

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR FERİBOTTAN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARININ DENEYSEL VE  
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat DURMAZ**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı**

**ARALIK 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR FERİBOTTAN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARININ DENEYSEL VE  
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Murat DURMAZ  
(508031015)**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selma ERGİN**

**ARALIK 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508131015 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Murat DURMAZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BİR FERİBOTTAN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARININ DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Selma ERGİN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Selma ERGİN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Osman Azmi ÖZSOYSAL**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **27 Kasım 2015**

**Savunma Tarihi :**      **28 Aralık 2015**



*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgi ve deneyimini benimle paylaşarak destek olan danışmanım sayın Prof. Dr. Selma ERGİN'e yardımları için teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında Ord. Prof. Ata Nutku feribotunda ölçüm almamıza izin veren İstanbul Deniz Otobüsleri A.Ş.'ye, ölçümler süresince bizlere yardımcı olan feribot personeline, "İstanbul' da Gemi Emisyonları Ölçümünde Hizmet Verecek Akredite Bir Laboratuvarın Geliştirilmesi ve BİT Destekli Eğitim Projesi' ne" verdikleri destekten dolayı T.C. Kalkınma Bakanlığı' na ve İstanbul Kalkınma Ajansı' na teşekkür ederim.

Tez süresince bilgi ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

Kasım 2015

Murat DURMAZ  
(Gemi İnş.ve Gemi Mak. Müh.)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı .....	1
1.2 Literatür Taraması .....	4
<b>2. GEMİLERDEN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARI.....</b>	<b>11</b>
2.1 Egzoz Emisyonu Oluşumu ve Egzoz Emisyonu Türleri .....	11
2.1.1 Azot oksit emisyonu .....	13
2.1.2 Kükürt oksit emisyonu.....	14
2.1.3 Karbon dioksit emisyonu .....	15
2.1.4 Karbon monoksit emisyonu .....	15
2.1.5 Hidrokarbon emisyonu .....	16
2.1.6 Partikül madde emisyonu .....	16
2.2 Egzoz Emisyonlarının Çevreye ve İnsan Sağlığına Zararları .....	16
2.3 Gemi Egzoz Emisyonları İle İlgili Kural ve Limitler.....	18
2.3.1 MARPOL Ek VI gemi kaynaklı hava kirliliğinin önlenmesi sözleşmesi	19
2.3.1.1 Azot oksit emisyonu düzenlemesi .....	21
2.3.1.2 Kükürt oksit emisyonu düzenlemesi.....	22
2.3.2 Türkiye' de gemi egzoz emisyonu kuralları ve limitleri .....	24
2.3.3 Bazı bölgesel kural ve limitler .....	25
<b>3. EGZOZ EMİSYONLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ .....</b>	<b>27</b>
3.1 Giriş .....	27
3.2 Egzoz Emisyonu Ölçüm Sistemleri.....	27
3.2.1 Emisyon ölçüm sistemi.....	28
3.2.2 Şaft gücü ölçüm sistemi.....	30
3.2.3 Egzoz gazı debisi ve sıcaklığı ölçüm sistemleri .....	30
3.2.4 Ortam sıcaklığı, nemi ve basıncı ölçüm sistemleri.....	31
3.3 NO <sub>x</sub> Teknik Dokümanına Göre Egzoz Emisyon Ölçüm Prosedürü ve Hesaplamaları .....	32
3.4 Egzoz Emisyon Ölçümleri.....	42
3.5 Emisyon Ölçümlerinde Belirsizlik Analizi .....	44
<b>4. EGZOZ EMİSYONLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ.....</b>	<b>47</b>
4.1 Giriş .....	47
4.2 Yukarıdan aşağıya (top down) metodu .....	48
4.2.1 Seviye 1 yaklaşımı .....	48

4.2.2 Seviye 2 yaklaşımı .....	49
4.2.3 Seviye 3 yaklaşımı .....	50
4.3 Aşağıdan yukarıya (botttom up) metodu .....	52
<b>5. BİR FERİBOTTAN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARI .....</b>	<b>55</b>
5.1 Giriş .....	55
5.2 Egzoz Emisyon Ölçümü Yapılan Geminin Özellikleri .....	55
5.3 Egzoz Emisyonları Ölçüm Sonuçları .....	57
5.3.1 Değişik yüklerde egzoz emisyon ölçüm sonuçları .....	57
5.3.2 Spesifik emisyon değerleri.....	63
5.3.3 Karbon denge metodu ile belirlenen emisyon değerleri .....	66
5.4 Teorik Metotlarla Emisyon Hesaplama Sonuçları.....	68
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>79</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>83</b>

## **KISALTMALAR**

<b>AB</b>	: Avrupa Birliği
<b>AIS</b>	: Otomatik tespit sistemi
<b>CARB</b>	: Kaliforniya Hava Kaynakları Kurumu
<b>ECA</b>	: Emisyon kontrol alanı
<b>EEA</b>	: Avrupa Çevre Ajansı
<b>EPA</b>	: Çevre Koruma Ajansı
<b>HFO</b>	: Deniz tipi ağır yakıt
<b>IMO</b>	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
<b>ISO</b>	: Uluslararası Standart Organizasyonu
<b>MDO</b>	: Deniz tipi dizel yakıt
<b>MGO</b>	: Deniz tipi dizel yakıt
<b>PM</b>	: Partikül madde
<b>ppm</b>	: Milyonda bir birim



## SEMBOLLER

$\Theta$	: Gerçek hava yakıt oranının stoykiyometriğe oranı
$NO_x$	: Azot oksitleri
$SO_2$	: Kükürt dioksit
$CO_2$	: Karbon dioksit
$CO$	: Karbon monoksit
$O_2$	: Oksijen
$HC$	: Hidrokarbon
$n$	: Makine devri
$P_i$	: Makine gücü
$W_{Fi}$	: Ağırlık faktörü
$q_{mgas}$	: Egzoz gazındaki emisyonun kütle debisi
$q_{mew}$	: Egzoz gazı kütle debisi
$q_{mf}$	: Yakıt kütle debisi
$q_{maw}$	: Makine giriş havası kütle debisi
$u_{gas}$	: Emisyon yoğunluğunun egzoz gazı yoğunluğuna oranı
$c_{gas}$	: Emisyon konsantrasyonu
$H_a$	: Spesifik nemlilikYoğunluk
$W_{ALF}$	: Yakıt hidrojen içeriği
$W_{BET}$	: Yakıt karbon içeriği
$W_{DEL}$	: Yakıt içeriği
$W_{EPS}$	: Yakıt içeriği
$f_c$	: Katsayı
$f_{fd}$	: Katsayı
$f_{fw}$	: Katsayı
$R_a$	: Mutlak nemlilik
$p_b$	: Giriş havası buhar doyma basıncı
$t_a$	: Giriş havası sıcaklığı
$k_{hd}$	: Nemlilik faktörü
$k_w$	: Kuru baz ıslak baz düzeltmesi
$\alpha$	: Hidrojen karbon oranı
$b_R$	: Sistemik hata
$\Theta_i$	: Kısmi türev
$u$	: Genişletilmiş belirsizlik değeri
$s_x$	: Standart sapma
$FC$	: Yakıt tüketim değeri
$EF$	: Emisyon faktörü
$E_i$	: Yayılan emisyon miktarı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Yanma havası tipik kimyasal bileşimi.....	12
Çizelge 2.2 : Gemi yakıtlarının tipik kimyasal bileşimi.....	12
Çizelge 2.3 : Değişik hava yakıt oranlarında emisyonlar (Caterpillar, 2007). ....	14
Çizelge 2.4 : Gemi yakıtlarında ortalama kükürt içeriği. ....	15
Çizelge 2.5 : Azot oksit limitleri.....	22
Çizelge 2.6 : Deniz tipi yakıtların kükürt içeriği AB limitleri.....	25
Çizelge 2.7 : Deniz tipi yakıtların kükürt içeriği CARB limitleri. ....	26
Çizelge 3.1 : Horiba PG 250 gaz analizörü özellikleri. ....	29
Çizelge 3.2 : Gaz analizörlerinin sapma ve hassasiyet değerleri.....	30
Çizelge 3.3 : Hız ve sıcaklık ölçüm sistemlerinin belirsizlik değerleri. ....	31
Çizelge 3.4 : Sıcaklık, nem ve basınç ölçüm sistemlerinin belirsizlik değerleri. ....	31
Çizelge 3.5 : Sabit devirli ana makine için E2 test şartları.....	33
Çizelge 3.6 : Egzoz emisyon türü ve egzoz gazı standart yoğunlukları. ....	35
Çizelge 3.7 : Emisyon ölçüm sensörleri. ....	37
Çizelge 4.1 : Seviye 1 emisyon faktörleri.....	49
Çizelge 4.2 : Seviye 2 NO <sub>x</sub> emisyon faktörü. ....	50
Çizelge 4.3 : Seviye 3 ana makine için NO <sub>x</sub> emisyon faktörü. ....	51
Çizelge 4.4 : Seviye 3 yardımcı makine için NO <sub>x</sub> emisyon faktörü. ....	52
Çizelge 4.5 : Ana makine için NO <sub>x</sub> emisyon faktörleri. ....	53
Çizelge 4.6 : Yardımcı makine için NO <sub>x</sub> emisyon faktörü. ....	54
Çizelge 4.7 : Diğer kirletici türleri için emisyon faktörleri. ....	54
Çizelge 5.1 : Ord. Prof. Ata Nutku Feribotu tipik özellikleri.....	56
Çizelge 5.2 : Yakıt analiz sonuçları.....	57
Çizelge 5.3 : Ölçülen çeşitli parametreler (%25 yük).....	59
Çizelge 5.4 : Emisyon değerleri (%25 yük).....	59
Çizelge 5.5 : Ölçülen çeşitli parametreler (% 50 yük).....	60
Çizelge 5.6 : Emisyon değerleri (%50 yük).....	60
Çizelge 5.7 : Ölçülen çeşitli parametreler (%75 yük).....	61
Çizelge 5.8 : Emisyon değerleri (%75 yük).....	62
Çizelge 5.9 : Ölçülen çeşitli parametreler (%100 yük).....	63
Çizelge 5.10 : Emisyon değerleri (%100 yük).....	63
Çizelge 5.11 : Spesifik emisyon değerleri. ....	64
Çizelge 5.12 : Karbon denge metoduna göre değişik emisyon değerleri. ....	67
Çizelge 5.13 : Emisyon değerlerinin karşılaştırılması. ....	67
Çizelge 5.14 : Feribot seyir durumu ve süreleri. ....	69
Çizelge 5.15 : Feribot sefer durumu ve yük faktörleri.....	69
Çizelge 5.16 : Feribot seyir durumu ve emisyon faktörleri. ....	70
Çizelge 5.17 : Değişik seyir durumlarında yayılan emisyon miktarları. ....	70
Çizelge 5.18 : Feribotun bir seferi için hesaplanan emisyon miktarları. ....	70
Çizelge 5.19 : Feribotun bir yıldaki sefer sayısı. ....	73
Çizelge 5.20 : Feribottan bir yılda yayılan emisyon miktarı. ....	74



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : İki devirli bir dizel makinenin tipik emisyon değerleri (Man, 2004). .....	13
Şekil 2.2 : Gemi emisyonlarının toplam miktara oranı (Viana ve diğerleri, 2014). ..	17
Şekil 2.3 : ECA ve SO <sub>x</sub> ECA bölgeleri (ABS, 2015) .....	21
Şekil 2.4 : Azot oksit limitleri. ....	22
Şekil 2.5 : Kükürt oksit limitleri. ....	23
Şekil 3.1 : Horiba PG 250 gaz analizörü. ....	28
Şekil 3.2 : Horiba Mexa 1170 gaz analizörü. ....	29
Şekil 3.3 : Şaft gücü ölçüm sistemi (Datum, n.d.). ....	30
Şekil 3.4 : Emisyon ölçüm sistemi (IMO, 2008). ....	36
Şekil 3.5 : Egzoz bacası ve emisyon ölçüm noktası. ....	42
Şekil 3.6 : Şaft gücü ölçüm sistemi. ....	43
Şekil 5.1 : Ord. Prof. Ata Nutku Feribotu. ....	56
Şekil 5.2 : Ana makine ve şanzıman yerleşimi. ....	57
Şekil 5.3 : % 25 yükte zamana bağlı makine fren gücü. ....	58
Şekil 5.4 : % 50 yükte zamana bağlı makine fren gücü. ....	60
Şekil 5.5 : % 75 yükte zamana bağlı makine fren gücü. ....	61
Şekil 5.6 : % 100 yükte zamana bağlı makine fren gücü. ....	62
Şekil 5.7 : Azot oksit emisyon değerleri. ....	64
Şekil 5.8 : Kükürt dioksit emisyon değerleri. ....	65
Şekil 5.9 : Karbon monoksit emisyon değerleri. ....	65
Şekil 5.10 : Karbon dioksit emisyon değerleri. ....	65
Şekil 5.11 : Oksijen değerleri. ....	66
Şekil 5.12 : Hidrokarbon emisyon değerleri. ....	66
Şekil 5.13 : Bir sefer süresince makine fren gücü. ....	68
Şekil 5.14 : NO <sub>x</sub> emisyon miktarı. ....	71
Şekil 5.15 : CO emisyon miktarı. ....	71
Şekil 5.16 : CO <sub>2</sub> emisyon miktarı. ....	72
Şekil 5.17 : HC emisyon miktarı. ....	72



## **BİR FERİBOTTAN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARININ DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

### **ÖZET**

Deniz taşımacılığı, diğer taşımacılık türlerine kıyasla en temiz taşımacılık türü olmasına rağmen, büyüyen deniz trafiği nedeniyle gemilerden kaynaklanan emisyonlar hava kirliliğini önemli derecede etkilemektedir. Deniz taşımacılığının hava kirliliğine olan önemli katkısı nedeniyle, gemi emisyonları ve çevreye olan etkileri son yıllarda birçok çalışmada yer almıştır. Gemi egzoz emisyonlarından kaynaklanan hava kirleticileri ve sera gazları; küresel ısınmaya, asit yağmurlarına ve hava kalitesinin azalmasına neden olurlar ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere sahiptirler. Ayrıca limanların yaşam alanlarına yakın olmasından dolayı gemi kaynaklı emisyonlar karasal hava kalitesini oldukça fazla etkilerken insan sağlığını da ciddi ölçüde etkilemektedir.

Artan deniz taşımacılığına bağlı olarak gemilerin çevreye olan zararları artmıştır. Bu zararları azaltmak ve kontrol altına almak amacıyla ülkeler, uluslararası kuruluşlar ve çevre kuruluşları çeşitli düzenlemeler hazırlamış ve bu düzenlemeler kademeli olarak yürürlüğe girmiştir. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) MARPOL Ek VI, Türkiye Cumhuriyeti Ulusal Mevzuatı, Avrupa Birliği Mevzuatı ve Kaliforniya Hava Kaynakları Kurumu (CARB) limitleri gemi egzoz emisyonlarına sınırlamalar getiren düzenlemelerdendir.

MARPOL Ek IV Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi Tüzüğü'nde gemilerin egzoz gazlarından çıkan başlıca azotoksit ( $\text{NO}_x$ ) ve kükürtoksit ( $\text{SO}_x$ ) gibi emisyonların küresel ve özel bölgelerde sınırlandırılmasına ilişkin düzenlemeler getirilmiş ve emisyonlar için limit değerler belirtilmiştir. Türkiye MARPOL Ek VI sözleşmesine çok yakın zamanda Şubat 2014 tarihinde taraf olmuştur. Türkiye'nin Marpol Ek IV'ya taraf olmasıyla birlikte gemi kaynaklı emisyonların incelenmesi, ölçülmesi, azaltım metotlarının geliştirilmesi büyük önem kazanmıştır. Gemi egzoz emisyonlarının MARPOL Ek VI limitlerine uygunluğunun denetlenmesi için egzoz emisyon ölçümlerinin yapılması gerekmektedir. Egzoz emisyon ölçümleri yapılarak gemilerden yayılan ortalama egzoz emisyon miktarı belirlenerek gemilerin limitlere uygunluğu değerlendirilir. Gemilerde egzoz emisyon ölçümleri, IMO tarafından yayınlanan  $\text{NO}_x$  Teknik dokümanında tarif edilen şekilde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca gemilerin egzoz emisyonlarının MARPOL Ek VI limitlerine uygunluğunun denetlenmesi konusunda uyulması gereken prosedürler  $\text{NO}_x$  Teknik dokümanında sunulmaktadır.

Gemi egzoz emisyonlarının deneysel olarak incelendiği çalışmalar ile emisyon faktörleri belirlenmektedir. Belirlenen emisyon faktörleri ile belirli bölgeler veya global ölçekte belirli bir zamanda yayılan egzoz emisyon miktarları teorik yöntemlerle hesaplanmaktadır. Bu çalışmalarla emisyon envanterleri oluşturularak gemilerden kaynaklanan emisyonların atmosfere, çevreye ve insan sağlığına etkileri

incelenmektedir. Gemi egzoz emisyonlarının deneysel olarak çalışılması ile egzoz emisyon faktörleri geliştirilmekte ve doğrulanmaktadır.

Gemi egzoz emisyon faktörleri çeşitli kurum ve kuruluşların yaptığı çalışmalarla belirli tipteki gemiler için belirlenmiş ve yayınlanmıştır. Bununla birlikte belirli bölgelerde farklı çalışma koşullarına sahip gemiler için emisyon faktörlerinin belirlenmesi, lokal ölçekte yapılacak emisyon envanter çalışmaları için büyük önem taşımaktadır.

Yapılan bu çalışmada Marmara Denizinde yolu ve araç taşımacılığı yapan tipik bir feribottan yayılan egzoz emisyonları deneysel metotlar ile belirlenmiştir. Gemi egzoz emisyonlarının ölçümleri sonucunda NO<sub>x</sub> egzoz emisyonu 11.909 g/kWh olarak belirlenmiştir. Türkiye'nin taraf olduğu IMO kurallarına göre, feribot üretim yılı göz önünde bulundurularak seviye 1 NO<sub>x</sub> limitlerine tabidir. Gemi ana makinesinin devri olan 750 rpm değeri kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda feribotun uyması gerekli NO<sub>x</sub> egzoz emisyon limiti 11.97 g/kWh olarak belirlenmiştir. Değişik makine yüklerinde ölçülen NO<sub>x</sub> emisyon değerlerine göre spesifik NO<sub>x</sub> emisyon değeri olan 11.909 g/kWh, seviye 1 NO<sub>x</sub> limitlerine uygun görölmüştür. Ayrıca Türk Ulusal Mevzuatı, denizcilik yakıtları kükürt içeriği limitlerine göre feribotta kullanılan yakıt kükürt içeriği % 0.1'i geçmemelidir. Ölçüm yapılan feribotta kullanılan yakıtın kükürt içeriği değeri % 0.0005 olarak belirlenmiştir. Feribotta kullanılan bu yakıt yürürlükte olan denizcilik yakıtları kükürt içerik değerlerine uygun bulunmuştur. Ayrıca CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve HC spesifik emisyonları sırasıyla 0.67 (g/kWh), 611.14 (g/kWh), 1350.10 (g/kWh) ve 0.623 (g/kWh) olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada feribottan yayılan egzoz emisyon miktarları teorik yöntemlerle, literatürde yayınlanmış verilere göre ve deneysel ölçümlerde elde edilen verilere göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda feribotun bir seferinde yayılan egzoz emisyon değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda elde edilen egzoz emisyon değerleri kıyaslanmıştır. Bu sonuçlara göre azot oksit ve karbon dioksit emisyonları için yapılan hesaplamaların yakın olduğu ve değişik metotlarla yapılan hesaplamalar arasında kabul edilebilir farklar olduğu belirlenmiştir. Ancak bu çalışmada kullanılan CO, HC ve SO<sub>2</sub> emisyon faktörlerinin bu feribot tipinden yayılan emisyon miktarı hesabı için yüksek hata değerlerine sahip olduğu görölmüştür. Ayrıca yapılan çalışmalar ile bu feribot tipi için teorik egzoz emisyon hesabında kullanılabilcek, feribotun değişik seyir durumları, değişik seyir durumlarında geçen süre ve toplam seyir süresi ve değişik seyir durumlarında makine yükü değerleri belirlenmiştir. Son olarak, bir yılda feribottan yayılan emisyon miktarı aylık olarak NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve HC kirleticileri için hesaplanmıştır.

## **AN INVESTIGATION ON THE EXHAUST EMISSIONS OF A FERRYBOAT BY EXPERIMENTAL AND THEORETICAL METHODS**

### **SUMMARY**

Marine transport is the most environmentally friendly transport mode when comparing others. However marine transport has growth day by day therefore world ship fleet has increased. For this increase marine emissions emitted by ships has become important emission source considering global emission budget. Marine emissions can be listed as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>), hydrocarbons (HC), particulate matters (PM) and others.

Marine emissions affect environment, chemical composition of the atmosphere, climate, regional air quality and human health negatively. Global effects of marine emissions are mostly related climate changing and global warming. On the other hand local effects of marine emissions can be listed as water and soil acidification, acid rain, local climate changes and human health hazards. Therefore marine emissions are researched globally and locally to estimate emission inventories, to define hazardous effects of emissions, to research possible emission reduction technologies and to decrease emission rate of ships.

Due to hazardous effects of marine emissions, environment agencies, international organizations and countries make regulations to limit marine emissions. International Maritime Organization (IMO), in 1997, make a protocol to prevent air pollution from ships. MARPOL Annex VI regulates air pollution from ships. In this regulation chapter 13 and chapter 14 define respectively emission limits of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> emission is regulated according to energy efficiency design index. Yet other emission kinds are not regulated.

As a result of approval of the MARPOL Annex VI by member states, global and local NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> limits adopted. SO<sub>2</sub> limits mostly define fuel sulphur content due to source of SO<sub>2</sub> exhaust emissions is fuel sulphur content. On the other hand NO<sub>x</sub> emissions are comprised as a result of chemical reaction of nitrogen and oxygen, which are in the burning air, at high temperatures in the combustion chamber. Briefly NO<sub>x</sub> emissions are product of the combustion processes. Due to hazardous effects of NO<sub>x</sub> emissions MARPOL Annex VI chapter 13 limits engine NO<sub>x</sub> emission rates according to construction year of the ships. There are three tier about to ships NO<sub>x</sub> emissions rates.

Due to this regulations, ships have to inspect whether they are consistent with emission limits or not. NO<sub>x</sub> Technical Code define procedures to ship's emission measurement methods, calculation methods also inspection and certification methods. Direct emission measurement method is used to inspect and certification emission rate of ships. Furthermore, direct exhaust emission measurement method used to investigate emission reduction technologies, effect of different fuel usage and engine performance evaluation. On the other hand, direct emission measurement

studies provide necessary knowledge to evaluate marine emissions with emission inventory methods.

Emission inventory methods used to estimate marine emissions locally or globally. These methods can be categorized into two groups, as bottom-up method and top-down method. According to bottom-up method emission from ships are estimated with fuel consumption data and emission factor of ship. If fuel consumption data is not known according to top-down method, ship installed power, engine specific fuel consumption data, load factor and emission factor are used to calculate emission from ships. Emission factors, engine load, installed engine power and load factor data of ships are published as a result of researches. These data are limited and not include all kind of ships. As a result of several researches emission data are published for general type of ships like general cargo, tanker and container vessels. These data are useful for global emission inventory estimations. However, to calculate local emission inventories, detailed knowledge of ship characteristics are needed. Due to different operating conditions or different ship characteristics, emission data published may not reflect all kind of ships. Therefore, direct emission measurement studies provide important and precious knowledge about emission values of specific or local ships.

In this study, exhaust emissions of a typical ferryboat which is shipping between Eskihisar and Topçular ports in Marmara Sea, are measured with direct emission measurement method. NO<sub>x</sub> Technical Code procedures are followed in measurements. According to E2 test cycle, direct emission measurement are applied at different engine loads. Engine brake power, engine parameters, ambient parameters, exhaust parameters and emission concentrations are measured at every load point. At the end, specific emission value of ship is estimated according to NO<sub>x</sub> Technical Code and this value is compared with NO<sub>x</sub> emission limit. As a result, specific NO<sub>x</sub> emission value of ferryboat is estimated as 11.909 g/kWh and tier 1 NO<sub>x</sub> emission limit is estimated as 11.97 g/kWh. It is seen that ferryboat is consistent with tier 1 NO<sub>x</sub> emission limit. Besides, exhaust flow rate is calculated using two methods and results are compared at %75 and %100 engine load. Firstly, exhaust gas flow rate is directly determined by using pitot tubes. In the second method exhaust gas flow is calculated by carbon balance method given in the NO<sub>x</sub> Technical Code Appendix 6. Fuel consumption flow rate is calculated by specific oil consumption data given by engine manufacturer. As a result, when comparing these emission values estimated using two different methods it is seen that emission values calculated using carbon balance method %15.22 and %16.28 higher than emission values calculated using direct exhaust flow rate determination method respectively at %75 and %100 engine load. Differences between emission values calculated by two different methods are reasonable considering uncertainty values of test results. According to regulation marine fuel sulphur content limit is %0.1 for Marmara Sea. Sulphur content of fuel used by ferry is %0.0005, so fuel used by ferry is consistent with fuel sulphur content regulation. Further, other exhaust emissions are calculated. These exhaust emission values can be listed as, CO<sub>2</sub> (611.14 g/kWh), CO (0.67 g/kWh), SO<sub>2</sub> (0.1 g/kWh), HC (0.6 g/kWh), O<sub>2</sub> (1350.1 g/kWh).

In the second part of this study emission inventory methods are applied to estimate emission values for one trip of ferryboat. Emissions from ferryboat are calculated for one trip of ferryboat according to bottom up and top down methods. To estimate emissions from ships, cruise characteristics of ferryboat are categorized into three groups. These categories are hotelling, manoeuvring and cruise. Then hotelling time,

manoeuvring time and cruise time are determined. Ferryboat emission inventory is calculated using published load factor and emission factor values and measurement data. Then result of emission inventory estimations are compared. As a result it is seen that, calculated  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}_2$  emissions with emission factors published in literature and emission factor are calculated, give similar results with acceptable differences. However, other emission factors used to estimate emissions is not suitable for this type of ship. Because there are important differences between emission values estimated with literature data and calculated with measurement results. So other emission values should be investigated for this type of ferryboat. As a result of measurements ferryboat trip phases, phase times for one trip of ferryboat, load factor of ferryboat at every phase of trip and emission values of ferryboat are defined. Finally, emission inventory of ferryboat is calculated for  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , CO and HC emissions monthly during 1 year. Emission are calculated for 1 year as 97 (t)  $\text{NO}_x$ , 0.77 (t)  $\text{SO}_2$ , 4467.3 (t)  $\text{CO}_2$ , 6.2 (t) CO and 5.6 (t) HC.



# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Deniz taşımacılığının yıllar içinde önemli miktarlarda artmasıyla birlikte gemi sayısı ve gemi trafiğinde önemli artışlar görülmüştür. Yapılan çalışmalarda 2001 yılı dünya gemi filosunun yaklaşık 90000 gemi olduğu, 45000 geminin yük taşımacılığı için kullanıldığı diğer 45000 geminin ise feribot, balıkçı gemisi, romorkör vb. gemi tiplerinden oluştuğu görülmüştür (Eyring ve diğerleri, 2005). Yapılan bir diğer çalışmada ise 2007 yılında dünya gemi filosu yaklaşık 58000 tanesi yük ve yolcu taşımacılığı olmak üzere 108000 gemiden oluşurken, 2014 yılında yaklaşık 61000 tanesi yük ve yolcu taşımacılığı olmak üzere 115000 gemi olarak hesaplanmıştır (Smith ve diğerleri, 2014). Gemi sayısındaki artış ile birlikte 1970-2012 yılları arasında dünya gemi filosunun tükettiği yakıt yaklaşık olarak 2 kat artarken, aynı dönemde deniz taşımacılığı ile yapılan iş, taşınan yük ve yükün taşıma mesafesi değerlendirildiğinde yaklaşık 5 kat artmıştır (Smith ve diğerleri, 2014). Yapılan çalışmalardan görüleceği gibi gemi sayısı ve yapılan deniz taşımacılığı sürekli artmaktadır ve artmaya devam edeceği öngörülmektedir. Deniz taşımacılığı taşınan yüke yapılan işe ve ortaya çıkan emisyonlara göre değerlendirildiğinde en temiz taşımacılık türüdür. Ancak deniz taşımacılığındaki bu önemli artış gemilerin önemli bir kirletici kaynağı olmasına neden olurken, gemi emisyonları en az düzenleme getirilen antropojenik emisyon kaynakları olarak kalmıştır. (Eyring ve diğerleri, 2005).

Deniz taşımacılığı ve gemi trafiğindeki bu önemli artış ve getirilen düzenleme ve kurallar sebebiyle, gemi emisyonları ve çevreye olan etkileri son yıllarda birçok çalışmada yer almıştır. Analitik metotlar kullanılarak yapılan hesaplamalarda gemi kaynaklı NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve PM emisyonları global olarak veya belirli bölgeler için hesaplanmıştır (Corbett ve diğerleri, 1999; Eyring ve diğerleri, 2005; Corbett ve diğerleri, 2007; Paxian ve diğerleri, 2010; Ergin, 2011; Goldsworthy ve Goldsworthy, 2015). Yapılan çalışmalarda gemilerden yayılan NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve

PM emisyonlarının global ölçekte iklimsel ve çevresel etkileri değerlendirilirken bölgesel olarak lokal etkileri, çevre ve insan sağlığına zararları incelenmiştir.

Yapılmış olan çalışmalarda gemilerden kaynaklanan emisyonların hesabında iki metot kullanılmaktadır. Yakıt tüketimini temel alan yukarıdan aşağıya metodunda, gemiler tarafından tüketilen yakıt miktarı ve gemilerin tükettiği birim ton yakıt başına yaydığı emisyon verileri kullanılarak gemilerden yayılan emisyon miktarı hesaplanmaktadır. Gemi hareketlerini ve makine tipini temel alan aşağıdan yukarıya metodunda, gemilerin aldığı yol, gemi hızı, gemi makine tipi ve gücü ve geminin ürettiği birim güç başına birim saatte yaydığı emisyon verileri kullanılarak gemilerden yayılan emisyon miktarı hesaplanmaktadır. Ayrıca gemilerden yayılan emisyonların hassas ve doğru şekilde belirlenebilmesi için geminin çalışma koşulları, geminin tükettiği yakıt, geminin tükettiği yakıt tipi, makine tipi, makine yükü, gemi yaşı vb. veriler detaylandırılmaktadır.

Aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya emisyon hesaplama metotlarının temelini emisyon faktörleri oluşturmaktadır. Emisyon faktörleri, gemilerde emisyon ölçümleri ile, kütle dengesi yöntemi ile, fiziksel ve kimyasal hesaplamalar ile belirlenebilmektedir (Matei ve diğerleri, 2008). Avrupa ve Amerika' da çevre kuruluşları tarafından yapılan çalışmalarda gemilerde emisyon ölçümleri gerçekleştirilerek emisyon faktörleri hesaplanmıştır (Trozzi ve Vaccaro, 1998; EPA, 2000; Van Aardenne ve diğerleri, 2013). Ancak limanlarda yapılan çalışmalarda, gemilerde gerçekleştirilen emisyon ölçümlerinde elde edilen sonuçlar ile analitik emisyon hesaplamaları ile elde edilen sonuçlar arasında önemli sapmalar ve hatalar olduğu görülmüştür (Fu ve diğerleri, 2013; Melo ve diğerleri, 2013; Corbett, 2004). Gemiler için emisyon faktörü belirleme çalışmaları sonucunda ortaya çıkan emisyon faktörleri, yaygın kullanımı olan gemiler için ve çalışmaların gerçekleştirildiği bölgede faaliyet gösteren gemi tipleri için hassas sonuçlar verirken, liman bölgelerinde farklı çalışma koşullarına ve farklı özelliklere sahip gemileri temsil etmeyebilirler (Fu ve diğerleri, 2013; Cappa ve diğerleri, 2014). Bu sebeple gemilerde emisyon ölçüm çalışmaları, emisyon faktörlerinin geliştirilmesi ve detaylı emisyon faktörleri oluşturulabilmesi için önemli veriler sunmaktadır.

Gemilerde emisyon ölçümleri, gemilerin emisyon limitlerine uygunluğunu denetlemek, emisyon temizleme sistemlerini değerlendirmek, gemi makinelerinin performansını değerlendirmek ve emisyon envanter çalışmalarında kullanılan

emisyona faktörlerini belirlemek veya doğrulamak için gerçekleştirilmektedir. IMO 1997 yılında yaptığı protokol ile gemi kaynaklı hava kirliliğini önleme düzenlemesini kabul etmiş ve gemilerden yayılan NOx emisyonlarını sınırlandırmıştır. Gemilerin bu limitlere uygunluğu gemilerde emisyon ölçümleri gerçekleştirilerek kontrol edilmekte ve bu limitlere uyan gemilere emisyon limitlerini sağladığını belirten sertifika verilmektedir. Ayrıca gemi kaynaklı emisyonları azaltmayı amaçlayan düzenlemeleri değerlendirmek ve gemi kaynaklı emisyonları azaltıcı ve önleyici sistemleri değerlendirmek için gemilerde emisyon ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Örneğin; Agrawal ve diğerleri (2008) yaptıkları çalışmada CARB tarafından uygulanan kıyılarda gemilerden yayılan emisyonları azaltmayı amaçlayan kıyıda gemi hızının azaltılması yöntemini incelemişlerdir. Yapılan diğer çalışmalarda yakıtın emisyonlara etkisi gemide emisyon ölçümü alınarak değerlendirilmiştir (Roskilly ve diğerleri, 2008; Winnes ve Fridell, 2009). Jayaram (2010) yaptığı çalışmada gemilerde emisyon azaltıcı ve temizleyici sistemleri, gemilerde gerçekleştirdiği emisyon ölçümleri ile değerlendirmiştir. Gemi emisyon ölçümleri gemilerin emisyon faktörlerini belirlemek için en sık başvurulan yöntemdir. Yukarıda bahsedildiği gibi Avrupa ve Amerika' da yapılan çalışmalarda gemilerde emisyon ölçümleri gerçekleştirilerek emisyon faktörleri hesaplanmıştır (Trozzi ve Vaccaro, 1998; EPA, 2000; Van Aardenne ve diğerleri, 2013).

Gemilerde emisyon ölçümleri, MARPOL EK VI Düzenleme 13, Gemi Dizel Makinelerinden Yayılan Azot Oksit Emisyonlarının Kontrolü Teknik Dokümanı' nında (NOx Teknik Dokümanı) tarif edildiği şekilde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ISO 8178 Silindirli İçten Yanmalı Motorların Egzoz Emisyonları Ölçümü Standardı, literatürde gemilerde emisyon ölçümlerinde kullanılan diğer önemli teknik dokümandır. NOx Teknik Dokümanı ve ISO 8178 Standardı gemilerde emisyon ölçümlerini, ölçülecek parametreleri ve gemi emisyonları hesaplamalarını tarif etmektedir. Gemilerde emisyon ölçümleri ,gemi de üretilen gücün , egzoz gazı konsantrasyonunun, NOx Teknik dokümanında tarif edilen makine parametrelerinin ve egzoz baca gazı debisinin ölçümünü kapsamaktadır (IMO, 2008). Ayrıca NOx Teknik Dokümanı ve ISO 8178 Standardı gemilerde emisyon ölçümlerinde karşılanması gerekli hassasiyet ve doğruluk değerlerini belirtmektedir.

Bu çalışmanın amacı Marmara Denizinde faaliyet gösteren bir feribotta emisyon ölçümleri gerçekleştirilerek feribottan yayılan egzoz emisyonlarını belirlemektir.

Feribotta güç ölçümü, egzoz gazı konsantrasyon ölçümü, NO<sub>x</sub> Teknik dokümanında tarif edilen makine parametreleri ölçümü ve egzoz debisi ölçümü gerçekleştirilecek ve gemiden yayılan emisyonlar birim güç başına birim saatte gemiden yayılan emisyonlar cinsinden belirlenecektir. Sonuca etki eden belirsizlik kaynakları değerlendirilecek ve belirsizlik analizi yapılarak verilen sonuçlardaki hata değerlendirilecektir. Çalışmanın bir diğer amacı analitik emisyon hesaplama metotlarını ve literatürde benzer türde gemiler için belirtilmiş olan emisyon faktörlerini kullanarak gemiden yayılan emisyonların belirlenmesidir. Ayrıca bu çalışmada ölçümler sonucunda belirlenen gemiden yayılan emisyon değerleri, analitik yöntemler ile hesap edilen gemiden yayılan emisyon değerleri ile karşılaştırılacaktır.

## **1.2 Literatür Taraması**

Deniz taşımacılığının ve gemi sayısının yıllar içinde önemli miktarlarda artması sonucunda gemiler önemli bir kirletici kaynağı haline gelmiştir. Gemilerden yayılan emisyonların insan sağlığına ve çevreye zararları ile ilgili çok sayıda araştırma ve çalışma yapılmıştır.

Gemi emisyonlarının global etkilerini değerlendirmek için yapılan emisyon envanter çalışmalarında, belirli bir alanda veya global olarak gemilerden yayılan emisyonlar analitik metotlarla hesaplanmıştır (Corbett ve diğerleri, 1999; Eyring ve diğerleri, 2005; Corbett ve diğerleri, 2007; Paxian ve diğerleri, 2010; Ergin, 2011; Goldsworthy ve Goldsworthy, 2015). Yapılan çalışmalarda gemilerden yayılan emisyonların global ölçekte iklime etkileri değerlendirilmiş, gemi kaynaklı emisyonların insan faaliyetlerinden kaynaklanan toplam emisyon miktarına oranı belirlenmiştir. Ayrıca belirli bir bölgede yoğunlaşan gemi trafiğinden yayılan emisyonların sebep olduğu bölgesel etkiler, insan sağlığına ve çevreye zararları araştırılmıştır.

Yoğun gemi trafiğine sahip liman şehirlerinin aynı zamanda yoğun nüfusun yaşadığı şehirler olması sebebiyle lokal çalışmalar bu özel alanlarda yoğunlaşmıştır (Lu ve diğerleri, 2006; Ergin, 2011; Van der Zee ve diğerleri, 2012; Goldsworthy ve Goldsworthy, 2015). Yapılan bir çalışmada limanda 20 gemiden yayılan NO<sub>x</sub> emisyonları incelenerek hava kalitesine olan etkileri değerlendirilmiş, emisyon kaynağına yakın bölgelerin hava kalitesinin düştüğü belirlenmiştir (Abdul-Wahab ve

diğerleri, 2008). Bu çalışmadan liman bölgeleri ve boğazların gemi kaynaklı emisyonlar açısından özel olarak incelenmeye ihtiyaç duyulan bölgeler olduğu anlaşılmaktadır. Amerika'da Boston Limanı için yapılan emisyon envanter çalışmasına göre limanda gemilerden yayılan azot oksit emisyonlarının %49' u römorkör, balıkçı tekneleri, gezinti tekneleri ve feribotlardan salınmaktadır (Nescaum, 2006). Amerika' da Los Angeles Limanı için yapılan emisyon envanter çalışmasında ise gemilerden yayılan azot oksit emisyonlarının %33' ü römorkör, balıkçı tekneleri, gezinti tekneleri ve feribotlardan salınmaktadır (Starcrest, 2005).

Melo ve diğerleri (2013) limanda faaliyet gösteren römorkörlerden yayılan emisyonlar üzerine yaptıkları çalışmada, römorkörlerden yayılan emisyonları literatürde belirtilmiş 3 farklı emisyon faktörleri ile hesaplamış ve anlık emisyon ölçümleri ile emisyonları belirlemiştir. Ayrıca yapılan ölçümler ile römorkörlerin limanda çalışma karakteristikleri ile ilgili veriler elde edilmiştir. Emisyon faktörleri ile yapılan hesaplamalar ile anlık olarak belirlenen emisyon sonuçlarının benzer bir davranış sergilediği ancak emisyon faktörleri ile yapılan hesaplamaların %10-50 aralığında daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür.

Cooper (2003) yaptığı çalışmada gemiler için belirlenen emisyon faktörlerinde ana makinelerin dikkate alındığını, limanda demirleme durumunda kullanılan yardımcı makinelerin emisyon faktörleri ile ilgili eksiklik olduğunu belirtmiştir. Limanda demirlemiş olan 6 geminin yardımcı makinelerinden emisyon ölçümleri gerçekleştirmiş ve benzer feribotların yardımcı makinelerinden yayılan emisyonların hesaplanabileceği detveyt tonaja bağlı formül sunmuştur.

Cappa ve diğerleri (2014) yaptığı çalışmada balıkçılık ve denizcilik araştırmalarında kullanılan bir geminin farklı hızlarda yaydığı emisyonları uzaktan algılama metodu ile belirleyip hızlara bağlı emisyon faktörlerini sunmuştur. Kıyı bölgesinde ve iç sularda faaliyet gösteren küçük teknelerin hız ve yük karakteristiklerinin açık denizlerde seyir yapan gemilerden farklı olduğu belirtilmektedir. Bu sebeple kıyı bölgesinde ve iç sularda yapılan emisyon hesaplamalarında kullanılan emisyon faktörlerinde küçük teknelerin değişken hız karakterinin göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmektedir.

Khan ve diğerleri (2013) yaptığı çalışmada 2 zamanlı bir dizel makineden yayılan NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve PM emisyonlarını ISO 8178 ve Çevre Koruma Ajansı (EPA)

standartlarına göre belirlemiştir. Spesifik emisyon değerlerini EPA 2009 ve ISO 8178-4 standartlarına göre belirleyerek emisyon değerlerini değerlendirmiştir. Emisyon ölçümlerini iki değişik seferde gerçekleştirmiş ve değişik makine yüklerinde ölçümler olarak NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve PM emisyonları için emisyon faktörlerini belirlemiştir.

Ghosh ve Risley (2012) yaptığı çalışmada 600 kW gücünde gemi yardımcı makinesinde ultra düşük kükürt içerikli yakıt ve yarı yarıya biodizel ultra düşük kükürt içerikli yakıt kullanımı sonucunda makineden yayılan NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve PM emisyonlarını ISO 8178 standardına ve NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanına göre farklı makine yüklerinde ölçmüştür. %50 biodizel karışimli yakıt kullanımı sonucunda NO<sub>x</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında sırasıyla %10, %18, ve %5 düşüş tespit etmiştir. Ayrıca değişik makine yüklerinde ve ortalama emisyon faktörlerini sunmuştur.

Agrawal (2009) çalışmasında değişik büyüklüklerde 2 konteyner gemilerinde ve bir tankerde ISO 8178 standartlarında göre emisyon ölçümleri gerçekleştirmiştir. Emisyon ölçümleri panamaks sınıfı ve panamaks üstü sınıfı olan konteyner gemileri ve suzmaks sınıfı tanker gemisi ana makinelerinde değişik yük değerlerinde gerçekleştirilmiştir. NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve PM emisyonları için her bir gemi için belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada ISO standartlarında belirtilen %25, %50 %75 ve %100 makine yüklerine ek olarak %8 makine yükünde ölçüm alınmış ve ana makinenin %8 makine yükünde emisyon değerleri belirlenmiştir.

Fu ve diğerleri (2013) yaptığı çalışmada Pekin ile Hangzhou kentlerini birbirine bağlayan Büyük Kanal' da 7 kargo gemisinde emisyon ölçümleri gerçekleştirmiştir ve deneysel olarak ortalama emisyon faktörlerini belirlemiştir. Çalışma sonucunda ortalama NO<sub>x</sub> emisyon faktörünün, daha önce yayınlanmış çalışmalarda belirtilen emisyon faktörleri ile karşılaştırıldığında 1.4-4.3 kez yüksek olduğu görülmüştür. Fu, yerel ölçekte yapılan analitik emisyon hesaplamalarında, Avrupa ve Amerika kaynaklı çalışmalarda belirlenen emisyon faktörlerini kullanmanın bölgesel koşulları temsil etmeyebileceğini belirtmektedir. Bu çalışmada iç taşımacılıkta ve özel kullanım koşullarında kullanılan gemilerin emisyonlarının deneysel olarak belirlenmesinin önemi görülmektedir. Deneysel yöntemler ile belirlenen emisyon değerleri, bölgesel emisyon envanter çalışmalarının doğruluğunu göstermek ve daha hassas emisyon envanter çalışmaları yapabilmek için son derece önemli veriler sunmaktadır.

Tzannatos (2010)'un Piraeus Limanı için yaptığı emisyon envanter çalışmasında aşağıdan yukarıya metodu ile liman bölgesinde gemi kaynaklı emisyonlar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda yalnızca Piraeus Limanı'nda gemilerden yayılan emisyonların miktarı belirlenmiştir. Piraeus Limanı'nda gemilerden yayılan NOx emisyonları ulusal ölçekte araçlardan yayılan NOx emisyonlarının %1.2'sini, SO2 emisyonları ulusal ölçekte araçlardan yayılan SO2 emisyonlarının %2.5'ini oluşturduğu belirtilmiştir. Tzannatos (2010) global ölçekte gemilerden yayılan emisyonlara kıyasla, limanlarda gemilerden yayılan emisyonların küçük yüzdeye sahip olduğunu belirtmiştir. Ancak bölgesel ölçekte incelendiğinde, yoğun nüfusun yaşadığı liman şehirlerinde gemilerden yayılan emisyonların toplam bölgesel emisyonlara kıyasla yüksek değerlere ulaştığını belirtmektedir. Bu sebeple liman şehirlerinin emisyon envanter çalışmalarında özel olarak incelenmesi gerekli bölgeler olduğu vurgulanmaktadır. Limanlarda gemi hareketleri ve emisyon karakteristikleri ile ilgili bilgi yetersizliği olduğu belirtilmektedir.

Bölgesel ve global olarak yapılan emisyon envanter çalışmalarında gemilerden yayılan emisyon miktarı, emisyon faktörleri kullanılarak belirlenmektedir. Emisyon faktörleri çeşitli çalışmalarda değişik gemi türleri için sunulmuştur (Van Aardenne ve diğerleri, 2013; Smith ve diğerleri, 2014; Ritchie ve diğerleri, 2005; Psaraftis, 2015). Van Aardenne ve diğerleri (2013) ve Smith ve diğerleri (2014) aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya metodu için emisyon faktörlerini bazı kirleticiler için yakıtı makine tipine bağlı olarak sunmuştur. Ritchie ve diğerleri (2005) emisyon faktörlerini aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya metodu için değişik gemi türlerine göre belirlemiştir. Psaraftis (2015) iç sularda denizcilik faaliyetlerinde kullanılan gemiler için NOx, CO, HC ve PM emisyon faktörlerini aşağıdan yukarıya metodu için belirlemiştir. Bu emisyon faktörleri kullanılarak global olarak ve bölgesel çalışmalar yapılmıştır.

Yoğun deniz trafiğine sahip liman bölgelerinin başında İstanbul ve Çanakkale Boğazları ve Marmara Denizi gelmektedir. Ergin (2011) yaptığı çalışmada Marmara Denizi ve Türk Boğazlarındaki gemi kaynaklı emisyonlar, 2010 yılı AIS verileri ve ulusal veriler kullanılarak hesaplanmıştır. Gemi hareketleri, makine devir sayısı, makine ve yakıt tipine bağlı olan aşağıdan-yukarıya yaklaşım metodu kullanılarak, NOx, SOx, PM2.5, PM10 ve NMVOC dahil yirmi farklı emisyon değeri hesaplanmıştır. NOx için 56,49 kton/yıl, SOx için 18,57 kton/yıl, toplam PM

emisyolları için 8,17 kton/yıl, CO<sub>2</sub> emisyonu için 2.518,2 kton/yıl olarak hesaplanmıştır. Aynı çalışmada birim kıyı uzunluğu-emisyon yoğunluğu parametreleri değerlendirildiğinde Marmara Denizi ve Türk Boğazlarının emisyon yoğunluğunun, Karadeniz, Akdeniz ve Baltık Denizinden oldukça fazla olduğu grlmştr. Marmara Denizi ve Türk Boğazlarındaki gemi trafiği ve bölgede yaşayan nüfus yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda gemi kaynaklı emisyonlar ile ilgili daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

İstanbul ve Çanakale Boğazları ve Marmara Denizinde yapılan diğer çalışmalarda, Kesgin ve Vardar (2001) İstanbul Boğazında yayılan azot oksit emisyonlarının yaklaşık %40' ı yolcu taşımacılığında kullanılan gemiler tarafından salındığını hesaplamıştır. Deniz ve diğerlerinin 2008 yılında yaptığı çalışmada İstanbul Boğazında yayılan azot oksit emisyonlarının yaklaşık %45'inin yolcu taşımacılığında kullanılan gemiler tarafından salındığı belirtilmiştir. Yerel deniz taşımacılığı, limanda faaliyet gösteren tekneler ve balıki teknelerinin, liman şehirleri için gemi kaynaklı emisyonların önemli bir bölümünü oluşturduğu görülmektedir. Liman şehirleri için yapılacak emisyon envanter çalışmalarında bu tür teknelerin emisyonlarının doğru şekilde hesaplanması gerekmektedir. Ancak yerel deniz taşımacılığında kullanılan tekneler, limanda faaliyet gösteren tekneler ve balıki tekneleri liman şehirlerinin yapısına ve bölgenin teknolojik gelişmişlik düzeyine göre değişkenlik gösteren emisyon salınım karakterlerine sahiptir. Bu sebeple limanda ve kıyıya yakın faaliyet gösteren bu tip teknelerin emisyon envanter hesabında doğru emisyon faktörlerinin kullanılması son derece önemlidir.

Gemi kaynaklı emisyonlara getirilen kısıtlamalara uyulması ve gemilerin kurallara uygunluğunun denetlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple emisyon oluşumu öncesi ve sonrası iyileştirme sistemleri, çift tip yakıt kullanan makine üretimleri, alternatif veya kükürt içeriği düşük yakıt kullanımları emisyon kısıtlamalarına uyabilmek için başvurulan başlıca yöntemlerdendir (Roskilly ve diğerleri, 2008; Yang ve diğerleri, 2012; Winnes ve Fridell, 2009; Blatcher ve Eames; 2013). Gemi kaynaklı emisyonlar arasında en çok çalışma yapılan emisyon türleri NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ve PM' dir. SO<sub>2</sub> emisyonları yakıt içerisindeki kükürt miktarından kaynaklanmakta olup kükürt içeriği düşük yakıt kullanımıyla giderilebilmektedir. Ancak yakıt maliyetlerinden dolayı scrubber vb. alternatif sistemler de tercih edilmektedir. NO<sub>x</sub> emisyonları yanma havasındaki azotun yüksek sıcaklıkta oksijen ile tepkimesinden

oluşmakta olup, NOx emisyonlarının kontrolü için birincil ve ikincil sistemler bulunmaktadır. Gemi kaynaklı PM emisyonları ile ilgili henüz kurallar düzenlenmemiş olup PM oluşum mekanizmaları, SO2 ve NOx temizleme sistemlerinin PM üzerindeki etkileri vb çalışmalar yapılmaktadır.

Gemilerden yayılan emisyonların denetlenmesi konusunda Uluslararası denizcilik örgütü (IMO) gemi kaynaklı emisyonların ölçümünü tarif eden NOx Teknik dokümanını 2008 yılında yayınlamıştır. Ayrıca içten yanmalı motorların farklı koşullar altında emisyon ölçümleri ile ilgili ISO 8178 1-11 standartları bulunmaktadır. Bu dokümanlar çalışma şartlarında veya makine fabrika koşullarında emisyon ölçüm prosedürlerini tarif etmektedir. Gemilerin emisyon kurallarına uygunluğunun denetlenerek sertifika verilmesi işlemlerinde NOx Teknik dokümanı kullanılmaktadır. Ayrıca yapılan deneysel ölçümlerde karşılaştırılabilirlik sağlamak için bu teknik dokümanlar ve standartlar takip edilmektedir (Cooper, 2003; Roskilly ve diğerleri, 2008; Agrawal ve diğerleri, 2008; Melo ve diğerleri, 2013). Ayrıca deneysel ölçüm metotlarına ek olarak henüz geliştirilmekte olan ölçüm metotları bulunmaktadır. Gemiye çıkmayı gerektirmeden uzaktan algılama ile ölçümü amaçlayan bu metotlar yüksek belirsizlik değerlerine sahiptir ve geliştirilmesi gereklidir (Lu ve diğerleri, 2006; Cappa ve diğerleri, 2014; Pirjola ve diğerleri, 2014; Lööv ve diğerleri, 2014).



## **2. GEMİLERDEN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARI**

Gemilerin %67' si dört devirli dizel makineler, %26' sı ise 2 devirli dizel makineler olmak üzere yaklaşık %93' lük oranı dizel makinelerle sevk edilmektedir (Corbett, 2003). Bazı çalışmalarda, Trozzi (2011) ve Van Aardenne ve diğerleri (2013) dünya gemi filosunda dizel makine kullanımı oranını %99 olarak belirtmiştir. Dolayısıyla gemilerden yayılan egzoz emisyonlarının tamamına yakını gemilerde kullanılan dizel makinelerden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde gemilerin egzoz emisyonlarının oluşumu ve emisyon türleri, egzoz emisyonlarının zararları ve gemi emisyonları ile ilgili kural ve limitler anlatılacaktır.

### **2.1 Egzoz Emisyonu Oluşumu ve Egzoz Emisyonu Türleri**

Gemilerin sevki ve gemilerde elektrik üretimi amacıyla dizel makineler kullanılmaktadır. Dizel makinelerde tüketilmekte olan dizel yakıtlar büyük oranda yapısında karbon ve hidrojen kapsayan karbonlu hidrojen olarak kabul edilebilirler. Dolayısıyla tam yanma sırasında karbonlu hidrojenlerin tümü karbon dioksit ve su buharı oluşturur. Ancak yanmanın tam olmaması silindirlere karbon monoksit oluşumuna da neden olur. Ayrıca tam yanma olmaması durumunda yakıtın bir kısmı yanmamış hidrokarbonlar olarak egzozdan atılır. Silindirlere fazla hava verilmesi nedeniyle azot oksitleri oluşur. Azot oksitlerin bir diğer oluşum sebebi yanma olayı anında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklardır. Kükürt oksitler ise yakıtların yapısındaki kükürt nedeniyle oluşmaktadır. (Küçükşahin, 1999).

Yanma havası kimyasal içerik olarak atmosferik havanın kimyasal bileşimi ile aynı kabul edilebilir. Bu şartlarda yanma havasının kimyasal bileşimi Çizelge 2.1' de verildiği gibidir.

**Çizelge 2.1 : Yanma havası tipik kimyasal bileşimi.**

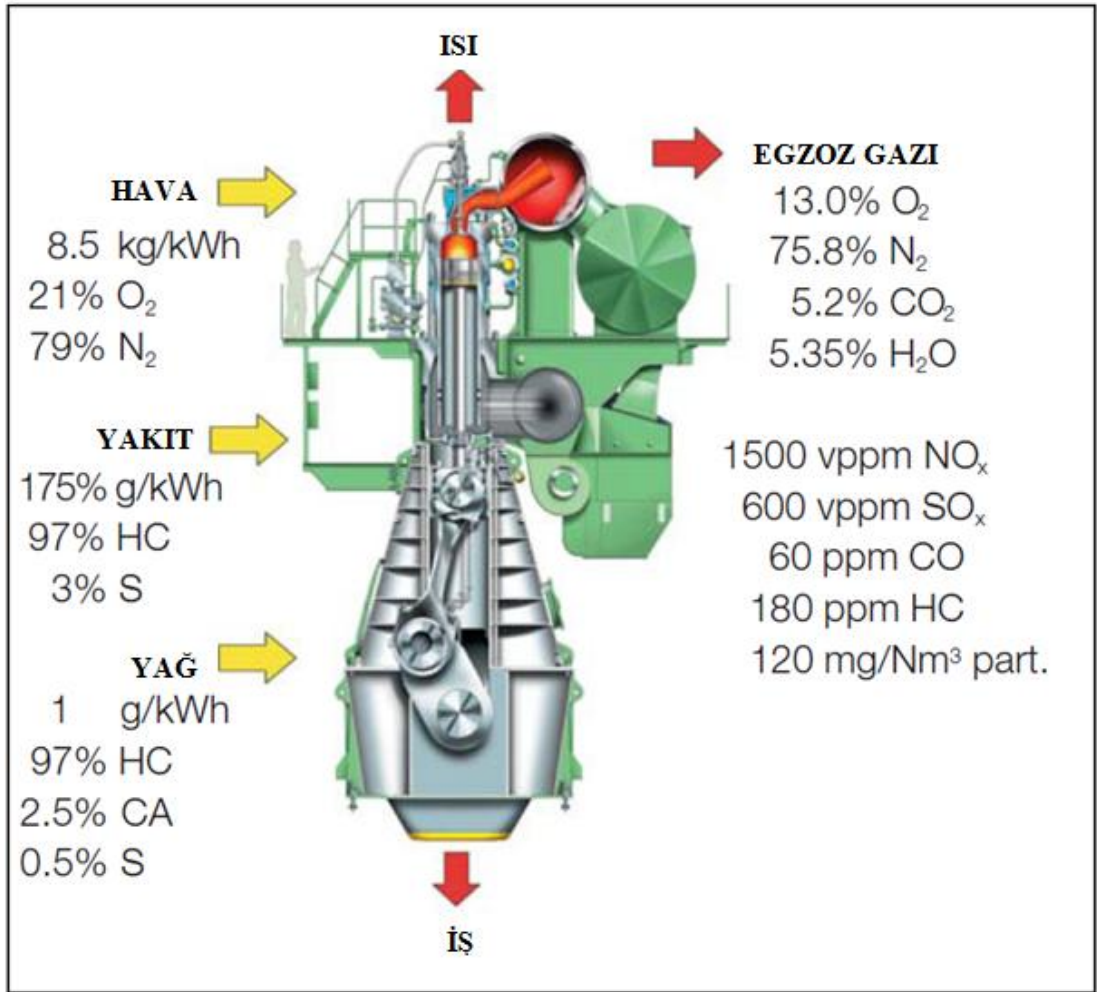
Elementler ve Bileşikler	Havadaki Miktarı
Azot	%78.09
Oksijen	%20.95
Argon	%0.93
Su Buharı ve Diğerleri	< %0.1

Gemilerde deniz tipi dizel yakıtlar (distillate fuel oil) ve deniz tipi ağır yakıtlar (residual fuel oil) olmak üzere başlıca iki tür yakıt kullanılmaktadır. Yakıt tüketimi fazla olan büyük taşıma kapasitesine sahip, düşük devirli dizel makinelerle sevk edilen gemiler genellikle ağır yakıt (residual fuel oil) kullanmaktadırlar. Makine devri yükselip makine boyutları küçüldükçe daha kolay yanma özelliğine ve daha düşük sülfür içeriğine sahip dizel yakıtlar (distillate fuel oil) kullanılmaktadır. Dizel yakıtların (distillate fuel oil) ve ağır yakıtların (residual fuel oil) içerdiği element miktarları Çizelge 2.2' de verilmektedir. Çizelge 2.2' de verilen değerler IMO (2008) ve ISO 8178 (2008)' dan alınmıştır.

**Çizelge 2.2 : Gemi yakıtlarının tipik kimyasal bileşimi.**

	Karbon (C)	Hidrojen (H)	Azot (N)	Oksijen (O)
Distile Yakıt	%86,2	%13.6	%0.00	%0.00
Ağır Yakıt	%86.1	%10.9	%0.4	%0.00

Dizel makinelerde yakıt farklı püskürtme sistemleri ile yüksek basınç altında sıkıştırılarak yüksek sıcaklığa eriştirilmiş hava içerisine püskürtülür. Silindirde sıkıştırılmış havanın sıcaklığı, yakıtın tutuşma sıcaklığından yüksek olduğu için yanma başlar ve iş oluşturulur (Küçükşahin, 1999). Dizel makinelerde hava ve yakıtın yanması sonucunda ısı oluşmakta, iş üretilmekte ve egzoz gazları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca dizel makinelerde yanma odasına sızan bir miktar yağlama yağı da hava ve yakıt ile birlikte yakılmaktadır. Yanma işleminin girdileri ve çıktıları iki devirli bir dizel makine için yaklaşık değerleri ile birlikte Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1 : İki devirli bir dizel makinenin tipik emisyon değerleri (Man, 2004).

### 2.1.1 Azot oksit emisyonu

Azot oksitler yanma havasında bulunan oksijen ve azotun silindir içerisinde yüksek sıcaklıklara maruz kalması sonucunda oluşurlar. Azot oksit ve azot dioksit olarak iki tür bileşik oluşmakta ve bu bileşikler azot oksit emisyonu olarak belirtilmektedir. Azot oksit emisyonları oluşumunu etkileyen diğer önemli faktör yanma odasında yakıt hava karışımının miktarıdır. Ayrıca silindir yapısı, makine özellikleri ve makinede olası arızalar azot oksitleri oluşumunu etkilemektedir. Denklem 2.1 makinede gerçekleşen yanma işlemindeki hava yakıt oranının, teorik olarak hesaplanan yanma olayındaki hava yakıt oranına bölünmesini ifade eder. Bu katsayı makinede gerçekleşen yanma olayında hava yakıt karışımını ifade etmek için kullanılır.

$$\phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{gerçek}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{stoykiyometrik}} \quad (2.1)$$

Yanma odasında zengin karışım varsa yani gerçek hava yakıt karışım oranı, stoykiyometrik hava yakıt karışım oranından az olduğu durumda NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumu azalmaktadır. Tam aksine gerçek hava yakıt karışım oranı, stoykiyometrik hava yakıt karışım oranından fazla olduğu durumlarda NO<sub>x</sub> emisyonu oluşumu artmaktadır. Bir makinede hava yakıt karışım katsayısına bağlı emisyon oluşumu aşağıda Çizelge 2.3' de verilmektedir.

**Çizelge 2.3 :** Değişik hava yakıt oranlarında emisyonlar (Caterpillar, 2007).

Ayarlar	NO <sub>x</sub>	CO	THC	NMHC
%10 Zengin (rich) Karışım	5.0	40.0	2.0	0.30
Stoykiyometrik	10.0	10.0	1.5	0.20
%10 Fakir (lean) Karışım	20.0	1.0	1.0	0.15

### 2.1.2 Kükürt oksit emisyonu

Dizel makinelerde kullanılan yakıtlar, yakıt içerik tablosunda verilen elementlere ek olarak bir miktar kükürt içermektedir. Yakıt içeriğinde bulunan kükürtler yanma odasında yanarak kükürt dioksit ve az miktarda kükürt trioksit bileşikleri oluşmaktadır. Oluşan SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub> bileşiklerinden bir miktarı su ile tepkimeye girerek H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bileşiklerini oluşturmaktadır. Bu bileşik oluşumlarının kimyasal denklemleri Denklem 2.2, Denklem 2.3 ve Denklem 2.4 verilmektedir.



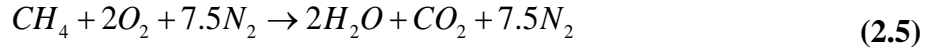
Kükürt oksit emisyonları yakıt içindeki kükürt miktarına bağlıdır. Dolayısıyla yakıt içindeki kükürt miktarı düşürülerek kükürt oksit emisyonları kontrol edilebilmekte ve düşürülebilmektedir. Gemiler tarafından emisyon kontrol alanı olmayan bölgelerde 2007-2012 yılları arasında kullanılan yakıt kükürt içeriği Smith ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur, bu değerler Çizelge 2.4'te verilmiştir

**Çizelge 2.4 : Gemi yakıtlarında ortalama kükürt içeriği.**

Yıl	2007	2008	2009	2010	2011	2012
ECA Bölgeleri Dışında HFO Kükürt İçeriği	2.42	2.37	2.6	2.61	2.65	2.51

### 2.1.3 Karbon dioksit emisyonu

Karbon dioksit, fosil yakıtların yanması sonucunda su ile birlikte oluşması beklenen bileşiktir. Denklem 2.5' te örnek bir fosil yakıtın yanma olayının kimyasal denklemi verilmiştir.



Trozzi 1998 yılında yaptığı çalışmada düşük devirli ve orta devirli makinelerde tüketilen birim ton yakıt başına oluşan karbondioksit miktarı sırasıyla 3165 kg ve 3250 kg olarak belirtilmektedir. Gemilerden yayılan karbondioksit miktarı makinelerde yakılan yakıt miktarı arttıkça artmaktadır. Gemilerden yayılan karbon dioksit miktarı enerji etkinliği kapsamında değerlendirilmektedir.

### 2.1.4 Karbon monoksit emisyonu

Dizel makinelerde yanma sıcaklığı yeterince yükselmediğinde az miktarda karbon monoksit oluşabilmektedir. Karbon monoksitin bir diğer oluşum sebebi yanma odasında yeterince hava olmamasıdır. Yakıt karışımı tablosunda görülebileceği gibi hava yakıt karışımının, stoykiyometrik hava yakıt karışımından az olduğu durumda karbon monoksit seviyesi artmaktadır. Ayrıca hava yakıt karışımının, stoykiyometrik hava yakıt karışımına eşit olduğu durumlarda da karbon monoksit oluştuğu görülmektedir. Yanma odasında mükemmel bir karışım sağlanamaması karbon monoksit oluşumuna sebep olan başlıca nedenlerdendir. Hava yakıt karışımı, stoykiyometrik hava yakıt karışımından fazla olduğu durumlarda ise oluşan karbon monoksit miktarının düştüğü görülmektedir.

### **2.1.5 Hidrokarbon emisyonu**

Gemi egzozlarından yayılan hidrokarbon emisyonları, silindirde tam yanma olmaması durumunda oluşmaktadır. Yanma havasındaki oksijen yetersizliği ve düşük sıcaklıklar tam yanmama durumuna yol açan başlıca sebeplerdendir. Ayrıca dizel makinelerde püskürtme sistemindeki sorunlar hidrokarbon emisyonuna sebep olmaktadır. Bunlara ilave olarak buharlaşması sonucunda da hidrokarbon emisyonu oluşmaktadır.

### **2.1.6 Partikül madde emisyonu**

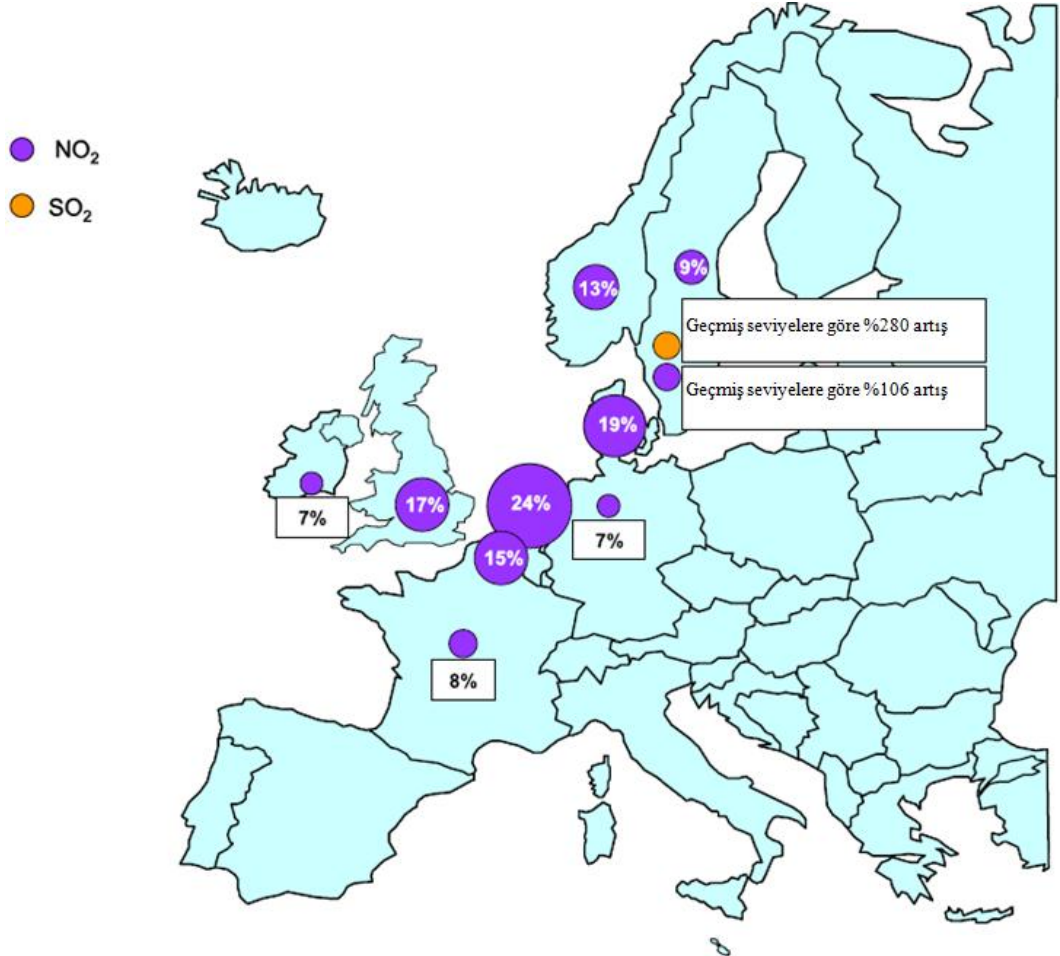
Egzoz gazında askıda bulunan organik ve inorganik yapıdaki taneciklerdir. Partikül maddeler çekirdek modu partikülleri ve birikim modu partikülleri olmak üzere iki farklı mekanizma sonucu açığa çıkmaktadır. Çekirdek modu partikülleri büyük ölçüde yoğunlaşmış hidrokarbon ve sülfatlardan oluşmaktadır. Sülfat oluşumları Denklem 2.3' te ve Denklem 2.4' te verilmiştir. Birikim modu partikülleri büyük oranda karbon içeren parçacıklar ile diğer katı parçacıkların yanma işlemi esnasında birikmesiyle oluşur (Ergin, 2011; Lamas ve Rodriguez, 2012).

Partikül maddelerin tamamına yakını 10 mikron veya daha küçük çapta parçacıklardan oluşmaktadır. Partikül maddelerin kütleli olarak yaklaşık % 94' ü 2,5 mikron çapından küçük parçacıklardan oluşmaktadır.

## **2.2 Egzoz Emisyonlarının Çevreye ve İnsan Sağlığına Zararları**

Dizel yakıtların yanması sonucunda bir çoğu çevreye ve insan sağlığına zararlı gazlar, partiküller ve organik bileşikler egzoz olarak çevreye yayılmaktadır. Ayrıca gemiler tüketilen yakıt miktarı başına üretilen egzoz emisyonları düşünüldüğünde diğer ulaşım araçlarına göre yüksek miktarda emisyon oluşturmaktadır. Eyring ve diğerleri (2005) taşımacılıkta tüketilen toplam yakıt miktarını hesaplamıştır. Buna göre gemiler taşımacılıkta tüketilen toplam yakıtın %16' lık kısmını tüketmektedir. Ancak taşımacılıktan kaynaklanan toplam CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ve PM emisyonlarının sırasıyla %16, %42, %73 ve %45 i gemilerden yayılmaktadır. Yapılan bir diğer çalışmaya göre dünyada insan faaliyetleri sonucunda üretilen toplam CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık %3'lük kısmı gemilerden salınmaktadır. Özetle gemilerden, çevre ve insan sağlığına zararlı egzoz emisyonları yayılırken bu emisyonların miktarları global ölçekte azımsanmayacak miktarlardadır.

Van Aardenne ve diğeri (2013) yayınladığı raporda denizcilikten kaynaklanan emisyonların insan sağlığı, ekosistem ve hava kalitesi üzerindeki potansiyel tehlikelerini incelemişlerdir. Ayrıca denizcilikten kaynaklanan emisyonların iklim değişimi üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir. İnsan sağlığına zararlı olduğu iyi bilinen vanadyum, nikel, siyah karbon ve polisiklik aromatik hidrokarbonların gemi aktiviteleri sonucunda yayıldığı belirtilmiştir. Ayrıca gemilerden yayılan azot oksit ve kükürt oksit emisyonlarının ekosistem üzerinde asitleşme ve ötrofikasyona katkısının olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür. Şekil 2.2' de gemi emisyonlarının Avrupa ülkelerindeki azot oksit ve kükürt dioksit emisyonlarına katkısı sunulmuştur. Hava kalitesi üzerine etkilerde, kükürt oksitler ve partikül maddelerden kaynaklanan yer seviyesinde ozon oluşumundan bahsedilmiştir. Global ölçekte gemilerden yayılan egzoz emisyonlarının sebep olduğu radyatif etkiler değerlendirilmiştir. Gemilerden yayılan emisyonlar iklim üzerinde soğutucu ve sıcaklığı yükseltici etkilere sebep olabilmektedir.



Şekil 2.2 : Gemi emisyonlarının toplam miktara oranı (Viana ve diğeri, 2014).

EPA (2000) tarafından yayınlanan bir çalışmada gemilerden kaynaklanan sağlık sorunları ve çevre sorunları, ozon oluşumu, partikül madde, karbon monoksit ve egzoz dumanı grupları altında incelenmiştir. Yer seviyesinde ozonun hidrokarbonlar ve azot oksitler sebebiyle oluştuğu belirtilmekte ve ozona maruz kalındığında sağlık üzerinde yol açtığı zararlı etkilerden söz edilmektedir. Partikül maddelerin prematüre ölümlere, akciğer rahatsızlıklarına ve kardiyovasküler problemlere neden olmaktadır.

Corbett ve diğerleri (2007) yılında göğüs hastalıkları ve akciğer kanseri kaynaklı ölümler üzerinde yaptığı araştırmada, 19000 ile 64000 göğüs rahatsızlığı ve akciğer kanseri kaynaklı ölümün gemilerden yayılan partikül maddelerden kaynaklandığını belirtmiştir.

Doug (2004), egzoz emisyonlarının sebep olduğu zararları incelemiştir. Gemi egzoz emisyonlarının farklı türlerinden kaynaklanan zararlar aşağıdaki gibidir.

- Azot oksit emisyonlarının kanserojen olduğunu ve şehirler üzerinde sise ve asit yağmurlarına dolayısıyla toprağın asitleşmesine neden olduğunu belirtmektedir.
- Kükürt oksitler, kötü kokuya sahiptir ve asit yağmurunun başlıca kaynağıdır. Ayrıca asit yağmurları sonucunda yer altı sularının asitleşmesine, göl ve nehirlerde alkalınların azalmasına yol açarlar. Toprakta fosfat eksikliğine yol açarak temel besinlerde eksikliğe neden olurlar.
- Karbon monoksitler son derece zararlı ve toksik etkilere sahiptir ancak yüksek derişimlerde tehlikeli olmaktadır.
- Hidrokarbonlar kısmen kanserojen özelliğe, sis etkisine ve kötü kokulara sahiptir.

Gemilerden yayılan egzoz emisyonlarının sebep olabileceği zararlar yukarıda farklı çalışmalardan örneklenerek verilmiştir. Yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi gemilerden yayılan egzoz emisyonları doğrudan ve dolaylı olarak çevre ve insan sağlığını etkilemektedir.

### **2.3 Gemi Egzoz Emisyonları İle İlgili Kural ve Limitler**

Gemi kaynaklı çevre kirliliği uluslararası kuruluşların veya ulusal idarelerin veya çevre örgütlerinin kabul ettikleri sözleşmeler ve oluşturdukları kural ve limitler

yoluyla kontrol edilmektedir. Bu sözleşmelerden en önemlisi Uluslar Arası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından oluşturulan MARPOL 73/78 Sözleşmesidir. Ayrıca Türkiye Cumhuriyeti Marpol 73/78 Sözleşmesi' ni tanımakla birlikte gemi egzoz emisyonları ile ilgili kabul etmiş olduğu ulusal mevzuatı vardır. Benzer şekilde bazı ülkelerde kendi karasuları içinde ulusal mevzuatlarını uygulamaktadır.

### **2.3.1 MARPOL Ek VI gemi kaynaklı hava kirliliğinin önlenmesi sözleşmesi**

Denizcilik alanında Birleşmiş Milletler kuruluşu olan Uluslar Arası Denizcilik Örgütü (IMO), denizcilik kaynaklı kirlilikten çevreyi korumak için MARPOL 73/78 Sözleşmesini oluşturmuş ve bu sözleşme IMO' ya üye ülkeler tarafından kabul edilmiştir. MARPOL 73/78 Sözleşmesi zaman içerisinde yapılan güncellemeler ile kapsamını genişletmektedir. MARPOL 73/78 Sözleşmesi 6 ekten oluşmaktadır. Gemi kaynaklı hava kirliliği MARPOL 73/78 Sözleşmesi EK VI kapsamına girmektedir. Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi sözleşmesi 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi sözleşmesi 23 düzenlemeye sahiptir. Bu düzenlemeler aşağıdaki verildiği gibidir.

- Düzenleme 1: Uygulama
- Düzenleme 2: Tanımlar
- Düzenleme 3: İstisnalar
- Düzenleme 4: Eşdeğerlikler
- Düzenleme 5: Sörveyler
- Düzenleme 6: Bir sertifikanın verilmesi veya kabul edilmesi
- Düzenleme 7: Diğer bir yetkili kuruluş tarafında sertifika verilmesi
- Düzenleme 8: Sertifikanın şekli
- Düzenleme 9: Sertifikanın süresi ve geçerliliği
- Düzenleme 10: İşletme isterleri hususunda liman devleti kontrolleri
- Düzenleme 11: İhlallerin tespiti ve uygulama
- Düzenleme 12: Ozon tabakasını inceltici maddeler
- Düzenleme 13: Azot Oksitler
- Düzenleme 14: Kükürt Oksitler ve partikül maddeler
- Düzenleme 15: Uçucu organik bileşikler
- Düzenleme 16: Gemide yakma

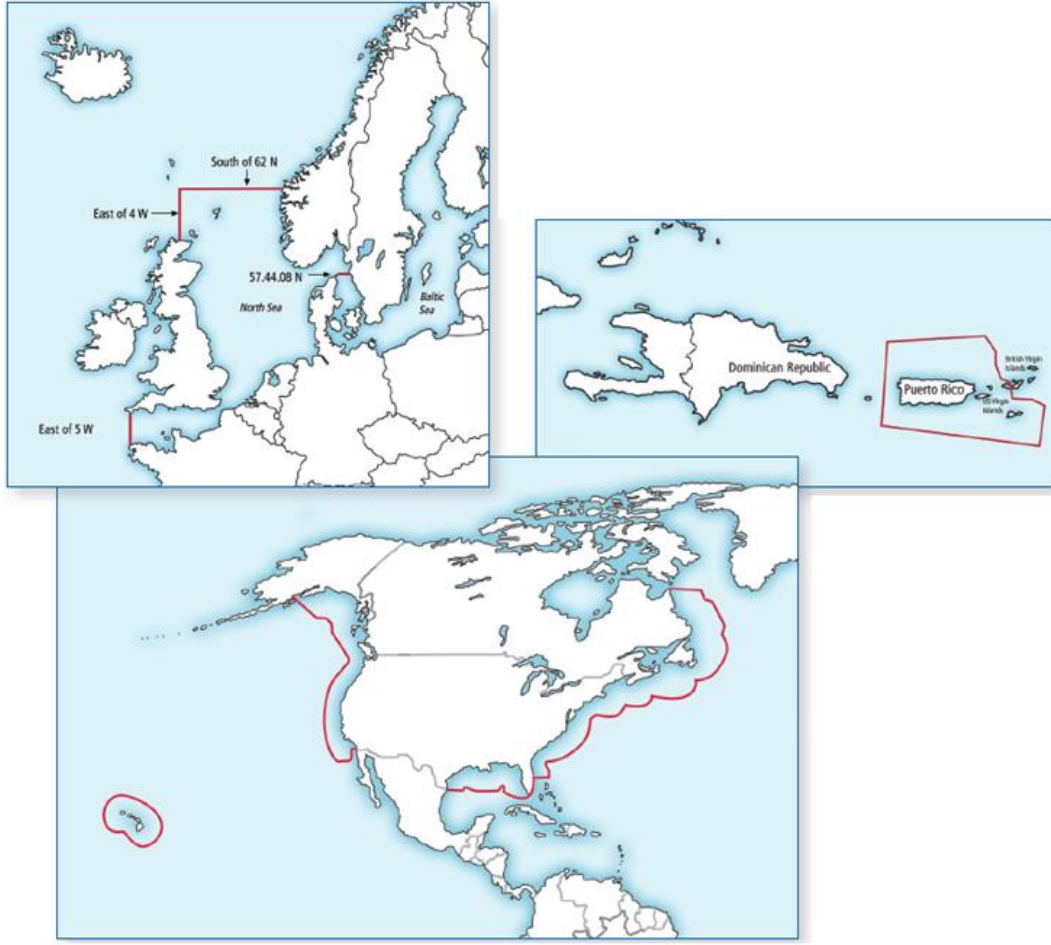
- Düzenleme 17: Kabul tesisleri
- Düzenleme 18: Yakıtta erişebilirlik ve kalitesi
- Düzenleme 19: Gemiler için enerji etkinliği düzenlemeleri
- Düzenleme 20: Sağlanan enerji etkinliği dizayn indeksi
- Düzenleme 21: İstenen enerji etkinliği dizayn indeksi
- Düzenleme 22: Gemi enerji etkinliği yönetim planı
- Düzenleme 23: Gemilerde enerji etkinliğinin geliştirilmesi amacıyla teknik işbirliğinin teşviki ve teknoloji transferi

Gemilerden yayılan egzoz emisyonlarından bu çalışmada incelenen azot oksitler düzenleme 13, kükürt oksitler düzenleme 14 kapsamına girmektedir.

MARPOL 73/78 Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin  nlenmesi Sözleşmesi ile bu sözleşmeyi kabul eden ülkelerde uygulanmak üzere limitleri genel limitleri belirtmektedir. Ayrıca IMO belirli ülkeleri ve bölgeleri emisyon kontrol alanları (ECA), kükürt oksit emisyonu kontrol alanı (SO<sub>x</sub> ECA) ilan ederek bu bölgelerde uygulamak üzere daha düşük limitler belirlemiştir. ECA alanlarında azot oksitleri ve kükürt oksitleri için daha düşük limitler geçerli olup, SO<sub>x</sub> ECA alanlarında yalnızca kükürt dioksitler için daha düşük limitler uygulanmaktadır. Bu alanlar aşağıda kabul tarihleri ile aşağıda verilmiştir.

- Baltık Denizi (SO<sub>x</sub> ECA), 1997' de kabul edilip 2005' te yürürlüğe girmiştir.
- Kuzey Denizi (SO<sub>x</sub> ECA), 2005-2006 yıllarında kabul edilmiştir.
- Kuzey Amerika (ECA), 2010-2012 yıllarında kabul edilmiştir.
- Karayipler, Porto Riko ve Virgin Adaları (ECA), 2011-2014 tarihlerinde kabul edilmiştir.

Belirtilen bu alanlar Şekil 2.3' te verilmektedir. Şekil 2.3' te sol üstte Kuzey Denizi ve Baltık Denizi, sağ üstte Porto Riko, Karayipler ve Virgin Adaları ve altta Kuzey Amerika ve Hawaii adaları emisyon kontrol alanları görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 2.3 : ECA ve SO<sub>x</sub> ECA bölgeleri (ABS, 2015)

### 2.3.1.1 Azot oksit emisyonu düzenlemesi

Ek VI Düzenleme 13, dizel makinelerinden kaynaklanan NO<sub>x</sub> emisyonları ile ilgili olup aşağıdaki durumlar için uygulanır:

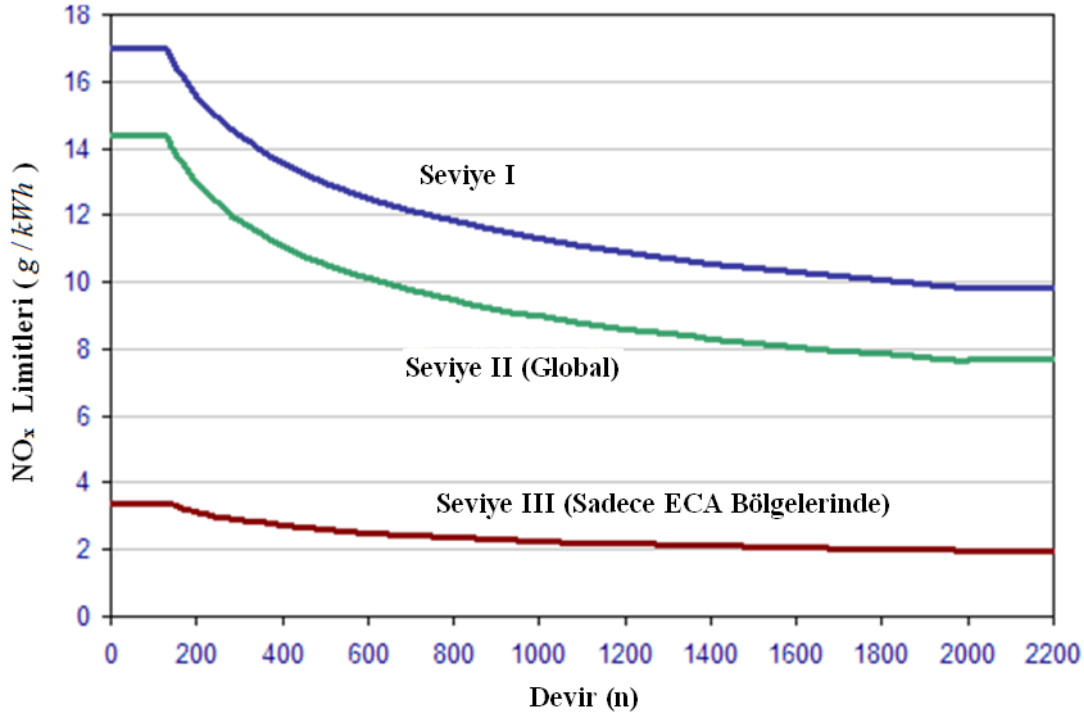
- 1 Ocak 2000 tarihinde veya daha sonra inşa edilen gemilere montajı yapılan ve her biri 130 kW çıkış gücüne sahip dizel makineler.
- 1 Ocak 2000 tarihi veya sonrasında önemli bir dönüşümden geçen, 130 kW' dan daha fazla çıkış gücünde sahip dizel makineler.
- 1 Ocak 1990 tarihinde veya sonrasında inşa edilen gemilere montajı yapılan, 5000 kW üzerinde ve her bir silindir hacmi 90 litre veya üzerinde olan dizel makineler.

NO<sub>x</sub> teknik dokümanı yukarıda belirtilen şartları sağlayan gemiler için uygulanmakta olup Çizelge 2.5' te verildiği şekilde, gemi inşa tarihine ve makine devir hızına göre gemini uyması gereken emisyon limiti belirlenmektedir.

**Çizelge 2.5 : Azot oksit limitleri.**

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

Seviye I limitleri 2000 yılından ile 2011 yılına kadar inşa edilen gemiler için geçerlidir. Gemiler Çizelge 2.5' te devir sayılarına (n) göre 130 devir altında, 130 devir ile 2000 devir arasında ve 2000 devir üzerinde olmak üzere 3 gruba ayrılmıştır. Gemilerin devir sayılarına göre uyması gereken NO<sub>x</sub> emisyon limiti seviyesi belirlenmektedir. Seviye II limitleri 2011 yılı ve sonrasında inşa edilen gemiler için geçerlidir. Seviye III limitleri ise 2016 yılı ve sonrasında inşa edilen ve emisyon kontrol alanlarında (ECA ) faaliyet gösteren gemiler için geçerlidir. Çizelge 2.5'te verilen değerlerin grafik gösterimi Şekil 2.4' te verilmiştir (McGill ve diğerleri, 2013).



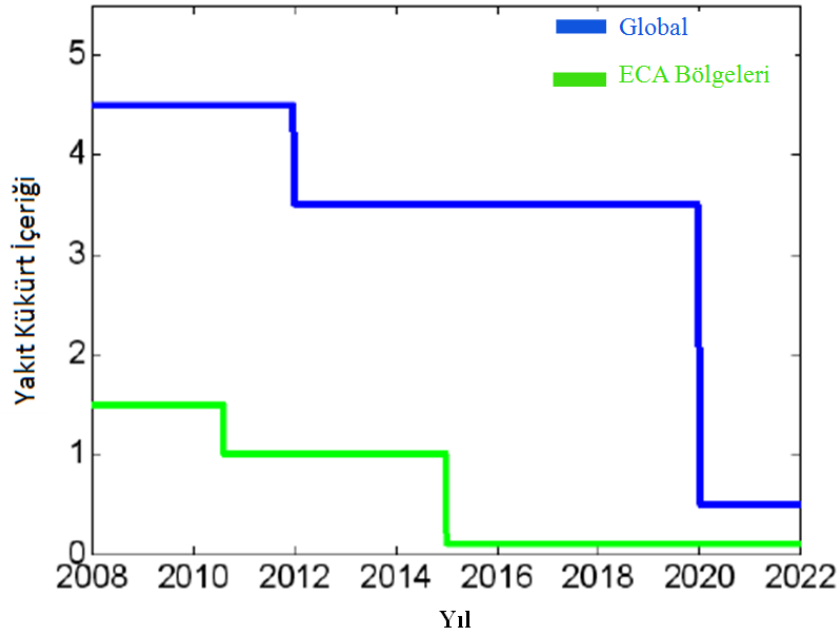
**Şekil 2.4 : Azot oksit limitleri.**

### 2.3.1.2 Kükürt oksit emisyonu düzenlemesi

Gemilerden yayılan kükürt oksit emisyonları denizcilikte kullanılan yakıtların içeriğindeki kükürt miktarına sınırlama getirilerek kontrol edilmektedir. Dünya

genelinde, 19 Mayıs 2005 tarihinden itibaren, denizcilikte kullanılan yakıtların kükürt içeriğine %4.5 oranında bir sınırlama getirilmiştir. 1 Ocak 2012 tarihinden itibaren ise, kükürt içeriği % 3.5 oranına düşürülmüştür. Denizcilikte kullanılan yakıtlar içerisindeki kükürt oksitlerin 1 Ocak 2020 tarihi itibarıyla global ölçekte %0.5'e düşürülmesi planlanmaktadır. Ancak IMO tarafından 2018 yılında yapılacak değerlendirmede, %0.5 kükürt limitlerine uygun yakıtların tedariği sağlanamıyor olması durumuna 1 Ocak 2020 tarihi 1 Ocak 2025 tarihine kadar ertelenebilecektir.

Dünya genelinde uygulanan bu limitlerden daha düşük limitler uygulanmak üzere bazı kıyı bölgeleri, limanlar ve denizler kükürt alanları (SECA) ilan edilmiştir. Kükürt alanlarında gemilerin kullanabileceği yakıtların kükürt içerik değeri 1 Temmuz 2010 öncesinde %1,5 olarak belirlenmiştir. 1 Temmuz 2010 ile 1 Ocak 2015 tarihleri arasında yakıt içerisindeki kükürt içeriği %1'e düşürülmüştür. 1 Ocak 2015 ve sonrasında ise bu değer %0.1 olarak belirlenmiştir. Bu değerler grafik gösterimde Şekil 2.5'te sunulmuştur.



Şekil 2.5 : Kükürt oksit limitleri.

Gemiler, yukarıda verilen yakıt kükürt içeriği limitlerine uygun olmayan yüksek kükürt içeriğine sahip kullanabilmektedir. Ancak yüksek kükürt içeriğine sahip yakıt kullanılması durumunda egzoz gazı temizleme sistemleri ile egzoz gazındaki kükürtoksitlerin temizlenmesi gerekmektedir. Temizleme işlemi sonrasında egzoz gazındaki kükürtoksit ( $SO_2$ ) miktarı, yakıt kükürt içeriği limitleri kullanılarak Denklem 2.6'ya göre belirlenebilmektedir. Örneğin; %1,5 yakıt kükürt limitlerinin

uygulandığı bir bölgede yüksek kükürt içeriğine sahip bir yakıt kullanılması durumunda kükürt oksit (SO<sub>2</sub>) emisyon değeri 6 g/kWh değerinden küçük olmalıdır.

$$SO_2 = 4 \times \%S \quad (2.6)$$

Bu denklemde;

SO<sub>2</sub> : Kükürt oksit (SO<sub>2</sub>) emisyon değeri (g/kWh),

%S : Yakıt kükürt içeriği (% m/m).

### 2.3.2 Türkiye' de gemi egzoz emisyonu kuralları ve limitleri

MARPOL Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi Sözleşmesi 4 Şubat 2014 tarihinde Türkiye' de uygulanmaya başlamıştır. Bu sözleşmenin kabul edilmesiyle Türkiye, limanlarına gelen gemilerin MARPOL Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi Sözleşmesi' nde belirtilen limitlere uymasını talep etme, gemilerin limitlere uygunluğunu denetleme ve gemilerin bu limitlere uymadığı takdirde yaptırım uygulama hakkına sahip olmuştur.

Ayrıca gemilerde kullanılan yakıtların içerdiği kükürt miktarı ile ilgili ulusal düzenlemeler yapılmıştır. Türkiye ulusal mevzuatının Avrupa Birliği mevzuatı ile uyumlaştırılması amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda, yakıtların kükürt oranlarına sınırlamalar getiren 99/32/EC sayılı AB Direktifi' ne uygun olarak "Bazı Akaryakıt Türlerindeki Kükürt Oranının Azaltılmasına İlişkin Yönetmelik" yürürlüğe konmuştur.

Bazı akaryakıt türlerindeki kükürt oranının azaltılmasına ilişkin yönetmelik 29 Ekim 2009 bakanlar kurulu tarafından kabul edilmiş, 6 Kasım 2009 tarihli Resmi Gazete' de yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. Bazı akaryakıt türlerindeki kükürt oranının azaltılmasına ilişkin yönetmelikte 2011 yılında yapılan düzenleme sonrasında gemilerde kullanılacak yakıtlarla ilgili limitler aşağıdaki gibidir.

- 1 Ocak 2012 tarihinden itibaren, göller ve nehirler gibi iç sularda faaliyet gösteren gemiler ile bayrağına bakılmaksızın rıhtımdaki gemiler %0.1 kükürt içeriğini aşan yakıt kullanamaz.
- 1 Ocak 2012 tarihinden itibaren, düzenli sefer yapan tüm yolcu gemileri %1.5 kükürt içeriğini aşan yakıt kullanamaz.

Yukarıda verilmekte olan limitler Türkiye Cumhuriyeti deniz yetki alanlarından uğraksız geçiş yapan gemilere uygulanmamaktadır. Ayrıca, rıhtımda 2 saat süreden az bağlı bulunması durumunda gemilere %0.1 kükürt içeren yakıt kullanma limitleri uygulanmamaktadır.

### 2.3.3 Bazı bölgesel kural ve limitler

Bazı ülkeler MARPOL Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi Sözleşmesi ile birlikte ulusal mevzuatlar ve bölgesel limitler uygulamaktadır. Bu düzenleme ve mevzuatlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Avrupa Birliği (AB) 99/32/EC sayılı AB Direktifi ile denizcilik yakıtlarının kükürt içeriklerine sınırlamalar getirmektedir. Bu direktif kapsamında Avrupa Birliği denizcilik yakıtları kükürt içeriği 2015 düzenlemelerine göre denizcilikte kullanılan yakıtlar Çizelge 2.6' da verilmiştir. Bu limitler 1 Ocak 2015 ile 1 Ocak 2020 tarihleri arasında geçerlidir.

**Çizelge 2.6 : Deniz tipi yakıtların kükürt içeriği AB limitleri.**

Limitlere tabi olma şartları	AB İçi ECA Bölgelerinde	AB İçinde ECA Bölgeleri Dışında
Limanlarda ve zincirli durumda	%0.1	%0.1
Düzenli sefer yapan yolcu gemileri	%0.1	%1.5
Diğer Gemiler	%0.1	%3.5

AB sınırları içerisinde bulunan ECA bölgelerinde, MARPOL Ek VI Düzenleme 14' te ECA bölgeleri için belirtilen limit olan %0.1 kükürt içerik limiti geçerlidir. AB sınırları içinde olan ancak ECA bölgesi olmayan bölgelerde limanda veya zincirli durumda olan ve 2 saatten uzun süreli bu durumda kalacak olan gemilerin kullandığı yakıtın kükürt içeriği % 0.1' i aşamaz. Düzenli sefer yapan yolcu gemilerinde kullanılan yakıtın kükürt içeriği % 1.5' i aşamaz. Limanda veya zincirleme durumunda olmayan yolcu gemileri haricindeki gemiler, % 3.5 kükürt içeriğini aşan yakıt kullanamaz.

Amerika MARPOL Ek VI Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Önlenmesi Sözleşmesi' ni kabul etmiştir ve Amerika kıyıları IMO tarafından 2005-2014 yılları arasında ECA bölgeleri ilan edilmiştir. Amerika' da bu uygulamalara ek olarak Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu (CARB) tarafından hazırlanan Kaliforniya Deniz Aşırı Çalışan

Gemiler İçin Yakıt Düzenlemeleri uygulanmaktadır. Bu düzenlemeler Kaliforniya kıyılarından ve Kaliforniya adalarının kıyılarından 24 deniz mili uzaklığına kadar olan alanı kapsamaktadır. Bu düzenlemenin getirdiği limitleri Çizelge 2.7' de verilmiştir.

**Çizelge 2.7 : Deniz tipi yakıtların kükürt içeriği CARB limitleri.**

Limitlerin Uygulamaya Giriş Tarihi	Marine Gas Oil (DMA Sınıfı)	Marine Diesel Oil (DMB Sınıfı)
1 Temmuz 2009	%1.5	%0.5
1 Ağustos 2012	%1.0	%0.5
1 Ocak 2014	%0.1	%0.1

Bu limitlere göre Kaliforniya sahillerine ve adalarına 24 deniz mili yaklaşan gemiler 1 Ocak 2014 tarihinden itibaren %0.1 ve altında kükürt içeriğine sahip yakıt kullanmak zorundadır.

### **3. EGZOZ EMİSYONLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

#### **3.1 Giriş**

Egzoz emisyonu ölçümleri, gemilerden yayılan egzoz emisyon miktarını belirlemek, gemilerin emisyon limitlerine uygunluğunu denetlemek, egzoz emisyonu temizleme sistemlerini değerlendirmek, gemi makinelerinin performansını değerlendirmek ve emisyon envanter çalışmalarında kullanılan emisyon faktörlerini belirlemek veya doğrulamak için gerçekleştirilmektedir. Ancak gemilerin egzoz emisyonunun belirlenmesi oldukça zahmetli ölçümleri kapsamakta olup, çok sayıda parametrenin kontrol edilmesini, ölçülmesini ve değerlendirilmesini gerektirmektedir. Gemilerde egzoz emisyon ölçümü ve gemi egzoz emisyonlarının değerlendirmesi NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı' na uygun şekilde yapılmalıdır. NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı, deniz tipi dizel makinelerin MARPOL 73/78 Sözleşmesi EK VI Düzenleme 13' te belirtilen NO<sub>x</sub> emisyonları limitlerine uygunluğunun belirlenmesi, sörveyi ve sertifikasyonu için takip edilmesi zorunlu prosedürleri tarif etmekte ve sunmaktadır. Ayrıca gemilerin egzoz emisyonlarının deneysel olarak belirlendiği diğer çalışmalarda, ISO 8178 İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Emisyon Ölçümleri standardı ve çeşitli parametreler için diğer ISO ve EPA standartlarının kullanıldığı görülmektedir. Bu bölümde egzoz emisyon ölçümlerinde kullanılan ölçüm sistemleri tanıtılacaktır. NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanına göre egzoz emisyon ölçümleri tarif edilecek ve egzoz emisyon hesaplamaları sunulacaktır, ayrıca bu çalışmada gerçekleştirilen emisyon ölçümleri tarif edilecektir. Bu bölümde son olarak, ölçüm sonuçlarına etki eden hata miktarının hesaplanması ve belirsizlik analizi tarif edilecektir.

#### **3.2 Egzoz Emisyonu Ölçüm Sistemleri**

Gemi egzoz emisyonlarını belirleyebilmek için egzoz gazı hızı ve sıcaklığı, makine ve çevre koşulları ile ilgili çeşitli özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Ölçüm yapılması ve belirlenmesi gerekli bu faktörler aşağıda sıralanmıştır.

- Egzoz gazındaki emisyonların konsantrasyonu,

- Şaft gücü,
- Egzoz gazı debisi ve sıcaklığı,
- Ortam sıcaklığı, nemi ve basıncı belirlenmelidir.

Yukarıda verilen bu değerler çeşitli ölçüm sistemleri ile ölçülmektedir. Egzoz gazındaki emisyon konsantrasyonları gaz analizörü ile ölçülecektir. Şaft gücü telemetrik şaft gücü ölçüm sistemi ile belirlenecektir. Egzoz gazı debisi, pitot tüpü ile egzoz gazı hızı belirlenerek hesaplanacaktır. Egzoz gazı sıcaklığı k tipi termokupl ile ölçülecektir. Makine dairesi ortam sıcaklığı, nemi ve basıncı, sıcaklık ölçer, nem ölçer ve basınç ölçer ile ölçülecektir.

### 3.2.1 Emisyon ölçüm sistemi

Emisyon ölçüm sistemi ile egzoz gazında bulunan  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  ve HC emisyonlarının konsantrasyonu belirlenmektedir. Egzoz gazındaki  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  ve  $\text{O}_2$  konsantrasyon değerleri Horiba PG 250 gaz analizörü ile belirlenmektedir. Emisyon ölçüm sistemi ısıtmalı prob, ısıtmalı örnekleme hattı, soğutma sistemi ve gaz analizöründen oluşmaktadır. Horiba PG 250 gaz analizörü Şekil 3.1' de sunulmuştur.



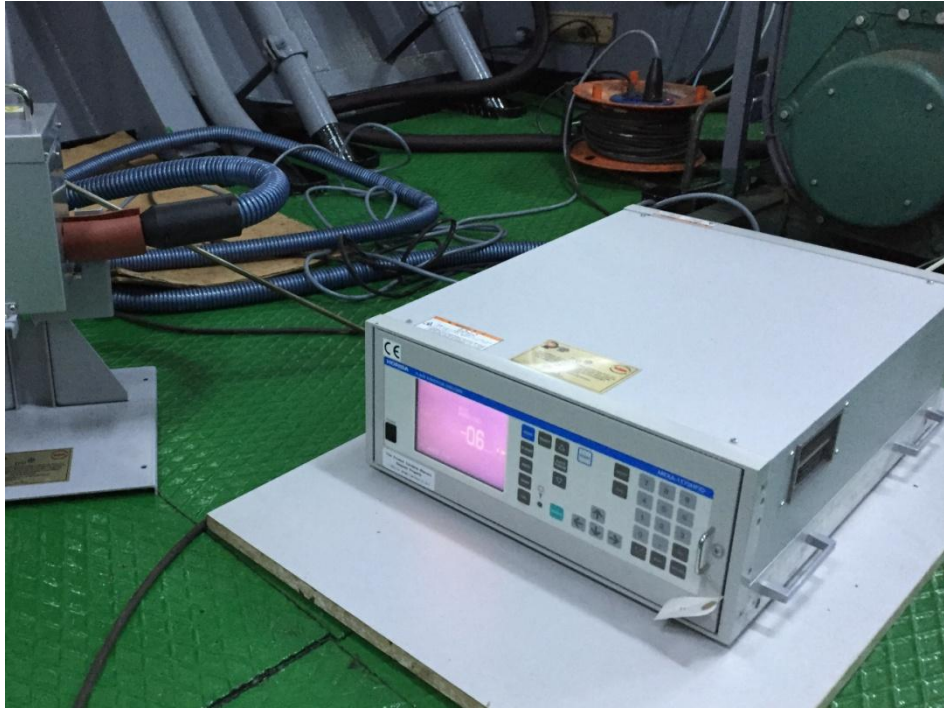
Şekil 3.1 : Horiba PG 250 gaz analizörü.

Horiba PG 250 gaz analizörü ile ölçülebilen emisyon türleri, gaz analizöründe kullanılan sensörler ve cihazın ölçüm aralığı Çizelge 3.1' de verilmiştir.

**Çizelge 3.1 : Horiba PG 250 gaz analizörü özellikleri.**

Emisyon Türü	Sensör Türü	Ölçüm Aralığı
NO <sub>x</sub>	Kemilüminesans (CLD)	0-2500 ppm
CO <sub>2</sub>	Dispersif olmayan infrared (NDIR)	0-20 %
CO	Dispersif olmayan infrared (NDIR)	0-5000 ppm
SO <sub>2</sub>	Dispersif olmayan infrared (NDIR)	0-3000 ppm
O <sub>2</sub>	Paramanyetik (PMD)	0-25 %

Hidrokarbon emisyonları Horiba Mexa 1170 gaz analizörü ile ölçülecektir. Hidrokarbon emisyonu ölçüm sistemi prob, ısıtmalı örnekleme hattı, ve gaz analizöründen oluşmaktadır. Horiba Mexa 1170 gaz analizörü Şekil 3.2' de sunulmuştur.



**Şekil 3.2 : Horiba Mexa 1170 gaz analizörü.**

Gaz analizörü ısıtmalı alev iyonizasyon sensörü (HFID) kullanmaktadır. Gaz analizörü 0-200000 ppm konsantrasyon değerleri aralığında ölçüm yapabilmektedir.

Egzoz emisyonu konsantrasyon ölçümlerinde kullanılan Horiba PG 250 ve Horiba Mexa 1170 gaz analizörlerinin sapma ve hassasiyet değerleri Çizelge 3.2' de verilmiştir. Horiba PG 250 gaz analizörü ölçek sapma değeri SO<sub>2</sub> emisyonu için %2

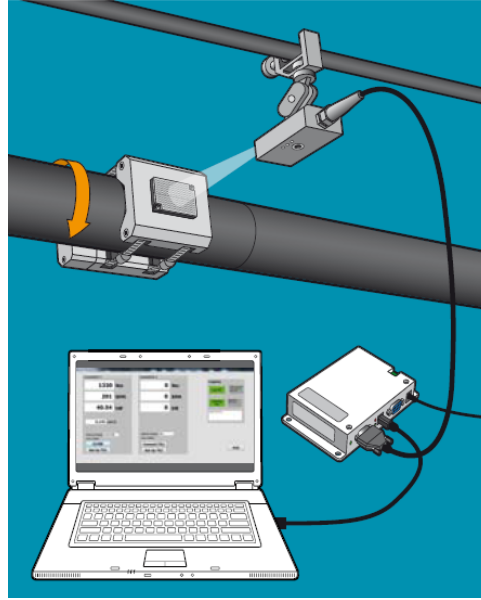
değerindedir, diğer emisyon değerleri için sapma değerleri çizelgede verilen değerlerdir. Gaz analizörlerinin sapma ve hassasiyet değerleri, üretici firmanın cihaz el kitabında belirttiği değerler olarak alınmıştır.

**Çizelge 3.2 : Gaz analizörlerinin sapma ve hassasiyet değerleri.**

Sapma Parametresi	Horiba PG 250 Değerleri	Horiba Mexa 1170 Değerleri
Lineerlik	% 2	% 1
Tekrarlanabilirlik	% 0.5	% 0.5
Sıfır Sapması	% 1	% 1
Ölçek Sapması	% 1	% 1

### 3.2.2 Şaft gücü ölçüm sistemi

Bu çalışmada makine fren gücü Datum telemetrik şaft gücü ölçüm sistemi ile belirlenmiştir. Şaft gücü ölçüm sistemi, gerinim ölçer (strain gauge) sensörü, verici (transmitter), yansıtıcı (reflektör), alıcı (receiver) ve arayüzden oluşmaktadır. Şaft gücü ölçüm sistemi Şekil 3.3' te sunulmuştur.



**Şekil 3.3 : Şaft gücü ölçüm sistemi (Datum, n.d.).**

Datum şaft gücü ölçüm sisteminin güç ölçümü ve devir ölçümü hatası % 1' dir.

### 3.2.3 Egzoz gazı debisi ve sıcaklığı ölçüm sistemleri

Egzoz gazı debisi, egzoz gazı hızı belirlenerek hesaplanmıştır. Bu çalışmada 1 tipi pitot tüpü ve portatif hız ve basınç ölçüm cihazı kullanılarak egzoz gazı hız değerleri

ölçülmüştür. Ölçüm cihazının hız ölçüm aralığı 4 m/s ile 100 m/s arasındadır.

Egzoz gazı sıcaklığı portatif sıcaklık ölçer ile ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinde k tipi termokupl kullanılmıştır. Cihazın sıcaklık ölçüm aralığı -200 °C ile +1300 °C arasındadır.

Egzoz gazı hızı ve egzoz gazı sıcaklığı ölçümlerinde kullanılan ölçüm cihazının doğruluk ve hassasiyet değerleri Çizelge 3.3' te verilmiştir. Sapma ve hassasiyet değerleri, üretici firmanın cihaz el kitabında belirttiği değerler olarak alınmıştır.

**Çizelge 3.3 : Hız ve sıcaklık ölçüm sistemlerinin belirsizlik değerleri.**

Ölçülen parametre	Ölçüm aralığı	Belirsizlik değerleri
Egzoz gazı hızı	4-30 m/s	±% 3
Egzoz gazı hızı	31 ile 100 m/s	±% 3
Egzoz gazı sıcaklığı	-200 ile -40 °C	±% 1
Egzoz gazı sıcaklığı	-39 ile +999 °C	±% 0.5
Egzoz gazı sıcaklığı	+1000 ile +1300 °C	±% 1

#### **3.2.4 Ortam sıcaklığı, nemi ve basıncı ölçüm sistemleri**

Makine dairesi ortam sıcaklığı ve ortam bağıl nemi portatif sıcaklık ve nem ölçer ile ölçülmüştür. Makine dairesi atmosferik basınç değeri portatif basınç ölçer ile ölçülmüştür. Ölçüm cihazlarının sapma ve belirsizlik değerleri Çizelge 3.4' te verilmiştir. Sapma ve hassasiyet değerleri, üretici firmanın cihaz el kitabında belirttiği değerler olarak alınmıştır.

**Çizelge 3.4 : Sıcaklık, nem ve basınç ölçüm sistemlerinin belirsizlik değerleri.**

Ölçülen parametre	Ölçüm aralığı	Belirsizlik değerleri
Ortam sıcaklığı	-40 ile -10 °C	± 2 °C
Ortam sıcaklığı	-10 ile +40 °C	± 1 °C
Ortam sıcaklığı	+40 ile +70 °C	± 2 °C
Ortam bağıl nemi	0 ile %100	±% 3.5
Ortam basıncı	700 ile 1100 mbar	± 2 mbar

### 3.3 NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanına Göre Egzoz Emisyon Ölçüm Prosedürü ve Hesaplamaları

NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı, gemilerin egzoz emisyon değerlerinin belirlenmesi, gemilerin NO<sub>x</sub> emisyonu limitlerine uygunluğunun denetlenmesi, sörveyi ve sertifikasyonu için takip edilmesi zorunlu dokümandır. Gemi egzoz emisyonu ölçüm prosedürü NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı'nda tarif edilmektedir. NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı deniz tipi dizel makinelerin fabrika koşulları altında egzoz emisyonunun belirlenmesini ve geminin çalışma koşulları altında egzoz emisyonunun belirlenmesini tarif etmektedir. Geminin çalışma koşullarında egzoz emisyonu belirlenmesi için motor parametreleri kontrol metodu, basitleştirilmiş ölçüm metodu ve doğrudan ölçüm metodu olmak üzere 3 metot NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı'nda sunulmaktadır. Doğrudan ölçüm metodu, fabrika koşulları altında yapılan testlere oldukça benzer olup, gemi egzoz emisyonlarının kapsamlı ölçümlerle belirlendiği metottur. Bu çalışmada doğrudan ölçüm metodu tarif edilmekte ve kullanılmaktadır.

Doğrudan ölçüm metodu, egzoz parametrelerinin, makine çalışma koşullarının ve bazı çevre koşullarının eş zamanlı ölçümlerini gerektirmektedir. Bu ölçümler sonucunda gemiden yayılan egzoz emisyonları birim saatte birim güç başına yayılan emisyon (g/kWh) cinsinden hesaplanmaktadır. Gemilerden yayılan NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve HC egzoz emisyonları ve O<sub>2</sub> gazı hesabı Denklem 3.1'e göre yapılmaktadır.

$$gas_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (q_{mgasi} \times W_{Fi})}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \times W_{Fi})} \quad (3.1)$$

Bu denklemde;

gas<sub>x</sub> : Her bir emisyon türü için emisyon değeri (g/kWh),

q<sub>mgasi</sub> : Her bir emisyon türünün farklı makine yüklerinde kütle debisi (g/h),

W<sub>Fi</sub> : Farklı makine yüklerinde ağırlık faktörü,

P<sub>i</sub> : Farklı makine yüklerinde makine gücü.

Gemilerden yayılan egzoz emisyonu değeri, makinenin farklı yük ve hızlarında yapılan ölçümlerde elde edilen değerler ile makinenin farklı yük ve hızlarına karşılık gelen değişik ağırlık faktörleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Gemiden yayılan egzoz emisyonlarını temsil edecek bir emisyon değeri belirleyebilmek için geminin

farklı çalışma koşullarını temsil eden makine yük ve hızlarında ölçümler alınmaktadır. Belirtilen bu makine hız ve yük değerleri için ağırlık faktörleri belirlenmiştir. Ağırlık faktörleri gemilerin daha sık çalıştığı makine yük ve hızlarında yüksek değerler almaktadır. Manevra, liman faaliyetleri durumlarını temsil eden ağırlık faktörleri ise göreceli olarak düşük değerler almaktadır. Ayrıca ana makine ve yardımcı makine için farklı makine yükü ve hız değerlerinde ölçüm alınmaktadır. Benzer şekilde geminin sevk sistemi göz önünde bulundurularak farklı makine yük ve hız değerlerinde emisyon ölçümleri alınmaktadır. NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı'nda değişik sevk sistemlerine ve çalışma koşullarına sahip makineler için ayrıca ana makine ve yardımcı makine için ölçüm yapılması gerekli makine yük ve hız değerleri verilmektedir. Belirtilen makine yükü ve hızı için belirlenen emisyon değerleri Denklem 3.1' e göre ilgili ağırlık faktörleri ile çarpılır ve her bir ölçüm noktası için bu işlem tekrar edilir. Benzer şekilde bu ölçüm noktalarındaki makine fren gücü ölçülür ve ilgili ağırlık faktörü ile çarpılır ve bu işlem her bir ölçüm noktası için tekrar edilir. Elde edilen toplam emisyon değeri toplam güç değerine bölünerek gemiden yayılan egzoz emisyonları her bir emisyon bileşeni için birim saatte birim güç başına yayılan emisyon cinsinden hesaplanır. Ancak gerçek şartlarda bu güç ve hız değerleri anlık olarak değişen koşullardan veya elverişsiz şartlardan dolayı her zaman sağlanamayabilir. Bu durumda ölçümler bu koşullara mümkün olan en yakın şartlarda gerçekleştirilmelidir. Çizelge 3.5' de IMO (2008)' e göre sabit devirli ana makinede ölçüm yapılması gerekli yük ve hız değerleri sunulmuştur. Çizelge 3.5' de verilen bu test şartları E2 test şartları olarak isimlendirilmektedir.

**Çizelge 3.5 : Sabit devirli ana makine için E2 test şartları.**

Hız (n)	%100	%100	%100	%100
Güç (P)	%100	%75	%50	%25
Ağırlık Faktörü (W <sub>F</sub> )	0.2	0.5	0.15	0.15

Gemilerden yayılan egzoz emisyonu hesabı Denklem 3.1' e göre yapılmaktadır. Denklem 3.1' de verilen makine gücü (P), NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanında belirtilen metotlardan biri ile belirlenmelidir. Makine gücü (P), makine fren gücünü temsil etmektedir ve NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanında makine gücü belirlenmesi için üç alternatif sunulmaktadır.

- Makine çıkışında şafttan doğrudan fren gücü ölçümü yapmak.

- Makine çıkışında doğrudan fren gücü ölçülemiyorsa, şaftın açıkta uygun bir bölgeisnden ölçüm alarak aradaki elemanları değerlendirerek fren gücünü belirlemek.
- Nomograflardan hesaplama yapmak.

Makine çıkışında şafttan güç almak her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda ölçülen makine gücü, güç kaybına sebep olan elemanlardan sonra ölçülüyorsa bu yardımcı elemanların sebep olduğu güç düşüşü belirlenerek Denklem 3.2' de belirtilen şekilde makine fren gücü bulunur. Yardımcı elemanların tanımı NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanında tarif edilmiştir.

$$P = P_m + P_{aux} \quad (3.2)$$

Egzoz emisyonu ölçümleri esnasında makine güç değeri anlık olarak değişkenlik gösterebilir. Makine yükündeki değişimler Denklem 3.3, Denklem 3.4 ve Denklem 3.5' e göre hesaplanmaktadır. NO<sub>x</sub> Teknik dokümanında verilen bu değerlendirmeye göre Denklem 3.5' te verilen %C.O.V değerinin %5' ten küçük olması gerekmektedir.

$$Ave = \frac{1}{N} \times \sum_{j=1}^N x_j \quad (3.3)$$

$$S.D. = \sqrt{\frac{1}{N-1} \times \sum_{i=1}^N (x_i - Ave)^2} \quad (3.4)$$

$$\%C.O.V. = \frac{S.D.}{Ave} \times 100 \quad (3.5)$$

Bu denklemde;

Ave : Ortalama,

S.D. : Standart sapma,

%C.O.V. : Varyans güç faktörü (%),

N : Toplam veri noktası sayısı.

Denklem 3.1' de verilen egzoz emisyon debisi ( $q_{m\text{gas}}$ ) Denklem 3.6a' ya veya Denklem 3.6b' ye göre hesaplanmaktadır. Her bir emisyon gazı için her bir ölçüm noktasında emisyon debisi ( $q_{m\text{gas}}$ ) hesaplanmaktadır. Egzoz emisyon debisi Denklem 3.6a azot oksit emisyonlarının egzoz gazındaki kütle debisinin belirlenmesi için kullanılmaktadır.

$$q_{m\text{gas}} = u_{\text{gas}} \times c_{\text{gas}} \times q_{m\text{ew}} \times k_{hd} \quad (3.6a)$$

Diğer emisyon türlerinin ve egzozdaki oksijen miktarının kütledebisi Denklem 3.6b' ye göre hesaplanmaktadır.

$$q_{m\text{gas}} = u_{\text{gas}} \times c_{\text{gas}} \times q_{m\text{ew}} \quad (3.6b)$$

Egzoz emisyon debisi ( $q_{m\text{gas}}$ ), egzoz emisyonu bileşeni yoğunluğunun egzoz gazına yoğunluğu oranı ( $u_{\text{gas}}$ ) ile egzoz emisyonu konantrasyonu ( $c_{\text{gas}}$ ) ve egzoz gazı kütle debisi ( $q_{m\text{ew}}$ ) çarpılarak belirlenir. Egzoz emisyonu bileşeni yoğunluğunun, egzoz gazı yoğunluğuna oranı ( $u_{\text{gas}}$ ), Denklem 3.7' de verilen şekilde hesaplanır. Çizelge 3.6' da, NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı' nda verilen standart yakıtlar deniz tipi dizel yakıt (MDO-MGO) ve deniz tipi ağır yakıt (HFO) için egzoz emisyonu bileşeni yoğunlukları ( $\rho_{\text{egas}}$ ) ve egzoz gazı yoğunluğu ( $\rho_{\text{gas}}$ ) sunulmuştur. Hidrokarbon emisyonu yoğunluğu yakıt türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çizelge 3.6' da IMO (2008)' e göre verilen değerler işlenmemiş (raw) egzoz gazı için geçerlidir. Seyrettilmiş gaz için egzoz gazı ve emisyon bileşenleri yoğunluk değerleri ISO 8178 (2008) standardında verilmektedir.

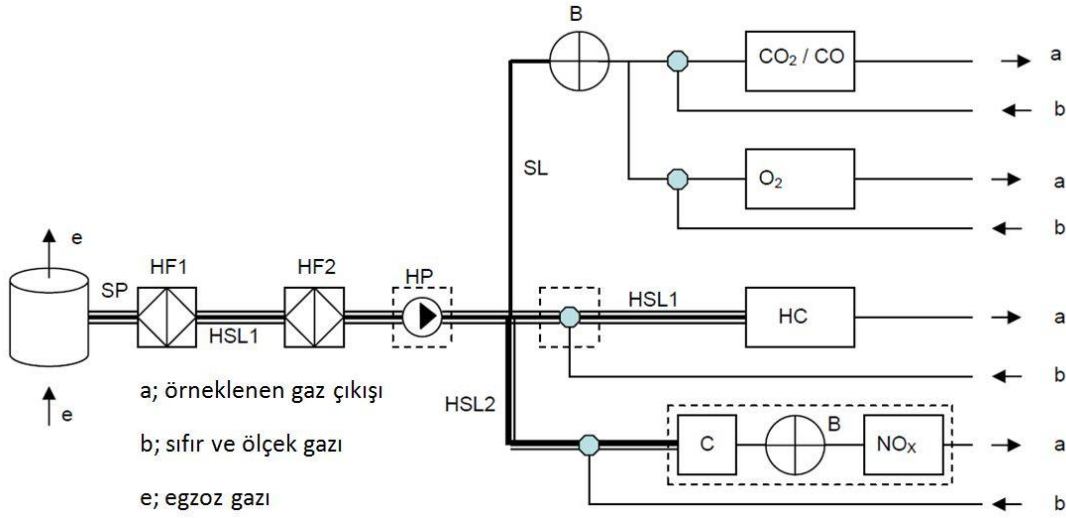
$$u_{\text{gas}} = \frac{\rho_{\text{gas}}}{\rho_{\text{egas}} \times 1000} \quad (3.7)$$

**Çizelge 3.6 :** Egzoz emisyon türü ve egzoz gazı standart yoğunlukları.

Egzoz Gazı	Egzoz Gazı	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Dizel Yakıt	Ağır Yakıt						
1.2943	1295,0	2.053	2.926	1.250	-	1.9636	1.4277

Çizelge 3.6' da verilmeyen hidrokarbon gazı yoğunluğu dizel yakıt (MDO-MGO) ve ağır yakıt (HFO) yakıt için sırasıyla 0,620 (kg/m<sup>3</sup>) ve 0,694 (kg/m<sup>3</sup>) değerindedir.

Egzoz emisyonlarının konsantrasyonu ( $c_{gas}$ ) ölçümünde, NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı' na göre egzoz gazını temsil eden bir örnekleme elde edebilmek için makine, turboşarjer veya diğer akım bozucu cihazlardan 10 boru çapı uzaklıkta ölçüm alınmalıdır. Aynı zamanda ölçüm alma noktası, egzoz gazının atmosfere çıkış noktasının büyük olan değer seçilerek 3 boru çapı veya 0.5 metre gerisinde olmalıdır (IMO, 2008). NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı' nda tarif edilen emisyon ölçüm sistemi şeması Şekil 3.4' te sunulmuştur. Denklem 3.6a' ya ve Denklem 3.6b' ye göre hesaplama yapabilmek için emisyon konsantrasyonları ppm biriminde olmalıdır. Gaz analizöründe farklı birimde emisyon konsantrasyon değerleri elde edilmişse, bu değerler ppm birimine dönüştürülmelidir.



**Şekil 3.4 :** Emisyon ölçüm sistemi (IMO, 2008).

Gaz analizör sistemi, örnekleme probu, ısıtılmalı hatlar, filtreler, pompa, soğutucu, azot oksitleri dönüştürücüsü ve sensörlerden oluşmaktadır. Şekil 3.4' te verilen B isimli bileşen egzoz gazı soğutma ve nem alma sistemini, C isimli bileşen azot oksitleri dönüştürücüsünü temsil etmektedir. Örnekleme probu SP harfleri ile, ısıtılmalı hatlar HSL harfleri ile filtreler HF harfleri ile pompa ise HP harfleri ile temsil edilmektedir. Bacada uygun bir noktadan örnekleme probu ile örneklenen egzoz gazının yoğuşmaması için örnekleme hattı ısıtılmalı olmalıdır. Bu ısıtma hattının sıcaklığı HC emisyonu için 190 °C olarak belirlenmiştir. Isıtılmalı hattan geçirilen egzoz gazı nem alma ünitesinden geçirilir ve gazdaki su buharı emisyon konsantrasyonuna etki etmeden yoğuşturulur. Nem alma işlemi sırasında soğutulan egzoz gazı sensörlere ulaştırılır. Gaz analizörlerinde kullanılacak, IMO (2008) 'e göre uygun sensör tipleri Çizelge 3.7' de verilmiştir.

**Çizelge 3.7 : Emisyon ölçüm sensörleri.**

Emisyon Türü	Sensör Türü
NO <sub>x</sub>	Kemilüminesans (CLD) veya Isıtmalı Kemilüminesans dedektörü (HCLD)
CO <sub>2</sub>	Dispersif olmayan infrared dedektörü (NDIR)
CO	Dispersif olmayan infrared dedektörü (NDIR)
HC	Isıtmalı alev iyonizasyon dedektörü (HFID)
O <sub>2</sub>	Paramanyetik (PMD), Zirkonyum dioksit (ZRDO) veya Elektrokimyasal dedektör

Egzoz gazı kütle debisi ( $q_{mew}$ ) hesabı için NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanında 3 metot belirtilmektedir.

- Doğrudan ölçüm metodu,
- Hava ve yakıt ölçüm metodu
- Yakıt debisi ölçümü ve karbon denge metodu.

Doğrudan egzoz gazı kütle debisi ölçümü metodu, ISO standartlarına, EPA standartlarına veya diğer uluslar arası kuruluşlar tarafından yayımlanan standartlara uygun şekilde egzoz gazı kütle debisi belirleme metotlarını içermektedir. TS ISO 10780 (1999) standardına göre bacada hacimsel debi hesabı Denklem 3.8, Denklem 3.9 ve Denklem 3.10' a göre yapılmaktadır. Elde edilen hacimsel debi değeri Çizelge 3.6' da verilen egzoz gazı yoğunluğu ile çarpılarak egzoz gazı kütle debisi belirlenmektedir.

$$\Delta \bar{p} = \frac{1}{n^2} \times \left( \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta p_i} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$\bar{v} = K \times C \times \left( T_s \times \Delta \bar{p} \div p_e \times M_s \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

$$q_{Vs} = \bar{v} \times A \quad (3.10)$$

Bu denklemlerde;

$\Delta \bar{p}$  : Pitot tüpü ortalama basınç farkı (kPa),

$\Delta p_i$  : i noktasındaki basınç farkı (kPa),

C :  $129 \text{ (m/s)} \times (\text{kg}/(\text{kmol} \times \text{K}))^{1/2}$ ,

K : Pitot tüpü katsayısı,

$T_s$  : Ortalama baca gazı sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ),

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

$p_e$  : Mutlak gaz basıncı (kPa),

A : Baca alanı ( $\text{m}^2$ ).

Hava ve yakıt ölçüm metoduna göre, makinenin yaktığı yakıt ve makine giriş havasının debisi belirlenerek Denklem 3.11' de verilen şekilde egzoz gazı kütle debisi belirlenmektedir. Makinenin yaktığı yakıt ( $q_{mf}$ ) ve makine giriş havasının debisi ( $q_{maw}$ ) uluslar arası standartlara uygun şekilde belirlenmelidir.

$$q_{mew} = q_{maw} + q_{mf} \quad (3.11)$$

Yakıt debisi ölçümü ve karbon denge metoduna göre egzoz debisi hesabı için makinenin yaktığı yakıt belirlenmelidir. Makinenin yaktığı yakıt belirlendikten sonra Denklem 3.12' de verilen karbon denge metoduna göre egzoz gazı kütle debisi hesaplanabilir.

$$q_{mew} = q_{mf} \times \left( \left( \frac{1.4 \times (w_{BET} \times w_{BET})}{\left( \frac{(1.4 \times w_{BET})}{f_c} + (w_{ALF} \times 0.08936) - 1 \right) \times \frac{1}{1.293} + f_{fd}} + f_{fd} \right) + (w_{ALF} \times 0.08936) - 1 \right) \times \left( 1 + \frac{H_a}{1000} \right) + 1 \quad (3.12)$$

Bu denklemde;

$w_{ALF}$  : Yakıt hidrojen içeriği,

$w_{BET}$  : Yakıt karbon içeriğidir.

Denklem 3.12' de verilen  $f_{fd}$  ve  $f_c$  katsayıları Denklem 3.13 ve Denklem 3.14' e göre hesaplanmaktadır.

$$f_{fd} = -0.055593 \times w_{ALF} + 0.008002 \times w_{DEL} + 0.0070046 \times w_{EPS} \quad (3.13)$$

$$f_c = (c_{CO_2,d} - c_{CO_2,ad}) \times 0.5441 + \frac{c_{CO_d}}{18522} + \frac{c_{HC_w}}{17355} \quad (3.14)$$

Makine giriş havasının mutlak nemliliği ( $H_a$ ), Denklem 3.15' e göre, makine giriş havasının doyma buhar basıncı ( $p_a$ ) ise Denklem 3.16' ya göre hesaplanmaktadır. Denklem 3.14' te verilen karbon dioksit ( $c_{CO_2}$ ), karbon monoksit ( $c_{CO}$ ) ve hidrokarbon ( $c_{HC}$ ) konsantrasyon değerleri gaz analizörü ile ölçümden elde edilecektir. Karbon dioksit ( $c_{CO_2}$ ) ve karbon monoksit ( $c_{CO}$ ) konsantrasyon değerleri kuru bazda, hidrokarbon ( $c_{HC}$ ) konsantrasyon değeri ise ıslak bazdaki değerdir. Ortam havasında bulunan karbon dioksit değeri ( $c_{CO_2,ad}$ ) %0.03 olarak verilmektedir.

$$H_a = 6.22 \times p_a \times R_a \div (p_b - 0.01 \times R_a \times p_a) \quad (3.15)$$

$$p_a = (4.856884 + 0.2660089 \times t_a + 0.01688919 \times t_a^2 - 7.477123 \times 10^{-5} \times t_a^3 + 8.10525 \times 10^{-6} \times t_a^4 - 3.115221 \times 10^{-8} \times t_a^5) \times (101.32 \div 760) \quad (3.16)$$

Bu denklemlerde;

$R_a$  : Ortam havası bağıl nemliliği (%),

$p_b$  : Ortam havası barometrik basıncı (kPa),

$t_a$  : Ortam havası sıcaklığıdır ( $^{\circ}C$ ).

Azot oksit emisyonu hesaplama fomülü 3.6a' da, diğer emisyon türleri için verilen formülden farklı olarak nemlilik faktörü ( $k_{hd}$ ) çarpım olarak formüle eklenmiştir. Nemlilik faktörü, sıkıştırılmalı içten yanmalı makineler için ve ara hava soğutmalı sıkıştırılmalı içten yanmalı makineler için olmak üzere iki denklem ile hesaplanmaktadır. Sıkıştırılmalı içten yanmalı makinelerde nemlilik faktörü Denklem 3.17a ile, ara hava soğutmalı sıkıştırılmalı içten yanmalı makinelerde nemlilik faktörü ise Denklem 3.17b ile hesaplanmaktadır.

$$k_{hd} = \frac{1}{1 - 0.0182 \times (H_a - 10.71) + 0.0045 \times (T_a - 298)} \quad (3.17a)$$

$$k_{hd} = \frac{1}{1 - 0.012 \times (H_a - 10.71) + 0.00275 \times (T_a - 298) + 0.00285 \times (T_{SC} - T_{SCRef})} \quad (3.17b)$$

Denklem 3.15' de verilen makine giriş havasının mutlak nemliliği, yanma havası mutlak nemlilik miktarından ( $H_{sc}$ ) büyükse, Denklem 3.17b' de makine giriş havası mutlak nemliliği ( $H_a$ ) yerine yanma havası mutlak nemliliği ( $H_{sc}$ ) kullanılacaktır. Yanma havası mutlak nemliliği ( $H_{sc}$ ) Denklem 3.18' e göre hesaplanmaktadır. Nemlilik faktörü hesaplamalarında Denklem 3.17b kullanılacak ise, makine giriş havasının mutlak nemliliği ( $H_a$ ) ve yanma havası mutlak nemliliği ( $H_{sc}$ ) hesaplanarak karşılaştırılmalı ve hangi değerin kullanılacağı belirlenmelidir.

$$H_{sc} = 6.22 \times p_{sc} \times 100 \div (p_c - p_{sc}) \quad (3.18)$$

Bu denklemlerde;

$p_c$  : Yanma havası basıncı (kPa),

$p_{sc}$  : Yanma havası buhar doyma basıncıdır (kPa).

Egzoz emisyonları belirlenirken çeşitli parametrelerin ölçümleri ıslak bazda (wet basis) veya kuru bazda (dry basis) yapılabilmektedir. Örneğin egzoz gazı konsantrasyonları kuru bazda veya ıslak bazda belirlenebilmektedir. Benzer şekilde debi değerleri kuru bazda veya ıslak bazda belirlenebilmektedir. Emisyon konsantrasyonunu belirlemek için yapılan ölçümlerin baz türü ile denklemlerde kullanılması gereken baz türü farklı ise Denklem 3.19' a göre kuru baz ıslak baz dönüşümü yapılmaktadır. Denklem 3.19 da verilen kuru baz ıslak baz düzeltme faktörü ( $k_w$ ) emisyon konsantrasyonlarının kuru baz ıslak baz dönüşümleri için kullanılmaktadır.

$$c_w = k_w \times c_d \quad (3.19)$$

Kuru baz ıslak baz düzeltme faktörü ( $k_w$ ), makinede tam yanma olma durumunda veya makinede eksik yanma olması durumunda farklı şekillerde belirlenmektedir. Makinede tam yanma gerçekleşmesi durumunda kuru ıslak baz düzeltme faktörü Denklem 3.20a' ya veya Denklem 3.20b' ye göre hesaplanmaktadır.

$$k_w = \left( 1 - \frac{1.2442 \times H_a + 111.19 \times w_{ALF} \times \frac{q_{mf}}{q_{mad}}}{773.4 + 1.2442 \times H_a + \frac{q_{mf}}{q_{mad}} \times f_{fw} \times 1000} \right) \times 1.008 \quad (3.20a)$$

$$k_w = \left( 1 - \frac{1.2442 \times H_a + 111.19 \times w_{ALF} \times \frac{q_{mf}}{q_{mad}}}{773.4 + 1.2442 \times H_a + \frac{q_{mf}}{q_{mad}} \times f_{fw} \times 1000} \right) \times \left( 1 - \frac{P_r}{P_b} \right) \quad (3.20b)$$

Kuru bazda yakıt faktörü ( $f_{fw}$ ), Denklem 3.21' e göre hesaplanmaktadır.

$$f_{fw} = 0.055594 \times w_{ALF} + 0.0080021 \times w_{DEL} + 0.0070046 \times w_{EPS} \quad (3.21)$$

Makinede eksik yanma gerçekleşmesi durumunda kuru baz ıslak baz düzeltme faktörü Denklem 3.22' ye göre hesaplanmaktadır.

$$k_w = \frac{1}{1 + \alpha \times 0.005 \times (c_{CO_2d} + c_{COd}) - 0.01 \times c_{H_2d} + k_{w_2} - \frac{P_r}{P_b}} \quad (3.22)$$

Hidrojen-karbon molar oranı ( $\alpha$ ), Denklem 3.23' ye göre hesaplanmaktadır. Distile yakıt (distillate fuel oil) ve ağır yakıt (residual fuel oil) olmak üzere iki tür yakıt için hidrojen ve karbon oranları Çizelge 2.2' de sunulmuştur.

$$\alpha = 11.9164 \times \frac{W_{ALF}}{W_{BET}} \quad (3.23)$$

Kuru bazda hidrojen konsantrasyonu ( $c_{H_2d}$ ), Denklem 3.24' e göre hesaplanmaktadır. Denklem 3.14 ve Denklem 3.22' de verilen karbon dioksit ( $c_{CO_2}$ ) ve karbon monoksit ( $c_{CO}$ ) konsantrasyon değerleri yüzdeler (%) birimde olmalıdır. Karbon dioksit ( $c_{CO_2}$ ) ve karbon monoksit ( $c_{CO}$ ) konsantrasyon değerleri gaz analizörü ile ölçümden elde edilecektir. Ölçümler Bölüm 3.2.1' de tarif edilmiştir. Denklem 3.16' da verilen makine giriş havası için kurubaz ıslak baz düzeltme katsayısı ( $k_{w_2}$ ), Denklem 3.25' e göre hesaplanmaktadır.

$$c_{H_2d} = \frac{0.5 \times \alpha \times c_{COd} \times (c_{COd} + c_{CO_2d})}{c_{COd} + 3 \times c_{CO_2d}} \quad (3.24)$$

$$k_{w_2} = \frac{1.608 \times H_a}{1000 + (1.608 \times H_a)} \quad (3.25)$$

Makine giriş havası için kuru baz ıslak baz düzeltme faktörü ( $k_{wa}$ ), Denklem 3.26' ya göre hesaplanmaktadır. Kuru bazda belirlenen makine giriş havası debisi Denklem 3.26' da belirlenen kuru baz ıslak baz düzeltme faktörü ile çarpılarak, makine giriş havasının ıslak bazdaki değeri elde edilebilir.

$$k_{wa} = 1 - k_{w_2} \quad (3.26)$$

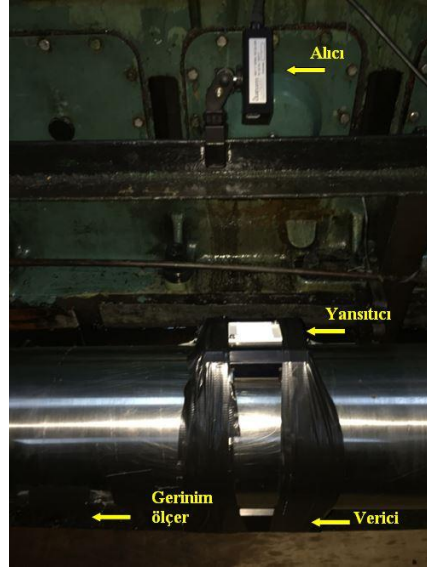
### 3.4 Egzoz Emisyon Ölçümleri

Egzoz emisyon ölçümleri Bölüm 3.3' te tarif edilen NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanı' na uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Makine egzoz bacasında ölçüm alınan nokta ölçüm prosedüründe tarif edilen özelliklere uygun bir noktada gerçekleştirilmiştir. Egzoz bacası ve emisyon ölçüm noktası Şekil 3.5' te sunulmuştur.



Şekil 3.5 : Egzoz bacası ve emisyon ölçüm noktası.

Şaft gücü ölçümü için makine çıkışında ölçüm almaya elverişli bir şaft olmadığı için şanzıman grubu çıkışında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şaft gücü ölçüm noktası ile makine arasında güç kaybına neden olan yardımcı ekipman olarak şanzıman grubu bulunmaktadır. Şaft gücü ölçüm sistemi Şekil 3.6' da sunulmuştur.



**Şekil 3.6 :** Şaft gücü ölçüm sistemi.

Emisyon ölçümleri öncesinde gaz analizörleri, ısıtmalı proplar, ısıtmalı hatlar ve soğutma sistemi uygun şekilde montaj yapılmıştır. Gaz analizörleri ve ısıtmalı hatlar ve soğutma sistemi ölçüm öncesinde üretici firmanın tavsiye ettiği cihaz ısınma süresi göz önünde bulundurularak ölçüme hazır hale getirilmiştir.

Egzoz gazı hızı ve sıcaklık ölçümleri, emisyon ölçümlerinin alındığı noktada gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler öncesinde gaz analizörlerinin sıfır ve ölçek kalibrasyonları, kalibrasyon gazları ile yapılmıştır. Ölçümler arasında sıfır ve ölçek kalibrasyonları kontrol edilmiştir. Şaft gücü ölçüm sistemi sıfır kalibrasyonu her bir ölçüm sonrasında yapılmıştır. Egzoz gazı hız ölçümleri öncesinde hız ölçüm cihazı otomatik sıfırlama işlemi yapılmıştır.

Emisyon ölçümleri makinenin sevk sistemi göz önünde bulundurularak Çizelge 3.5' te verilen E2 tip test şartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Bu test şartlarına göre %25, %50, %75 ve %100 makine yüklerinde emisyon ölçümleri alınmıştır. Makine yükü belirlenen değere ulaşmış ve stabil hale geldikten sonra gaz analizörleri ile emisyon konsantrasyon değerleri ölçülmüştür. Şaft gücü ölçer ile şaft gücü anlık olarak ölçülerek kaydedilmiştir. Egzoz gazı hızı pitot tüpü ile, egzoz gazı sıcaklığı k tipi termokupl ile ölçülmüştür. Egzoz gazı hızı bacanın farklı noktalarında tekrarlı şekilde ölçülmüştür. Makine dairesi ortam sıcaklığı ve bağıl nemi portatif sıcaklık ve nem ölçer ile ölçülmüştür. Makine dairesi ortam basıncı ise portatif basınç ölçer ile ölçülmüştür.

### **3.5 Emisyon Ölçümlerinde Belirsizlik Analizi**

Ölçüm sonuçları ölçülen büyüklüğün kesin sonucunu vermemektedir. Her ölçüm bir miktar hata içermektedir. Ölçüm sonuçlarına etki eden bu hatalar, rastlantısal hatalar ve sistematik hatalar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Rastlantısal hatalar, aynı şartlarda yapılan tekrarlı ölçümlerin ortalaması etrafında sapma göstermektedir. Rastlantısal hatayı belirleyebilmek sabit tutulan deney şartlarında çok sayıda ölçüm alınır. Ölçümler sonucunda alınan değerlerin ortalama değerden sapması bulunarak rastlantısal hata belirlenir. Sistematik hatalar, ölçümler boyunca sabit kalmakta veya önceden tahmin edilen bir yönde ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Sistematik hatalar sebebiyle ölçüm sonuçlarında, gerçek değerden bir miktar daha az veya daha fazla değer elde edilmektedir. Sistematik hata sayısal olarak bilindiğinde bu değer tüm ölçülen değerlere eklenen bir düzeltme faktörü gibi kullanılmaktadır (Sadıkhovalar ve diğerleri, 1995).

Emisyon ölçümlerinde, ölçüm hataları rastlantısal hatalar ve sistematik hatalar olarak iki grupta değerlendirilmiştir. Emisyon ölçümleri belirli şartlar altında gerçekleştirilen ölçümlerden oluşmaktadır. Belirlenen makine yükünde belirli bir süre boyunca ölçümler alınmaktadır. Ancak çeşitli dış etkenlerde ve değişen şartlardan dolayı rastlantısal hatalar oluşmaktadır. Rastlantısal hatalar ölçümlerde elde edilen verilerin ortalamadan sapma değeri olarak belirlenmiştir. Şaft gücü ölçümlerinde meydana gelen rastlantısal hatalar Denklem 3.3, Denklem 3.4 ve Denklem 3.5' te standart sapma hesabı ile belirlenmektedir.

Sistemik hatalar kalibrasyon sapmaları, ölçüm cihazından kaynaklanan hatalar, deney yönteminden kaynaklanan hatalar ve diğerlerinden oluşmaktadır (Sadıkho ve diğerleri, 1995). Ölçüm sonuçlarına etki eden sistemik hata Denklem 3.27' ye göre hesaplanmaktadır. Ölçüm sonuçlarına etki eden sistemik hatalar ASME (2005)' te verilen ölçüm sonuçlarına etki eden belirsizliklerin analitik hesaplanması metoduna göre hesaplanmıştır.

$$b_R = \left( \sum_{i=1}^l (\theta_i \times b_{x_i})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.27)$$

Bu denklemde;

$b_R$  : Toplam sistemik hata,

$\theta_i$  : Denklemin i bileşenine göre kısmi türevi,

$b_{x_i}$  : i bileşenin sistemik hatasıdır.

Denklem 3.27 egzoz gazı debisi hesabı için düzenlendiğinde Denklem 3.28 elde edilmektedir. Egzoz gazı kütle debisinin pitot tüpü ile belirlendiği durumlarda Denklem 3.28' e göre sonuca etki eden sistemik belirsizlik hesaplanmaktadır. Sonuca etki eden sistemik hatalar hız ölçümü hataları ve baca alan hesabı hatalarından kaynaklanmaktadır.

$$B_{q_{mew}} = \sqrt{\left( \frac{\partial q_{mew}}{\partial V} \times B_V \right)^2 + \left( \frac{\partial q_{mew}}{\partial r} \times B_r \right)^2} \quad (3.28)$$

Emisyon kütle debisi sonucuna etki eden sistemik hata Denklem 3.29' a göre hesaplanmaktadır. Sonuca etki eden sistemik hatalar, egzoz kütle debi hesabı sistemik hatası ve emisyon konsantrasyon ölçümü sistemik hatasıdır. Emisyon konsantrasyon ölçüm hatası gaz analizörünün sistemik hataları bileşiminden kaynaklanmaktadır. Gaz analizörü sistemik hatası Denklem 3.30' a göre hesaplanmaktadır. Gaz analizörü sistemik hatasına etki eden bileşenler lineerlik, sıfır sapması, ölçek sapması ve tekrarlanabilirliktir. Diğer bileşenlerin değerleri göreceli olarak oldukça düşük olup değerlendirilmemiştir.

$$B_{q_{mgas}} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{mgas}}{\partial c_{gas}} \times B_{c_{gas}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{mgas}}{\partial q_{mew}} \times B_{q_{mew}}\right)^2} \quad (3.29)$$

$$B_{c_{gas}} = \sqrt{B_{lin}^2 + B_{span}^2 + B_{zero}^2 + B_{rep}^2} \quad (3.30)$$

Hesaplanan emisyon değerine etki eden sistematik hatalar Denklem 3.31' e göre hesaplanmaktadır. Sonuca etki eden sistematik hatalar emisyon kütle debi hesabı sistematik hatası ve shaft gücü ölçümü sistematik hatasıdır.

$$B_{gas} = \sqrt{\left(\frac{\partial gas}{\partial q_{mgas}} \times B_{q_{mgas}}\right)^2 + \left(\frac{\partial gas}{\partial P} \times B_P\right)^2} \quad (3.31)$$

Ölçüm sonuçlarına etki eden rastlantısal hatalar ve sistematik hatalar belirlenerek Denklem 3.32' ye göre bileşik belirsizlik değeri hesaplanmaktadır.

$$u_{\bar{X}} = \sqrt{(b_{\bar{X}})^2 + (s_{\bar{X}})^2} \quad (3.32)$$

Bileşik belirsizlik değeri %95 güven aralığında verilmektedir ve bileşik genişletilmiş belirsizlik değeri Denklem 3.33' e göre hesaplanmaktadır.

$$U_{\bar{X}} = 2 \times u_{\bar{X}} \quad (3.33)$$

Ölçüm sonuçlarına etki eden belirsizlik değeri Denklem 3.34' e göre verilmektedir.

$$\bar{X} \pm U_{\bar{X}} \quad (3.34)$$

## **4. EGZOZ EMİSYONLARININ TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

### **4.1 Giriş**

Gemilerin egzoz emisyonunu teorik olarak hesaplama yöntemi genellikle bölgesel veya global olarak çok sayıda gemiden yayılan toplam egzoz emisyonu miktarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, gemi egzoz emisyonundan kaynaklanan hava ve çevre kirliliği, gemi egzoz emisyonunun iklime ve atmosfere etkileri gibi çeşitli çalışmalarda kullanılmaktadır. Literatürde gemi egzoz emisyonlarının teorik olarak belirlendiği çalışmalarda, egzoz emisyonlarının teorik olarak belirlenmesi için iki farklı metot kullanılmaktadır. Bu metotlar, yakıt tüketimini temel alan yukarıdan aşağıya (top-down) metodu ve gemi makine gücünü temel alan aşağıdan yukarıya (bottom-up) metodudur. Bu metotlar ile gemilerden yayılan egzoz emisyonlarının hesabında aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya metotları için belirlenmiş emisyon faktörlerini kullanılmaktadır.

Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya emisyon hesaplama metotları ile yapılan emisyon envanter çalışmaları 90' lı yıllarda başlamıştır (Corbett ve diğerleri, 1999; Trozzi ve Vaccaro, 1998). Zaman içinde yapılan çalışmalarla gemilerin yakıt tüketim verileri ve gemilerde kullanılan makineler hakkında detaylı veriler elde edilmiştir. Böylece temsil yeteneği iyileştirilmiş çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalar ile teorik olarak emisyonların belirlenmesi için kullanılan veriler güncellenmekte ve geliştirilmektedir. Yöntemler ise iyileştirilerek daha doğru ve hassas emisyon hesaplamaları yapılabilmektedir. Bu çalışmalardan Trozzi (2010) ve Van Aardenne ve diğerleri (2013) yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya metotları için iyileştirilmiş hesaplama metotları sunmuşlardır. Smith ve diğerleri (2014), yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya metotlarında kullanılan emisyon faktörlerini sunmuştur.

## 4.2 Yukarıdan aşağıya (top down) metodu

Yukarıdan aşağıya metodu gemilerden yayılan emisyonları belirlenmesi için gemilerin tükettiği yakıtı ve gemilerin yaktığı birim ton yakıt başına ürettiği emisyonu temel almaktadır. Bu metot kullanılarak yapılan çalışmalarda deniz tipi yakıt satış istatistiklerinden gemilerin tükettiği yakıt belirlenmektedir. Gemilerin tükettiği yakıt miktarı, emisyon faktörü ile çarpılarak gemilerden yayılan emisyon miktarları belirlenmektedir. Trozzi (2010) ve Van Aardenne ve diğerleri (2013) yukarıdan aşağıya metodu için seviye 1, seviye 2 ve seviye 3 olmak üzere üç tür hesaplama metodu sunmuştur. Seviye 1 metodu basit bir yaklaşım olup gemiler hakkında detaylı bilgiler gerektirmemektedir. Seviye numarası arttıkça metodun gelişmişlik düzeyi artmaktadır. Ancak iyileştirilmiş metotlarla hesaplama yapabilmek için gemiler ile ilgili detaylı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır.

### 4.2.1 Seviye 1 yaklaşımı

Seviye 1 yaklaşımında gemi egzoz emisyonları Denklem 4.1' e göre hesaplanmaktadır. Değişik yakıt türlerinin tüketim miktarı ve bu yakıt türleri için belirlenen emisyon faktörleri bilindiği durumda bu yöntem ile gemilerden yayılan egzoz emisyonları hesaplanabilmektedir.

$$E_i = \sum_m (FC_m \times EF_{i,m}) \quad (4.1)$$

Bu denklemde;

$E_i$  : Her bir emisyon türü  $i$  için yayılan toplam emisyon miktarı (kg),

$FC_m$  : Her bir yakıt türü tüketim miktarı (ton),

$EF_{i,m}$  : Yakıt türüne bağlı emisyon faktörü (kg/ton),

$m$  : Yakıt türü.

Çizelge 4.1' de kullanılan yakıt türüne bağlı emisyon faktörleri seviye 1 yaklaşımı için sunulmuştur. Çizelge 4.1' de verilen  $NO_x$ , CO ve  $SO_x$  emisyon faktörleri Van Aardenne ve diğerleri (2013)' den alınmıştır.  $CO_2$  ve HC emisyonları ( $CH_4$  ve NMVOC) Smith ve diğerleri (2014)' den alınmıştır. Çizelge 4.1' de verilen kükürt oksit ( $SO_x$ ) emisyon faktörü, kullanılan yakıt içerisindeki kükürt oranına bağlı olarak

değişmektedir. Kükürt oksit emisyon faktörü Denklem 4.2' ye göre hesaplanmaktadır.

$$EF_{SO_x} = 20 \times S \quad (4.2)$$

Bu denklemde;

$EF_{SO_x}$  : Kükürt oksit emisyon faktörü (kg/ton yakıt),

S : Yakıt içerisindeki kükürt miktarı (%).

**Çizelge 4.1 : Seviye 1 emisyon faktörleri.**

Emisyon Türü	Emisyon Faktörü (HFO)	Emisyon Faktörü (MDO/MGO)	Birim
NO <sub>x</sub>	79.3	78.5	kg/ton yakıt
CO	7.4	7.4	kg/ton yakıt
SO <sub>x</sub>	20xS	20xS	kg/ton yakıt
CO <sub>2</sub>	3114	3114	kg/ton yakıt
CH <sub>4</sub>	0.05	0.05	kg/ton yakıt
NMVOG	3.08	3.08	kg/ton yakıt

#### 4.2.2 Seviye 2 yaklaşımı

Seviye 2 yaklaşımı, Seviye 1 yaklaşımına gibi yakıt tüketimini esas almaktadır. Ancak, yakıt türü ve içeriğinin ülkelere özgü bilgileri ve gemi makine tipi bilgileri bu metotta hesaplamalarda değerlendirmeye katılmaktadır. Seviye 1 yaklaşımına kıyasla iyileştirmeler içermektedir ancak, bu yaklaşım ile hesaplama yapabilmek için gemilerin kullandığı makine tipleri bilinmelidir. Seviye 2 yaklaşımında gemi egzoz emisyonları Denklem 4.3' e göre hesaplanmaktadır.

$$E_i = \sum_m \left( \sum_j (FC_{m,j} \times EF_{i,m,j}) \right) \quad (4.3)$$

Bu denklemde;

$E_i$  : Yıllık emisyon miktarı (ton),

$FC_m$  : Her bir makine tipi j için tüketilen yakıt türü m (ton),

$EF_{i,m}$  : Yakıt türüne ve makine tipine bağlı emisyon faktörü (kg/ton),

j : Makine tipi,

m : Yakıt türü.

Çizelge 4.2' de, kullanılan yakıt türüne, makine tipine ve gemi üretim yılına bağlı azot oksit emisyon faktörleri seviye 2 yaklaşımı için sunulmuştur. Makine tipi yüksek devir (YD), orta devir (OD) ve düşük devir (DD) olarak gruplandırılmıştır. Emisyon faktörleri 2000, 2005 ve 2010 yılları için verilmiştir. Azot oksit emisyon faktörleri tüketilen birim ton yakıt başına üretilen kilogram emisyon (kg/ton) birimindedir. Çizelge 4.2' de verilen NO<sub>x</sub> emisyon faktörleri Van Aardenne ve diğerleri (2013)' den alınmıştır. CO ve SO<sub>x</sub> emisyonları için Çizelge 4.1' de verilen değerler kullanılmaktadır.

**Çizelge 4.2 : Seviye 2 NO<sub>x</sub> emisyon faktörü.**

Makine Tipi	Yakıt Türü	NO <sub>x</sub> EF 2000	NO <sub>x</sub> EF 2005	NO <sub>x</sub> EF 2010
YD	Fuel Oil	59.6	57.7	55.6
YD	MDO/MGO	59.1	57.1	55.1
OD	Fuel Oil	65.7	63.4	61.3
OD	MDO/MGO	65.0	63.1	60.6
DD	Fuel Oil	92.8	89.7	86.5
DD	MDO/MGO	91.9	88.6	86.5

### 4.2.3 Seviye 3 yaklaşımı

Seviye 3 yaklaşımı da Seviye 1 ve Seviye 2 yaklaşımı gibi yakıt tüketimini esas almaktadır. Diğer yaklaşımlara göre daha geliştirilmiştir. Gemiden yayılan egzoz emisyonları geminin farklı çalışma şartlarına göre değerlendirilmektedir. Gemilerin faaliyetleri, liman ve zincirleme, manevra ve seyir olmak üzere 3 grupta değerlendirilmektedir. Bu 3 faaliyet türünden oluşan emisyon miktarları hesaplanarak gemilerden yayılan toplam emisyon miktarı Denklem 4.4' e göre hesaplanmaktadır. Her bir faaliyet durumu, yakıt türü ve makine türü göz önüne alındığında, egzoz emisyonu hesabı Denklem 4.5' e göre yapılmaktadır.

$$E_{sefer} = E_{liman} + E_{manevra} + E_{seyir} \quad (4.4)$$

$$E_{trip} = \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p}) \quad (4.5)$$

Bu denklemde;

$E_{trip}$  : Bir gemi seferinde emisyon miktarı (ton),

$FC$  : Tüketilen yakıt miktarı (ton),

$EF$  : Emisyon faktörü (kg/ton),

$i$  : Emisyon türü,

$m$  : Yakıt türü,

$j$  : Makine tipi,

$p$  : Gemi faaliyet türü.

Çizelge 4.3' te ana makine için, Çizelge 4.4' te ise gemi yardımcı makinesi için gemi faaliyet türüne, kullanılan yakıt türüne, makine tipine ve yıllara bağlı emisyon faktörleri seviye 3 yaklaşımı için sunulmuştur. Gemi faaliyet durumu seyir (S) ve liman ve manevra (L-M) olarak gruplandırılmıştır. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4' te verilen  $NO_x$  emisyon faktörleri Van Aardenne ve diğerleri (2013)' den alınmıştır. CO ve  $SO_x$  emisyonları için Çizelge 4.1' de verilen değerler kullanılmaktadır.

**Çizelge 4.3 : Seviye 3 ana makine için  $NO_x$  emisyon faktörü.**

Gemi Faaliyeti	Makine Tipi	Yakıt Türü	$NO_x$ EF	$NO_x$ EF	$NO_x$ EF
			2000	2005	2010
S	YD	Fuel Oil	59.6	57.7	55.6
S	YD	MDO/MGO	59.1	57.1	55.1
S	OD	Fuel Oil	65.7	63.4	61.3
S	OD	MDO/MGO	65.0	63.1	60.6
S	DD	Fuel Oil	92.8	89.7	86.5
S	DD	MDO/MGO	91.9	88.6	86.5
L-M	YD	Fuel Oil	43.6	42.3	40.6
L-M	YD	MDO/MGO	43.0	41.7	40.1
L-M	OD	Fuel Oil	47.9	46.2	44.6
L-M	OD	MDO/MGO	47.5	45.7	44.3
L-M	DD	Fuel Oil	67.4	65.1	62.9
L-M	DD	MDO/MGO	66.7	64.2	62.1

**Çizelge 4.4 :** Seviye 3 yardımcı makine için NO<sub>x</sub> emisyon faktörü.

Makine Tipi	Yakıt Türü	NO <sub>x</sub> EF 2000	NO <sub>x</sub> EF 2005	NO <sub>x</sub> EF 2010
YD	Fuel Oil	51.1	49.4	47.6
YD	MDO/MGO	50.2	48.6	46.8
OD	Fuel Oil	64.8	62.5	60.4
OD	MDO/MGO	64.1	62.0	59.7

### 4.3 Aşağıdan yukarıya (bottom up) metodu

Aşağıdan yukarıya metodu gemilerden yayılan emisyonları belirlenmesi için gemi kurulu gücünü ve gemilerin seferde ve farklı çalışma koşullarında harcadığı süreyi temel almaktadır. Bu metotta kullanılan emisyon faktörleri birim güç başına birim saatte yayılan emisyon biriminde olmalıdır. Makinenin ürettiği güç ve bu güçte kaldığı süre emisyon faktörü ile çarpılarak üretilen emisyon miktarları belirlenmektedir. Trozzi (2010) ve Van Aardenne ve diğerleri (2013), tarafından yapılan çalışmada sunulan aşağıdan yukarıya egzoz emisyon hesabı formülü Denklem 4.6' da verilmiştir.

$$E_{trip,i,j,m} = \sum_p \left[ T_p \times \sum_e (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p}) \right] \quad (4.6)$$

Bu denklemde;

$E_{trip}$  : Bir gemi seferinde emisyon miktarı (ton),

$EF$  : Emisyon faktörü (g/kWh),

$LF$  : Makine yük faktörü,

$P$  : Makine gücü,

$T$  : Zaman (saat),

$e$  : Makine kategorisi (ana, yardımcı),

$i$  : Emisyon türü,

$m$  : Yakıt türü,

$j$  : Makine tipi,

p : Gemi faaliyet türü.

Sefer süresi bilinmediği durumlarda Denklem 4.7' ye göre hesaplanmaktadır.

$$T_{seyir} = \frac{X}{V} \quad (4.7)$$

Bu denklemde;

$T_{seyir}$  : Seyir süresi (saat),

X : Seyir mesafesi (km),

V : Ortalama seyir hızı (km/saat).

Çizelge 4.5' de geminin 3 seyir hali için geçerli olmak üzere gemi ana makinesi için geçerli azot oksit emisyon faktörü verilmiştir. Emisyon faktörü (EF) birim güç başına birim saatte yayılan gram emisyon (g/kWh) birimindedir. Ayrıca makine spesifik yakıt tüketim (SFOC) değerleri verilmiştir. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6' da verilen NO<sub>x</sub> emisyon faktörleri Van Aardenne ve diğerleri (2013)' den alınmıştır.

**Çizelge 4.5 : Ana makine için NO<sub>x</sub> emisyon faktörleri.**

Gemi Faaliyeti	Makine Tipi	Yakıt Türü	NO <sub>x</sub> EF 2000	NO <sub>x</sub> EF 2005	NO <sub>x</sub> EF 2010	SFOC (g/kWh)
S	YD	Fuel Oil	12.7	12.3	11.8	213.0
S	YD	MDO/MGO	12.0	11.6	11.2	203.0
S	OD	Fuel Oil	14.0	13.5	13.0	213.0
S	OD	MDO/MGO	13.2	12.8	12.3	203.0
S	DD	Fuel Oil	18.1	17.5	16.9	195.0
S	DD	MDO/MGO	17.0	16.4	15.8	185.0
L-M	YD	Fuel Oil	10.2	9.9	9.5	234.0
L-M	YD	MDO/MGO	9.6	9.3	8.9	223.0
L-M	OD	Fuel Oil	11.2	10.8	10.4	234.0
L-M	OD	MDO/MGO	10.6	10.2	9.9	223.0
L-M	DD	Fuel Oil	14.5	14.0	13.5	215.0
L-M	DD	MDO/MGO	13.6	13.1	12.7	204.0

Çizelge 4.6' da ise yardımcı makine için gemi faaliyet türüne, kullanılan yakıt türüne ve makine tipine bağlı azot oksit emisyon faktörü aşağıdan yukarıya metot için

sunulmuştur. CO ve SO<sub>x</sub> emisyonları Trozzi (2010) ve Van Aardenne ve diğerleri (2013) tarafından bu metot ile değerlendirilmemiştir. Ancak değişik çalışmalarda verilen emisyon faktörleri kullanılarak bu emisyon türleri için hesaplama yapılabilir.

**Çizelge 4.6 :** Yardımcı makine için NO<sub>x</sub> emisyon faktörü.

Makine Tipi	Yakıt Türü	NO <sub>x</sub> EF2000	NO <sub>x</sub> EF2005	NO <sub>x</sub> EF2010	SFOC(g/kWh)
YD	Fuel Oil	11.6	11.2	10.8	227.0
YD	MDO/MGO	10.9	10.5	10.2	217.0
OD	Fuel Oil	14.7	14.2	13.7	227.0
OD	MDO/MGO	13.9	13.5	13.0	217.0

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6' da yalnızca NO<sub>x</sub> emisyon faktörleri verilmiştir. Aşağıdan yukarıya metodu diğer emisyon faktörleri yapılan değişik çalışmalarda verilmiştir. Çizelge 4.7' de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve HC emisyonları için emisyon faktörleri verilmiştir. Ritchie ve diğerleri (2005) yaptığı çalışmada NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ve HC emisyon faktörlerini değişik durumlar için belirlemişlerdir. Çizelge 4.7' de bu değerler verilmiştir. Smith ve diğerleri (2014) tarafından yürütülen çalışmada CO emisyon faktörü yayınlanmıştır. Çizelge 4.7' de bu değer sunulmuştur.

**Çizelge 4.7 :** Diğer kirletici türleri için emisyon faktörleri.

Gemi Faaliyeti	NO <sub>x</sub> EF (g/kWh)	SO <sub>2</sub> EF (g/kWh)	CO <sub>2</sub> EF (g/kWh)	HC EF (g/kWh)	CO EF (g/kWh)
Seyir	13.2	1.0	697.0	0.46	0.54
Manevra	11.8	1.0	747	0.97	0.54
Liman	13.2	1.0	725	0.5	0.54

## **5. BİR FERİBOTTAN YAYILAN EGZOZ EMİSYONLARI**

### **5.1 Giriş**

Bu bölümde Marmara Denizinde yolcu ve araç taşımacılığında kullanılan tipik bir feribotta gerçekleştirilen emisyon ölçüm sonuçları sunulmuştur. Öncelikle ölçüm yapılan feribotun tipik özellikleri verilmiştir. Feribottan değişik makine yüklerinde belirlenen emisyon değerleri ve belirlenen spesifik emisyon değerleri sunulmuştur. Spesifik emisyon değerleri feribotun uyması gereken  $\text{NO}_x$  ve  $\text{SO}_2$  limitlerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca belirlenen emisyon değerlerini karşılaştırmak ve kontrol etmek amacıyla %75 ve %100 makine yükünde karbon denge metoduna göre emisyon değerleri belirlenmiş, %75 ve %100 makine yükünde ölçülen emisyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak feribotun bir seferi süresince yayılan emisyon miktarları ölçüm sonuçlarında belirlenen emisyon değerlerine göre ve literatürde yayınlanan değerlere göre hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Geminin bir seferi süresince yayılan emisyon miktarı belirlenmiş ve literatürde yayılan emisyon faktörlerinin bu feribot tipi için uygunluğu incelenmiştir. Ayrıca aylık olarak feribottan yayılan emisyon miktarı ve toplamda bir yılda yayılan emisyon miktarı hesaplanmıştır.

### **5.2 Egzoz Emisyon Ölçümü Yapılan Geminin Özellikleri**

Egzoz emisyon ölçümleri Gebze ve Yalova arasında yolcu ve araç taşıyan Ord. Prof. Ata Nutku feribotunda gerçekleştirilmiştir. Feribot 2000 yılında üretilmiş olup geminin genel görünüşü Şekil 5.1' de sunulmuştur. Geminin genel özellikleri ise Çizelge 5.1' de verilmiştir.



**Şekil 5.1 :** Ord. Prof. Ata Nutku Feribotu.

Feribotta iki adet 883 kW ana makine bulunmaktadır. Feribot baş ve kıç tarafında bulunan birer adet kontrol edilebilir kanatlı pervane (CPP) ile sevk edilmektedir. İki ana makine, eş makineler olup özellikleri aynıdır. İki ana makine tek şanzıman grubuna bağlı olup, iki makinede üretilen güç şanzıman çıkışında baştaki veya kıçtaki pervanelere tek bir yönde iletilebildiği gibi aynı anda her iki yöne verilebilmektedir. Ana makine, şanzıman grubu özellikleri ve egzoz baca çapı Çizelge 5.1' de verilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Ord. Prof. Ata Nutku Feribotu tipik özellikleri.

Parametre	Değer
Tam boy (m)	80.71
Dikmeler arası boy (m)	78.78
Genişlik (m)	22
Draft (m)	4.5
Gros tonaj (m <sup>3</sup> )	1595.72
Net tonaj (m <sup>3</sup> )	630.71
Detveyt tonaj (t)	225
Makine devri (rpm)	750
Makine gücü (kW)	2x883
Makine özgül yakıt tüketimi (g/kWh)	198
Şaft çapı (mm)	230
Şanzıman devir düşürme oranı	2.483
Şanzıman maksimum çıkış devri (rpm)	308
Baca çapı (mm)	360

Ana makinelerin ve şanzıman grubunun yerleşimi Şekil 5.2' de verilmiştir.



**Şekil 5.2 :** Ana makine ve şanzıman yerleşimi.

Feribotta ana makine, jeneratör ve kazanlarda aynı yakıt kullanılmaktadır. Kullanılan yakıt ultra düşük sülfür içerikli dizel yakıt olup, yakıt analiz sonuç değerleri Çizelge 5.2' de verilmiştir. Yakıt kükürt içeriği yaklaşık olarak 5 ppm değerindedir.

**Çizelge 5.2 :** Yakıt analiz sonuçları.

Parametre	Değer
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	832,1
Su İçeriği (mg/kg)	48
Kükürt İçeriği (mg/kg)	4,4
Setan İndisi	58,6

### 5.3 Egzoz Emisyonları Ölçüm Sonuçları

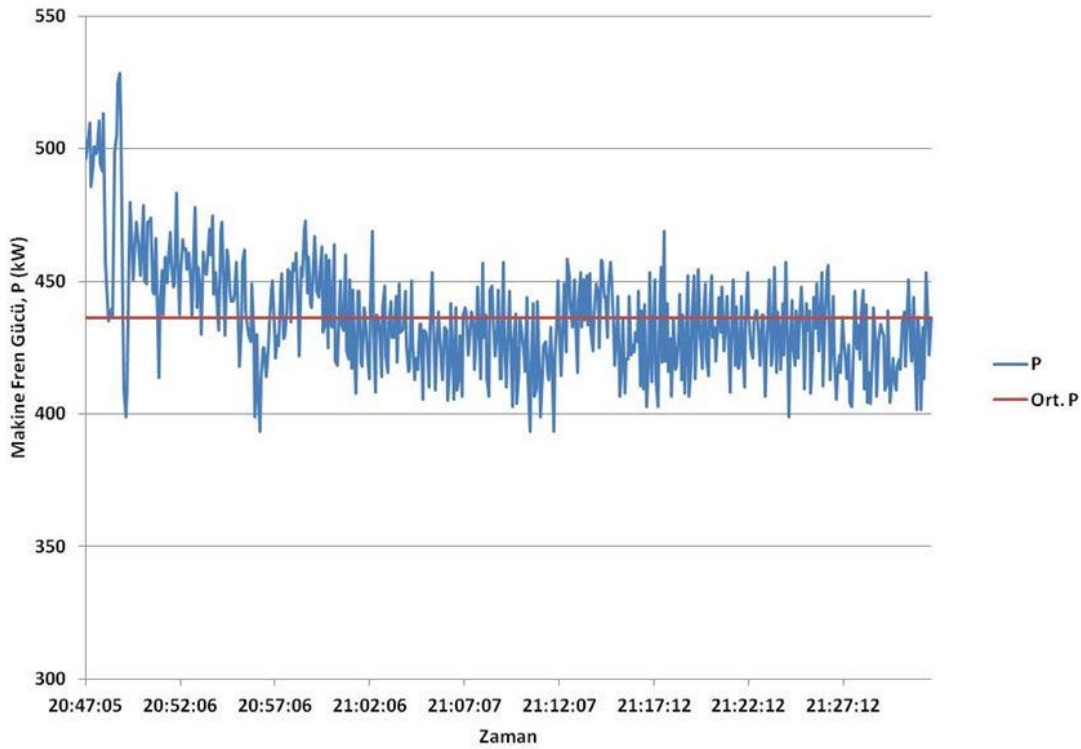
#### 5.3.1 Değişik yüklerde egzoz emisyon ölçüm sonuçları

Feribotun egzoz emisyon ölçümleri E2 test şartlarına uygun olarak %25, %50, %75 ve %100 makine yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Belirlenen makine yüklerinde emisyon konsantrasyonları ortam şartları ve egzoz gazı hızı ve sıcaklığı ölçülmüştür. Değişik makine yüklerinde alınan ölçüm sonuçları ve belirlenen emisyon değerleri çizelge olarak, makine fren gücü değerleri ise grafik olarak sunulmuştur.

Makine fren gücü, ölçülen şaft gücü değerinden belirlenmiştir. Şaft gücü ölçümü şanzıman grubundan sonra gerçekleştirildiği için Denklem 3.2' ye göre kayıp makine gücü ölçülen güce eklenmiştir. Şanzımanda kaybedilen makine gücü literatürde

verilen değerlere uyumlu olarak %5 alınmıştır (Friis ve diğerleri, n.d.; Northern lights, n.d.).

% 25 makine yükü için makine fren gücü değeri toplam kurulu gücün (1766 kW) % 25' i alınarak 441 kW olarak belirlenmiştir. Gemi ana makinesi belirlenen makine yükünde stabil halde çalışırken ölçümler gerçekleştirilmiştir. Egzoz emisyon ölçümleri ve diğer ölçümler süresince makine fren gücü değeri kaydedilmiştir. Zamana bağlı olarak makine fren gücü değeri ve ortalama makine fren gücü Şekil 5.3' te verilmiştir. Ayrıca ölçülen makine güç değerlerinin stabil olmasını ifade eden varyans güç faktörü (%C.O.V), %4.87 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, %5 limit değerinin altında olup, makinenin ölçümler süresince belirlenen güçte stabil şekilde kaldığını ifade etmektedir.



**Şekil 5.3 :** % 25 yükte zamana bağlı makine fren gücü.

Makine fren gücünün stabil olarak kaldığı bu aralıkta makine dairesi ortam koşulları, egzoz gazı hızı, egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazındaki emisyon konsantrasyon miktarı ölçülmüştür. Ölçülen ortam koşulları, egzoz gazı hızı, egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazındaki emisyon konsantrasyon değerleri ise Çizelge 5.3' te verilmiştir. NOX, SO<sub>2</sub>, CO ve HC emisyon konsantrasyonları milyonda bir biriminde (ppm) iken O<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> konsantrasyon miktarları hacimce yüzde (%V/V) birimindedir.

**Çizelge 5.3 : Ölçülen çeşitli parametreler (%25 yük).**

Parametre	Ölçüm sonuçları
T <sub>a</sub> (°C)	25.7
p <sub>b</sub> (kPa)	101.7
R <sub>a</sub> (%)	41.0
T <sub>exh</sub> (°C)	250
V <sub>exh</sub> m/s	9.7
NO <sub>x</sub> (ppm)	514
SO <sub>2</sub> (ppm)	4
CO (ppm)	115.6
CO <sub>2</sub> (% V/V)	2.67
O <sub>2</sub> (% V/V)	16.28
HC (ppm)	151

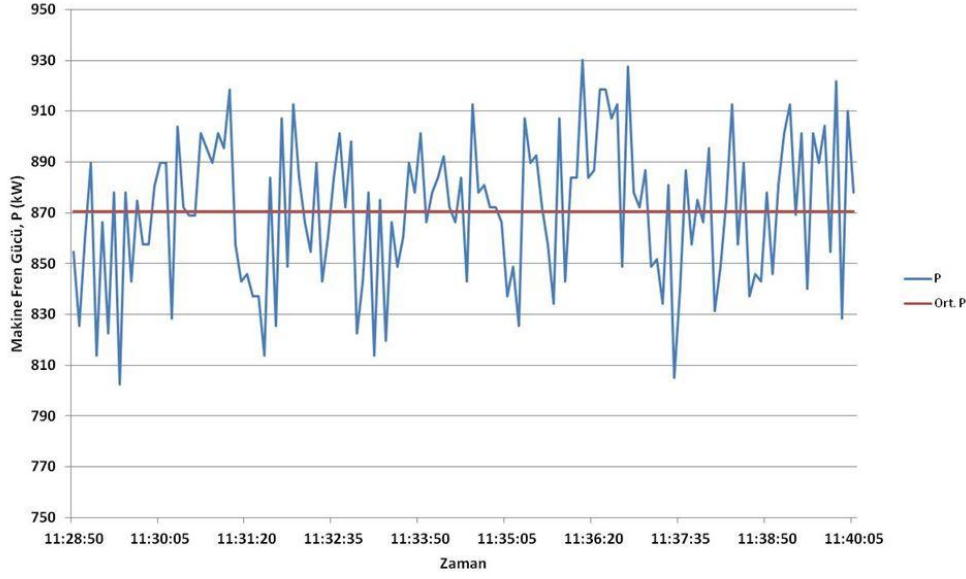
%25 makine yükünde emisyon değerleri ve ölçüm sonuçlarındaki belirsizlik değerleri Çizelge 5.4' te sunulmuştur.

**Çizelge 5.4 : Emisyon değerleri (%25 yük).**

Emisyon Türü	Emisyon değerleri	Sonuç belirsizlik değerleri
NO <sub>x</sub> (g/kWh)	15.310	±% 12.5
SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.165	±% 28.9
CO (g/kWh)	2.034	±% 12.7
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	737.800	±% 12.7
O <sub>2</sub> (g/kWh)	3270.935	±% 12.7
HC (g/kWh)	1.358	±% 12.0

% 50 makine yükü için makine fren gücü değeri toplam kurulu gücün (1766 kW) % 50' si alınarak 883 kW olarak belirlenmiştir. Makine belirlenen bu yükte stabil halde çalışırken ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Egzoz emisyon ölçümleri ve çeşitli parametre ölçümleri süresince makine fren gücü değeri kaydedilmiştir. Zamana bağlı olarak makine fren gücü değeri ve ortalama makine fren gücü Şekil 5.4' te verilmiştir. Ortalama güç değeri yaklaşık 870 kW olarak belirlenmiştir. Ayrıca ölçülen makine güç değerlerinin stabil olmasını ifade eden varyan güç faktörü (%C.O.V), %3,4 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, %5 limit değerinin altında olup, makinenin ölçümler süresince belirlenen güçte stabil şekilde kaldığını ifade etmektedir.



**Şekil 5.4 :** % 50 yükte zamana bağlı makine fren gücü.

%50 yükte ölçülen ortam koşulları, egzoz gazı hızı, egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazındaki emisyon konsantrasyon değerleri ise Çizelge 5.5' te verilmiştir.

**Çizelge 5.5 :** Ölçülen çeşitli parametreler (% 50 yük).

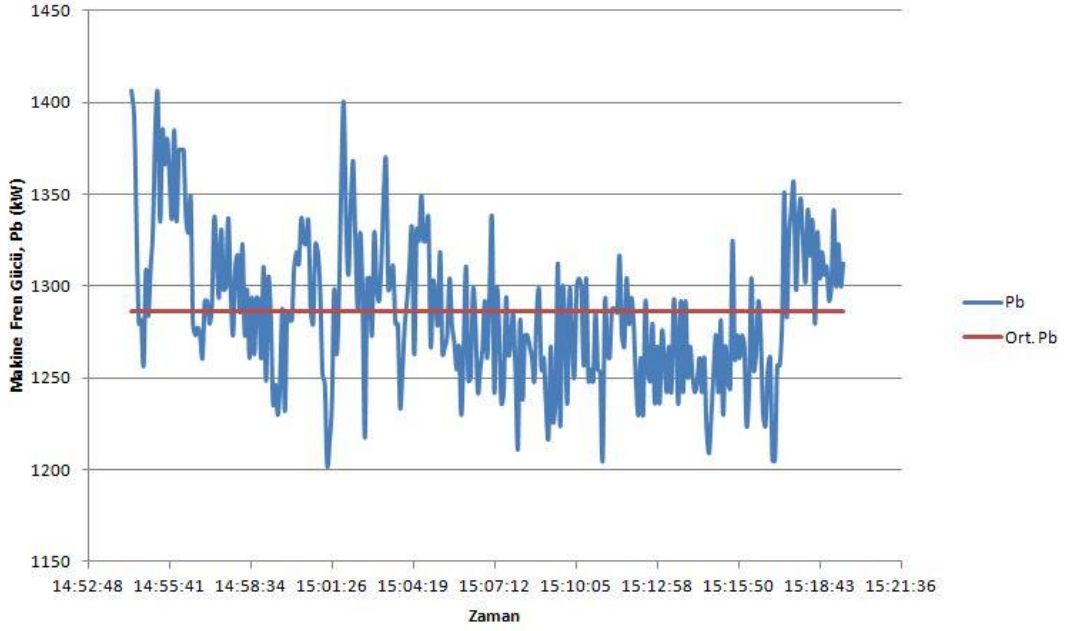
Parametre	Ölçüm sonuçları
T <sub>a</sub> (°C)	25.8
p <sub>b</sub> (kPa)	101.6
R <sub>a</sub> (%)	39.9
T <sub>exh</sub> (°C)	253.6
V <sub>exh</sub> m/s	11.9
NO <sub>x</sub> (ppm)	617.3
SO <sub>2</sub> (ppm)	4.6
CO (ppm)	82.1
CO <sub>2</sub> (% V/V)	3.08
O <sub>2</sub> (% V/V)	15.187
HC (ppm)	133

%50 makine yükünde emisyon değerleri ve ölçüm sonuçlarındaki belirsizlik değerleri Çizelge 5.6' da sunulmuştur.

**Çizelge 5.6 :** Emisyon değerleri (%50 yük).

Emisyon Türü	Emisyon değerleri	Sonuç belirsizlik değerleri
NO <sub>x</sub> (g/kWh)	11.311	±% 10.4
SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.116	±% 25.1
CO (g/kWh)	0.887	±% 10.8
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	522.660	±% 10.6
O <sub>2</sub> (g/kWh)	1873.831	±% 10.7
HC (g/kWh)	0.737	±% 9.8

% 75 makine yükü için makine fren gücü değeri, toplam kurulu gücün (1766 kW) % 75' i alınarak 1324 kW olarak belirlenmiştir. Gemi ana makinesi belirlenen makine yükünde stabil halde çalışırken ölçümler gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı olarak makine fren gücü değeri ve ortalama makine fren gücü Şekil 5.5' te verilmiştir. Ortalama güç değeri yaklaşık 1287 kW olarak belirlenmiştir. Ayrıca ölçülen makine güç değerlerinin stabil olmasını ifade eden varyans güç faktörü (%C.O.V), %3,1 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 5.5 :** % 75 yükte zamana bağlı makine fren gücü.

%75 yükte ölçülen ortam koşulları, egzoz gazı hızı, egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazındaki emisyon konsantrasyon değerleri ise Çizelge 5.7' de verilmiştir.

**Çizelge 5.7 :** Ölçülen çeşitli parametreler (%75 yük).

Parametre	Ölçüm sonuçları
Ta (°C)	27.1
pb (kPa)	101.41
Ra (%)	40.4
Texh (°C)	317.5
Vexh m/s	13.77
NO <sub>x</sub> (ppm)	843
SO <sub>2</sub> (ppm)	3.9
CO (ppm)	58.48
CO <sub>2</sub> (% V/V)	4.085
O <sub>2</sub> (% V/V)	13.4
HC (ppm)	131

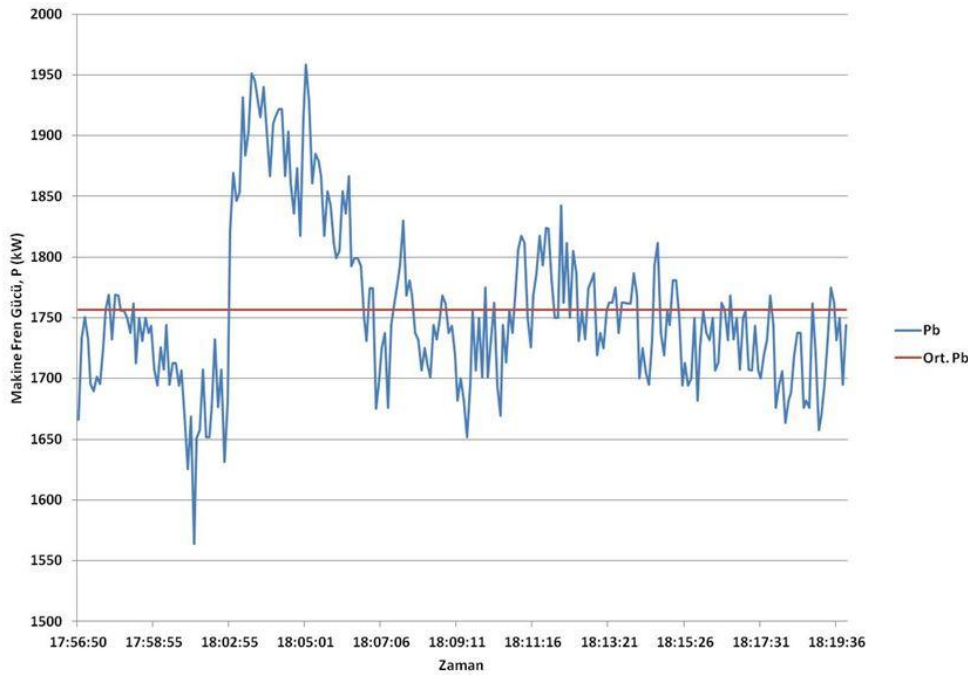
%75 makine yükünde emisyon değerleri ve ölçüm sonuçlarındaki belirsizlik değerleri Çizelge 5.8' de sunulmuştur.

**Çizelge 5.8 : Emisyon değerleri (%75 yük).**

Emisyon Türü	Emisyon değerleri	Sonuç belirsizlik değerleri (±%)
NO <sub>x</sub> (g/kWh)	11.804	±% 10.1
SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.076	±% 28.9
CO (g/kWh)	0.489	±% 10.7
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	536.575	±% 10.2
O <sub>2</sub> (g/kWh)	1279.775	±% 10.4
HC (g/kWh)	0.568	±% 9.4

%100 makine yükü için makine fren gücü değeri, toplam kurulu gücün (1766 kW) % 100' ü olan 1766 kW olarak belirlenmiştir. Bu yük değerine mümkün olduğunca yaklaşılmaya çalışılmış ve bu yükte stabil kalarak ölçümler alınmıştır.

Egzoz emisyon ölçümleri ve çeşitli parametre ölçümleri süresince makine fren gücü değeri kaydedilmiştir. Zamana bağlı olarak makine fren gücü değeri ve ortalama makine fren gücü Şekil 5.6' da verilmiştir. Ortalama güç değeri yaklaşık 870 kW olarak belirlenmiştir. Ayrıca ölçülen makine güç değerlerinin stabil olmasını ifade eden varyan güç faktörü (%C.O.V), %3,87 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, %5 limit değerinin altında olup, makinenin ölçümler süresince belirlenen güçte stabil şekilde kaldığını ifade etmektedir.



**Şekil 5.6 : % 100 yükte zamana bağlı makine fren gücü.**

%100 makine yükünde ölçülen ortam koşulları, egzoz gazı hızı, egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazı emisyon konsantrasyon değerleri ise Çizelge 5.9' da verilmiştir.

**Çizelge 5.9 :** Ölçülen çeşitli parametreler (%100 yük).

Parametre	Ölçüm sonuçları
T <sub>a</sub> (°C)	27.1
p <sub>b</sub> (kPa)	101.32
R <sub>a</sub> (%)	40.8
T <sub>exh</sub> (°C)	337.2
V <sub>exh</sub> m/s	16.84
NO <sub>x</sub> (ppm)	936
SO <sub>2</sub> (ppm)	3.5
CO (ppm)	71
CO <sub>2</sub> (% V/V)	4.53
O <sub>2</sub> (% V/V)	12.78
HC (ppm)	140

%100 makine yükünde emisyon değerleri ve ölçüm sonuçlarındaki belirsizlik değerleri Çizelge 5.10' da sunulmuştur.

**Çizelge 5.10 :** Emisyon değerleri (%100 yük).

Emisyon Türü	Emisyon değerleri	Sonuç belirsizlik değerleri (±%)
NO <sub>x</sub> (g/kWh)	11.688	±% 11.2
SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.061	±% 32.2
CO (g/kWh)	0.530	±% 11.6
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	531.258	±% 11.3
O <sub>2</sub> (g/kWh)	1089.753	±% 11.5
HC (g/kWh)	0.544	±% 10.5

### 5.3.2 Spesifik emisyon değerleri

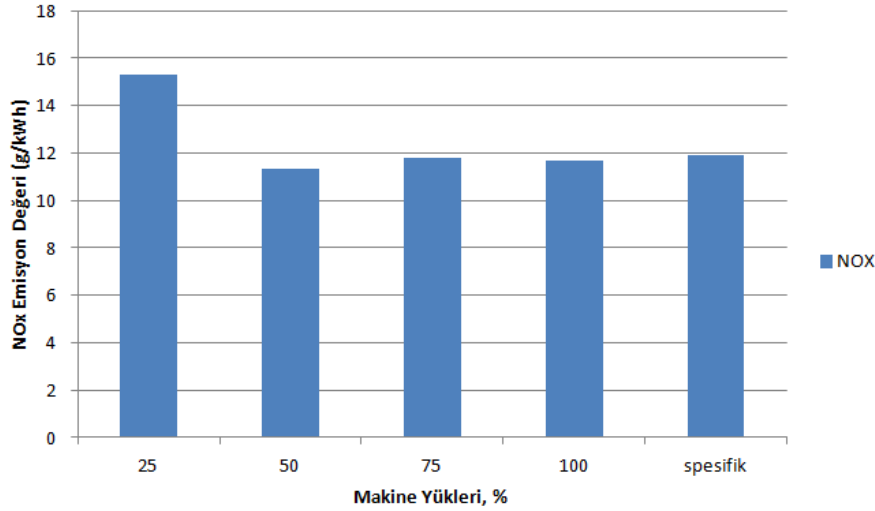
Bir feribotun egzoz emisyonları Çizelge 3.5' te verilen E2 test şartlarına göre NO<sub>x</sub> Teknik Dokümanına uygun şekilde değişik makine yüklerinde ölçülmüştür. Spesifik emisyon değerleri, bölüm 5.3.1' de verilen değişik yüklerde ana makineden yayılan NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> ve HC emisyon değerleri ve Çizelge 3.5' te verilen değişik yükler için ağırlık faktörleri kullanılarak Denklem 3.1' e göre belirlenmiştir. Spesifik emisyon değerleri Çizelge 5.11' de verilmiştir.

**Çizelge 5.11 : Spesifik emisyon değerleri.**

Emisyon Türü	Emisyon değerleri	Sonuç belirsizlik değerleri ( $\pm$ %)
NO <sub>x</sub> (g/kWh)	11.909	10.69
SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.103	28.98
CO (g/kWh)	0.666	11.15
CO <sub>2</sub> (g/kWh)	611.140	10.82
O <sub>2</sub> (g/kWh)	1350.104	10.98
HC (g/kWh)	0.623	10.44

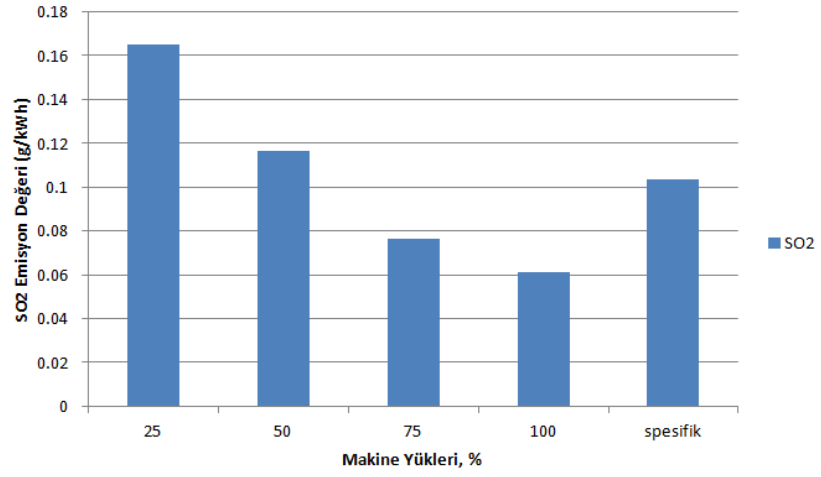
Feribotun uyması gereken emisyon limitleri Çizelge 2.5' te verilen seviye 1 değeridir. 750 devir olan ana makine için emisyon limit değeri 11.97 g/kWh olarak hesaplanmıştır.

Değişik makine yüklerinde belirlenen emisyon değerleri ve Denklem 3.1' e göre NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> ve HC emisyonları için belirlenen spesifik emisyon değeri aşağıda grafik olarak sunulmuştur.Şekil 5.7' de NO<sub>x</sub> emisyonunun değişik yüklerde belirlenen değeri ve Denklem 3.1' e göre belirlenen spesifik NO<sub>x</sub> emisyon değeri verilmiştir.



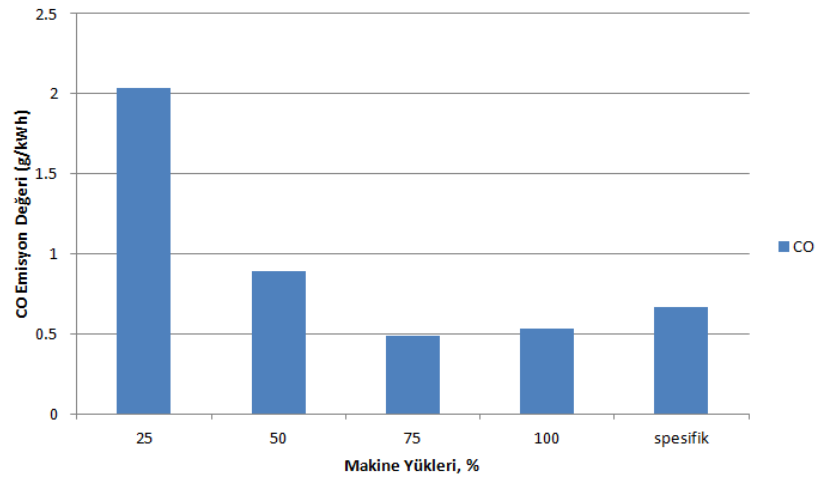
**Şekil 5.7 : Azot oksit emisyon değerleri.**

Şekil 5.8' de SO<sub>2</sub> emisyonunun değişik yüklerde belirlenen değeri ve Denklem 3.1' e göre belirlenen spesifik SO<sub>2</sub> emisyon değeri verilmiştir.

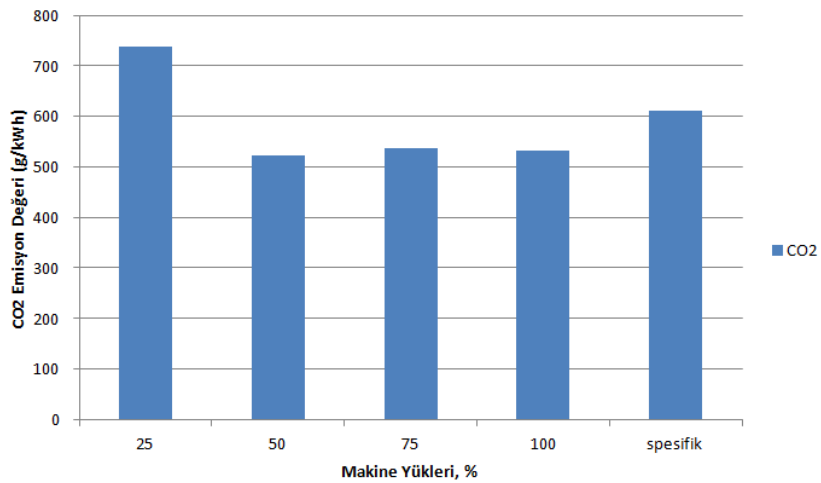


**Şekil 5.8 :** Kükürt dioksit emisyon değerleri.

Şekil 5.9' da CO emisyonunun ve Şekil 5.10' da CO<sub>2</sub> emisyonunun değişik yüklerdeki değerleri ve Denklem 3.1' e göre belirlenen spesifik emisyon değerleri verilmiştir.

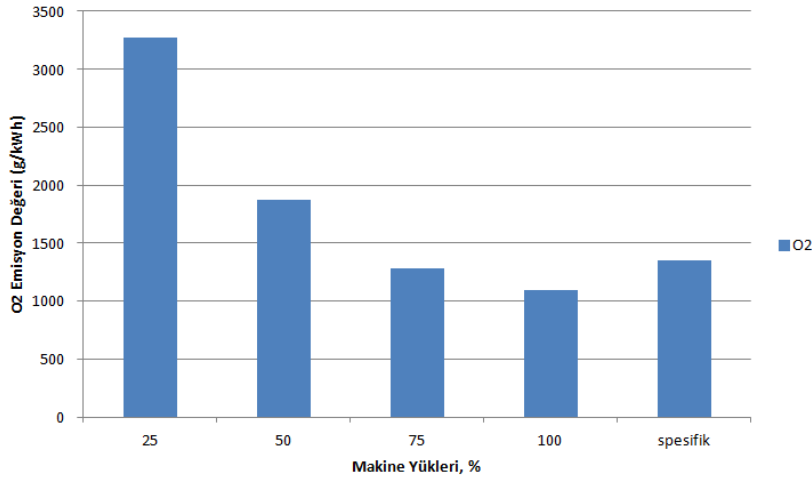


**Şekil 5.9 :** Karbon monoksit emisyon değerleri.



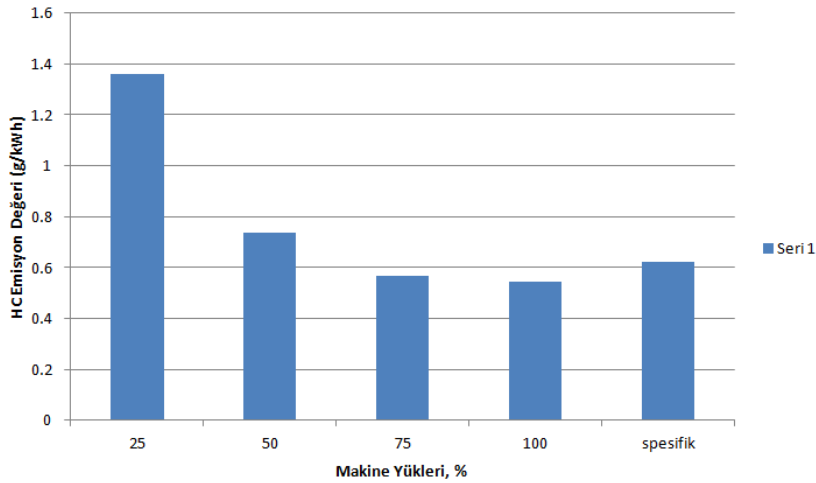
**Şekil 5.10 :** Karbon dioksit emisyon değerleri.

Şekil 5.11' de O<sub>2</sub> gazının değişik yüklerde belirlenen değerleri ve Denklem 3.1' e göre belirlenen spesifik emisyon değeri verilmiştir.



Şekil 5.11 : Oksijen değerleri.

Şekil 5.12' de HC emisyonunun değişik yüklerde belirlenen değeri ve Denklem 3.1' e göre belirlenen spesifik emisyon değeri verilmiştir.



Şekil 5.12 : Hidrokarbon emisyon değerleri.

### 5.3.3 Karbon denge metodu ile belirlenen emisyon değerleri

Emisyon değerleri karbon denge metodu kullanılarak %75 yük %100 yük için belirlenmiştir. Karbon denge metodu yakıt tüketiminin bilindiği durumlarda egzoz gazı kütle debisinin belirlenmesi için kullanılmaktadır ve Denklem 3.12' de verilmiştir. Bu çalışmada anlık yakıt tüketim değerleri ölçülmediğinden dolayı makine yakıt tüketimi, makine kataloğunda verilen makine özgül yakıt tüketim değeri (SFOC) kullanılarak belirlenmiştir. Makine özgül yakıt tüketim değeri tipik

olarak %75-%100 aralığında optimum çalışma noktasında verilen değerdir. Bu yakıt tüketim değeri kullanılarak %75 ve %100 makine yüklerinde emisyon değerleri belirlenmiştir. Belirlenen emisyon değerleri Bölüm 5.3.1' de verilen %75 ve %100 makine yüklerindeki emisyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karbon denge metodu ile belirlenen değişik yüklerdeki emisyon değerleri Çizelge 5.12' de verilmiştir.

**Çizelge 5.12 : Karbon denge metoduna göre değişik emisyon değerleri.**

Makine Yüğü	Emisyon Türü	Karbon denge metoduna göre emisyon değerleri
%75	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	13.600
%75	SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.088
%75	CO (g/kWh)	0.564
%75	CO <sub>2</sub> (g/kWh)	618.220
%75	O <sub>2</sub> (g/kWh)	1474.502
%75	HC (g/kWh)	0.654
%100	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	13.592
%100	SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.071
%100	CO (g/kWh)	0.617
%100	CO <sub>2</sub> (g/kWh)	617.770
%100	O <sub>2</sub> (g/kWh)	1267.212
%100	HC (g/kWh)	0.633

Makine özgül yakıt tüketim değeri ve karbon denge metoduna göre %75 ve %100 makine yükünde belirlenen emisyon değerleri ile Bölüm 5.3.1 de verilen %75 ve %100 makine yüklerindeki emisyon değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.13' te verilmiştir. Belirlenen emisyon değerleri arasındaki fark yüzde olarak belirtilmiştir.

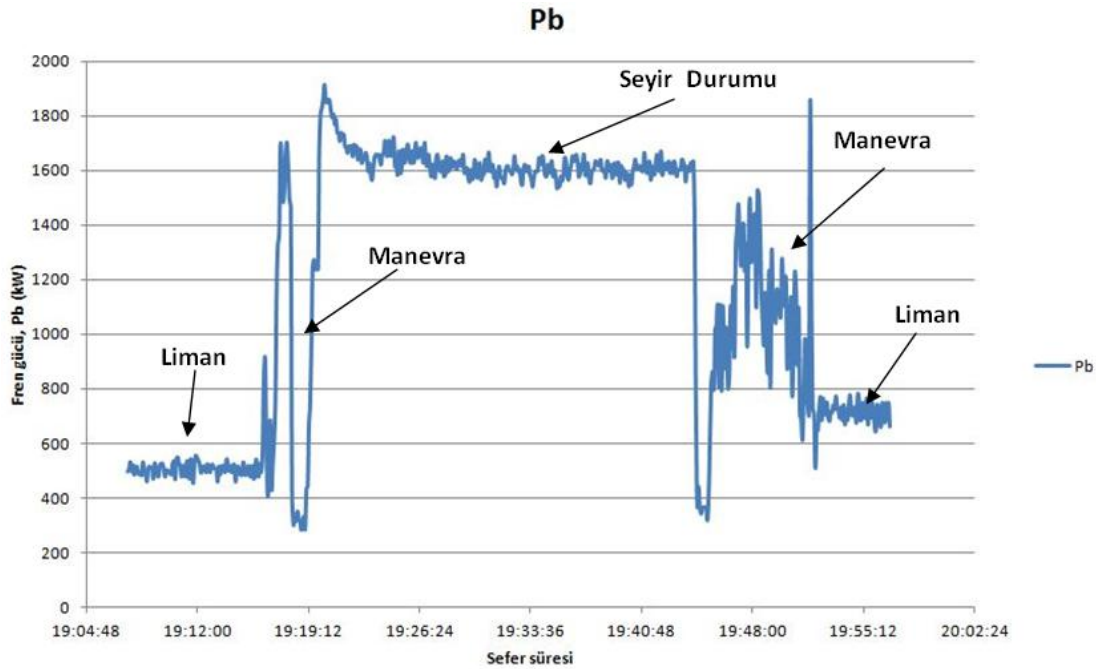
**Çizelge 5.13 : Emisyon değerlerinin karşılaştırılması.**

Makine Yüğü	Emisyon Türü	Emisyon değerleri	Karbon denge metoduna göre emisyon değerleri	Fark (%)
%75	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	11.688	13.600	15.22
%75	SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.061	0.088	15.22
%75	CO (g/kWh)	0.530	0.564	15.22
%75	CO <sub>2</sub> (g/kWh)	531.258	618.220	15.22
%75	O <sub>2</sub> (g/kWh)	1089.753	1474.502	15.22
%75	HC (g/kWh)	0.544	0.654	15.22
%100	NO <sub>x</sub> (g/kWh)	11.688	13.592	16.28
%100	SO <sub>2</sub> (g/kWh)	0.061	0.071	16.28
%100	CO (g/kWh)	0.530	0.617	16.28
%100	CO <sub>2</sub> (g/kWh)	531.258	617.770	16.28
%100	O <sub>2</sub> (g/kWh)	1089.753	1267.212	16.28
%100	HC (g/kWh)	0.544	0.633	16.28

## 5.4 Teorik Metotlarla Emisyon Hesaplama Sonuçları

Egzoz emisyonlarını teorik olarak hesaplanma metodu, bir gemiden belirli bir zamanda yayılan egzoz emisyonlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Özellikle yoğun deniz trafiğine sahip limanlarda ve iç denizlerde bu çalışmalar deniz trafiğinin çevresel etkilerini değerlendirmek için büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada Marmara Denizinde faaliyet gösteren bir feribotun, yaptığı bir seferde ana makinelerinden yayılan toplam emisyon miktarları hesaplanmıştır.

Emisyonların teorik olarak hesaplanması için feribotun bir seferi süresince faaliyetleri ve faaliyet süreleri belirlenmiştir. Feribotun bir seferi, araç ve yolcu alımı ile başlamakta olup feribotun araç ve yolcuları indirmesiyle tamamlanmaktadır. Bu süre içerisinde araç ve yolcu alma durumunda iken liman durumunda bulunmaktadır. Feribot limandan ayrılmak ve limana yanaşmak için her bir seferinde iki kez manevra durumunda bulunmaktadır. Bu iki duruma ek olarak geminin seyir hali bulunmaktadır. Feribotun bir seferi boyunca makine fren gücünün zamana bağlı değişimi Şekil 5.13' te verilmiştir. Ayrıca şekilde makine gücünün ölçüldüğü seyir durumu belirtilmiştir.



Şekil 5.13 : Bir sefer süresince makine fren gücü.

Feribotun bir seferi boyunca seyir durumları ve bu seyir durumunda bulunma süreleri Çizelge 5.14' de verilmiştir.

**Çizelge 5.14 :** Feribot seyir durumu ve süreleri.

Faaliyet	Seyir durumu	Süre (dk)
Seyir durumu	Seyir	26
Kalkış ve yanaşma işlemleri	Manevra	10
Yolcu ve araç indirme bindirme işlemleri	Liman	14

Feribotun bir seferinde ana makinelerden yayılan emisyon miktarı yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya metotları ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda literatürde yayınlanmış olan emisyon faktörleri ve diğer bilgiler kullanılmıştır. Ayrıca emisyon ölçüm sonuçları kullanılarak aşağıdan yukarıya metodu ile feribotun ana makinelerinden yayılan emisyon miktarı hesaplanmıştır. Aşağıdan yukarıya metodu ile yapılan hesaplamalarda kullanılan makine yük faktörü değerleri Çizelge 5.15' te verilmiştir. Şekil 5.13' te belirtildiği gibi feribotun farklı sefer durumlarında makine fren gücü ölçülmüştür ve her bir sefer durumundaki makine fren gücü toplam kurulu makine gücüne (1766 kW) bölünerek makine yükü bulunmuştur.

**Çizelge 5.15 :** Feribot sefer durumu ve yük faktörleri.

Seyir durumu	Yük Faktörü (Literatür)	Yük Faktörü (Ölçüm Sonuçları)
Seyir	0.20	0.3
Manevra	0.20	0.6
Liman	0.80	0.8

Yukarıdan aşağıya emisyon hesaplamalarında kullanılan emisyon faktörleri (YA-EF) Çizelge 5.16' da verilmiştir. Hesaplamalarda NO<sub>x</sub> emisyonu için 3. seviye emisyon faktörü kullanılmıştır. Ancak diğer emisyonlar için 1. seviye emisyon faktörleri kullanılmıştır. Hesaplamalar Denklem 4.4 ve Denklem 4.5' e göre yapılmıştır. Aşağıdan yukarıya metodu ile yapılan hesaplamalar Denklem 4.6' ya göre yapılmıştır. Aşağıdan yukarıya metodu ile emisyon hesaplamalarında kullanılan emisyon faktörleri (AY-EF) Çizelge 5.16' da verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda liman durumu için % 75 makine yükü emisyon değeri, manevra durumu için % 50 makine yükü emisyon değeri ve liman durumu için % 25 makine yükü emisyon değerleri kullanılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre belirlenen ve yukarıdan aşağıya emisyon hesaplamalarında kullanılan emisyon faktörleri (ÖS-EF) Çizelge 5.16' da verilmiştir.

**Çizelge 5.16 : Feribot seyir durumu ve emisyon faktörleri.**

Emisyon Türü	Seyir Durumu	YA-EF (kg/ton)	AY-EF (g/kWh)	ÖS-EF (g/kWh)
NO <sub>x</sub>	Seyir	65	13.2	11.8
NO <sub>x</sub>	Manevra	47.5	10.6	11.3
NO <sub>x</sub>	Liman	47.5	10.6	15.3
SO <sub>2</sub>	Seyir	2	1	0.49
SO <sub>2</sub>	Manevra	2	1	0.89
SO <sub>2</sub>	Liman	2	1	2.03
CO	Seyir	7.4	0.54	0.07
CO	Manevra	7.4	0.54	0.11
CO	Liman	7.4	0.54	0.16
CO <sub>2</sub>	Seyir	3114	697	536.58
CO <sub>2</sub>	Manevra	3114	747	522.66
CO <sub>2</sub>	Liman	3114	725	737.80
HC	Seyir	3.13	0.46	0.57
HC	Manevra	3.13	0.97	0.74
HC	Liman	3.13	0.5	1.36

Ölçülen emisyon değerleri kullanılarak aşağıdan yukarıya metoduna göre feribotun bir seferi boyunca farklı seyir durumlarında yayılan emisyon miktarı hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.17' de verilmiştir.

**Çizelge 5.17 : Değişik seyir durumlarında yayılan emisyon miktarları.**

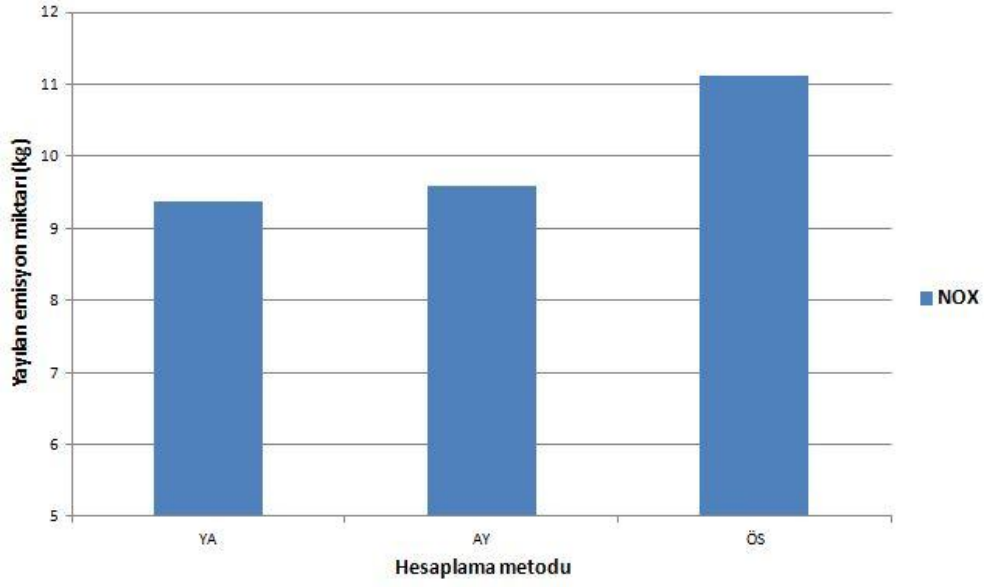
Emisyon türü	NO <sub>x</sub> (kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	CO (kg)	CO <sub>2</sub> (kg)	HC (kg)
Seyir	7.23	0.047	0.29	328.5	0.35
Manevra	1.99	0.02	0.16	92.3	0.13
Liman	1.89	0.02	0.52	91.2	0.17
Toplam	11.12	0.09	0.71	512.01	0.65

Aşağıdan yukarıya metoduna göre hesaplanan emisyon miktarı (AY-EM), yukarıdan aşağıya metodu na göre hesaplanan emisyon miktarı (YA-EM) ve ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan emisyon miktarı (ÖS-EM) karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.18' de sunulmuştur.

**Çizelge 5.18 : Feribotun bir seferi için hesaplanan emisyon miktarları.**

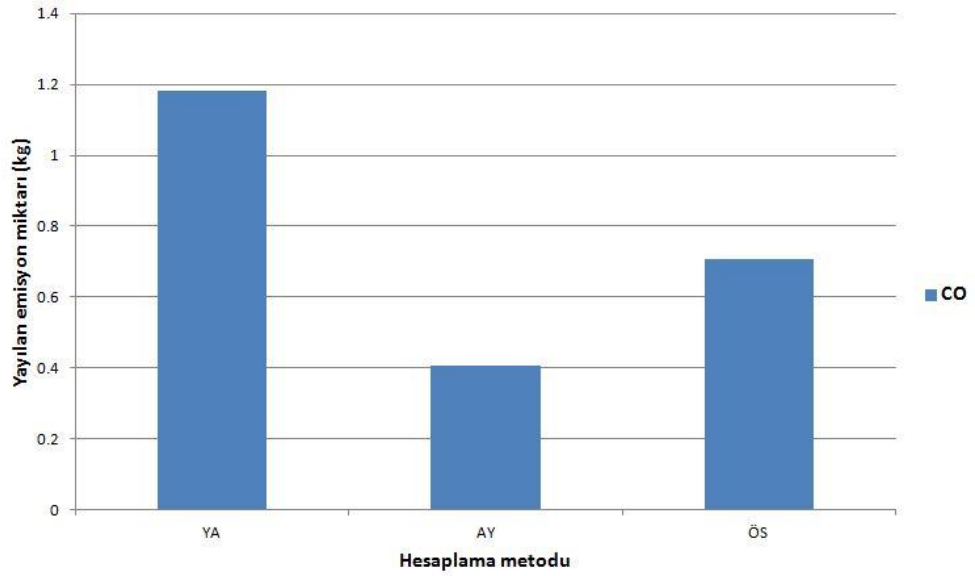
Emisyon türü	AY-EM (kg)	YA-EM (kg)	ÖS-EM (kg)
NO <sub>x</sub>	9.38	9.86	11.12
SO <sub>2</sub>	0.32	0.75	0.09
CO	1.18	0.41	0.71
CO <sub>2</sub>	497.31	530.44	512.01
HC	0.50	0.38	0.65

Hesaplanan azot oksit emisyon miktarı karşılaştırmalı olarak Şekil 5.14' te sunulmuştur.



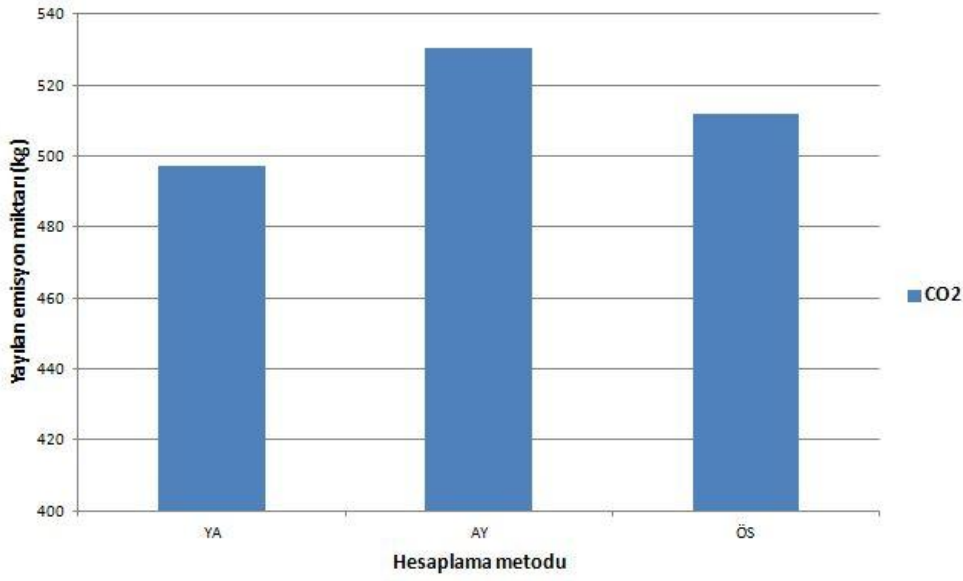
Şekil 5.14 : NO<sub>x</sub> emisyon miktarı.

Hesaplanan karbon monoksit emisyonu miktarı karşılaştırmalı olarak Şekil 5.15' te sunulmuştur.



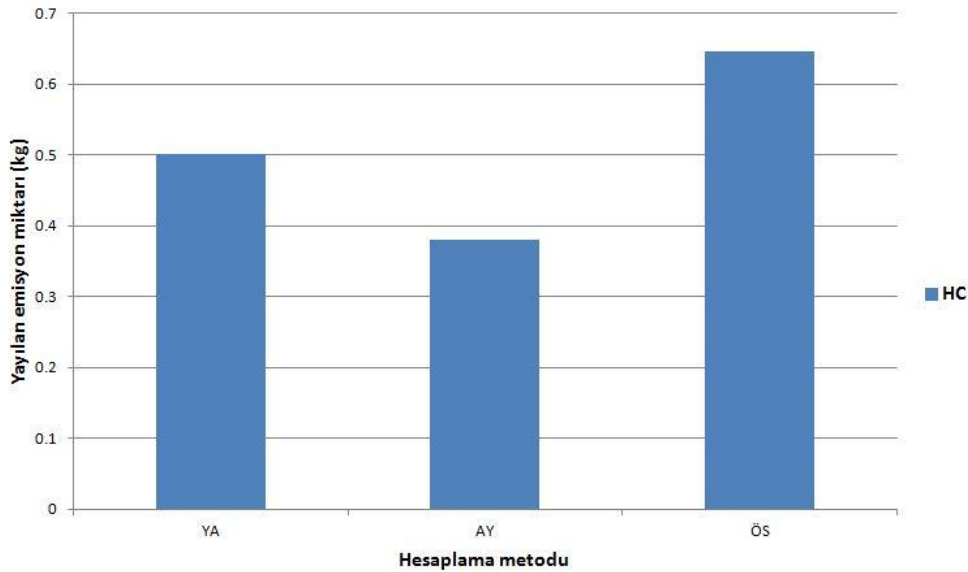
Şekil 5.15 : CO emisyon miktarı.

Hesaplanan karbon dioksit miktarı karşılaştırmalı olarak Şekil 5.16' da sunulmuştur.



Şekil 5.16 : CO<sub>2</sub> emisyon miktarı.

Hesaplanan hidrokarbon emisyonu miktarı karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17' de sunulmuştur.



Şekil 5.17 : HC emisyon miktarı.

Literatürde verilen emisyon faktörlerine göre hesaplanan emisyon miktarları ile ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan emisyon miktarları kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmaya göre aşağıdan yukarıya metoduna göre hesaplanan azot oksit emisyonu ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan değerden %15.6 daha düşük, yukarıdan aşağıya metoduna göre yapılan hesaplamalar ise ölçüm sonuçlarına göre yapılan hesaplamalardan %11 daha düşük değerler vermiştir. Kükürt dioksit değerleri

arasındaki fark oldukça büyüktür. Aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya metotları ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan emisyon SO<sub>2</sub> miktarına kıyasla sırasıyla 3.5 kat ve 8.3 kat fazla sonuçlar vermiştir. Karbondioksit emisyonunun aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya metotları ile hesaplanan değeri, ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan emisyon miktarından sırasıyla %2.87 daha düşük ve %3.6 daha yüksektir. Emisyon ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan karbon monoksit emisyon miktarı literatürde yayınlanmış emisyon faktörleri kullanılarak yapılan hesaplamalara kıyasla, aşağıdan yukarıya metodu ile hesaplanan emisyon miktarından %67 fazla, yukarıdan aşağıya metodu ile hesaplanan emisyo miktarından %42 daha düşüktür. Hidrokarbon emisyonları ölçüm sonuçları kullanılarak yapılan hesaplamalara kıyasla aşağıdan yukarıya metodu ile %23, yukarıdan aşağıya metodu ile %41.5 daha düşük hesaplanmıştır.

Ölçülen emisyon değerleri kullanılarak aşağıdan yukarıya metoduna göre feribotun ana makinelerinden yayılan emisyon miktarı aylık olarak ve toplamda bir yıl süresince hesaplanmıştır. Feribotun 1 yılda yaptığı sefer sayısı aylık olarak Çizelge 5.19' da sunulmuştur. Sefer sayıları 2015 yılı için belirlenmiştir.

**Çizelge 5.19 : Feribotun bir yıldaki sefer sayısı.**

Ay	Aylık toplam sefer sayısı	Ortalama günlük sefer sayısı
Ocak	646	20.8
Şubat	575	20.5
Mart	710	22.9
Nisan	714	23.8
Mayıs	748	24.1
Haziran	720	24.0
Temmuz	833	26.9
Ağustos	835	26.9
Eylül	763	25.4
Ekim	751	24.2
Kasım	717	23.9
Aralık	713	23.0

Çizelge 5.19' da verilen değerlere göre feribot 2015 yılı süresince yaklaşık 8725 sefer yapmıştır. Feribotun aylık sefer sayıları kullanılarak, aylık olarak feribottan yayılan emisyon miktarı ve toplamda bir yılda yayılan emisyon miktarı NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve HC kirleticileri için hesaplanmıştır. Hesaplanan emisyon değerleri Çizelge 5.20' de verilmiştir.

**Çizelge 5.20 :** Feribottan bir yılda yayılan emisyon miktarı.

Emisyon türü Ay	NO <sub>x</sub> (ton)	SO <sub>2</sub> (ton)	CO (ton)	CO <sub>2</sub> (ton)	HC (ton)
Ocak	7.181	0.057	0.457	330.757	0.417
Şubat	6.392	0.050	0.407	294.404	0.371
Mart	7.893	0.062	0.502	363.525	0.459
Nisan	7.937	0.063	0.505	365.573	0.461
Mayıs	8.315	0.066	0.529	382.981	0.483
Haziran	8.004	0.063	0.509	368.645	0.465
Temmuz	9.260	0.073	0.589	426.502	0.538
Ağustos	9.282	0.073	0.591	427.526	0.539
Eylül	8.482	0.067	0.540	390.662	0.493
Ekim	8.349	0.066	0.531	384.517	0.485
Kasım	7.971	0.063	0.507	367.109	0.463
Aralık	7.926	0.062	0.505	365.061	0.460
Toplam	96.994	0.765	6.174	4467.264	5.635

Feribottan bir yılda yayılan emisyon miktarı NO<sub>x</sub> için yaklaşık 97 ton, SO<sub>2</sub> için 0.77 ton, CO<sub>2</sub> için 4467.3 ton, CO için 6.2 ton ve HC için 5.6 ton olarak hesaplanmıştır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Marmara Denizinde yolcu ve araç taşımacılığı yapan tipik bir feribottan yayılan egzoz emisyonları deneysel metotlar ile belirlenmiştir. Feribot, Türkiye' nin taraf olduğu IMO kurallarına göre üretim yılı (2000) göz önünde alındığında seviye 1 NO<sub>x</sub> limitlerine tabidir. Ayrıca feribotun faaliyet alanı olan iç denizlerde kullanılacak denizcilik yakıtları için kükürt içeriği limitleri belirlenmiştir. Ölçümler sonucunda belirlenen NO<sub>x</sub> emisyon değeri ile feribotun seviye 1 NO<sub>x</sub> limitlerine uygunluğu değerlendirilmiş ve feribotun kullandığı yakıtın kükürt içeriği limit değerler ile kıyaslanmıştır. Ayrıca feribottan yayılan egzoz emisyon miktarları, literatürde yayınlanmış verilere göre ve ölçümlerde elde edilen verilere göre hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak literatürde yayınlanan verilerin bu tip feribotlardan yayılan egzoz emisyon değerlerinin hesabı için uygunluğu değerlendirilmiştir. Ayrıca feribotun farklı sefer durumları, farklı sefer durumlarında geçen süre ve toplam seyir süresi ve farklı sefer durumlarında makine yükü belirlenerek yapılacak teorik egzoz emisyon hesaplamaları için veri üretilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Marmara Denizinde yolcu ve araç taşımacılığı yapan tipik bir feribottan yayılan egzoz emisyonları deneysel metotlar ile belirlenmiştir. Feribotun sevk sistemine uygun test şartları olan E2 tip test şartlarında belirtilen makine yüklerinde egzoz emisyonları ölçülmüştür. Değişik makine yüklerinde NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve HC emisyonları belirlenmiştir. E2 test şartları için verilen ağırlık faktörleri ve değişik yüklerdeki emisyon değerleri kullanılarak spesifik emisyon değerleri belirlenmiştir. NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve HC kirleticileri için spesifik emisyon değerleri sırasıyla 11.91 (g/kWh), 0.10 (g/kWh), 0.67 (g/kWh), 611.14 (g/kWh), 1350.10 (g/kWh) ve 0.623 (g/kWh) olarak belirlenmiştir.
- Ölçülen emisyon değerleri için belirsizlik analizi yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlara etki eden belirsizlik değeri, değişik makine yükleri

için ve spesifik emisyon değerleri için belirlenmiştir.  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  ve HC spesifik emisyon değerlerine etki eden belirsizlikler sırasıyla 10.69 (%), 11.15 (%), 10.82 (%), 10.98 (%) ve 10.44 (%) olarak belirlenmiştir. Değişik makine yüklerindeki emisyon değerlerine etki eden belirsizlikler Bölüm 5.3.1' de verilmiştir.  $\text{SO}_2$  spesifik emisyon değeri, %28.98 olarak belirlenmiştir.  $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  ve HC emisyon değerlerine etki eden belirsizlikler kabul edilebilir değerlerdedir. Ancak  $\text{SO}_2$  emisyon değerlerine etki eden belirsizlikler yüksek değerlerdedir. Bu hata değerleri gaz analiz cihazı  $\text{SO}_2$  ölçüm aralığının ultra düşük kükürt içerikli yakıtı uygun olmamasından kaynaklanmaktadır. Feribotun ultra düşük kükürt içerikli yakıt kullanımı sonucunda oluşan egzoz gazındaki düşük  $\text{SO}_2$  konsantrasyonu gaz analiz cihazının alt ölçüm limitlerine yaklaşmıştır.

- Feribot, Türkiye' nin taraf olduğu IMO kurallarına göre üretim yılı göz önünde bulundurularak seviye 1  $\text{NO}_x$  limitlerine tabidir. Gemi ana makinesinin devri olan 750 rpm değeri kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda feribotun uyması gerekli  $\text{NO}_x$  egzoz emisyon limiti 11.97 g/kWh olarak belirlenmiştir. Ayrıca feribot Marmara Denzinde çalıştığı için Türk Ulusal Mevzuatı denizcilik yakıtları kükürt içeriği limitlerine göre feribotta kullanılan yakıt kükürt içeriği % 0.1'i geçmemelidir. Ayrıca  $\text{SO}_2$  emisyon değeri 0.4 g/kWh değerini geçmemelidir. Sonuç olarak ölçümler sonucunda belirlenen  $\text{NO}_x$  spesifik emisyon değeri (11.909 g/kWh) seviye 1  $\text{NO}_x$  limitlerine uygundur. Ayrıca feribotta kullanılan yakıtın kükürt içeriği değeri %0.0005 olarak belirlenmiştir. Feribotta kullanılan bu yakıt yürürlükte olan denizcilik yakıtları kükürt içerik değerlerine uygundur. Aynı zamanda ölçümler sonucunda belirlenen  $\text{SO}_2$  spesifik emisyon değeri (0.10 g/kWh), 0.4 g/kWh limit değerinin altındadır.
- Feribottan yayılan egzoz emisyon miktarları, literatürde yayınlanmış verilere göre ve ölçümlerde elde edilen emisyon değerlerine göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda feribotun bir seferinde yayılan egzoz emisyon değerleri belirlenmiştir. Hesaplamalar aşağıdan yukarıya metoduna ve yukarıdan aşağıya metoduna göre yapılmıştır. Bu hesaplamalarda literatürde yayınlanan emisyon faktörleri kullanılmıştır. Ayrıca ölçüm sonuçlarında elde edilen emisyon değerleri kullanılarak yukarıdan aşağıya metoduna göre feribotun bir

seferinde yayılan emisyon miktarı hesaplanmıştır. Değişik metotlarla hesaplanan emisyon miktarları karşılaştırıldığında CO<sub>2</sub> emisyon değerleri oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Karbon dioksit emisyon miktarları arasındaki fark %3' ten düşük olup CO<sub>2</sub> emisyon faktörlerinin bu gemi tipi için kullanımının uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Azot oksit emisyon miktarları arasındaki %15 ve %11 değerlerinde olup kabul edilebilir değerlerdir. Ancak hidrokarbon emisyonu ve karbon monoksit emisyonu için teorik metotlara göre ve ölçüm sonuçlarına göre yapılan hesaplamalarda önemli farklılıklar görülmüştür. Hidrokarbon emisyonunda %23-%41.5, karbon monoksit emisyonunda %42-67 oranında farklar görülmüştür. HC ve CO emisyonları için yayınlanan emisyon faktörleri, bu gemi tipi için yakın sonuçlar vermemiştir ve bu gemi tipi için yayınlanan emisyon faktörlerinin incelenmesi gerektiği görülmüştür. Kükürt dioksit emisyon miktarları arasında büyük farklar ortaya çıkmıştır. Bu farkın temel sebebi literatürde verilen emisyon faktörlerinin %0.1 yakıt kükürt içeriğine göre verilmiş olmasıdır. Ancak gemide %0.1 yakıt kükürt içeriğinden 100 kat daha düşük kükürt içeriğine sahip yakıt kullanılmaktadır. Bu sebeple SO<sub>2</sub> emisyon hesaplamalarında büyük farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak literatürde verilen NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyon faktörleri ile yapılan hesaplamaların bu gemi tipini temsil edebileceği görülmüştür. Ancak CO ve HC emisyon hesaplamalarında literatürde verilen emisyon faktörlerinin ölçüm sonuçlarından sırasıyla %67 ve %42 gibi farklı değerler verebildiği görülmüş olup bu emisyon faktörlerinin bu gemi tipi için incelenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Kükürt dioksit emisyonu için ultra düşük kükürt içeriğine sahip yakıtlar için kullanılan emisyon faktörleri kullanılması gerektiği görülmüştür.

- Feribottan bir yılda yayılan emisyon miktarı aylık olarak NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve HC kirleticileri için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre bir yılda feribottan yayılan emisyon miktarı NO<sub>x</sub> için yaklaşık 97 ton, SO<sub>2</sub> için 0.77 ton, CO<sub>2</sub> için 4467.3 ton, CO için 6.2 ton ve HC için 5.6 ton olarak belirlenmiştir.

Ayrıca gerçekleştirilen ölçümler sonucunda feribotun farklı sefer durumları, farklı sefer durumlarında geçen süre ve toplam seyir süresi ve farklı seyir

durumlarında makine yükü belirlenerek bu tip feribot için yapılacak teorik egzoz emisyon hesaplamaları için veri üretilmiştir.

Bu çalışmada bir feribotun egzoz emisyon değerleri farklı makine yüklerinde NO<sub>x</sub> teknik dokümanına göre belirlenmiştir. Emisyon değerleri, değişik makine yüklerinde ölçülmüş ve spesifik emisyon değerleri belirlenmiştir. Ölçümlerde egzoz debisi pitot tüpü ile egzoz gaz hızı ölçülerek belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla karbon denge metodu kullanarak %75 ve %100 makine yükünde emisyon değerleri belirlenmiştir. İki farklı yöntemle %75 ve %100 makine yükünde belirlenen emisyon değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak karbon denge metoduna göre belirlenen emisyon değerleri %75 makine yükünde %15.22 ve %100 makine yükünde %16.28 yüksek değerler belirlenmiştir. Karbon denge metodunda kullanılan yakıt tüketimi makine katalog yakıt tüketim değeri olan özgül yakıt tüketiminden belirlenmiştir. Belirlenen emisyon değerleri arasındaki fark ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında kabul edilebilir değerlerdir. Gelecek çalışmalarda makine yakıt tüketimi ölçülerek karbon denge metodunun kullanılması daha sağlıklı karşılaştırma yapmaya olanak sağlayacağı gibi sonuçlarının güvenilirliğinin artmasını sağlayacaktır.

Emisyon ölçümleri belirlenen makine yükünde 25 dakika ile 50 dakika arasında değişen sürelerde gerçekleştirilmiştir. Ancak ölçümler tek set halinde alınmıştır. Gelecek çalışmalarda yapılacak tekrarlı ölçümler ile ölçüm güvenilirliği artırılabilir. Ayrıca rastlantısal belirsizlikler düşürülerek ölçüm sonuçlarına etki eden hata değeri düşürülebilir.

Ölçümler sonucunda elde edilen emisyon değerleri kullanılarak emisyon faktörleri belirlenmiştir. Belirlenen emisyon faktörleri ile ve literatürde yayınlanan emisyon faktörleri ile feribotun bir seferinde yayılan emisyon miktarı hesaplanmıştır. Değişik yöntemlerle teorik olarak hesaplanan azot oksit emisyonu ve karbon dioksit emisyonu miktarları arasında kabul edilebilir hatalar bulunmaktadır. Bu gemi türünden yayılan emisyon miktarlarının hesaplanması için, literatürde yayınlanmış olan emisyon faktörleri kullanılabilir. Ancak diğer emisyon türleri için yayınlanmış emisyon faktörlerinin incelenmesi ve bu feribot tipi için düzenlenmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abdul-Wahab, S. A., Elkamel, A., Al Balushi, A. S., Al-Damkhi, A. M., & Siddiqui, R. A.** (2008). Modeling of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) concentrations resulting from ships at berth. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 43(14), 1706-1716.
- ABS.** (2015). *Abs Trends Update on Operational Performance and Environmental Issues: Sulfur Oxide (SO<sub>x</sub>) Limits Reduced in ECAs*, Retrieved from [http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2015/ABS-Trends\\_January2015.pdf](http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2015/ABS-Trends_January2015.pdf)
- Agrawal, H., Welch, W. A., Miller, J. W., & Cocker, D. R.** (2008). Emission measurements from a crude oil tanker at sea. *Environmental Science & Technology*, 42(19), 7098-7103.
- Agrawal, H.** (2009). *Analyses and Impacts of Emissions From Marine Engines* (Doctoral dissertation, University of California, Riverside) Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/304851201>
- ASME.** (2005). Test Uncertainty, *The American Society of Mechanical Engineers*, New York.
- Blatcher, D., & Eames, I.** (2013). Compliance of Royal Naval ships with nitrogen oxide emissions legislation. *Marine pollution bulletin*, 74(1), 10-18.
- Cappa, C. D., Williams, E. J., Lack, D. A., Buffaloe, 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*, 14(3), 1337-1352. doi: 10.5194/acp-14-1337-2014
- Caterpillar.** (2007). Application and Installation Guide-Gas Engine Emissions. *CATERPILLAR*
- Cooper, D.** (2003). Exhaust emissions from ships at berth. *Atmospheric Environment*, 37(27), 3817-3830. doi: 10.1016/s1352-2310(03)00446-1
- Corbett, J. J.** (2004). Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modeling: California Air Resources Board, Research Division.
- Corbett, J. J., Fischbeck, 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., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A.** (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental Science & Technology*, 41(24), 8512-8518.
- Datum.** (n.d). Shaft Power Monitoring Kit Installation Guide, *Datum Electronics*
- Doug, W.** (2004). Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines.
- Ergin, S.** (2011). Gemi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Projesi Sonuç Raporu.
- EPA.** (2000). Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data: United States Environmental Protection Agency Washington, DC.

- Eyring, V., Köhler, H., Van Aardenne, J., & Lauer, A.** (2005). Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 110(D17).
- Friss, D., McGrath, B., Knapp, C.** (n.d.). Review of Engine Shafting, Propulsion and Transmission Systems Key Considerations for Industry [Powerpoint slides]. Retrieved from [http://www.ccfi.ca/pdf/Vessel/presentations/Propulsion %20and%20shafting.pdf](http://www.ccfi.ca/pdf/Vessel/presentations/Propulsion%20and%20shafting.pdf)
- Fu, M., Ding, Y., 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.
- Goldsworthy, L., & Goldsworthy, B.** (2015). Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data—An Australian case study. *Environmental Modelling & Software*, 63, 45-60.
- IMO.** (2008). Revised MARPOL Annex VI: Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships and NOx Technical Code 2008.
- ISO 8178.** (2008). Reciprocating Internal Combustion Engines-Exhaust Emission Measurement: Moteurs Alternatifs À Combustion Interne-Mesurage Des Émissions de Gaz D'échappement. Steady-state Test Cycles for Different Engine Applications. Cycles D'essai en Régime Permanent Pour Différentes Applications Des Moteurs: ISO.
- Jayaram, V.** (2010). Analytical Framework to Evaluate Emission Control Systems for Marine Engines.
- Kesgin, U., & Vardar, N.** (2001). A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits. *Atmospheric Environment*, 35(10), 1863-1870.
- Khan, M. Y., Ranganathan, S., Agrawal, H., Welch, W. A., Laroo, C., Miller, J. W., & Cocker III, D. R.** (2013). Measuring in-use ship emissions with international and US federal methods. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(3), 284-291.
- Küçükşahin, F.** (1999). Dizel Motorları. *Güven Kitabevi, Genişletilmiş*, 3.
- Lamas, M. I., & Rodríguez, C. G.** (2012). Emissions from marine engines and NOx reduction methods. *Journal of maritime research*, 9(1), 77-81.
- Lööv, J. B., Alfoldy, B., Gast, L., Hjorth, J., Lagler, F., Mellqvist, J., . . . Westrate, H.** (2014). Field test of available methods to measure remotely SOx and NOx emissions from ships. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(8), 2597-2613.
- Lu, G., Brook, J. R., Rami Alfarra, M., Anlauf, K., Richard Leitch, W., Sharma, S., . . . Phinney, L.** (2006). Identification and characterization of inland ship plumes over Vancouver, BC. *Atmospheric Environment*, 40(15), 2767-2782. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.12.054
- Man.** (2004). Emissions Control MAN B&W Two-Stroke Diesel Engines. *MAN B&W Diesel, Copenhagen Denmark*.
- Matei, V., Vladut, G., Mogosan, A., Blaauw, H., de Vries, B., Seiwerth, P., & Kampfer.** (2008). A. EMISSION FACTORS IN INLAND NAVIGATION.
- McGill, R., Remley, W. B., & Winther, K.** (2013). Alternative Fuels for Marine Applications. *A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement, Annex, 41*, 3-10.
- Melo Rodríguez, G. d., & Murcia Cuenca, J. M.** (2013). Analysis and measurement of NOx emissions in port auxiliary vessels.
- Nescaum.** (2006). Scoping Study to Evaluate the Emissions of Harbor Craft Operating in Boston Harbor and Potential Control Options, *NESCAUM*.

- Northern lights.** (n.d.). L844D Features and Benefits Performance Data, *Northern lights*. Retrieved from [http://www.northern-lights.com/media/PDFs/brochure\\_pdfs/spec\\_sheets/Lugger/L844D.pdf](http://www.northern-lights.com/media/PDFs/brochure_pdfs/spec_sheets/Lugger/L844D.pdf)
- 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.
- Pirjola, L., Pajunoja, A., Walden, J., Jalkanen, J.-P., Rönkkö, T., Kousa, A., & Koskentalo, T.** (2014). Mobile measurements of ship emissions in two harbour areas in Finland. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(1), 149-161.
- Psaraftis, H. N. (Ed.)**. (2015). *Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions* (Vol. 226). Springer.
- Ritchie, A., de Jonge, E., Hugli, C., & Cooper, D.** (2005). European Commission Directorate General Environment, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement, and Market-based Instruments. *Task 2c-SO2 Abatement, Entec UK Limited, Cheshire, Northwich, UK*.
- 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 Thermal Engineering*, 28(8-9), 872-880. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.07.007
- Ghosh, S., Risley, T.** (2012). *Final Report Alternative Fuel For Marine Application*. U. S. Maritime Administration, Retrieved from [http://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/MARAD\\_ALT\\_FUEL\\_FINAL\\_REPORT\\_\(REVISED\\_3-22-12\).pdf](http://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/MARAD_ALT_FUEL_FINAL_REPORT_(REVISED_3-22-12).pdf)
- Sadikhov, E., Kangı, R., & Uğur, S.** (1995). Ölçüm Belirsizliği. *Ulusal Metroloji Enstitüsü*, 95-016.
- Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., ... & Raucci, C.** (2014). Third IMO GHG Study 2014. *International Maritime Organization (IMO)*, London.
- Starcrest** (2013). *Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions 2012*, Available: [http://www.portoflosangeles.org/pdf/2012\\_Air\\_Emissions\\_Inventory.pdf](http://www.portoflosangeles.org/pdf/2012_Air_Emissions_Inventory.pdf)
- Trozzi, C.** (2010). Emission estimate methodology for maritime navigation. *Techne Consulting, Rome*.
- Trozzi, C., & Vaccaro, R.** (1998). Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships. *Techne report MEET RF98*.
- TS ISO 10780** (1999). Nokta Kaynak Emisyonları-Borulardaki Gaz Akışlarının Hız ve Debinin Ölçülmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tzannatos, E.** (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus – Greece. *Atmospheric Environment*, 44(3), 400-407. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.10.024
- Van Aardenne, J., Colette, A., Degraeuwe, B., Hammingh, P., & De Vlioger, I.** (2013). *The impact of international shipping on European air quality and climate forcing* (Vol. 4).
- Van der Zee, S. C., Dijkema, M. B., van der Laan, J., & Hoek, G.** (2012). The impact of inland ships and recreational boats on measured NO x and ultrafine particle concentrations along the waterways. *Atmospheric Environment*, 55, 368-376.

- Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., Vlieger, I. d., & van Aardenne, J.** (2014). Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, *90*, 96-105. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.046
- Winnes, H., & Fridell, E.** (2009). Particle emissions from ships: Dependence on fuel type. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *59*(12), 1391-1398.
- Yang, Z., Zhang, D., Caglayan, O., Jenkinson, I., Bonsall, S., Wang, J., . . . Yan, X.** (2012). Selection of techniques for reducing shipping NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *17*(6), 478-486.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad** :Murat DURMAZ

**Doğum Yeri ve Tarihi** : İstanbul 1990

**E-Posta** : durmazmu @itu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Den. Bil. Fak., Gemi İnş. ve Gemi Mak. Müh. Böl.

### İŞ DENEYİMİ:

- Loça Tersanesi ve Teknomar Gemicilik (2012-Stajyer)
- Yonca-Onuk JV Tersanesi (2013-Stajyer)
- Gemisyon-İstanbul'da Gemi Emisyonları Ölçümünde Hizmet Verecek Akredite Bir Laboratuvarın Geliştirilmesi ve Bit Destekli Eğitim Projesi (Yardımcı Araştırmacı, 2013-2014)
- İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi (Araştırma Görevlisi 2014- )