibre değerleri kontrol edilmiş ve ölçümler yapılmaya başlanmıştır. Emisyonların yoğunlukları, ortamın koşulları ve atık gaz ısı ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçüm değerleri tabloda verilmiştir. Makine fren gücü makine çıkışından hemen sonra ölçüldüğü için güç kayıpları yaşanmadığından dolayı güç kayıpları ekleme gereksinimi duyulmamıştır. Makinanın karakteristikleri Tablo 3.3' te sunulmuştur.

Tablo 3.3 Baudouin ana makine karakteristikleri

Makine bilgileri		
Silindirler ve tipi	:	12 V
Silindir çap ve boyu	:	150x150
Devir hızı	:	1800 RPM
Güç	:	736 (kW)
Hp	:	1000

Makinenin %25 yükündeki fren gücünün toplamı makine güç değerinin %25' i alınarak hesaplanıp 184 (kW) olarak belirlenmiştir. Gemi ana makinesi belirlenen yükte sabit bırakılarak ölçümler yapılmıştır. Emisyon ölçümleri ölçümler yapılırken her aşamada makine fren gücü kayıt altına alınmıştır. Varyans güç faktörü

hesaplanarak değeri %4.75 olarak bulunmuştur. Bu da belirlenmiş olan %5 limitinin altında olduğundan makine ölçümleri yapıldığı süreçte verilerin sabit kaldığını göstermektedir. Makine dairesi ortam koşulları, emisyon konsantrasyonları ve egzoz gaz sıcaklığı Tablo 3.4' te sunulmuştur.

Tablo 3.4 Makine %25 yükte iken ölçülen parametreler

Parametreler	Birim	Sonuçlar	
Ta	(°C)	:	24.8
Ra	(%)	:	30.4
$T_{egz.}$	(°C)	:	220.3
NO_X	(ppm)	:	362
CO	(ppm)	:	124
CO_2	%V/V	:	3.09
SO_2	ppm	:	-
O_2	%V/V	:	17.25

Ağır yük taşımacılığında kullanılan araçlar için emisyon gazı konsantrasyonundan (ppm) den (g/kWh)'a genel dönüşümü aşağıdaki 3.1, 3.2, 3.3 denklemleri yardımıyla hesaplanır (Pilusa, T.J., Mollagee, M. M., & Muzenda, E., 2012).

$$NO_x\ (g/kWh) = 6.636\ \times 10^{-3}\ \times\ NO_x\ (ppm) \tag{3.1}$$

$$CO\ (g/kWh) = 3.591 \times 10^{-3}\ CO(ppm) \tag{3.2}$$

$$CO_2\ (g/kWh) = 63.470 \times CO_2\ (\%vol) \tag{3.3}$$

IMO seviye II ye göre NO_X limiti 8.18 g/kWh olması gerekmektedir. Buna göre üzerinde ölçüm yapılan M/S DARIO MORENO vapurunun emisyon değerleri Tablo 3.5' te verilmiştir. Ancak TESTO 350 MARITIME emisyon ölçüm cihazında HC ve SO_2 ölçülemediğinden dolayı tabloda bu değerlere yer verilmemiştir.

Tablo 3.5 Hesaplanan emisyon değerleri (%25)

Emisyonun çeşidi		Hesaplanan Emisyon değerleri (g/kWh)
NO_X	:	2.402
CO	:	0.445
CO_2	:	196.122

Makine yükü %50 iken elde edilen fren gücü kurulu olan toplam gücün yarısına eşit olmaktadır. Dolayısıyla fren gücü 368 kW olarak hesaplanmıştır. Gemi ana makinesi belirlenen yükte sabit bırakılarak ölçümler yapılmıştır. Emisyon ölçümleri ölçümler yapılırken her aşamada makine fren gücü kayıt altına alınmıştır. Varyans güç faktörü hesaplanarak değeri %3.27 olarak bulunmuştur. Bu da belirlenmiş olan %5 limitinin altında olduğundan makine ölçümleri yapıldığı süreçte verilerin sabit kaldığını göstermektedir. Makine dairesi ortam koşulları, emisyon konsantrasyonları ve egzoz gaz sıcaklığı Tablo 3.6' da sunulmuştur.

Tablo 3.6 Makine %50 yükte iken ölçülen parametreler

Parametreler	Birim	Sonuçlar	
Ta	(°C)	:	24.8
Ra	(%)	:	30.4
$T_{egz.}$	(°C)	:	280.3
NO_X	(ppm)	:	382
CO	(ppm)	:	122
CO_2	%V/V	:	4.11
SO_2	%V/V	:	-
O_2	%V/V	:	15.25

%50 Makine yükünde emisyon değerleri Tablo 3.7'de sunulmuştur.

Tablo 3.7 Hesplanan emisyon değerleri (%50)

Emisyonun çeşidi		Hesaplanan Emisyon değerleri (g/kWh)
NO_X	:	2.234
CO	:	0.438
CO_2	:	260.861

Makine yükü %75 iken elde edilen fren gücü, kurulu olan toplam 736kW gücünün %75'i alınmasıyla 552kW değeri bulunur. Ana makine saptanan sabit makine yükü altında analiz sonuçları alınmıştır. Ölçülen makine güç değerlerinin sabit olduğu anlamına gelen Varyans güç faktörü %3 olarak hesaplanmıştır. Bu da belirlenmiş olan %5 limitinin altında olduğundan makine ölçümleri yapıldığı süreçte verilerin sabit kaldığını göstermektedir. Makine dairesi ortam koşulları, emisyon konsantrasyonları ve egzoz gaz sıcaklığı Tablo 3.8' de sunulmuştur.

Tablo 3.8 Makine %75 yükte iken ölçülen parametreler

Parametreler	Birim	Sonuçlar	
Ta	(°C)	:	24.8
Ra	(%)	:	30.4

$T_{egz.}$	(°C)	:	313.5
NO_X	(ppm)	:	452
CO	(ppm)	:	68
CO_2	%V/V	:	5.99
SO_2	%V/V	:	-
O_2	%V/V	:	13.42

%75 Makine yükünde emisyon değerleri Tablo 3.9' de sunulmuştur.

Tablo 3.9 Hesaplanan emisyon değerleri (%75)

Emisyon türü		Hesaplanan Emisyon değerleri (g/kWh)
NO_X	:	2.999
CO	:	0.244
CO_2	:	380.185

Makine yükü %100 iken elde edilen fren gücü, kurulu olan toplam 736kW gücün %100' ü alınmasıyla 736kW değeri bulunur. Ana makine saptanan sabit makine yükü altında analiz sonuçları alınmıştır. Ölçülen makine güç değerlerinin sabit olduğu anlamına gelen Varyans güç faktörü %3,62 olarak hesaplanmıştır. Bu da belirlenmiş olan %5 limitinin altında olduğundan makine ölçümleri yapıldığı süreçte verilerin sabit kaldığını göstermektedir. Makine dairesi ortam koşulları, emisyon konsantrasyonları ve egzoz gaz sıcaklığı Tablo 3.10' da sunulmuştur.

Tablo 3.10 Makine %100 yükte iken ölçülen parametreler

Parametreler	Birim	Sonuçlar	
Ta	(°C)	:	24.8
Ra	(%)	:	30.4
$T_{egz.}$	(°C)	:	335.4
NO_X	(ppm)	:	467
CO	(ppm)	:	121
CO_2	%V/V	:	6.78
SO_2	%V/V	:	-
O_2	%V/V	:	12.50

%100 Makine yükünde emisyon değerleri tablo 3.11'de sunulmuştur.

Tablo 3.11 Hesaplanan emisyon değerleri (%100)

Emisyon türü			Hesaplanan Emisyon değerleri (g/kWh)
NO_X		:	3.099
CO		:	0.434
CO_2		:	430.326

3.6 Spesifik Emisyon Değerleri

Bir vapurun egzoz emisyonları tablo 2.7’ de belirtilen E2 test koşulları referans alınarak NOx Teknik koduna uyacak biçimde makinenin belirli yük değerlerinde hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama sonucu çıkan emisyon değerleri tablo 3.12’ de gösterilmektedir.

Tablo 3.12 Spesifik emisyon değerleri

Emisyonun Çeşidi	Emisyon Değerleri
NOx (g/kWh)	6.23
CO (g/kWh)	0.93
CO2 (g/kWh)	894.91

Vapurun uyması gereken NOx emisyon limitleri tablo 1.9’ da verilen seviye 2 değeridir. 1800rpm değeri göz önünde tutularak emisyon sınırının 7.84 (g/kWh) şekilde tespit edilmiştir. Dolayısıyla Dario MORENO vapuru IMO’ nun belirlediği 2. Seviye emisyon limit sınırlarını aşmadığı görülmektedir.

BÖLÜM DÖRT
SONUÇ

Bu çalışmada İzmir Körfezinde yolcu taşımacılığı yapan bir vapurdan yayılan egzoz gaz emisyonları deneysel metotlar ile belirlenmiştir. Vapur Türkiye'ninde taraf olduğu IMO kurallarına göre inşaa yılı (2015) dikkate alındığında seviye-2 NO_x limitlerine tabidir. Bunun ile beraber vapurun çalışma alanı iç denizlerde kullanılabilecek denizcilik yakıtı kükürt içeriği limitlerine tabidir. Yapılan ölçümlerle belirlenen NOx emisyon değeri ile vapurun seviye-2 NOx limitlerinin ve vapurda kullanılan yakıt kükürt içeriğinin limit değerinin uygunluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca vapurun değişik seyir koşullarında bu seyirlerde geçirilen süreler ile toplam seyir zamanı ve seyir sırasında makinenin yükleri saptanarak deney için veriler toplanmıştır. Yapılan hesaplamalar TESTO 350 Maritime elektronik emisyon ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Ege Denizi İzmir Körfezinde yolcu taşımacılığında kullanılan vapurdan salınan egzoza ait emisyon çeşitleri deney yapılarak saptanmış ve ölçülmüştür. Vapurun ana tahrik mekanizmasına uyan E2 test döngüsü koşullarında değinilen makineye ait değişik yük değerlerinde NO_x, CO, CO_2, emisyon türleri dikkate alınmıştır. Ölçümleri yapılan bu kirleticiler sırasıyla 6.23 (g/kWh), 0.930 (g/kWh), 894.910 (g/kWh) olarak belirlenmiştir.

Vapur Türkiye'nin taraf olduğu IMO kurallarında belirtilen inşaa yılı dikkate alınarak seviye 2 NO_x limitlerine tabidir. Vapurun ana makinesinin sahip olduğu 1800 rpm değeri kullanılarak hesaplanan vapurun uyması gereken NOx egzoz emisyon limiti 7.84 (g/kWh) olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak Türk Ulusal Mevzuatı deniz araçlarında kullanılacak yakıtın sülfür içerik limit değeri baz alınmasıyla vapurda kullanılması gereken yakıtın içeriğindeki sülfür oranı %0.1'i aşmamalıdır. Sonuç olarak vapurda gerçekleştirilen deneysel ölçüm sonucunda belirlenen NO_x spesifik emisyon değeri 6.23 (g/kWh) olarak belirlenmiş olup bu değer seviye 2 NO_x limitlerine uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca ezgoz ölçümü yapılan vapurda kullanılan dizel yakıtın kükürt içeriği %0.07 olarak belirlenmiştir. Vapurda kullanılan yakıt Ulusal Mevzuata ve IMO'nun belirlediği yakıt kükürt içeriğine %0.1 (g/kWh)

limit değerinin altında olduğu görülmüştür dolayısıayla vapurda kullanılan denizcilik yakıtları kükürt içeriği limit değerlerine uygundur.

Deniz araçlarından kaynaklı emisyon değerlerinin insan sağlığına zararlı ve çevre kirliliğine sebep olmasından dolayı uluslararası alanda önemli bir konu halini almıştır. Özellikle, çevresel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak MARPOL Ek VI"da yapılacak değişiklikler ve ilaveler hızla milli ve milletlerarası alanda uygulamaya geçecektir. Nitekim Ek VI"nın kısa bir sürede milletlerarası alanda kabul edilmesi bunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle Türkiye açısından bu düzenlemenin kabul edilmesinin ve milli mevzuat ile uyum sağlanmasının önemi vardır. Ancak Ek VI"nın kabul edilmesi ile birlikte yakıt üretim kalitesinin belirli niteliklere sahip olma zorunluluğu, atık alım tesislerinin yeterli bir sayıya ulaştırılması ve gemi donanımına ilişkin teknik yeniliklerin getirilmesi ihtiyacıyla ortaya çıkacak ek maliyetlere ilişkin hususların değerlendirilmesinin de gerekliliği ortadadır. Yapılan çalışmada vapurun emisyon değerleri IMO'nun ve Türkiye Ulusal Mevzuatına göre emisyon değerlerine uygunluğu görülmüş olsa da yine de çevre kirliliğine neden olmaktadır.

Bu bilgiler göz önünde tutularak yaşanılabilir çevre oluşturma ve iç suların temiz tutulabilmesi için şehir hatlarında çalışan vapurların tamamen elektrikli tahrik sistemi ile çalışan araçlara dönüştürülmesine ihtiyaç vardır. Vapura entegre edilecek güneş enerjisinden elde edilecek elektriğin yanı sıra iskelelere elektrik besleme hatları oluşturularak vapura yerleştirilmiş bataryalar şarj edilmesi sağlanıp bu enerji ile seferlerin yapılabileceği gerçeği göz önünde tutulmalıdır. İlk yatırım maliyeti yüksek olsa da, bakım onarım, yedek parça maliyeti ve fosil yakıt maliyetinden vazgeçileceğinden dolayı uzun vade ve uzun yıllar çalışma süreleri düşünüldüğünde elektrikli vapurlara geçişin mantıklı bir hareket olacağı gerçeğidir. Dolayısıyla daha temiz bir şehir, daha temiz bir ülke ve dahası daha temiz bir dünya için Elektrikli vapur projelerinin hayata geçirilmesi gerekliliğidir.

KAYNAKLAR

Aardenne, Van J.; Clotte , A.; Degraeuwe, B.; De Vieger, I.; Hammingh, .; Viana, M. (2013). *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing.* Kopenhagen. doi:eea.europa.eu/enquiries,

Abdel-shafy, H. I., & Mansour, M. S. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum, 25*(1), 107-123.

Air pollution from ships, European Federation for Transport and Environment,Swedish NGO Secretariat on Acid Rain, North Sea Foundation, Bellona Foundation. (2008). *European Environmental Bureau and Seas at Risk*.

Alver, E., Demirci, A., & Özcimder, M. (tarih yok). Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar ve Sağlığa Etkileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 3*(1), 46.

Alver, E.; Demirci, A.; Özcimder, M. (2012). Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar ve Sağlığa Etkileri,. *1*(3), s. 3 (1): 45-52.

Anantharaman, M., Garaniya, V., & Khan, F. (2015). Marine Engines and their Impact on the economy.

Andritz. (2021). *Andritz*. https://www.andritz.com/products-en/environmental-solutions/environmental-solutions/air-pollution-control/seasox-exhaust-gas-cleaning?gclid=CjwKCAjw8cCGBhB6EiwAgORey6X-CEju3nmPh0n9FGwqqpLlEtoT-qajFsUs06c2zhMFRPH7r1kSSRoC-GwQAvD_BwE adresinden alındı

ASME. (2005). Test Uncertainty. *The American Society of Mechanical Engineers*. New York. 2021 tarihinde alındı

Aygül, Ö., & Baştuğ, S. (2020). Deniz Taşımacılığı Kaynaklı Hava Kirliliği ve İnsan Sağlığına Etkisi. *Journal of Maritime Transport and Logistics, 1*(1), 33-36-37.

Bernstein, J. A., Alexis, N., Baccubus, H., Bernstein, L., Fritz, P., Horner, E., . . . Tarlo, S. M. (2008). Health Effects of Nonindustrial Indoor Air Pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology, 121*(3), 585-591.

Cappa, C. D., Williams, E. J., Lack, D. A., Bufalloe, G. M., Coffman, D., Hayden, K. L., . . . Quinn, P. K. (2014). A case study into the measurement of ship emissions from plume intercepts of the NOAA ship Miller Freeman. *Atmospheric Chemistry and Physics*. doi:10.5194/acp-14-1337-2014

Caterpillar. (2007). Application and İnstallation Guide-Gas Engine Emissions.

Corbet, J. J., Fishbeck, P. S., & Pandis, S. N. (1999). Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012),, 104*(D3), 3457-3470.

Corbett, J. J. (2004). Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modeling.

Corbett, J. J., & Fishbeck, P. S. (2003). Emissions from waterborne commerce inUnited States. *Environ. Sci. Technology, 34*(15), 3254–3260.

Corbett, J. J., Winerbrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, p., Eyring, V., & Lauer, A. (2007, 11 5). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental Science & Technology, 41*(24), 8512-8518.

Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Solazzo, E., Monforti - Ferario, F., . . . Vignati, E. (2020). *European Commission.* doi::10.2760/56420

Emission Standards. (2021). *IMO Marine Engine Regulations*. Emission Standards: https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#nox adresinden alındı

EPA. (2000, 2). Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data. US, Wahington, Washington: United States Environmental Protection Agency.

Ergin, S. (2011). *Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Projesi Sonuç Raporu.*

European Commission. (2013, 06 28). Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime ransport and amending Regulation. (s. 1). Brussels: European Commission.

Eyring, V., Köhler, H. W., Aardenne, J. V., & Lauer, A. (2005, 9 16). Emissions from international shipping 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110*(D17).

Eyring, V., Köhler, H. W., Aardenne, J. V., & Lauer, A. (2005, 9 16). Emissions from international shipping 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110*(D17).

Ding, Y. Fu, M., Ge, Y., Yu, L., Yin, H., Ye, W., & Liang, B. (2013). Real-world emissions of inland ships on the Grand Canal, China. *Atmospheric Environment*(81), 222-229. 2020 tarihinde alındı

Fueltrade. (2015). Low sulphur bunker fuels to meet 2015 ECA requirements. *Emission Control Areas.* https://ft-maritime.com/index.php?story=17 24.10.2014 adresinden alındı

Global Climate Change. Carbon Dioxide. Erişim Şubat . (2020). Global Climate Change. Carbon Dioxide. Erişim Şubat . adresinden alındı

Goldsworthy, L., & Goldsworth, B. (2015). Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data – An Australian case study. *Envıronmental Modellıng & Software 63*, 45-60.

Green ship of the future. (2020). https://greenship.org/about/emission-wiki/hydrocarbons/ adresinden alındı

Gutiérrez, J. M., Velázquez, E. P., Sánchez, Y. A., Moreno, R. R., Cayetano, F. C., & Grados, V. D. (2018, 8 1). Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data. *The Science Total Environment*. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.045

IMO. (2008). *Marine Engine Regulations*. 2021 tarihinde https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php adresinden alındı

IMO. (2008). NOX technical code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Merine Diesel Engines. s. 69.

IMO. (2019). *Prevention of Air Pollution from Ships*. https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx adresinden alındı

IMO. (2021). https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-–-Regulation-13.aspx adresinden alındı

İstanbul-Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz deniz ticaret odaları. (2019). *Denizcilik sektör raporu.* Deniz ticaret odası. İstanbul: Deniz ticaret odası. 5 22, 2020 tarihinde alındı

Küçükşahin, F. (1999). *Dizel Motorları. Güven Kitabevi, Genişletilmiş, 3.* istanbul: Güven Kitabevi, Genişletilmiş, 3.

LOGWARD. (2021). *LOGWARD*. https://www.logward.com/co2-calculator adresinden alındı

Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006). *Diesel emissions and their control.* SAE International.

MARPOL. (2008). *Marpol*. 2021 tarihinde http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/app2.htm adresinden alındı

McGill, R., William (Bill), R., kim, W. (2013). *Alternative Fuels for Marine applications.* A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing agreement, Annex 41. mart 05, 2022 tarihinde alındı

NASA. (2020). Global Climate Change. Carbon Dioxide. Erişim Şubat. https://www.climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/ adresinden alındı

Olivier, J. J., Bouwman, A. F., Van der mass, C. M., & Berdowski, J. (1994). Emission database for global atmospheric research. EDGAR. (31), 93-106.

Paxian, A., Eyring, V., Beer, W., Sausen, R., & Wright, C. (2010). Present-day and future global bottom-up ship emission inventories including polar routes. *Environmental Science & Technology, 44*(4), 1333-1339.

Pilusa, T.J., Mollagee, M. M., & Muzenda, E. (2012). Reduction of Vehicle Exhaust Emissions from Diesel Engines Using the Whale. *Aerosol and Air Quality Research*. Taiwan. doi:10.4209/aaqr.2012.04.0100

Ritchie , A., Jonge , E., Hugi, C., & Cooper, D. (2005). *European Comission Directorate General Environment.* Task 2c – SO2 Abatement, Entec UK limited, Service Contract on Ship Emissions: , Northwich, UK. Temmuz 1, 2021 tarihinde alındı

Roskilly, A. P., Nanda, S. K., Wang, Y. D., & Chirkowski, J. (2008). The performance and the gaseous emissions of two small marine craft diesel engines fuelled with biodiesel. *Applied Therman Engineering. 28 (2008) 872–880*, 8-9. doi:0.1016/j.applthermaleng

Seykens, X. (2010). Development and validation of a phenomenological diesel engine combustion model. *PhD thesis, Eindhoven University of Technology, Netherlands*, s. 23-24.

Sharma, D. C. (2006). Ports in a storm. Environmental Health Perspectives. *114*(4), A222-A231. https://doi.org/10.1289/ehp.114-a222 adresinden alındı

Sinha , P., Hobbs, P. V., Yokelson, R. J., Christian, T. J., Kirchstetter, T. W., & Bruintjes, R. (2003). Emissions of trace gases and particles from two ships in the southern Atlantic Ocean. *Atmospheric Environment, 37*(15), 2139-2148. doi:10.1016/S1352-2310(03)00080-3

Smith, T. J. (2014). *Third IMO Greenhouse Gas Study*. London: IMO.

Smith, T., Jalkanen, J., Anderson, B. A., Corbett, J. J., FAber, J., Hanayama, S., . . . Pandey, A. (2014). *Third IMO Greenhouse Gas Study*. London: IMO.

T.C. Ulaştırma Bakanlığı. (2021). https://imo.uab.gov.tr/marpol-73-78 adresinden alındı

Taylor, B. N., & Kuyatt, E. C. (1994, 9). NIST technical note. *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Tezcan, A., Atılgan, A., & Öz, H. (2011). Seralarda Karbondioksit Düzeyi, Karbondioksit. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fak. Dergisi, 6*(1), 44 - 51.

The Emissions Database for Global Atmospheric Research. (2020). *European Comission*. Europe: jrc-edgar (at) ec.europa.eu.

Trozzi, C. (2010). *Emission estimate methodology for maritime navigation.* Rome. 616,2021tarihinde.https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf adresinden alındı

Trozzi, C. (2013). *air pollutant emission inventory guidebook* (s. 12-25). içinde EEA (European Environment Agency).

Trozzi, C., & Vaccaro, R. (2006). Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships. Techne report MEET RF98. *Environment & Transport*.

TURKAK. (2015). Deney / Analiz sonuçlarındaki Ölçüm Belirsizliği Tahmini için TURKAK Prensipleri. *Türk Akreditasyon Kurumu*, s. 5. https://secure.turkak.org.tr/docs/GuiedeLines/R20-02-01.pdf adresinden alındı

Uçar, O. F. (2014). Samsun İli Limanlarına Gelen Gemilerin Oluşturduğu Egzoz Gazı Emisyonlarının İncelenmesi ve Çevresel Etkileri. *T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı*, 8-9.

US EPA. (2009). *Integrated science assessment (ISA) for particulate matter*. https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=216546#tab-3. adresinden alındı

Van Aardenne, J., Colette, A., Degraeuwe, B., Hammingh, P., & De Vlieger, I. (2013). *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing.*

Winnes, H., & Fridell, E. (2009). Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type. *Journal of the Air & Waste Management Association, 59*(12), 1391-1398.