

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DENİZCİLİKTE ENERJİ VERİMLİLİĞİ TASARIM İNDEKSİ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur YILMAZ

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

OCAK 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DENİZCİLİKTE ENERJİ VERİMLİLİĞİ TASARIM İNDEKSİ ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur YILMAZ
512191005**

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Anabilim Dalı

Deniz Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin ARSLANOĞLU

OCAK 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 512191005 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Onur YILMAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Denizcilikte Enerji Verimliliği Tasarım İndeksi Analizi” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

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

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bora USLUER
Galatasaray Üniversitesi

Teslim Tarihi : 18 Ocak 2021
Savunma Tarihi : 26 Ocak 2021





Aileme..



ÖNSÖZ

Beni her zaman destekleyen, yetiştiren aileme ve Prof. Dr. Yasin Arslanoğlu hocama Araş. Gör. Tayfun Uyanık, Araş. Gör. Üstün Atak, Araş. Gör. Gizem Elidolu ve Dr. Öğr. Üyesi Hasan Bora Usluer hocama teşekkür ederim.

Tezimin ülkemiz denizciliğine faydalı olmasını dilerim.

Ocak 2021

Onur YILMAZ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Verimlilik ve IMO Yönetmelikleri.....	2
1.2.1 IMO'nun düzenlemeleri.....	5
1.2.2 Marpol ekVI.....	6
1.2.3 MRV.....	8
1.3 Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları	10
1.3.1 Farklı gemi türlerinde emisyonlar	12
1.3.2 Emisyon türleri.....	15
1.3.2.1 Azot oksit emisyonu.....	16
1.3.2.2 Karbon monoksit emisyonu	17
1.3.2.3 Sülfür oksit emisyonu	17
1.3.2.4 Hidrokarbon emisyonu	18
1.3.2.5 Partikül madde emisyonu	18
1.3.3 Emisyon ölçüm sistemleri.....	19
2. GEMİLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ	23
2.1 Enerji Verimliliği İyileştirme Yöntemleri	24
2.1.1 Gemi tasarımı	24
2.1.2 Sevk ve pervane sistemi	26
2.1.3 Makine teknolojisi.....	28
2.1.4 Çalıştırma ve bakım tutumu	31
2.2 Gemi Tiplerine Göre Enerji Verimliliği Analizi	32
2.3 Denizcilikte Enerji Verimliliği Terimleri.....	37
2.3.1 Enerji verimliliği tasarım indeksi (EEDI)	38
2.3.2 Enerji verimliliği işletim göstergesi (EEOI)	42
2.3.3 Gemi enerji verimliliği yönetim planı (SEEMP)	43
3. ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZ UYGULAMASI.....	47
3.1 EEDI'nin hesaplanması.....	47
3.2 Seyirde Gemilerde Enerji Verimliliği	50
3.1.1 Tersinir pervane sisteminin etkisi	50
3.1.2 Common-rail sisteminin etkisi	52
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR.....	59



KISALTMALAR

IMO	: Uluslararası Denizcilik Örgütü
MARPOL	: Deniz Kirliliğın Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
MRV	: İzleme, Raporlama, Doğrulama Planı
EEDI	: Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi
EEOI	: Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi
SEEMP	: Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı
ECA	: Emisyon Kontrol Alanı
SECA	: Kükürt Emisyon Kontrol Alanı
UNSCR	: Birleşmiş Milletler Güvenlik Konseyi Kararları
KP	: Kyoto Protokolü
EE	: Enerji Verimliliği
EIV	: Tahmini Endeks Değeri
UDHB	: Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı
PM	: Partikül Madde
NO	: Azot Oksit
CO	: Karbon Monoksit
SO	: Kükürt Oksit
HC	: Hidrokarbon
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: MARPOL Ek VI emisyon limiti kontrol devri.....	8
Çizelge 1.2: Dünya deniz ticaret filosu.....	10
Çizelge 1.3: Parçacık emisyonlarının bileşenleri.....	19
Çizelge 2.1: Gemi türlerine göre enerji verimliliği analizi.....	33
Çizelge 2.2: EEDI uygulanan gemi tipi.....	39
Çizelge 2.3: EEDI formül parametrelerinin açıklaması	40
Çizelge 2.4: EEOI formül parametrelerinin açıklaması	43
Çizelge 2.5: SEEMP örneği.....	45
Çizelge 3.1: Farklı tiplerde yakıt değerleri.....	49
Çizelge 4.1: Sefer ve gemi özellikleri.....	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: SEEMP ve EEDI uygulamasından sonra CO ₂ değişimi.....	6
Şekil 1.2: EU MRV ve IMO DCS zaman çizelgesi.....	9
Şekil 1.3: Gemi tiplerine göre NO _x oranları.....	13
Şekil 1.4: Gemi tiplerine göre SO _x oranları	13
Şekil 1.5: Gemi tiplerine göre CO ₂ oranları	14
Şekil 1.6: Gemi tiplerine göre HC oranları.....	14
Şekil 1.7: Gemi tiplerine göre PM oranları	15
Şekil 2.1: Hava kabarcığı yağlama sistemi.....	26
Şekil 2.2: Ters yönde dönebilen pervane.....	28
Şekil 2.3: MARPOL Ek VI emisyon limiti kontrol devri.....	30
Şekil 2.4: Dünya deniz ticaret filosu.....	31
Şekil 3.1: Parçacık emisyonlarının bileşenleri.....	48
Şekil 4.1: CPP uygulamasının amortisman süresi	56



DENİZCİLİKTE ENERJİ VERİMLİLİĞİ TASARIM İNDEKSİ ANALİZİ

ÖZET

Gemilerde enerji verimliliği konusu, gemi sahipleri için büyük bir gereksinim haline gelmiştir. Dünyada çevre bilincinin artmasıyla birlikte emisyon konusuna yeni kurallarla daha fazla önem verilmektedir. Gemilerde enerji verimliliğini arttırmak için gemi tasarımları, pervane sistemleri, makine teknolojileri ve başarılı bakım tutumları önemlidir. Bu çalışma gemilerde emisyonun azaltılması ve enerji verimliliği yöntemlerinin sağlanması uygulamaları için yapılmıştır.

Dünyadaki sera gazı emisyonlarının yüksek bir kısmını oluşturan denizcilik sektöründe, enerji verimli gemilere olan talep artacaktır. Akaryakıt fiyatlarındaki önemli artış nedeniyle çevre dostu ve otonom gemilerin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu yüksek maliyetleri ve emisyonları azaltmak için, MARPOL Ek VI'ya CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik enerji verimliliği indeksi (EEDI) gibi düzenlemeler eklenmiştir. Gemi enerji verimliliği yönetim planı ile enerji kayıplarının en aza indirilmesi ve denizcilik sektörünün geleceği için daha temiz denizlerin oluşturulması hedeflenmektedir. Bu çalışmada gemilerin enerji verimliliğini artıran uygulamalar, hesaplama yöntemleri ve denizleri daha verimli hale getirmek için yapılması gereken süreçlerle kanıtlanmıştır.

Bu tez çalışmasında gemilerden kaynaklanan emisyonlarla ilgili düzenlemeler incelenmiş, düzenlemeler nedeniyle denizcilik işletmelerinde gemi kaynaklı emisyon azaltma yöntemleri ele alınmıştır. Gemi enerji verimliliğini artırmak için kullanılan verimi yüksek gemi tasarımları, yeni nesil pervane sistemleri, makine teknolojileri, alternatif enerji kaynakları, otomasyon sistemleri ve başarılı bakım-tutum uygulamaları gibi yöntemler detaylarıyla incelenmiştir. Bu uygulamaların etkinliğinin incelenebilmesi adına emisyon ölçüm sistemleri de tez çalışmasına dahil edilip açıklanmıştır. Emisyon ölçüm sistemleri sayesinde hangi yöntemin daha verimli sonuçlar verdiği de anlaşılabilir.

Bu tez çalışmasında ana hedef gemi enerji verimliliğinin ele alındığı uygulamaların detaylarıyla incelenmesi ve bu yöntemler ile ilgili tasarımsal bilgilerin denizcilik bilgisi ile entegre edilerek iyi bir gemi işletmeciliğinin sağlanmasıdır. Bu hedefe ulaşılabilmesi için her gemi türü ile ilgili o gemiye özel verimlilik artırma yöntemlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu yöntemler konusundaki bilincin artmasıyla hem daha verimli bir gemi işletmeciliği sağlanacak, hem de Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün yayınladığı emisyon azaltma kuralları sağlanabilecektir.

Uluslararası Denizcilik Örgütü tarafından yayınlanan kurallar denizcilik işletmeleri üzerinde maddi baskı da oluşturmaktadır. Bu durumda denizcilik şirketleri Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün koyduğu kuralları sağlayabilmek için çeşitli maddi külfetlerin altına girmektedir. Şirketler bu yüzden ekonomik darboğazlara düşebilmektedir. Denizcilik şirketleri, son yıllarda gemilerde enerji verimliliğinin artırılması için fayda/maliyet oranı bakımından etkin yöntemleri ele almaya

başlamıştır. Bu yöntemlerin uygulanmasında elde edilen başarılı sonuçlar denizcilik şirketlerini ekonomik olarak rahatlatırken emisyonlar nedeniyle Uluslararası Denizcilik Örgütü ve ilgili liman devletleri tarafından uygulanabilecek çeşitli ceza ve yaptırımların önüne geçilebilmesi sayesinde denizcilik şirketlerine motivasyon olmuştur.

Tez çalışmasının içerik planını açıklamak gerekirse öncelikle Uluslararası Denizcilik Örgütü ile ilgili kavramlar ele alınmıştır. Bu kapsamda ayrıca MARPOL, UNFCCC ve MRV gibi bazı yaklaşımlar incelenmiştir. Egzoz emisyonlarını azaltan gemi tipleri ve tasarımları, emisyon azaltıcı teknolojilerin tasarımlarının incelenmesi ve gemi enerji verimliliği konusunda uygulanan yöntemler ayrıntılarıyla tanıtılmıştır. Bu yöntemlerin gemilerde enerji verimliliğine etkisinin ne oranda olduğunun tespit edilebilmesi amacıyla Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi, Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi ve Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı detaylarıyla incelenmiştir. Bu yöntemler sayesinde hangi yöntemin ne oranda bir verimlilik iyileştirmesi gerçekleştirdiği tespit edilebilmiştir. Tez çalışmasının son bölümünde ise gemi enerji verimliliğini artıran yöntemlerin bir uygulaması incelenerek verimlilik artırılması konusunda bir analiz çalışması yapılmıştır.

ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX ANALYSIS IN MARITIME

SUMMARY

The amount of cargo transported by sea in world trade is increasing day by day due to the economic transportation route. Due to the increase in the number of commercial vessels, there have been significant increases in maritime emissions in recent years. With the increase in environmental awareness in the world, the issue of emissions has become more important. For this reason, the International Maritime Organization is trying to reduce the amount of maritime emissions by issuing various rules and regulations. Shipping companies develop various methods to meet the requirements imposed by these rules and regulations. These methods are also methods to increase energy efficiency in ships. Resistance-reduced ship design, advanced propeller systems, advances in machine technologies, successful maintenance attitude approaches are examples of methods that increase energy efficiency in ships. In this thesis study, the methods that can be applied to increase ship energy efficiency and reduce emissions are discussed in detail.

In order to reduce greenhouse gas emissions from the maritime sector, the demand for ships with high energy efficiency is increasing. Fluctuations in fuel prices can also be another reason for increased demand for highly energy efficient vessels. In order to systemize energy efficiency applications, applications such as the Energy Efficiency Design Index and Energy Efficiency Operational Indicator aimed at reducing CO₂ emissions have been added to the MARPOL Annex IV regulation. If these applications are examined as content, the Energy Efficiency Design Index is an approach applied while the ships are still under construction, while the Energy Efficiency Operational Indicator can be seen as an approach applied during operation. These approaches to ship energy efficiency are 2000 to minimize energy losses on ships, while reducing the amount of fuel spent during the expedition.

In this thesis study, regulations on emissions from ships were examined and ship-borne emission reduction methods were discussed in maritime enterprises due to the regulations. Methods such as high efficiency ship designs, next generation propeller systems, machine technologies, alternative energy sources, automation systems and successful maintenance-attitude applications used to increase ship energy efficiency have been examined in detail. In order to examine the effectiveness of these applications, emission measurement systems are also included in the thesis study and explained. Thanks to emission measurement systems, it is also understandable which method gives more efficient results.

The main objective of this thesis is to examine the applications in which ship energy efficiency is handled in detail and to integrate the design information about these methods with maritime knowledge to ensure a good ship management. In order to achieve this goal, it is necessary to know the methods of increasing efficiency specific to that ship for each ship type. With the increased awareness of these methods, both a more efficient ship management will be provided, and emission reduction rules published by the International Maritime Organization will be provided.

Rules issued by the International Maritime Organization also place financial pressure on maritime enterprises. In this case, maritime companies are subject to various financial burdens in order to meet the rules established by the International Maritime Organization. Therefore, companies can fall into economic bottlenecks. In recent years, shipping companies have begun to consider effective methods in terms of benefit/cost ratio to improve energy efficiency on ships. Maritime companies economically successful results in the implementation of this method relax the emissions due to the International Maritime Organization and related penalties and sanctions that can be applied by Port states to prevent various thanks, the shipping company has been the motivation to.

To explain the content plan of the thesis study, first of all, concepts related to the International Maritime Organization are discussed. In this context, some approaches such as MARPOL, UNFCCC and MRV were also examined. The types and designs of vessels that reduce exhaust emissions, the study of the designs of emission-reducing technologies and the methods applied in the field of ship energy efficiency are discussed in details. The Energy Efficiency Design Index, Energy Efficiency Operational Indicator and Ship Energy Efficiency Management Plan have been examined in detail in order to determine the rate at which these methods affect energy efficiency in ships. Thanks to these methods, it was determined which method performed an efficiency improvement in what proportion. In the last part of the thesis study, an analysis study was carried out on increasing efficiency by examining an application of methods that increase ship energy efficiency.





1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Enerji verimliliği, genel olarak üretim kalitesinde ve miktarında bir düşüşe yol açmadan, hizmet birimi veya ürün miktarı başına enerji tüketiminin azaltılması olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle, verim daha az enerji ile aynı işlem kullanılarak edilir. Aşağıdaki (1) numaralı formülde gösterildiği gibi, verimlilikteki amacımız düşük enerji kullanarak yüksek enerji elde etmektir.

$$\text{verimlilik}(\%) = \frac{\text{alınan enerji}}{\text{verilen enerji}} \times 100 \quad (1)$$

En ucuz enerjinin tasarruf edilen enerji olduğu unutulmamalıdır. Bir sistemin verimli çalışması sadece yakıt ekonomisi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda önleyici bakım sağlar ve beklenmeyen arızaları en aza indirir. Verimsiz çalışmanın neden olduğu arızalar çok fazla hasara neden olabilir. Deniz taşımacılığının en verimli taşımacılık sektörü olması nedeniyle gemi sayısındaki önemli artışla dünyadaki CO₂ emisyonunun yüzde 3-3.5 oranına gemiler neden olmaktadır[1-6]. Salınım miktarı dikkate alınarak gemilerde gerekli düzenlemelerin yapılması, uygulamaların geliştirilmesi ve önlemlerin alınması gerekmektedir.

Gemi bazlı emisyonlar limanların yaşam alanlarına yakınlığı nedeniyle karasal hava kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir ve insan sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Akciğer kanseri, bronşit, eklem romatizması, raşitizm ve çeşitli kalp hastalıkları gibi tehlikeli hastalıklar hava kirlleticilerinin başlıca tehlikeleri arasındadır. Bunun yanında hava kirliliği göz yanıkları, göğüs bulanıklığı, nefes darlığı, iştahsızlık ve kan zehirlenmesi gibi olumsuz etkilere de neden olur. İnsan vücudunda zararlı emisyon tozlarının birikmesi iştah kaybına neden olur ve sonuçta vücudun direncini zayıflatır. Cilt solunum güçlüğü, cilt solunumunun engellenmesi ile başlar. İnsanlarda nefes alma zorluğu sonunda aşırı yorgunluk ve yaşlanma belirtileri görülür. Ayrıca emisyonların içerdiği zehirli maddeler solunarak alınan bu maddeler kana karışır ve

kan zehirlenmesi meydana gelir. İnsan vücudunda çeşitli şekillerde kirliliğe neden olan kalıntıların etkisiyle insanlarda nöral ve ruhsal bozukluklar meydana da gelmektedir. Genellikle atmosferdeki sülfür dioksit nitrojen oksitler asit partiküllerinin oluşmasına yardımcı olur. Ek olarak, oluşan nitrik ve sülfürik asitler diğer partikül maddelere yapışır ve bu partiküllerin solunmasıyla bu asitlerin doğrudan akciğerlere gitmesine neden olur. Akciğere giden bu asidik toz ve gazlar, akciğerlerdeki alveolleri etkileyerek kana karışır [1-6].

Bu çalışmada emisyonlarla ilgili düzenlemeler, gemilerden kaynaklanan egzoz emisyon türleri ve emisyon azaltma yöntemleri yer almaktadır. Gemilerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik yöntemlerle detaylandırılan tezde, emisyon ölçüm sistemlerine de yer verilmiştir.. Bu tezin amacı, enerji verimliliğini artırmak için yapılması gereken işlemleri denizcilerin bilgisine entegre etmek ve emisyon salınımını kontrol ederek denizleri daha verimli hale getirmektir. IMO, MARPOL, UNFCCC ve MRV'nin bazı emisyon düzenlemeleri hakkında bazı bilgiler verilmiştir. Devamında gemi tiplerine, emisyon tiplerine ve emisyon önleme yöntemlerine göre değişen egzoz emisyonlarına atıfta bulunulmuştur. Ardından gemilerde enerji verimliliğini artırma yöntemlerinden ve bu yöntemlerin gemileri nasıl etkilediğinden bahsedilmiştir ve EEDI, EEOI ve SEEMP gibi enerji verimliliği terimleri ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Son olarak, verimliliği artırmaya ilişkin bir vaka çalışması yapılmıştır.

1.2 Verimlilik ve Emisyon Yönetmelikleri

Deniz taşımacılığından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının ve partiküllerinin azaltılması, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından çok önemlidir. Deniz taşımacılığının ticari taşımacılığın en sürdürülebilir yöntemlerinden biri olduğu yaygın olarak görülmektedir, ancak hayal edilemeyecek kirlilik ve maliyetler, toplum ve mürettebat için tehlike oluşturacak etkenler göz ardı edilmeden, sektörün bu değerlendirmesi ile ilgili bazı sorular ortaya çıkmaktadır. Gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliğinin sağlanmasına ilişkin uluslararası kuralların zorunlu hükümleri her geçen gün artmaktadır. MARPOL'ün 6.ekinde yer alan SO_x, NO_x, CO_x, PM emisyonları, emisyon kontrol alanları gibi

hükümler tüm armatörler ve operatörler için geçerli olup, bunlardan ECA uygulaması, gemi baca gazı salınımları ile ilgili gemilere birçok yükümlülük getirmiştir [7].

Avrupa Birliği, önemli ve büyüyen bir emisyon kaynağı olan uluslararası deniz taşımacılığının neden olduğu sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel bir yaklaşım olarak MRV direktifini uygulamaya koymuştur [8]. Yakıt tüketimini azaltarak, birçok ekonomik, sosyal, çevresel fayda ve işletme açısından rekabet avantajı sağlamak mümkündür. Ekonomik olarak gemi sahipleri ve işletmecileri için daha az işletme maliyeti sağlayacak ve sonuç olarak yükler daha düşük bir maliyetle taşınabilecek. Halk sağlığı için baktığımızda, özellikle solunum yolu hastalıklarının azalması nedeniyle işini ve evini kaybedecek kişi sayısının azalması ve çevresel fayda olarak da sera gazı emisyonlarının azaltılması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi [9] gibi faydalar sağlanabilir.

1990'ların ortalarından beri deniz taşımacılığında düşük karbon emisyonları IMO toplantılarında tartışılmaktadır. 1997 yılında gelişmelerin çoğu MARPOL kapsamında ele alınmıştır. Bu sözleşmeye göre, MEPC (Deniz Çevre Koruma Komitesi) CO₂ ve enerji verimliliği konularında kararlar ve düzenlemeler yapma yetkisine sahiptir. Çalışmalar, 2000 yılında MEPC'nin 45'inci oturumuna kadar gemi bazlı sera gazlarının salınımını azaltmaya yönelik taslak yönergelerin yayınlanmasıyla devam etmiştir. 2003 yılında sera gazı salınımını azaltmak için bir mekanizma kurulmasına karar verilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe konmuştur. Sonuç olarak, IMO daha çevre dostu ve verimli taşımacılıkla ilgili düzenlemeler getirmiştir. Yukarıda belirtilen düzenleyici yaklaşımları desteklemek için, IMO Temmuz 2011'de bir çalışma planı daha kabul etmiştir. Buna göre denizcilik filosunun verimliliğini izlemek için uygun bir yaklaşım sağlayan ve gemi performansını optimize etmek için bazı seçenekler sunan SEEMP (Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı), tüm gemiler için zorunlu hale gelmiştir. Yeni gemiler için EEDI (Energy Efficiency Design Index) uygulanmıştır. 1 Ocak 2013 tarihi itibarıyla sözü edilen SEEMP ve EEDI uygulamaları yürürlüğe girmiştir. MEPC ayrıca gönüllü kullanıma dayalı olarak gemi sahiplerine yardımcı olmak için bir EEOI (Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi) kılavuzu oluşturmuştur.

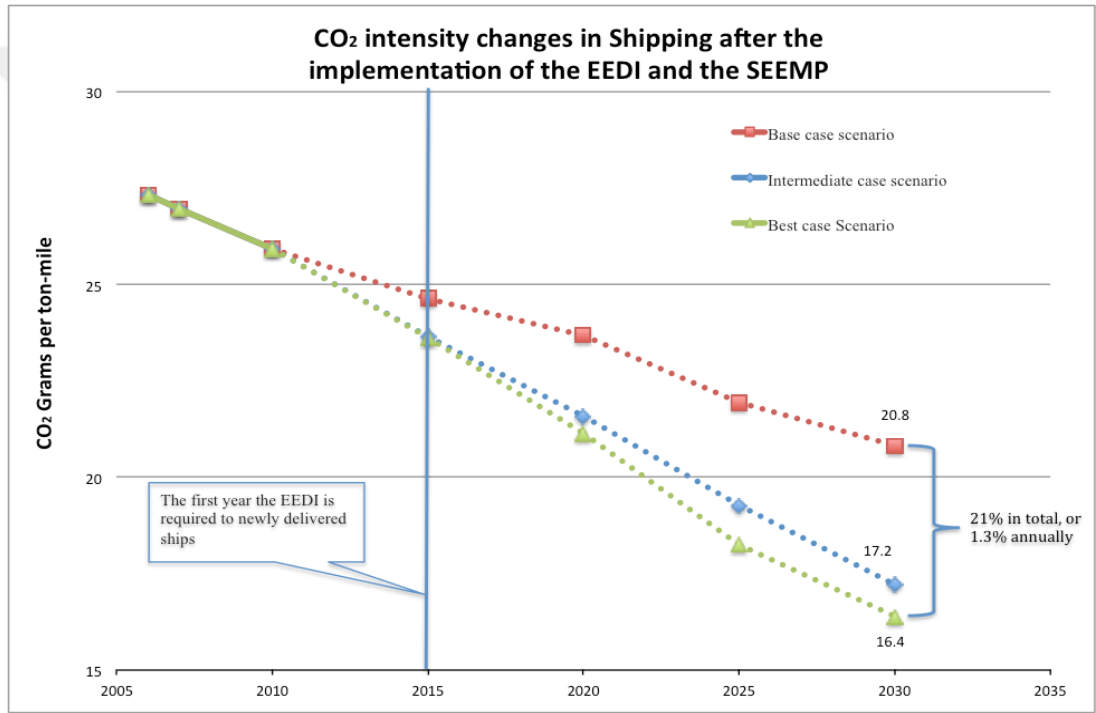
UNFCCC Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) iklim değişikliği sorunu küresel tepkinin temelini oluşturmak üzere 1992 yılında kabul edilmiştir. Sözleşme, 21 Mart 1994 tarihinde yürürlüğe girmiştir. 194 Taraflı Sözleşme neredeyse evrensel katılıma ulaşmıştır. Sözleşmenin nihai amacı, atmosferdeki sera gazı birikimini, iklim sistemi üzerinde insan kaynaklı tehlikeli etkiyi önleyecek bir seviyede durdurmaktır. BMGK genel kuralları, ilkeleri ve yükümlülükleri bir çerçeve sözleşme olarak tanımlar. Sözleşme, iklim sisteminin, endüstriden ve diğer sektörlerden karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonlarından bütünlüğü etkilenebilecek ortak bir varlık olduğunu kabul etmektedir.

UNFCCC iklim değişikliğine karşı mücadelede ileri bir adımdır. Ancak, sera gazı emisyonları küresel olarak artmaya devam ettikçe ve iklim değişikliğinin olumsuz etkileri giderek arttıkça, UNFCCC Tarafları mevcut Sözleşme'nin kalitesini güçlendirmek için Kyoto Protokolü 'nü (KP) müzakere etmeye başlamıştır. İki buçuk yıl süren müzakerelerden sonra Protokol, 1997 yılında Kyoto'da düzenlenen üçüncü konferansta kabul edilmiş ve 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Şu anda 191 ülkeyi ve AB'yi kapsayan protokole ülkemiz de 2009'da taraf olmuştur. Sonuç olarak, Kyoto Protokolü küresel ısınmaya ve sonuçlarına karşı bir önlem olarak ortaya çıkmıştır. Kyoto Protokolü'nün imzalanması, gelecekte dünyanın iklim sorunlarının çözümüne katkıda bulunmak için olumlu bir tutumdur.

1.2.1 IMO'nun düzenlemeleri

Uluslararası denizcilik için düzenleyici kurum olan Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından, Londra'da düzenlenen 70'inci MEPC toplantısında 2020 yılında küresel kükürt üst sınırının %0,50 m/m olarak uygulanmasına karar verilmiştir[10]. Gemilerin kükürt içeriğini önemli ölçüde düşürmek için kullandıkları yakıtın uygulama zamanı, hem çevre hem de insan sağlığı için bir dönüm noktası olan 1 Ocak 2020 olarak belirlenmiştir. IMO, BM organizasyonunun bir parçasıdır ve denizcilik sektöründen sorumludur. Organizasyonun amaçları; denizcilik sektörünü etkileyen tüm teknik konularda, uluslararası ticaretle uğraşan ülkelerin mevzuat ve uygulamaları, denizin güvenliği, seyirlerin etkinliği ve standartların en üst düzeyde gerçekleşmesini sağlamak ve kolaylaştırılabilmesi için genel olarak kabul edilmesi açısından hükümetler arasında bilgi alışverişinin sağlanmasıdır. IMO bu amaçlarla

ilgili olarak idari güce sahip tek makamdır. Üye Devletler, kendi ülkelerinde ki uygulamaları için kendi ulusal mevzuatında kabul edilen anlaşmaların uygulanmasını talep ederler. 1970'lerde deniz taşımacılığında artan petrol ve dökme sıvı hacmi nedeniyle, petrol ve diğer zararlı maddeler yoluyla kirliliği ortadan kaldırmak ve gemi kazalarından kaynaklı kirliliği en aza indirmek amacıyla 1973 yılında Gemilerden Kaynaklanan Kirliliği Önleme Uluslararası Konvansiyonu kurulmuştur [11]. Bu sözleşme, 6-17 Şubat 1978 tarihleri arasında düzenlenen Uluslararası Tankların ve Stokların Önlenmesi Konferansı'nda (TSSP Konferansı) kabul edilen 1978 Protokolü ile değiştirilmiş ve 1978 Protokolü, Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesine İlişkin Uluslararası Sözleşme ile tadil edilmiştir.



Şekil 1.1: SEEMP ve EEDI uygulamasından sonra CO₂ emisyon değişimi [12].

Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, CO₂ emisyonu IMO tarafından belirlenen 3 senaryoya dayanmaktadır ve IMO'nun 2030 yılına kadar salınım tahminlerini göstermektedir. Şekil 1.1 ayrıca SEEMP ve EEDI öncesi ve sonrası denizcilik sektöründen kaynaklanan karbon emisyon eğilimlerini de göstermektedir ve IMO bu 3 senaryoyu ikinci sera gazı çalışmasında sunmuştur.

Temel senaryo (kırmızı çizgi), yeni kuralların yürürlüğe girmediğini varsayarak karbon emisyonlarının yüzdesindeki azalmayı göstermektedir. En iyi durum senaryosu

(yeşil çizgi), kuralların herhangi bir gecikme olmaksızın yürürlüğe girdiğini gösterir. Ara senaryo (mavi çizgi), kurallar 4 yıllık bir gecikmeyle dünya filosunun yarısını uyguladığında karbon emisyonu eğilimini göstermektedir.

1.2.2 MARPOL Ek VI

MARPOL 73/78 Sözleşmesini revize eden 1997 Protokolü ile Sözleşmeye "Gemilerden Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesine İlişkin Kurallar" Ek VI eklenmiş ve 19 Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Dünya tonajının % 88.90'ı bu protokole taraftır. MARPOL 1997 Protokolüne uygun olarak, salınımın sınırlandırılması ve gemilerin baca (egzoz) gazlarından nitrojen oksit (NO_x) ve sülfür oksit (SO_x) salınımına ilişkin yeni düzenlemeler getirilmiştir. Bu düzenlemeler aşağıdaki gibidir [13]:

- Yönetmelik 1 : Uygulaması
- Yönetmelik 2 : Tanımları
- Yönetmelik 3 : Genel istisnaları
- Yönetmelik 4 : Eşdeğerleri
- Yönetmelik 5 : Anketler
- Yönetmelik 6 : Sertifikanın düzenlenmesi veya onaylanması
- Yönetmelik 7 : Başka bir Hükümet tarafından Sertifika verilmesi veya onaylanması
- Yönetmelik 8 : Sertifika Formu
- Yönetmelik 9 : Sertifikanın Süresi ve Geçerliliği
- Yönetmelik 10 : Operasyonel Gereksinimler Konusunda Liman Devlet Kontrolü
- Yönetmelik 11 : İhlal ve Uygulama Tespiti
- Yönetmelik 12 : Ozon tabakasını incelten maddeler
- Yönetmelik 13 : Azot oksitler (NO_x)
- Yönetmelik 14 : Kükürt oksitler (SO_x)
- Yönetmelik 15 : Uçucu Organik Bileşikler
- Yönetmelik 16 : Gemide yakma

- Yönetmelik 17 : Resepsiyon tesisleri
- Yönetmelik 18 : Fuel Oil Kalitesi
- Yönetmelik 19 : Platformlar ve Sondaj Kuleleri İçin Gereksinimler
- Yönetmelik 20 : E.V. Sağlanan Endeksin Tasarımı
- Yönetmelik 21 : İstenilen Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi
- Yönetmelik 22 : Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı
- Yönetmelik 23 : Gemilerde Enerji Verimliliğinin Geliştirilmesi için Teknik İşbirliği ve Teknoloji Transferinin Desteklenmesi

Tüm uluslararası gemileri, sabit ve yüzer sondaj ünitelerini 400 GRT ve daha büyük tonajlı diğer platformları kapsayan bu Ek, gemi yakıtının kükürt ve kükürt oranını sınırlandırmış ve gemi bacalarının, geminin bacalarına izin veren sistemlerle donatılması zorunlu hale getirilmiştir. Daha sonra inşa edilen gemilere kurulan 130 kW ve daha fazla güce sahip tüm yeni gemi dizel makinelerinin NO_x salınımı gerekliliklerine uyması istenmiş ve "Uluslararası Hava Kirliliği Önleme Sertifikası (IAPP)", bu ek altında gemiler için zorunlu hale getirilmiştir. NO_x ve partikül emisyonlarının daha sıkı bir şekilde sınırlı olduğu özel emisyon kontrol alanları tanımlanmış ve 2013 yılında yürürlüğe giren yeni kurallarla yeni sera gazı emisyonları önemli ölçüde azalmıştır.

Çizelge 1.1: MARPOL Ek VI emisyon limiti motor devrine oranı [14].

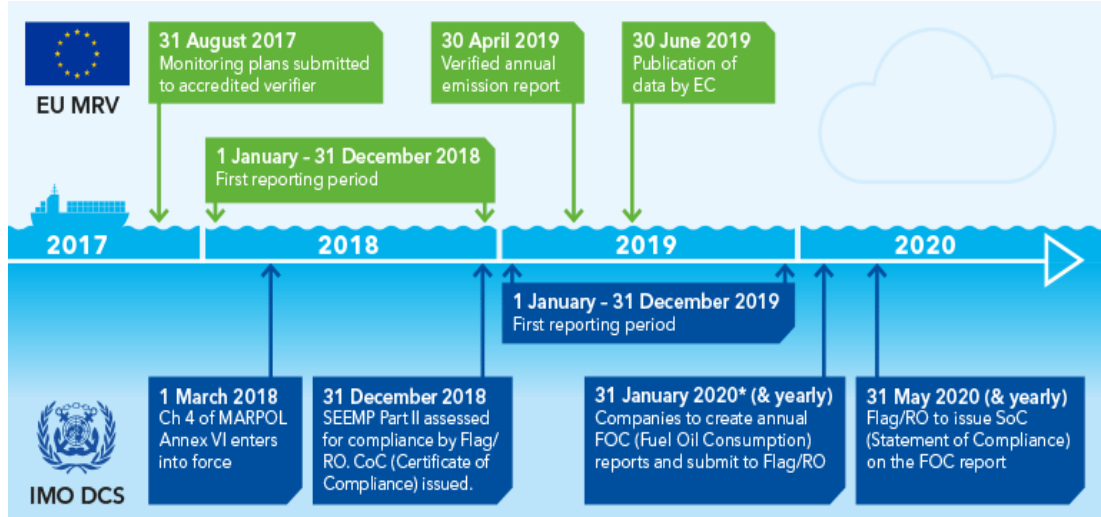
Katman	Gemi inşaası	Toplam ağırlıklı çevrim emisyon limiti (g / kWh)		
		n = makinenin devir hızı (rpm)		
		n <130	n = 130-1999	n ≥2000
I	1 OCAK 2000	17	$45.n^{(-0.2)}$	9.8
II	1 OCAK 2011	14.4	$44.n^{(-0.23)}$	7.7
III	1 OCAK 2016	3.4	$9.n^{(-0.2)}$	2

1.2.3 MRV

MRV, deniz taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonlarının izlenmesi, raporlanması ve doğrulanmasına ilişkin yönetmeliktir. Ocak 2018'den itibaren, sefer sırasında tüketilen yakıt ve diğer ilgili veriler izlenmektedir. Her geminin CO₂ emisyonlarının ve diğer bilgilerin izlenmesi ve raporlanması için seçilen yöntemi belirten bir plandır. Plan, uygulama yönetmeliğindeki nedene göre düzenlenir. Komisyon, raporlanan CO₂ emisyonları hakkındaki bilgileri aşağıdaki bilgiler dahil olmak üzere, her yıl 30 Haziran tarihine kadar kamuya açıklayacaktır.

- Gemi tanımlama
- Uygun olduğu durumlarda, EEDI veya EIV (Tahmini Endeks Değeri)
- Yıllık CO₂ emisyon miktarı
- Yıllık toplam yakıt tüketimi
- Kapsanan mesafe başına ortalama yıllık yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları
- Taşınan kargo başına yıllık ortalama yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonları
- Seyirde geçirilen toplam zaman
- İzleme için kullanılan yöntem
- Uygunluk Belgesinin verildiği ve süresinin dolduğu tarih
- Emisyon raporunu bir araya getiren değerlemenin belirlenmesi
- Gönüllü olarak izlenen ve bildirilen diğer bilgiler

Komisyon, deniz taşımacılığında kaynaklanan CO₂ emisyonları ve diğer ilgili bilgiler hakkında yıllık raporlar yayınlamıştır. Bu, gemilerin büyüklüğüne, gemi türüne, faaliyete ve ilgili olduğu düşünülen diğer gemilere göre toplam ve analiz edilen sonuçları içerir.



Şekil 1.2: EU MRV ve IMO DCS Zaman Çizelgesi [8] .

1.3 Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Emisyonları

Gemi sayısında ve gemi trafiğinde önemli artışlar gözlenirken, deniz taşımacılığında da yıllar içinde önemli bir artış kaydedilmiştir. Yapılan çalışmalarda, 2001 yılında dünya gemi filosunun (300 GRT ve üzeri) 778.758, yük taşımacılığında kullanılan diğer 5330 geminin ise yolcu gemisi tiplerinden oluştuğu görülmüştür[15]. Başka bir çalışmada ise 2007 yılında yük ve yolcu taşımacılığı dahil olmak üzere dünya gemi filosu 1.009.523 gemiden oluşurken, 2016 yılında yük ve yolcu taşımacılığı dahil 1.716.088 gemi olarak hesaplanmıştır [15] . Gemi sayısındaki artışla birlikte, 1970 - 2012 yılları arasında dünya filosunun tükettiği yakıt yaklaşık 2 kat artarken, deniz taşımacılığında yapılan çalışmalar kargonun taşıma mesafesi değerlendirildiğinde yaklaşık 5 kat artmıştır. Çalışmalardan da görüleceği üzere gemi ve deniz taşımacılığı hacmi sürekli artmakta ve artmaya devam etmesi beklenmektedir. Deniz taşımacılığı, yapılan çalışmalara ve ortaya çıkan emisyonlara göre değerlendirildiğinde en temiz kirlenici kaynağı olarak kabul edilir.

Çizelge 1.2: Dünya deniz ticaret filosu [16].

Yıl	Tanker	Dökme	Konteyner	Kuru yük	Toplam
2001	327455	278084	68715	99174	778758
2002	330718	291175	76131	96128	799763
2003	333176	296855	83744	96754	816385
2004	347453	301617	90214	95187	840355
2005	368399	319167	99190	95346	888035
2006	387707	341720	111663	97417	944498
2007	411319	363646	128174	100322	1009523
2008	439291	386650	144552	102784	1079339
2009	463287	414431	161945	106820	1152545
2010	501573	451223	169514	105781	1234153
2011	523608	528126	183722	107049	1348567
2012	547390	605757	196885	105284	1461759
2013	555181	666861	206409	104531	1539263
2014	567933	705826	216275	107983	1604375
2015	579205	738612	227674	109139	1661008
2016	600130	752936	244186	112306	1716088

Deniz taşımacılığı, gemi trafiği ve getirilen düzenlemelerdeki bu önemli artış nedeniyle, gemi emisyonlarının ve çevresel etkileri son yıllarda pek çok çalışmaya dahil edilmiştir.

Gemi kaynaklı emisyonların hesaplanmasında iki yöntem kullanılmaktadır. Yakıt tüketimine dayalı yukarıdan-aşağıya yönteminde, gemiler tarafından yayılan yakıt miktarı ve gemilerden yayılan emisyon verileri, tüketilen yakıt birimi başına gemiler tarafından yayılan emisyon verileri kullanılarak hesaplanır. Gemi hareketlerine ve makine tipine dayanan aşağıdan yukarıya yönteminde, gemilerin yaydığı emisyon miktarı gemi gücü hızı, gemi makine tipi ve hızı ve gemi tarafından birim güç başına üretilen güç birimi başına yayılan emisyon verileri kullanılarak hesaplanır. Ayrıca geminin çalışma koşulları, makinenin türü, geminin tükettiği yakıt türü, motor yükü ve geminin yaşı ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Emisyon faktörleri aşağıdan yukarıya ve yukarıdan aşağıya emisyon hesaplama yöntemlerinin esasını oluşturur. Emisyon faktörleri gemilerdeki emisyon ölçümleri, fiziksel, kimyasal ve kütle dengesi yöntemi

metodlarla belirlenebilir. Gemilerde emisyon ölçümleri yapılmış ve emisyon faktörleri Avrupa ve ABD'deki çevre kuruluşları tarafından hesaplanmıştır. Fakat limanlarda gerçekleştirilen çalışmalarda gemilerdeki emisyon ölçümlerinden çıkan sonuçlar ile analitik emisyon hesaplamalarla elde edilen sonuçlar arasında önemli sapmalar ve hatalar gözlemlenmiştir. Gemilere yönelik emisyon faktörü belirleme çalışmalarından kaynaklanan emisyon faktörleri, liman sahalarında farklı işletme koşullarına ve farklı özelliklere sahip gemileri temsil etmeyebilirken, yaygın kullanıma sahip gemiler ve işlerin yapıldığı alanda faaliyet gösteren gemi tipleri için doğru sonuçlar sağlayabilir. Bu nedenle gemilerde yapılan emisyon ölçüm faaliyetleri, emisyon faktörlerinin geliştirilmesi ve ayrıntılı emisyon faktörlerinin oluşturulması için veriler sağlamaktadır.

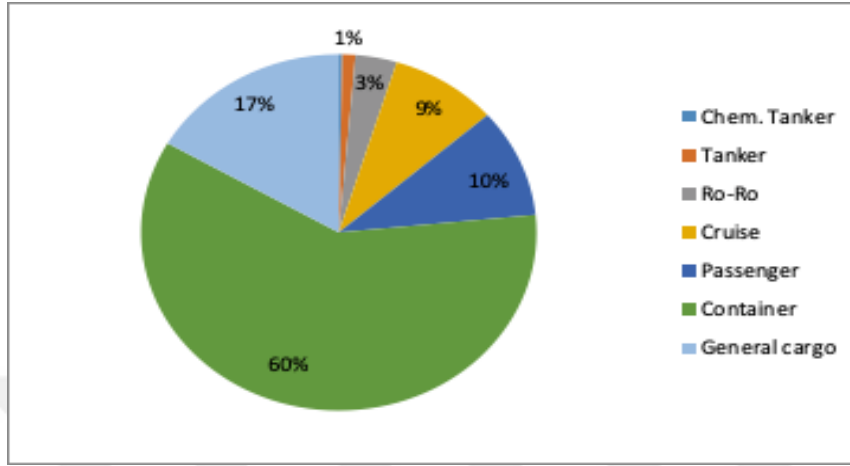
Gemilerde yapılan emisyon ölçümleri, gemilerin emisyon limitlerine uygunluğunu izlemek, emisyon temizleme sistemlerini belirlemek, gemi makinelerinin performansını ölçmek ve emisyon envanteri çalışmalarında yararlanılan emisyon faktörlerini belirlemek veya doğrulamak için yapılmaktadır. IMO, 1997 yılındaki protokolü ile gemi bazlı hava kirliliğinin ve gemilerden kaynaklanan NO_x emisyonlarının sınırlandırılmasına yönelik bir yönetmeliği kabul etmiştir. Gemilerin bu limitleri sağlayıp sağlamadığı gemilerde emisyon ölçümleri yapılarak denetlenmekte ve bu limitleri karşılayan gemilere sertifika verilmektedir. Gemiden gemiye emisyon azaltma önlemlerini değerlendirmek ve gemi bazlı emisyon azaltma ve önleyici sistemleri değerlendirmek için gemilerde emisyon ölçümleri de yapılmaktadır.

1.3.1 Farklı gemi türlerinde emisyonlar

Gemi tiplerine göre egzoz gazı emisyon ölçümü araştırmalarında; gemilerin makine özellikleri ve tasarımı, kullanılan yakıtların özellikleri, gemi ortalama seyir hızı, yük faktörleri, gemilerin itiş ve pervane sistemi, döşeme, makine teknolojisi, çalışma ve bakım tutumu gibi faktörler gemilerin yaydığı emisyon miktarını etkilemektedir.

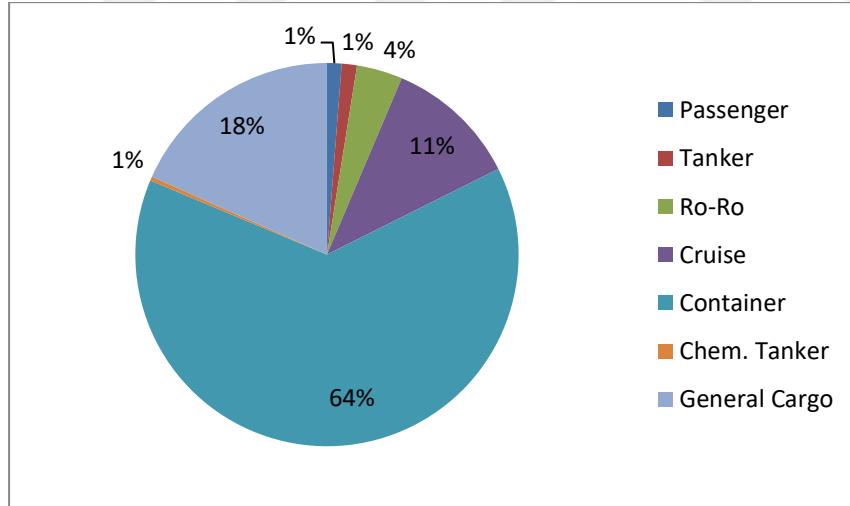
Yapılan bir çalışmada İzmir Limanı'na 2007 yılında gelen gemilerin ana makinelerinden ve dizel jeneratörlerinden salınan egzoz gazı miktarı işletme modlarına göre ölçülerek değerlerle belirtilmiştir. 1083,7 ton NO_x, 982,2 ton SO₂, 57838,8 ton CO₂ 91,5 ton HC ve 138,3 ton PM, seyirde M/E egzoz gazı ile

oluşturulmuştur. 296,6 ton NO_x, 268,5 ton SO₂ 15810,5 ton CO₂ 25,1 ton HC, 37,9 ton PM manevrada M/E egzoz gazı ile oluşturulmuştur. Dizel Jeneratördeki egzoz gazı miktarı da hesaplanmıştır. 2007 yılında 247,9 ton NO_x, 458,5 ton SO₂, 26940,8 ton CO₂, 19,1 ton HC ve 34,3 ton PM D/G'den oluşmuştur [17].

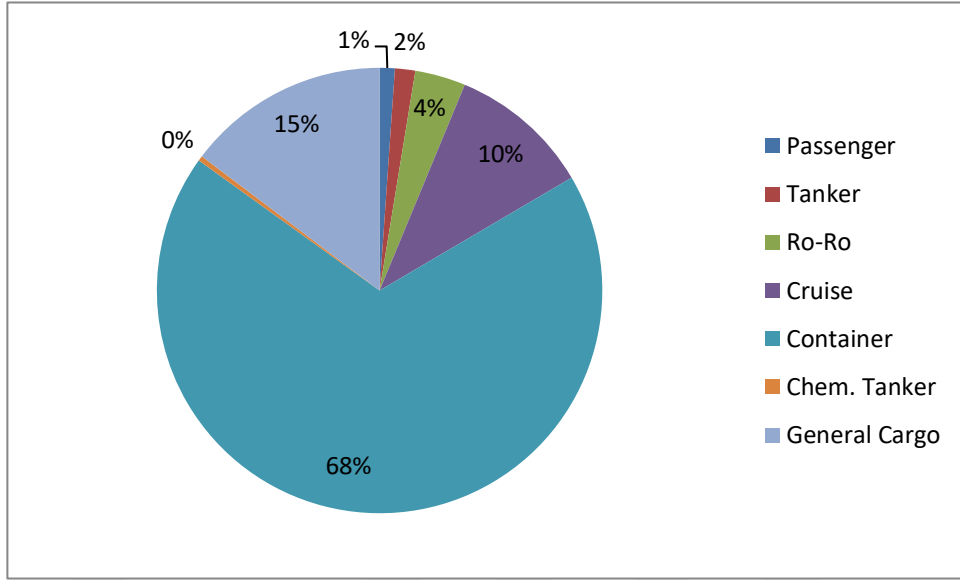


Şekil 1.3: Gemi tiplerine göre NO_x emisyon oranları

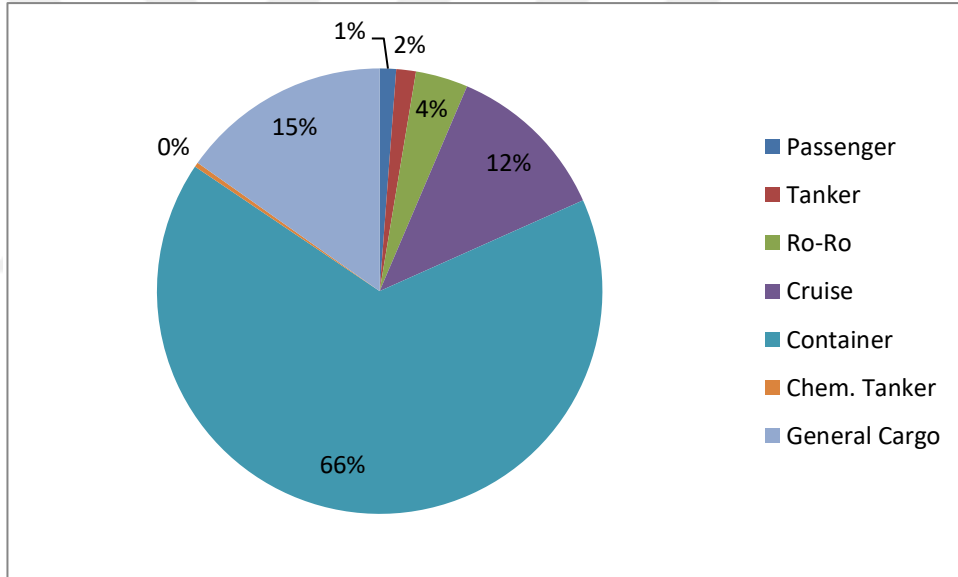
2007 yılında İzmir Limanı'na gelen gemilerden yayılan NO_x, SO₂, CO₂, HC ve PM miktarı gemi faaliyetleri emisyon hesaplama yöntemine göre hesaplanmıştır.



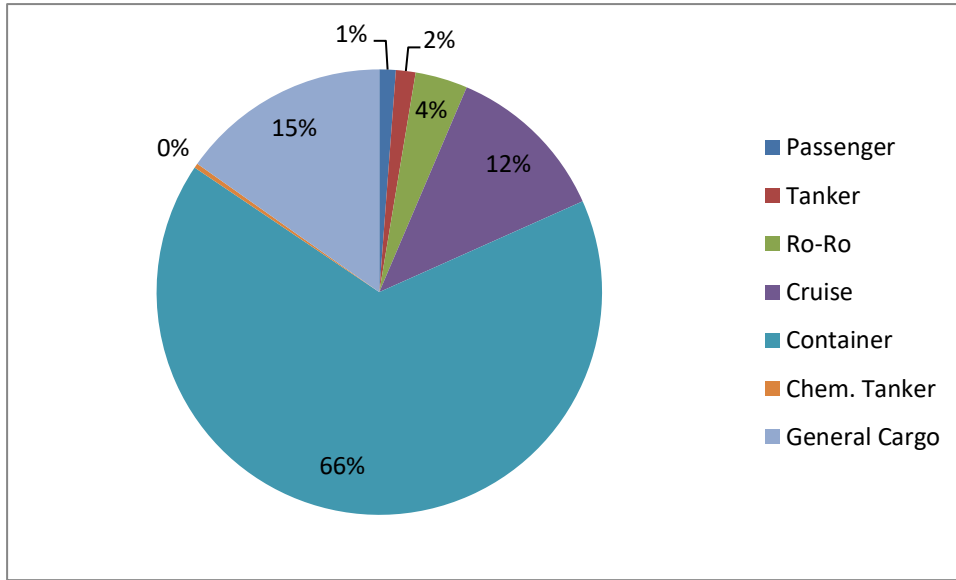
Şekil 1.4: Farklı gemi tiplerinin SO₂ emisyon oranları



Şekil 1.5: Gemi tiplerine göre CO₂ emisyon oranları



Şekil 1.6: Gemi tiplerine göre HC emisyon oranları



Şekil 1.7: Gemi tiplerine göre PM emisyon miktarları

Alınması gereken en etkili önlemler, İzmir limanına gelen gemilerde emisyon azaltma teknolojilerinin uygulanması ve kullanılan yakıt kalitesinin iyileştirilmesidir. Ana makinede ve jeneratörlerde temiz yakıt kullanılarak CO₂, NO_x ve SO₂ emisyonları azaltılabilir. Olası önlemlerden biri limandan belirli bir mesafede gemi hızını azaltma yöntemi ile dizel emisyon miktarını azaltmaktır. Limana gelen gemilerin hızının düşürülmesi sonucunda yakıt tüketimi azalacak ve gemi emisyonları azalacaktır. Gemilerin limanda ve demirde bekleme süreleri azaltılarak, jeneratörlerden çıkan egzoz gazı miktarı azaltılabilmektedir.

1.3.2 Emisyon türleri

Egzoz emisyonlarının neredeyse tamamı gemilerde kullanılan dizel makinelerden meydana gelmektedir. Bu bölümde egzoz emisyonlarının formasyonu ve emisyon çeşitleri açıklanacaktır.

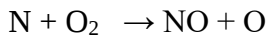
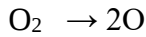
Dizel makineler gemilerin seyrinde ve gemiler için elektrik üretmekte kullanılır. Dizel makinelerde tüketilen dizel yakıtlar, karbon içeren hidrojen olarak kabul edilebilir. Tam yanma sırasında, tüm karbonatlı hidrojenler karbondioksit ve su buharı oluşturur. Yanma olmaması halinde silindirlere karbon monoksit oluşumuna sebep olur. Bütünüyle yanma olmadığında, yakıtın bir miktarı yanmamış hidrokarbonlar olarak egzozdan dışarı atılır. Silindirlere aşırı hava verilmesiyle azot oksit meydana gelir.

Azot oksit oluşumunun bir başka nedeni de yanma işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklıklardır. Sülfür oksitler, yakıtların yapısındaki sülfürden kaynaklanır [18].

Dizel motorlarda havanın yakıtla yanması sonucu yanma ürünleri oluşur . Bunlar CO₂, H₂O, SO₂, O₂ ve N₂'dir . Yakıt tam olarak yanmamışsa veya yanma ayrıştırılırsa, bu bileşenlere ek olarak CO, H₂, NO oluşur. Yakıttan tam enerji alabilmek için yakıtın tamamı yakılmalıdır. Bunun için yeterli miktarda oksijen ve dolayısıyla hava gereklidir. Dizel makinelerde karışım direkt olarak silindirde olduğu için yanma işlemi hava ile yakıtın karışımı tamamlanmadan başlar. Bu, egzozda yanmamış gazlara neden olur. Makinenin yanmasının tamamen gerçekleşip gerçekleşmeyeceği yanmanın meydana geldiği yanma odasındaki hava miktarına bağlıdır.

1.3.2.1 Azot oksit (NO_x) emisyon

Yanma sonucunda havadaki azotun yüksek sıcaklıklarda oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler oluşur. NO_x, ana element olarak azot içerir. Egzoz gazlarının atmosfere salınmasının bir sonucu olarak, NO'nun bir kısmı NO₂'ye ve oksijenle temas halindeki diğer NO_x'e dönüştürülür. Bu bağlamda, NO_x oluşumunu etkileyen iki önemli parametre yanma odası sıcaklığı ve hava / yakıt oranıdır. Kimyasal reaksiyon oranları da etkilidir. Ancak bu hızlar aynı zamanda sıcaklığa da bağlıdır. Yanma sistemlerinde azot oksitlerin oluşumu için birçok mekanizma düşünülmüştür.



Zincir reaksiyonları, oksijen moleküllerinin yüksek sıcaklıklarda ayrılmasından oluşan atomik oksijen tarafından başlatılır. Bu mekanizmaya göre, dizel yakma spreyindeki bölgesel NO oluşumu, bölgesel oksijen atomunun konsantrasyonu ile ilişkilendirilirken, bölgesel oksijen atomunun konsantrasyonu, oksijen moleküllerinin bölgesel konsantrasyonu ve alev sıcaklığı ile ilişkilidir. Yukarıdaki denge reaksiyonları göz önünde bulundurularak, son 2 reaksiyonu ters yönde ilerleterek NO'dan O₂ elde etmek mümkündür. NO oluşum hızı, N₂ ve O₂ oluşum hızından daha yüksektir. Bunun nedeni, piston üst ölü noktadan aşağı hareket ettiğinde NO'ların tekrar N₂ ve O₂'ye ayrışmasının beklenmesi, reaksiyon hızının düşük sıcaklıklarda

çok düşük olması, dolayısıyla bu reaksiyonların da yavaşlamasıdır. Piston üst ölü noktadan aşağı inerken soğuyan gazlar, reaksiyonu dondurur. Bu nedenle NO miktarındaki azalma önemsizdir [19].

1.3.2.2 Karbon monoksit (CO) emisyonu

Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının temel nedeni oksijenin yetersiz olmasıdır. Yanma odası tamamen hesaba katıldığında, oksijen genellikle yetersiz olabilir veya karışım tamamen homojen değilse, yanma odası belirli bir yerde yerel olarak yetersiz olabilir. Temel olarak, CO oluşumu hava fazlası katsayısının güçlü bir fonksiyonu olarak değişir. Yanma sırasında CO oluşumuna su gazı dengesi denir.



denklemi ile belirlenir. Daha yüksek alev sıcaklıklarında, bu denge reaksiyonundan CO₂'den daha fazla CO elde edilir ancak sıcaklık düştükçe CO, CO₂'ye oksitlenir. Bu bakımdan zayıf karışımlarda egzoz gazlarındaki CO içeriği daha düşükken, zengin karışımlarda O₂ eksikliğinden dolayı soğuk egzoz gazlarında bile yüksek miktarda CO bulunmaktadır.

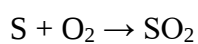
Yanma sırasında, alev cephesinin iç kısmındaki yüksek sıcaklık bölgesinde büyük miktarda CO oluşur. Ancak oksidasyon sonucu gazların genleşmesi ve soğumasından sonra CO, CO₂'ye dönüşmüştür [19].

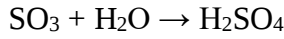


Özetle, yanma bittiğinde CO'nun CO₂'ye dönüştürülmesiyle sonuçlanan rekombinasyon reaksiyonları meydana gelir.

1.3.2.3 Sülfür oksit (SO_x) emisyonu

Dizel motorlardaki yakıtlar, yakıt içerik tablosundaki elementlerin dışında bir miktar kükürt içerir. Yakıtın kükürt içeriği, kükürt dioksit ve az miktarda kükürt trioksit bileşiklerinden oluşur. Ortaya çıkan SO₂ ve SO bileşiklerinin bir miktarı H₂SO₃ ve H₂SO₄ oluşturmak için su ile reaksiyona girer[19]. Bu bileşik oluşumların kimyasal denklemleri;





Sülfür oksit emisyonları, yakıttaki sülfür miktarına bağlıdır. Bu nedenle, yakıttaki kükürt içeriği azaltılabilir ve kükürt oksit emisyonları kontrol edilebilir ve azaltılabilir.

1.3.2.4 Hidrokarbon (HC) emisyonu

Silindirde tam yanma olmadığında gemi egzozlarından hidrokarbon emisyonları meydana gelir. Yanma havasındaki oksijen miktarının yetersizliği ve düşük sıcaklıklar, tam yanmayı engelleyen ana nedenlerdir.

Yanmamış HC iki kaynaktan oluşur. Biri dağınık alevin önündeki zayıf karışım, diğeri ise nozul boşluğundaki ve silindir hacminin genişlemesi sırasında zengin karışımdır. Çatlak hacimleri olarak adlandırılan piston segmanlarının, valf kafalarının ve enjektörlerin etrafındaki boşlukların etrafındaki hacimler, HC emisyonunda önemli bir etkiye sahiptir. Bu çatlaklarda alevler söner ve bu boşluklarda HC oluşur.

Yüksek sıkıştırma oranları ve basınçların yanı sıra çatlak hacimlerinin yanma odası hacmine oranı da HC oluşumunu etkiler. HC emisyonları ayrıca yük ve hız da bağlıdır. Hava fazlalık katsayısı ile değişir. Yüksek yüklerde HC emisyonları düşükken, kısmi yüklerde bu oran artar. Karışım zenginleştikçe, karışımda bulunan O₂ miktarı azalır. Fazla yakıtın varlığından dolayı yüksek sıcaklıklar oluşmakta ve sonuç olarak soğutma suyu ile yağlama yağına ısı transferi artmakta, yanma reaksiyonlarında azalma ve HC'de artış olur [19].

1.3.2.5 Partikül madde emisyonu

Egzoz gazı içerisinde organik ve inorganik partiküller bulunur. Partikül madde, farklı mekanizmaların, çekirdek mod partiküllerinin ve birikim modu partiküllerinin sonucudur. Çekirdek mod parçacıkları yüksek oranda yoğunlaştırılmış hidrokarbonlardan ve sülfatlardan oluşur. Biriktirme modu partikülleri, yanma işlemi sırasında büyük miktarlarda karbon içeren partiküllerin ve diğer katı partiküllerin birikmesi ile oluşur. Partikül maddelerin neredeyse tamamı 10 mikron veya daha küçük çapa sahip partiküllerden oluşur. Partikül maddenin yaklaşık %94'ü çap olarak 2,5 mikrondan küçük partiküllerden oluşur [19].

Çizelge 1.3: Parçacık emisyonlarının bileşenleri [20].

Partikül Bileşeni	Dizel Egzoz Gazlarında Partikül Emisyonlarının İçeriği (ağırlık%)
Katı Parçacıklar	66-82
Sıvı Yakıt ve Organik Bileşenler	11-15
Makine Yağı ve Organik Bileşenler	9-11
Kükürt Bileşikleri ve Su	1-11

1.3.3 Emisyon ölçüm sistemleri

Gemilerden salınan egzoz emisyon seviyesini saptamak, gemilerin emisyon limitlerine uygunluğunu kontrol etmek, egzoz emisyon azaltma sistemlerini ölçmek, gemi makinelerinin performansını saptamak ve tespit etmek için egzoz emisyon ölçümleri veya emisyon envanteri çalışmalarında kullanılan emisyon faktörlerini doğrulamak için yapılır. Fakat, gemilerin egzoz emisyonlarının tespiti çok zorlu ölçümler gerektirir ve sayıca fazla parametrenin kontrolünü ve değerlendirilmesini gerektirir. Gemilerde egzoz emisyon ölçümü ve gemi egzoz emisyonlarının değerlendirilmesi NO_x Teknik Dokümanı'na göre yapılmalıdır. NO_x Teknik Dokümanı, MARPOL 73/78 Konvansiyonu Ek 13, Kural 13'te belirtilen NO_x emisyon limitlerine göre gemi dizel makinelerinin belirlenmesi, incelenmesi ve sertifikasyonu için izlenecek prosedürleri açıklar ve sunar. Ayrıca gemilerin egzoz emisyonlarının deneysel olarak saptandığı diğer çalışmalarda, İçten Yanmalı Makinelerde Egzoz Emisyon Ölçümleri için ISO 8178 Standardı ve çeşitli parametreler için diğer ISO ve EPA standartları kullanılmaktadır. Bu kısımda egzoz emisyonunda kullanılan ölçüm sistemleri açıklanacaktır.

Gemi egzoz emisyonlarının belirlenmesi için egzoz gazı hızı ve sıcaklığı, makine ve çevre koşulları ile ilgili çeşitli özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu faktörlerin ölçülmesi ve belirlenmesi gerekir:

- Egzoz gazındaki emisyon konsantrasyonu,
- Şaft dayanımı
- Egzoz gazı akışı ve sıcaklığı,

-Ortam sıcaklığı, basıncı ve nemi saptanmalıdır

Yukarıda verilen bu değerler farklı ölçüm sistemleri ile ölçülür. Egzoz gazındaki emisyon yoğunluğu gaz analizörü ile ölçülür. Şaftın gücü, telemetrik şaft gücü ölçüm yöntemi ile saptanabilir. Pitot tüpü ile egzoz gazı hızı saptanarak egzoz gazı debisi hesaplanacaktır. Egzoz gazı sıcaklığı k-tipi termokupl ile ölçülecektir. Makine dairesinin sıcaklığı, nemi ve basıncı sıcaklık göstergesi, nem ölçer ve basınç göstergesi [21] ile ölçülebilir.

Emisyon ölçüm sistemi ile egzoz gazındaki NO_x, SO₂, CO₂, CO, O₂ ve HC emisyonlarının konsantrasyonu belirlenir. Egzoz gazındaki konsantrasyon değerleri, gaz analizörü tarafından belirlenir. Baca gazı ölçümü, kazana yakın taraftan açılan bir delik vasıtasıyla kazanın arkasındaki baca çıkışından yapılır. Baca gazı analizörünün probu bu delikten sokulur ve probun ucu bacanın ortasına yerleştirilir. Çünkü baca merkezi baca sıcaklığının en yüksek olduğu noktadır. Baca gazı analizöründeki emme pompası, bacadaki atık gazı emer ve toz tutucuyu ön filtre üzerinden içerideki sensörlere gönderir. Bu durumda baca gazındaki su buharı, cihaz veya sonda üzerinde bulunan ayrı bir su deposu vasıtasıyla toplanır ve tahliye edilir. Elektrokimyasal sensörler bozulmaya neden olduğundan suyun sensörlere gitmemesi önemlidir. Baca gazı probundaki baca gazı sıcaklığı termokupl ile ölçülür. Ek bir sıcaklık probu da ortam sıcaklığını ölçer ve brülöre giren havanın sıcaklığını belirler. Ölçülen tüm bu parametreler yanma verimini ve hava oranını ölçer. Gerekli düzeltmeler yapılarak yanmanın en yüksek verimlilikte gerçekleşmesi sağlanır. Bu sayede hem yakıttan tasarruf edilir hem de hava çevreye kirletici gazlardan çok daha az salınır.

Egzoz gazı akış oranı, egzoz gazı hızı belirlenerek hesaplanır. Egzoz gazı hız değerleri, bir I-tipi pitot tüp, taşınabilir hız ve basınç göstergesi kullanılarak ölçülür. Egzoz gazı sıcaklığı sıcaklık göstergesi ile ölçülür. Sıcaklık ölçümleri için K tipi termokupl kullanılır. Gemilerden yayılan egzoz emisyon değeri, makinenin çeşitli yük ve hızına tekabül eden farklı ağırlık faktörleri ile makinenin çeşitli yük ve hızlarında yapılan ölçümlerle ulaşılan değerler kullanılarak hesaplanır. Gemiden çıkan egzoz emisyonlarını karşılayacak bir emisyon değerini belirlemek için geminin çeşitli çalışma koşullarını temsil eden makine yüklerinde ve hızlarda ölçümler yapılır. Bu makine hızı ve yükleri için ağırlık faktörleri belirlenir. Ağırlık faktörleri, gemilerin

daha sık çalıştığı makine yüklerinde ve hızlarda daha yüksek değerler alır. Manevra ve liman faaliyetlerine karşılık gelen ağırlık faktörleri nispeten düşük değerler alır. Ayrıca ana ve yardımcı makine için farklı makine yükü ve hız değerleri alınır. Benzer şekilde, emisyon ölçümleri, geminin sevk sistemi dikkate alınarak farklı motor yükü ve hız değerlerinde alınır [21].

Emisyon hesaplama yöntemleri, emisyon envanteri çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Egzoz gazı emisyonları önceki çalışmalarla karşılaştırılarak belirlenir ve çevresel etkilerinin seyri belirlenir. Çevresel etkiler, canlılar üzerindeki olumsuz etkilerle karakterizedir. Bu olumsuz etkiler bilimsel çalışmalarla ortaya çıkar. IMO ve EPA gibi uluslararası denizcilik kuruluşları, emisyon envanteri çalışmaları sonucunda emisyon hesabının yapıldığı bölge için emisyon miktarını azaltmaya yönelik yasal düzenlemeler ve sınırlamalar sağlamaktadır. Gemi makinelerinden çıkan emisyon miktarı, gemilerden kaynaklanan hava kirliliğinin belirlenmesinde önemlidir. Miktar hesaplanırken iki yöntem uygulanır. Birincisi, gemilerin yaktığı toplam yakıt miktarını kullanarak emisyon hesaplama yöntemi, diğeri ise geminin seyir, manevra ve liman faaliyetlerine dayalı emisyon hesaplama yöntemidir.

Yakıt miktarına bağlı olarak önemli emisyon tahminlerinin önemli bir bileşeni, her geminin ne kadar yakıt yaktığıdır. Diğer bileşenler; gemilerin tipi, gross tonajı, her geminin çalışma günü sayısı, bu süre içinde geminin çalıştırdığı makine veya makine tipi ve bu makinelerin kullandığı yakıt türü ve tüketilen yakıt miktarıdır. Bu yöntemde çalışma şartlarına göre tüketilen yakıt miktarı yük faktörlerine göre değişmektedir. Örneğin tankerlerdeki yakıt tahliyesi, gemi içerisindeki elektrik veya buhar türbini ile yapılır. Bu pompaların devreye girmesiyle elektrik jeneratörlerinde ekstra bir yük oluşur veya kazan çalıştırılır. Bu amaçla tankerlerde tahliye işlemleri için ekstra yakıt tüketimi hesaplanır. Diğer yöntem, gemi faaliyetleri için emisyon hesaplama yöntemidir ve emisyonlar, her gemi faaliyeti için belirlenen emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanabilir Emisyon faktörleri, her gemi faaliyeti sırasında ana ve yardımcı makinelerin yaydığı emisyon miktarını belirler. Her geminin emisyonları, seyir, manevra ve yanaşma sırasında ayrı ayrı hesaplanır. Çünkü her işletim modunda her geminin ana makine gücü ve jeneratörlerin gücü; yük faktörüne ve kullanılan yakıtın türüne bağlı olarak değişir. Bu nedenle, gemi faaliyetine göre, yük faktörlerine göre ana makine ve jeneratör gücünün emisyon hesaplaması her bir işletim modu için

bilinmelidir. Ayrıca her geminin çalışma koşullarında, ana makine ve jeneratörde kullanılan yakıt türünün de bilinmesi gerekir. Ayrıca rota, manevra ve yanaşma süreleri bilinmelidir.





2. GEMİLERDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Son yıllarda denizcilik sektörü, gemilerden kaynaklanan emisyonların azaltılmasına yönelik ciddi tedbirlerin alınması ve akaryakıt fiyatlarının hızla artması nedeniyle yakıt tüketimini azaltma konusunda büyük bir baskı altındadır. Denizcilik sektöründe, gemilerin daha verimli çalışması ve yüksek enerji verimliliğine sahip gemilerin tasarımı ile gemilerde %25 ila %75'e varan yakıt tasarrufu mümkündür [22]. Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) 1 Ocak 2013 tarihinden itibaren tüm gemilere; Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP) ve Enerji Verimliliği Tasarım Endeksi (EEDI) zorunlu hale getirilmiştir. EEDI, yakıt verimliliğini etkileyen tüm bileşenler için minimum enerji verimliliği uygulamaları dahil olmak üzere yeni gemiler için teknik anlamda önlemler sağlarken, SEEMP, gemilerin şuan ki teknolojileri kullanılarak geliştirilen operasyonel uygulamalar yoluyla enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Enerji verimliliğini artırmak için farklı teknolojik ve tasarım temelli yaklaşımlar bulunsa da, bu önlemlerin gemiler için uygulanmasındaki sınırlamalar, gemilerin verimli operasyonunun önemini artırmaktadır [22].

Gemilerin işletme maliyetlerinin en büyük tutarlarından birini oluşturan akaryakıt maliyetleri, özellikle akaryakıt fiyatlarının arttığı ve navlun düştüğü dönemlerde daha da önem kazanmaktadır. Geminin mevcut durumuna göre enerji verimliliği çalışmaları ile bu giderin düşürülmesi mümkündür. Bugüne kadar yakıt maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar belirli noktalara odaklanmıştır. Gemi makinelerinin yakıt maliyetlerinin istenilen düzeyde en aza inmesi, tüm gemiyi kapsayacak enerji ekonomisi çalışmaları ile mümkündür. Gemilerin yakıt tüketimi nedeniyle birçok faktör gemiyi etkiler. Yakıt tüketimini etkileyen tüm faktörleri belirlemek, bu faktörlerin verimliliğini artırmanın yollarını belirlemek ve mevcut koşulların uygun şekilde işletilmesiyle yakıt maliyetlerini en aza indirmek mümkün olabilir. Yakıt maliyetlerini etkileyen faktörlerin verimliliğini artırmak amacıyla yapısal

değişiklikler, teknolojik gelişmelerin geminin yapısına uygulanması ve mevcut operasyonel koşulların iyileştirilmesi ile mümkün olabilir. Belirli harcamalar gerektiren gemi için en uygun formun belirlenmesi, geminin yaşı ve hizmet ömrü ile yakından ilgilidir. Ancak yüksek maliyet olmadan yapılabilen enerji verimliliği uygulamaları ile yakıt maliyetlerini düşürmek mümkündür.

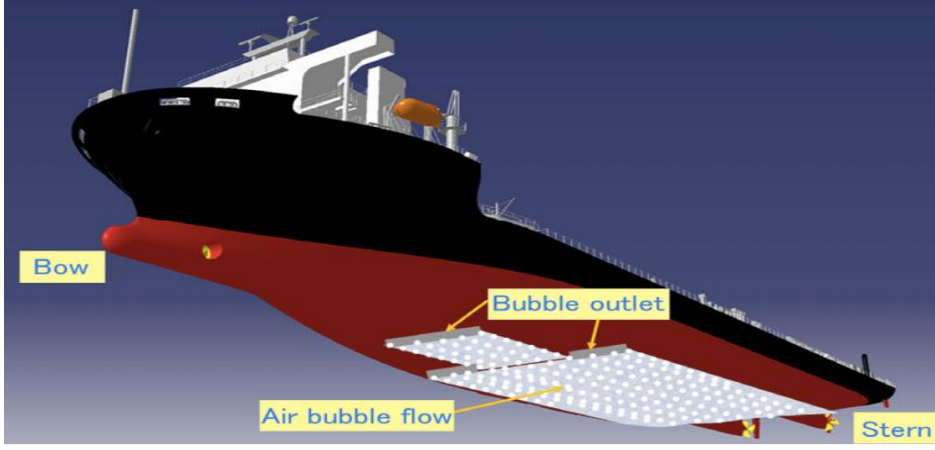
2.1 Enerji Verimliliği İyileştirme Yöntemleri

Gemilerdeki enerji kazanımlarını etkileyen enerji verimliliği uygulamaları, toplam direncin azaltılması, tahrik verimliliğinin artırılması, makine dairesindeki motorların verimliliğinin artırılması ve navigasyon verimliliğinin artırılması gibi uygulanacak başlıca faktörlerdir.

Gemi ve filo işletme verimliliği çok yönlüdür ve birbirine bağlıdır. Bu nedenle, verimlilik yönetimi, filonun tüm operasyonunu kapsayan entegre bir çözümü içermelidir. Genel verimliliği iyileştirmenin başarısını veya başarısızlığını belirtmek için tek bir metrik kullanılamaz. Bunun yerine, birden çok metriğin karşılaştırmalı bir analizi gerekir. Ayrıca, uygulanabilir olması için, verimlilik yönetiminin işletme önceliklerini, hedeflerini ve kısıtlamalarını barındırması gerekir. Yakıttan tasarruf etme ve karbon ayak izini azaltma teknolojisi, yalnızca kritik görev hedeflerine de ulaşıldığında yararlıdır. Çoğu gemi, artan geçiş süresi pahasına da olsa, sadece yavaşlayarak yakıt tüketimini azaltabilir. Hızlı geçiş süreleri veya güvenilir tam zamanında varış gerektiren taktik hedefler, yakıt tüketimindeki ilişkili artışı haklı gösterebilir. Bu hedefleri gerçekleştiren gemi operatörleri, örneğin, dağıtım optimizasyonu, akıllı yolculuk planlaması ve gemide enerji yönetimi gibi enerji verimliliğini artırmak için yavaş buharlama dışında yollar aramalıdır. İşletme verimliliğiyle ilişkili diğer önemli ölçümler arasında mürettebat ve kargonun sağlığı ve güvenliği, gemi yaşam döngüsü maliyetleri ve limanda planlanmamış zaman yer almaktadır. Birden fazla verimlilik yönetimi aracının stratejik olarak uygulanması sayesinde, bu maliyetler gemi, filo ve operatörün operasyonel hedeflerini ve kısıtlamalarını desteklerken korunabilir veya azaltılabilir. Gemi ve filo işletim verimliliğinin tüm bu yönleri, objektif kıyaslama metodolojileri kullanılarak önceki taban çizgileri ile nicel olarak karşılaştırılabilir.

2.1.1 Gemi tasarımı

Gemi tasarım uygulamaları, yakıt tasarrufu yapılacak geminin türüne göre inşaat aşamasında gemilerin boyut, gövde, tonaj ve itiş bölümlerini tasarlama yöntemlerini içerir. Geminin direncini azaltmayı amaçlayan bu uygulamalar, gemilerden kaynaklanan gaz emisyonlarının azaltılmasında önemli bir etkiye sahiptir. Geminin su üzerinde hareket edebilmesi için pervaneye iletilen direncin ve gemiyi etkileyen dirençlerin aşılması gerekir. Geminin direnci, geminin istenen hızda ve belirtilen güçte hareket etme kabiliyetini doğrudan etkiler. Hareket eden gemiye toplam direnç, geminin su direncine karşı toplam direncine eşittir. Su altındaki dirençler, sürtünme direnci ve artık dirençtir. Suyu dayanıklılık hava direncidir. Hava şartlarına karşı direnç, güverteye yüklenen konteynerler nedeniyle konteynerlerin özellikle konteyner gemileri üzerindeki etkisini artırmaktadır. Gemi makinelerinin enerji ekonomisini etkileyen en önemli faktör su altındaki dirençtir. Geminin çalışması sırasında tekne üzerindeki boya tabakası zamanla zarar görür. Bu, geminin gövdesinde erozyona neden olur. Korumasını kaybeden yüzeylerde pürüzlülük artar. Gemi tasarım aşamasında, gemi düşük bir dalga oluşturduğunda geminin en-boy oranı büyür. Gemi hızı düşükse direnç katsayısı artar. Bu nedenle, gemilerin tam boyunu %10-15 artırmak, geminin güç ihtiyacını yaklaşık % 9-10 azaltır[23]. Ayrıca gemi inşaat aşamasında hafif malzemelerin kullanılması toplam geminin ağırlığını azaltır. Çelik yerine alüminyum gibi hafif malzemeler kullanmak, enerji verimliliğini artırmak için başka bir çözümdür. Gemi yapımında çelik malzemenin azalması, itme gücünde azalmaya neden olur. Balast kullanımının azaltılması, geminin boşta iken daha hafif bir yapı oluşturmaya ve geminin suya karşı daha az direnç göstermesine izin verir. Ayrıca balast pompalarının kullanılması da elektrik tüketimini artırarak jeneratördeki yakıt tüketimini artırmaktadır. Bu, emisyon salınımının etkisini artırır. Geminin en kullanışlı kış tasarımı, sert dalgaların etkisini azaltmak ve pervaneye akışı iyileştirmek için yapılmıştır. Deniz suyunun viskoz bir direnci vardır. Bu direnç , gemi üzerine etki eden direncin büyük bir bölümünü oluşturur . Geminin hızı arttıkça direnç de artar. Bu sürtünme direncini azaltmak için hava kabarcığı yağlama tekniği kullanılır.



Şekil 2.1: Hava kabarcığı yağlama sistemi [24].

Gemi içerisindeki tüm bölümler, esneme, titreşim, yoğun paslanma etkileri, sıcaklık değişimleri ve dalga etkileri gibi geminin etkilerine karşı yeterli ve gemi kurallarına uygun olmalıdır. Farklı kuvvetler, basınçlar ve sıcaklıklar için tasarlanmış sistem veya ekipman elemanları arasındaki mevcut bağlantılar söz konusu olduğunda, daha düşük değerler için tasarlanmış sistem veya donanım elemanı güvenlik elemanları ile aşırı gerilmelerden korunmalıdır. Herhangi bir hasarı önlemek için, sistemler aşırı basınç ve sıcaklık veya taşmaya karşı koruyan ekipmanlarla donatılmalıdır. Bu nedenle boru devrelerinde basıncı önlemek için basınç düşürücü veya emniyet valfleri kullanılmalıdır. Taşma sisteminin basıncı azaltmadaki başarısızlığı, bu vanaların devreye girmesine neden olur. Gemi boyunca uzanan uzun borular, geminin seyri sırasında dalgaların gemi üzerindeki etkisinden dolayı aşağı ve yukarı yönde bükülme kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu kuvvetlerin borulara zarar vermemesini sağlamak için dengeleme ara bağlantı elemanları (dengeleyiciler) kullanılmalıdır.

2.1.2 Sevk ve pervane sistemleri

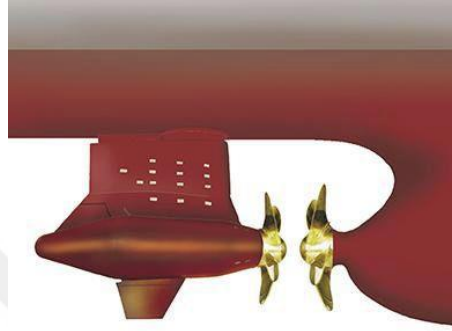
Gemi sevkinde en yaygın kullanılan sistem pervanedir. Pervane, diğer tahrik sistemlerinden daha yüksek verimlilikle çalışır ve karmaşık teknolojiler gerektirmez. Tipik bir pervane sisteminde dağıtım verimliliği % 70'e kadar çıkabilir [25]. Pervane , şaft ile makineden gelen torku aksel bir itme kuvvetine dönüştürür. Bir pervanenin temel hidrodinamik özellikleri çap (D), hız (N), adım (P), yüzey alanı (A) ve açık su verimidir (no). Pervaneler genellikle alüminyum, dökme demir, paslanmaz çelik veya bronz alaşımlarından tek parça halinde dökülür. Ticari gemilerde en çok kullanılanlar metal, bakır, alüminyum ve nikel içeren bronz alaşımlarıdır. Tek bir pervane,

maksimum toplam besleme verimliliği için en uygundur. Çift pervane, sınırlı su emilimi veya yüksek manevra kabiliyeti veya aşırı kuvvet gerektiğinde tercih edilir. Çift pervane sistemi, tek pervaneden daha ağır ve daha pahalıdır. Kanat sayısı genellikle 3, 4 veya 5'tir. Kanat sayısının az olması ile verimlilik artar, ancak kanat sayısının artmasıyla pervane çapının küçültülmesi mümkündür.

Optimum pervane çapı, belirli bir güç değeri için pervane shaft hızı ve damar hızına göre hesaplanır. Güç artışı pervane çapını artırır ve pervane hızının artmasıyla azalır. Kanat sayısının ve kanat alanı oranının artması, pervane çapının küçülmesine neden olur. Kanat alanının boyutu pervane yüküne ve gemi hızına bağlıdır. Çok küçük kanat alanına sahip pervanelerde kavitasyon problemleri olabilir. Öte yandan çok geniş kanat alanları sürtünme kayıplarına neden olur. Kullanılacak pervane tipi gemi tipi, gemi hızı, geminin tekne şekli ve çalışma alanına bağlıdır. Sevk yönünden gemi kış formunun tek pervaneli gemilerde tasarlanması zorunludur. Bununla birlikte, çift pervaneli teknelerde durum böyle olmadığından, kış formu minimum direnç için tasarlanacaktır [23].

Pervane özelliklerinin belirlenmesinde maksimum verimlilik esastır, ancak kavitasyon ve titreşim sorunları dikkate alınmalıdır. Örneğin kanat sayısının az olması verimi artırır; ancak titreşim yaratma olasılığı artar. Pervane çapı arttıkça artan verimlilik, ancak tekne ile pervane arasındaki açıklıklar azaldıkça titreşim olasılığını artırır. Pervaneler tekneye mümkün olduğunca yakın konumlandırılmalı ve en yoğun itme alanında çalışmalıdır. İtme azalması, çarktaki negatif basınçtan kaynaklanır ve tekne ile pervane arasındaki mesafeyle azalır. Pervane çapına ulaşıldığında bu mesafe ihmal edilebilir bir düzeye iner, ancak bu genellikle diğer problemler nedeniyle elde edilemez. Pervane çapı olabildiğince büyük olmalıdır, ancak titreşimi önlemek için tekne ile pervane arasında belirli açıklıklar bırakılmalıdır. Pervanelerin çoğu sabit bir adım değerine sahiptir ve belirli bir işlemde optimum verime sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ancak bazı gemi türlerinde çalışma koşulları değişiklik gösterir ve optimum bir pervane tasarlamak zordur. Örneğin balıkçı tekneleri ve römorkörlerde serbest hareket ve çekme (ağlar, gemiler vb.) durumunda pervanenin çalışma koşulları çok farklıdır.

Ters çevrilebilir pervane sistemleri, enerji verimliliği açısından tek pervaneli sistemlere göre daha iyi sonuçlar sunar. Tersine çevrilebilir pervane çifti, ikiz eşmerkezli yönün tersi yönde dönen bir şafta monte edilebilir ve aynı zamanda geminin kıç tarafında dönmesini sağlayan bir itici sistem olarak ana şafta bağlanabilir. Bu sistemler, tahrik sistemleri olarak kullanıldığında yüksek enerji verimli tasarımlardır. Tersine çevrilebilir pervane çiftlerinin kullanılması, gemiler için gerekli güç ihtiyacını yaklaşık %10-15 oranında azaltır [23].



Şekil 2.2: Karşı yöne dönen pervane [26]

Öte yandan nozul, pervane veriminin artmasına yardımcı olur. Nozul, pervane kanatları suda dönerken her kanadın arkasında düşük bir basınç alanı oluşturur ve bu basınç farkı tekneyi ileri doğru iten kuvveti oluşturur. Ancak her kanat sonunda yüksek basınçla kanadın alçak basınç tarafına kaçan su nedeniyle kayıplar meydana gelir. Bu kayıplar, nozul iç yüzeyi ile pervane kanadı ucu arasındaki akım sınırlandırılarak önlenir. Radyal yöndeki kayıplar bu şekilde önlenir. Pervane verimliliğini artırmanın yanı sıra, nozul, uçak kanadı tarafından üretilen kaldırma kuvvetine benzer bir eksenel itme kuvveti sağlar. Pervane etrafındaki bir noktada birleşen su akışı, nozulun iç yüzeyinde negatif bir basınç ve dış yüzeyde pozitif bir basınç oluşturur. Memenin dış yüzeyi, net bir itme sağlamak için bu kuvvetlerin dengelenmesine yardımcı olur.

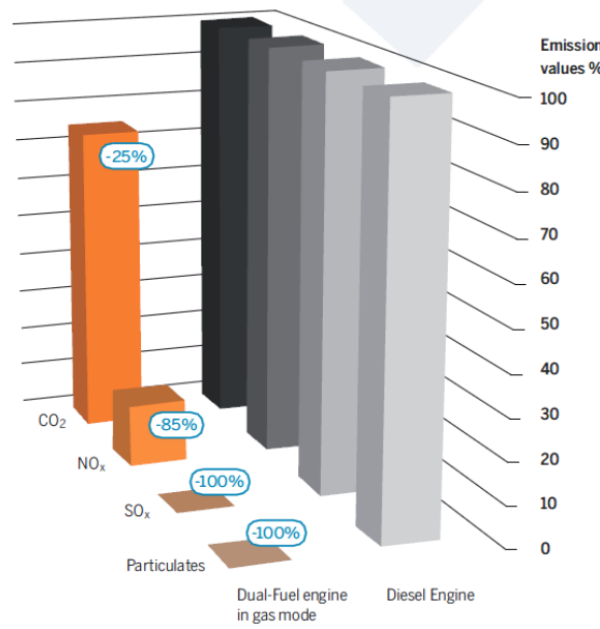
2.1.3 Makine teknolojisi

Hibrit tahrik sistemleri; klasik mekanik sistem ve elektrikli tahrik sisteminin kombinasyonundan meydana gelir. Özellikle, yüksek hız gerektiğinde, ana tahrik üniteleri, yani dizel motorlar veya gaz türbinleri, tahrik şaftlarını doğrudan tahrik eder. Ancak daha düşük güç gerektiren operasyonlarda gemideki jeneratörlerin ürettiği

elektrik, şaftları ana sevk motorları vasıtasıyla tahrik etmektedir. Elektrikli tahrik sistemleri istenirse yüksek hız, elektronik sistemler gibi geniş bir yelpazede esnek güç kullanımı sağlayabilir. Geleneksel tahrik dağıtım sistemi konfigürasyonlarında, dizel motorlar veya gaz türbinleri, genellikle şaftları doğrudan tahrik etmeleri gerektiğinden hem şaft üzerine hem de şaft hattına monte edilmelidir. Ancak bu şekilde bir sınırlama yoktur çünkü dizel makineler yalnızca elektrikle çalışan bir sistemde elektrik üretecek jeneratörleri çalıştıracaktır. Bu durum geminin tasarım aşamasında büyük kolaylık sağlamaktadır.

Hibrit yardımcı güç sistemi yalnızca yakıttan değil, aynı zamanda CO₂ emisyonlarından da tasarruf sağlar. Tam kapasiteli bir gemi makinesi yerine daha küçük bir elektrikli hibrit sürücüye sahip bir jeneratörün kullanılması, önemli bir yakıt tasarrufu sistemidir. Diğer avantajı ise geminin sessiz olması ve titreşimlerin azalmasıdır. Makine dairesinden köprü üstüne ses desibelinde önemli düşüşler meydana gelir. Örneğin, M/S Nodarias gemisinde kullanılan hibrit yardımcı güç üretimi, ana makine bakım maliyetini %60 oranında, yakıt tüketimini %15 azaltmaktadır ve köprü üstünde 60 dB'lik sesi 42 dB'ye düşürmektedir. Bu teknoloji ile ulaşımda hibridizasyonun enerji verimliliğinde etkili olduğu kanıtlanmıştır [27].

LNG (sıvılaştırılmış doğal gaz), metan esaslı yanıcı bir gaz karışımıdır. LNG, HFO, MDO ve MGO'ya göre her zaman daha ucuzdur. Uygulama ve bakım işlemleri diğer sistemlere göre daha kolaydır. Yakıt olarak LNG kullanan gemilerin emisyonları, diğer yakıt türlerini kullanan gemilere göre daha düşüktür. Aynı zamanda yağlama yağı kullanımı azalır. LNG, IFO'dan daha az enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu, yakıt hacminin 2 katını gerektirir. Aynı koşullar altında, LNG'nin yakıt olarak kullanımı, gaz türbinleri ve dört zamanlı dizel motorlara kıyasla NO_x miktarı kadar azalmaktadır. Gemilerde kullanılan yakıtlardan daha az karbon içeren LNG yakıtı, CO₂ emisyonlarında azalmaya neden olur. Ayrıca gemi tasarım uygulamalarında LNG düşük hacimli bir gaz olduğu için tüm enerji ihtiyacını tek bir merkezden karşılama imkanı sunmaktadır. Düşük sıcaklıkta bile yüksek yakıt performansı sağlar. Alternatif yakıtlara göre avantajlı bir fiyatı vardır. Temmuz 2011 tarihli IMO MEPC62'de benimsenen enerji verimliliği gereklilikleri ve sera gazı emisyon kontrolü benimsendiğinden, çift yakıtlı ve tek yakıtlı makinelerin CO₂ emisyonlarını azaltmak için yakıt olarak LNG tercih edilmektedir [28].

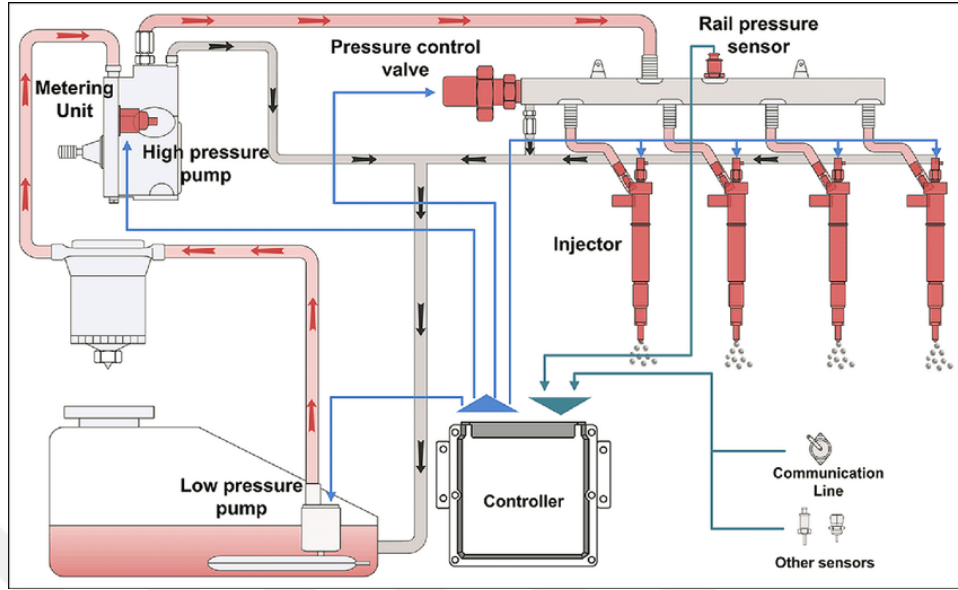


Şekil 2.3 : LNG modu motorunun emisyon miktar oranı [29].

Bir geminin enerji haritası incelendiğinde enerji kayıplarının önemli bir kısmının gemi ana makinelerinden kaynaklı olduğu görülmektedir. İki zamanlı bir gemi dizel makinesi için ana kayıplar yağlama yağı, egzoz gazı, soğutma suyu ve temizleyici havadır. Bu kaynaklarda atık ısı enerjisinin geri kazanılması, makinenin termal verimini artırır ve emisyonların işletme maliyetlerinin azaltılmasında büyük fayda sağlar. MAN-Diesel & Turbo, Ana motor gücünün %11'inin, buhar ve egzoz türbinleri tarafından üretilen egzoz ve egzoz havasını kullanan bir atık ısı geri kazanım sistemi tarafından üretilebileceğini bildirmiştir[26]. Atık ısı geri kazanım tekniği, dizel makinelerden çıkan egzoz gazlarının enerjisinden elektrik enerjisi elde etme yöntemidir.

Common Rail Sistemi, düşük CO₂ ve SO₂ emisyonları elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Sistem, silindirdeki yanmayı kontrol ederek çalışma sırasında her yükte mümkün olan en düşük yakıt tüketimini sağlayacak şekilde kontrol edilir. Bu uygulama manevra ve diğer yüklerde verimli çalışma sağlar. Bu sistem, yakıt tüketimi, egzoz gazı emisyonu, işletim sistemi ve gürültü üretimi açısından bugüne kadar kullanılan aynı tip sistemlere göre açıkça üstündür. Bu sistemin diğer avantajları; yeterli yakıt basıncı, daha yüksek yakıt basıncı ve sürekli hazırlıkta daha iyi atomizasyon sağlamasıdır. Ayrıca yakıt yanma odasına kademeli olarak püskürtüldüğü

için gürültü azaltılır. Common rail sistemi, tam bir elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilir ve bir hata durumunda, hata kendi kendine teşhis edilebilir.



Şekil 2.4 : Common rail enjeksiyon sisteminin yapısı [30]

2.1.4 Çalıştırma ve bakım tutumu

Operasyonel bakım tutumları genellikle yakıt ve katkı maddelerinin neden olduğu kurumların temizliği, hava koşullarına göre geliştirilmiş navigasyon planları, optimize edilmiş gemi trimi, gövde ve pervane temizliği, navigasyon performans ölçümleri ve raporlaması, çalışma süreleri, gemi hız azaltma, tekne yüzey kaplaması ile ilgilidir. Operasyonel uygulamalar genellikle düşük yatırım maliyetleri ve orta düzeyde işletme maliyetleri gerektiren ve enerji verimliliğine önemli ölçüde katkıda bulunan yöntemlerdir. Örneğin, turboşarjları ve egzoz kazanlarını temiz tutmak, ana sistemlerin verimliliğini artırır [31]. Gemilerin liman sahalarında hızlı yanaşma ve kalkış operasyonları yapmaları, açık denizde zaman içerisinde hızlarını düşürme imkanı sağlamaktadır. Bu, gemiler için yakıt tüketimi açısından bir avantaj sağlar. Kirliliği ve pürüzlü bir yüzeye kıyasla, cilalı bir pervane yüzeyi enerji verimliliği sağlar ve yakıt tüketimini azaltır.

Gemi operasyonlarında enerji verimliliğini artırmanın diğer yöntemleri, gemi makine ve ekipmanlarının yönetmeliklere uygun olarak çalıştırılmasıdır. Mekanik ve elektrikli sistemlerin optimize edilmiş çalışması yakıt tüketimini azaltır. Ana makine üreticisinin tavsiyelerindeki devirlere uyum, etkili bir yakıt tasarrufu uygulamasıdır. Makine,

düzenli bakım ve zamanında onarımlarla verimli bir şekilde kullanılabilir. Makine performans parametrelerini gerçek zamanlı olarak algılayan ve kontrol eden, ayrıca bakım davranışı sorunlarından kaynaklanan sorunları teşhis edip çözen sistemler de kullanılmalıdır. Yardımcı makinelerin performans testleri, bakım tutum sisteminde belirtilen aralıkta yapılmalıdır. Enerji verimliliğini sağlamak için optimum miktarda yakıtın yanı sıra uygun yakıt türünün sipariş edilmesi de önemlidir. Akaryakıt yönetimi kapsamındaki çalışmalar, denizcilik şirketlerinin filo maliyetleri, toplam CO₂ emisyonları ve gemilerin enerji performanslarının karşılaştırılmasına da olanak sağlamaktadır. Gereksiz enerji kullanımının önlenmesi, düşük yüklerde jeneratörlerin paralel çalışması, buhar santralinin optimizasyonu, seperatör optimizasyonu, ısı optimizasyonu, havalandırma ve iklimlendirme işlemleri, ekonomizer temizliği ve diğer ısı eşanjörleri enerji verimliliğini artıran diğer konulardır.

Gemilerde kullanılan pompalar operasyon sırasında çok fazla enerji tüketir. Özellikle ana soğutma suyu devrelerinde çok sayıda pompa bulunmaktadır. Soğutma sırasında yakıttan üretilen ısı dönüştürme olmaksızın dışarı atılır. Bu kayıp enerji ile ısı verim azalır. Pompaların değişken hız ve adımlarla çalışması, çalışma ihtiyacına göre uyarlanmalıdır. Buna ek olarak, otomasyon kontrollü sistemlerin kullanımı yakıt tüketimini ve CO₂ emisyonlarını azaltma yöntemidir. Bu sistemdeki verilere dayalı olarak gemi sistemlerinde verimlilik ve performans açısından gelişmiş izleme ve kontrol sağlanmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanması ile güç üretim sistemleri, herhangi bir operasyonel durumda pervane üzerindeki itme kuvveti için gereken optimum güç dağılımını düzenler.

2.2 Gemi Tiplerine Göre Enerji Verimliliği Analizi

Bu çalışmada, gemilerin enerji verimliliğini artırmak için uygulanabilir yöntemler ve bu yöntemlerin CO₂ gaz emisyonlarını azaltıcı etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda uygulanabilir her yöntemin her gemi tipine uygun olmadığı tespit edilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları gemilere ek donanım olarak uygulanmaktadır. Bazı gemilerde, enerji verimliliğini sağlamak için bazı yapısal değişiklikler gerekmektedir. Bu bağlamda bu tür gemilere uygulanacak yöntemler için bazı yatırım maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Ayrıca her gemi tipine uygulanan bir yöntemin yakıt tüketimi ve CO₂ gazı emisyonları açısından aynı etkiye sahip olmadığı

belirlenmiştir. Başvuru için seçilecek yöntemlerin belirlenmesinde geminin yaşı ve gemi tipi dikkate alınmalıdır. **Çizelge 2.1**'de verilen CO₂ azaltma değerleri gemi tipine göre düzenlenmiştir. Örneğin; Gemilerin enerji verimliliğini artırmaya yönelik işletme ve bakım tutum yöntemleri için gemilerde yapılan tekne yüzey temizliğinin tankerlerde %3 yakıt tasarrufu sağladığı ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarını %3 azalttığı görülmektedir. Ancak bu oran konteyner tipi gemilerde %2, Ro-Ro'da %2 ve feribotlarda %2'dir. Tabloda karşılaştırılan yöntemler incelendiğinde; rüzgar kuvvetinin bir rotor vasıtasıyla geminin gücü üzerindeki etkilerinin diğer yöntemlere göre enerji verimliliği ve CO₂ emisyonları açısından en faydalı yöntem olduğu görülmektedir. Ancak bu yöntem sadece tankerler ve Ro-Ro tipi gemiler için geçerlidir. Ayrıca gemi yelken ve paraşüt uygulamalarında rüzgar enerjisinin kullanımı her gemi tipine uygulanabilmekte ve bu yöntem enerji verimliliğine %20 oranında etki etmektedir. Gemi hizalaması en uygun yöntem olarak kabul edilir ve herhangi bir yatırım maliyeti gerektirmez. Günlük seyir hızının saatte yaklaşık 3,0 knot azaltılması CO₂ emisyonlarını %23 oranında azaltabilir. Ancak geminin hızının azaltılması, yüklerin taşınması sırasında sürüş sürelerini artıracak ve bu durumda enerji maliyetleri artacak ve seyahat maliyeti artacaktır. Bu nedenle, uygun seyir planlarının ve güç yönetim sistemleri uygulamalarının geliştirilmesinin bazı maliyetleri düşürdüğü görülmektedir. Operasyonel uygulamaların yanı sıra denizcilik şirketlerinde insan kaynakları departmanı ve firmanın gemilerinde yakıt tasarrufuna dayalı ödül ve prim sistemi geliştirilecek ve enerji verimliliği kültürü oluşturulacaktır. Bu basit sistemin gelişmesiyle birlikte şirketin filosundaki birimler arasında bir rekabet olacaktır. Mürettebat için iyi bir eğitim ve değerlendirme yönetim sisteminin oluşturulmasıyla enerji verimliliği artacak ve yakıt tasarrufu sağlanacaktır [23].

Çizelge 2.1: Gemi türlerine göre enerji verimliliği analizi [23].

Uygulanabilir Yöntem	Tanker	Konteyner	Ro-Ro	Feribot	CO ₂ azaltma oranı (%)
Gemi boyutu optimizasyonu	X	X	X	X	4-10

Balast optimizasyonu	X	X	X	X	7-10
Hafif gemiler yapımı	X	X	X	X	5-9
Gemi ana boyutlarının optimizasyonu	X	X	X	X	9-10
Trim önleme kanatları			X	X	4
Geminin kıçının uzatılması		X	X	X	3-7
Şaft hattının ayarlanması		X	X	X	2
Pervane optimizasyonu	X	X	X	X	5
Gövde altı hava kabarcığı yöntemi	X	X	X	X	3,5-15
Kıç pervanesi tasarımı			X	X	8-10
CRP sistemi	X	X	X	X	10-15
Pervane-gövde etkileşimi	X	X	X	X	4
Pervane-dümen kombinasyonları	X	X	X		4
Geliştirilmiş pervane kanatları	X	X	X	X	2
Pervane kanatları optimizasyonu	X	X			4

Pervane memesi	X			X	5
Sabit ve değişken hızlı çalışma		X	X	X	5
Rüzgar enerjisi	X	X	X	X	8.5-21
Rüzgar gücü	X		X		30
Pervane verimlilik yöntemleri	X	X	X	X	2-4
Hibrit sistemler	X	X	X	X	30
Dizel-elektrikli tahrik			X	X	20-30
Elektrik devrelerindeki kayıpların azaltılması			X	X	2
Değişken hızlı elektrik üretimi				X	5-10
LNG tüketimi	X	X	X	X	4-20
Atık ısı geri kazanımı	X	X	X	X	10-20
Ortakraylısistem	X	X	X	X	1
Güç yönetimi				X	5-10
Güneş enerjisi	X		X	X	4

Soğutma suyu pompaları ve hız control uygulamaları	X	X	X	X	1
Otomasyon sistemleri	X	X	X	X	5-10
Gelişmiş güç yönetimi				X	5
Yakıt ve katkı temizliği	X	X	X	X	2
Limanlarda operasyon süresi kısaltılması	X	X	X	X	10
Pervane yüzey temizliği	X	X	X	X	10
Tekne yüzey temizliği	X	X	X	X	3-9
Makine işlemlerinde yük optimizasyonu	X	X	X	X	4
Hız düşürme	X	X	X	X	23
Navigasyon planlaması	X	X	X	X	10
Gemi trimi optimizasyonu	X	X	X	X	5

Oto pilot optimizasyonu	X	X	X	X	4
Enerji verimliliği bilinci	X	X	X	X	10
Şartlara dayalı bakım	X	X	X	X	5
Tekne temizliği	X	X	X	X	2-3

Sonuç olarak yapılan çalışmalarda; geminin boyutunun artırılması, balastın küçültülmesi, hafif gemilerin inşası, geminin ana boyutlarının optimizasyonu, pervane boşluklarının direncinin azaltılması, gövde altının hava kabarcıkları ile doldurulması, CRP (ters dönen pervane) sistemi, pervane-gövde etkileşimi, geliştirilmiş pervane kanatları, rüzgar enerjisi, pervane verimlilik yöntemleri, hibrit sistemler, LNG yakıt kullanımı, atık ısı enerjisi dönüşümü, Common Rail yakıt sistemi, soğutma suyu pompaları ve hız kontrol uygulamaları, otomasyon sistemleri, yakıt ve katkı maddeleri temizliği, limanlarda çalışma sürelerinin azaltılması, pervane yüzeyinin temizlenmesi ve cilalanması, tekne yüzey kaplaması, makine operasyonlarında yük kontrolü, hız azaltma (3 knot), seyir planlaması, gemi trim optimizasyonu, otomatik pilot ayarları, enerji verimliliği bilinci, koşul bazlı bakım tekne altı temizleme tankı uygulamalarına yönelik tutum ve uygulamalar tüm tanker, konteyner, Ro-Ro ve feribot gemilerinde emisyon azaltma yöntemleri olmuştur.

2.3 Denizcilikte Enerji Verimliliği Terimleri

1997 yılında Kyoto/Japonya'da düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nde (UNFCCC, 1998) imzalanan ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC, 1998) sonucu kabul edilen "Kyoto Protokolü", sınırlı sera gazı emisyonlarını azaltılmayı da amaçlamaktadır [31]. Kyoto Protokolü'nde gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması, Protokol'ün genel hedeflerinden ayrı olarak değerlendirilmektedir ve gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılması veya sınırlandırılması görevi

Protokol Taraflarına ve Uluslararası Denizcilik Örgütü'ne (IMO) verilmiştir. IMO, SO_x ve NO_x emisyonlarıyla başa çıkmak için MARPOL Ek VI'yı oluşturmuştur. 2008 yılında IMO, Baltık Denizi, Kuzey Denizi ve İngiliz Kanalı'nı gemilerden kaynaklanan SO_x emisyonlarını sınırlamak için Kükürt Emisyon Kontrol Alanlarında (SECA) olarak tanımlamıştır. 2010 yılında IMO, NO_x emisyonlarını azaltmak için Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada kıyılarının tamamını Emisyon Kontrol Alanı (ECA) olarak belirlemiştir [32].

2.3.1 Enerji verimliliği tasarım indeksi (EEDI)

400 gros ton kapasiteli gemiler ve yeni gemiler haricinde enerji verimliliği tasarım indeksi (EEDI), hibrit sevk sistemi, dizel-elektrik ve türbin, CO₂ emisyon performansını ölçmek için teorik olarak geliştirilmiş ve gemi tasarımı ve makine performans verilerinden hesaplanmıştır. Bu değer, aşağıdaki istatistiksel çalışmalar sonucunda IMO tarafından enerji verimliliği tasarım indeksi (EEDI) sağlamalıdır. Bu endeksin uygulanmasının nedeni, geminin tasarım aşamasında geminin enerji verimliliğini arttıracak daha yenilikçi ve teknolojik gelişmeleri teşvik etmektir. EEDI, tablo 2.2'de gösterilen tipteki gemiler için geçerlidir.

Çizelge 2.2: EEDI uygulamalı gemi tipleri [33]

Gemi Tipi	Özellik
Yolcu Gemileri	SOLAS Bölüm 1 Kural 2'de tanımlandığı gibi 12'den fazla yolcu gemisi
Kuru yük gemileri	Tek güverteli kargo mahallerinin üzerinde tanklara sahip olarak inşa edilen gemiler, genellikle SOLAS Bölüm 9 Kural 1'de tanımlandığı gibi dökme yük taşırlar, örneğin cevher gemileri.

Gaz Tankerleri	SOLAS Bölüm II-1 Düz. 3'te tanımlanan gaz tankları
Tanker	MARPOL Ek 1, Kural 1'de tanımlanan petrol tankerleri veya Ek II Yönetmelik 1'de tanımlanan kimyasal tankerler
Konteynır gemileri	Depolarında ve güvertede konteyner taşımak için tasarlanmış gemiler
Ro-Ro Kargo Gemileri veya Gemi Taşıyıcıları	Boş arabaları ve kamyonları taşımak için tasarlanmış çok katlı Ro-Ro kargo gemileri
Ro-Ro Kargo Gemileri veya Toplu Taşıyıcılar	Metre başına 4 Ton / m'den az taşıyacak şekilde tasarlanmış taşıma birimleri taşıyan gemiler
Ro-Ro Kargo Gemileri veya Toplu Taşıyıcılar	Metre başına 4 Ton / m ve daha fazla araç taşıyacak şekilde tasarlanmış taşıma üniteleri
Genel Kargo Gemileri	Çoğunlukla genel kargo için çok katlı veya tek güverte için tasarlanmış gemiler.
Ro-Ro Yolcu Gemileri	SOLAS Kısım II-1, Kısım A, Kural 2.23'te tanımlanan yolcu gemileri

EEDI iyileştirme teknikleri olarak daha az dirençli gövdeler ve iyileştirilmiş dümen biçimleri, daha verimli kıç güverte, pervane ve dümen düzenlemeleri, motorlarda daha düşük enerji tüketimi, yakıt olarak petrolden doğal gaza (LNG) dönüş, az enerji tüketen çeşitli teknolojiler (güverte boyası, boru yalıtımı, aydınlatma, klima vb.), minimum balast konfigürasyonları, hibrit gemiler (rüzgar enerjisi, güneş panelleri vb.) gemide kullanılmalıdır.

EEDI, deniz taşımacılığının çevreye etkisini ve deniz taşımacılığının topluma olan faydasını ifade eder. EEDI formülü, enerji geri kazanımı, düşük karbonlu yakıt kullanımı, gemilerin dalgalar halinde performansı ve buzun güçlendirilmesi ihtiyacı dahil olmak üzere özel tasarım özelliklerini ve ihtiyaçlarını dikkate alır.

$$EEDI = \frac{\text{çevreye etkisi}}{\text{topluma faydası}} = \frac{\text{Güç} \cdot \text{SCF} \cdot \text{FC}}{\text{Deadweight} \cdot \text{hız}} \quad (6)$$

EEDI formülü;

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SCF_{AE})}{f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot \text{Kapasite} \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{((\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}) C_{FAE} \cdot SCF_{AE})}{f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot \text{Kapasite} \cdot V_{ref} \cdot f_w} - \frac{1}{f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot \text{Kapasite} \cdot V_{ref} \cdot f_w} \cdot (\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}) \quad (7)$$

Çizelge 2.3: EEDI formülleri parametre açıklamaları [34].

Parametre	Açıklama
C_F	Yakıt tüketimi ile CO ₂ emisyonu arasında boyutsuz dönüşüm faktörü
V_{REF}	Saatte deniz mili cinsinden gemi hızı
Kapasite	MEPC 245'in 2.3 ve 2.4'lerinde belirtildiği gibi Ağırlık'ın bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır (66)
P_{ME}	Ana motor MCR'nin kw cinsinden %75'i
P_{AE}	Yardımcı Makine Gücü
P_{TI}	Şaft motorunun nominal güç tüketiminin %75'i
P_{EFF}	%75 ana makine gücünde tahrik için yenilikçi mekanik enerji verimli teknolojinin çıktısı
P_{AEFF}	Yenilikçi elektrik enerjisi verimli teknoloji sayesinde yardımcı güç azaltımı

SCF	G / kWh cinsinden Sertifikalı Spesifik Yakıt Tüketimi
f_j	Gemiye özel tasarım unsurlarını hesaba katan düzeltme faktörü.
f_w	Dalga yüksekliği, dalga frekansı ve rüzgar hızının temsili deniz koşullarında hız düşüşünü gösteren boyutsal olmayan katsayı
f_i	Kapasite üzerindeki herhangi bir teknik / yasal sınırlama için kapasite faktörü
f_c	Kübik kapasite düzeltme faktörü (kimyasal tankerler ve gaz taşıyıcılar için)
f_1	Geminin ölü ağırlık kaybını telafi etmek için vinçler ve diğer kargo ile ilgili donanımlarla donatılmış genel kargo gemileri faktörü
f_{eff}	Yenilikçi enerji verimliliği teknolojisinin kullanılabilirlik faktörü

2.3.2 Enerji verimliliği işletim göstergesi (EEOI)

IMO, gemi operatörlerinin yakıt tüketimi ve yük açısından verimliliklerini izlemelerine yardımcı olmak için Enerji Verimliliği Operasyonel Göstergesi (EEOI) adlı yeni bir gösterge oluşturmuştur. EEOI, operasyonel performans izlemek için SEEMP ile isteğe bağlı kullanıma dayalı bir kılavuздur. Bir geminin enerji verimliliği, tercihen uluslararası bir standarda dayalı olarak sayısal olarak izlenmelidir. IMO tarafından geliştirilen EEOI, bir geminin ve/veya bir işletme gemisinin enerji verimliliğinin nicel bir göstergesini öğrenmek için uluslararası olarak kurulmuş ana izleme araçlarından biridir [35].

EEOI'nin IMO (MEPC.1/Circ.684) tarafından geliştirilen kılavuza göre hesaplanması ve gerekirse belirli bir gemiye veya ticari operasyona göre ayarlanması önerilir. Bu kılavuz, yük birimi başına emilen CO₂ şeklinde çalışan bir geminin enerji verimliliğine

ilişkin gösterge kavramını ifade ederek verimliliği ifade eder. Kılavuz, şirketler tarafından hedef olarak kullanılabilecek bir yaklaşım sunmaktadır.

EEOI'yi kurmak için aşağıdaki adımlar atılmalıdır.

- EEOI için hesaplama süresinin belirlenmesi,
- Toplanacak veriler için veri kaynaklarının belirlenmesi,
- Veri toplama,
- Verilerin uygun formata dönüştürülmesi ve
- EEOI'nin hesaplanması

Her şirket kendi üretkenlik değerini belirlemekte ve kendi standartlarını belirlemekte özgürdür. IMO, ağır fuel oil (HFO) ve deniz dizel yakıtı (MDO) tüketimi ile yük ve seyir mesafesi arasında bir bağlantı kurmuştur. IMO'nun temel formülü aşağıdaki gibidir;

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times CF_j}{mKargo.i \times D_i} \quad (8)$$

Çizelge 2.4: EEOI formül parametrelerinin açıklamaları (IMO, 2009c)

Parametreler	Açıklama
J	Kullanılan yakıt türü
i	Sefer sayısı
FC_j	i zamanında tüketilen J yakıtının kütlesi
CF_j	j yakıt için CO ₂ kütle dönüştürme faktörü cinsinden yakıt ağırlığı
mCargo	Taşınan kargo miktarı
D_i	Deniz mili cinsinden mesafe

Bu formül kuru yük gemiler ve diğer birçok gemi türü için kullanılabilir. Formül, yolculuk sırasında belirli bir dönemde tüketilen yakıtın sonucu olarak üretilen CO₂ kütlesini yukarıda belirtilen açıklamaya paralel olarak gösterir. EEOI birimi, taşınan yük miktarına bağlıdır ;

örneğin, ton CO₂/(ton * deniz mili), ton CO₂/(TEU * deniz mili), ton CO₂/(kişi sayısı * deniz mili) vb.

2.3.3 Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı (SEEMP)

15 Temmuz 2011 tarihinde MEPC.203 (62) ile kabul edilen MARPOL Ek VI Bölüm IV gerekliliklerine uymak için, 400 GT ve üzeri uluslararası yolculukta enerji verimliliğinin dikkate alındığını doğrulamak için Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı 'na (SEEMP) sahip olunması zorunludur. Şuanki gemilerde SEEMP hazırlanması ve geminin varlığının doğrulanması, hangisi önce olursa, yürürlüğe girdikten sonra ilk ara ya da yenileme sürveyinde yapılacaktır. Büyük değişim kapsamındaki değişiklikler için idarelerin değerlendirmesine bağlı olarak enerji verimliliği kurallarına uyum şartı aranacaktır. Şartlara uygunluk neticesinde gemilere "Uluslararası Enerji Verimliliği Sertifikası" verilecektir.

Gemi Enerji Verimliliği Yönetim Planı, enerji tasarrufu önlemlerinin ne kadar etkili olduğunu ve bu önlemlerin enerji verimliliğini nasıl iyileştirdiğini belirler. Ayrıca, geminin enerji verimliliğini daha fazla iyileştirmek için hangi önlemlerin alınabileceğini de tanımlar. SEEMP, şirket tarafından özel bir plan olarak geliştirilmelidir. SEEMP, bir geminin enerji verimliliğini dört adımda iyileştirmeyi amaçlamaktadır: "planlama", "uygulama", "izleme", "öz değerlendirme ve iyileştirme". Bu bileşenler, gemi enerji yönetiminin sürekli geliştirme döngüsünde kritik bir rol oynar. Döngü her tekrarlandığında, bazı öğelerin değiştirilmesi gerekirken diğer öğeler aynı kalabilir [36].

Planlama, SEEMP'in en önemli aşamasıdır. Bu, hem geminin mevcut enerji kullanımının hem de gemi enerji verimliliğinin istenen gelişiminin ilk belirlendiği aşamadır bu yüzden en uygun, etkili ve uygulanabilir planı geliştirmek için planlamaya yeterli zaman ayrılması önerilmektedir [36].

SEEMP'in operasyonel kriterleri, düşük yakıt tüketimi ve azaltılacak CO₂ emisyonları olmak üzere iki bölümde kategorize edilebilir. Gelişmiş teknik ve operasyonel yönetim kapsamında; hava tahmini, hız optimizasyonu, zamanında ulaşım, optimum gemi trimi, optimum balast, tekne bakımı, sürücü sistemi bakımı, gelişmiş filo yönetimi, enerji yönetimi, atık ısının geri kazanımı, optimum şaft gücü, dümen ve dümen kontrol sistemleri, otomatik pilotların optimum kullanımı optimum pervane listelenebilir. Limanlar ile ilgili yöntemler, büyük kapasiteli limanlara uygulanabilir. Hızlı liman operasyonları, liman tesislerinin hızlı yüklenmesi ve boşaltılması ve liman çalışmalarında istihdam edilecek tanınmış personeller bu yöntemler arasında sıralanabilir.

Çizelge 2.5: SEEMP örneği [36]



Geliştirme Süresi:		Geliştirici:	
Uygulama Zamanı:	Başlama:	Başvurusu:	
	Bitiş:		
Bir sonraki planlanmış değerlendirme tarihi:			
1. ÖNLEMLER			
Enerji Verimliliği Önlemleri	Uygulama	Sorumlu Personel	
Hava durumuna göre rota	Servis sağlayıcılar tarafından sağlanan bilgilere göre, kaptan optimum <u>rota</u> seçiminden sorumludur.	(Servis sağlayıcılar) tarafından sağlanan bilgilere göre, rotanın seçiminden optimizier sorumludur.	
Hız optimizasyonu	1 Mayıs 2013 tarihi itibarıyla tasarım hızı (% 85 MCR) 19kt iken 18kt olarak belirlenmiştir.	Kaptan, geminin hızından ve kontrolünden sorumludur.	
2. İZLEME			
İzleme araçlarına ilişkin açıklamalar bu bölüme dahil edilmelidir.			
3. HEDEFLER			
Ölçülebilir hedefler buraya yazılmalıdır.			
4. DEĞERLENDİRME			
Değerlendirme prosedürleri buraya yazılmalıdır.			

EEDI ve SEEMP ile ilgili emisyon azaltma anketine göre, tahmini CO₂ emisyon azaltma sonuçları aşağıdaki gibidir;

Gemi kaynaklı CO₂ emisyonları, EEDI ve SEEMP yönetmelikleri ile önemli ölçüde azaltılmıştır. 2020 yılına kadar SEEMP, mevcut gemilere uygulanabileceğinden CO₂ emisyonlarının azaltılmasında EEDI'ye göre çok daha etkili olacaktır. EEDI'nin etkisi, verimsiz eski tonajlı gemilerin yeni kural ve yönetmeliklere göre tasarlananlarla değiştirilmesiyle artacaktır. 2020'den itibaren yeni gemiler için EEDI

düzenlemelerinin ve mevcut gemiler için SEEMP uygulamalarının getirilmesiyle, dünya filosunun CO₂ emisyonları 151,5 milyon ton azalacak ve 2040'ta 330 milyon , 2040'ta 615 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir [37].



3. ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZ UYGULAMASI

Enerji verimliliği, tasarıma, sevk ve pervane sistemine, makine teknolojisine ve farklı bakım tutum tekniklerine göre gemiden gemiye değişir. Bu çalışmada, farklı pervanelerin ve balast kullanan farklı gemilerin emisyon oranlarındaki değişim araştırılmıştır. Bu değişiklik EEDI formül hesaplamaları ile sunulmuş ve sonuç olarak farklı yöntemlerin geminin enerji verimliliğini artırdığı kanıtlanmıştır. Hesaplanan EEDI değerleri, IMO tarafından belirlenen gerekli EEDI değerinin altında olmalıdır. Bu hesaplama yöntemleri aynı zamanda bir emisyon kontrol yöntemi olmuştur.

Öncelikle enerji verimliliği tasarım indeksi uygulamalarında kullanılan formül içindeki faktörler incelenmiştir. Farklı gemilerin farklı sistemleri ve değerleri için hesaplamalar yapılmıştır.

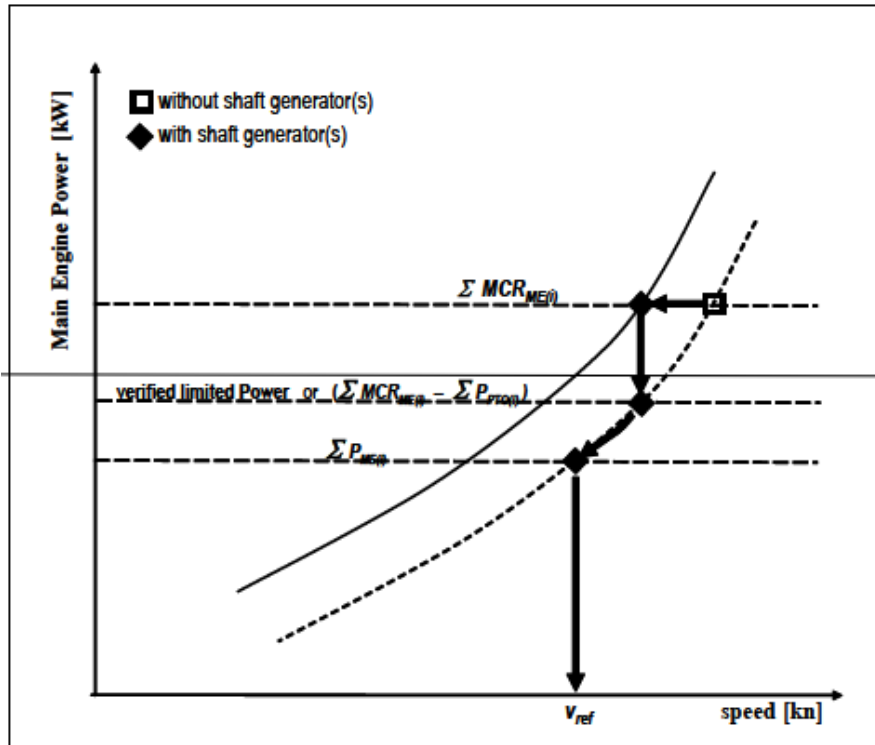
3.1 EEDI'nin Hesaplanması

Daha önce bahsedilen EEDI formülünde;

- Ana makine emisyonları = $(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} C_{FME(i)} SFC_{ME(i)})$
- Yardımcı makine emisyonları = $(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})$
- Şaft jeneratörleri / motorları emisyonları = $((\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)}) C_{FAE} \cdot SFC_{AE})$
- Verimlilik teknolojisi = $(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME})$
- Taşıma işi = $f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w$
- ME ve AE sırasıyla ana ve yardımcı motorları temsil eder.
- Normal maksimum deniz yükünün bir kısmı şaft jeneratörleri tarafından sağlanıyor ise; gücün bu kısmı için, SFC_{AE} ve CF_{ME} yerine SFC_{ME} ve CF_{ME} kullanılabilir. NO_x teknik kodunun E2 veya E3 test döngülerine göre sertifikalandırılan makineler için spesifik yakıt harcamı, teknik dosyadaki

%75 MCR değeridir. SFC_{AE} için makine NO_x sertifikalı D2 ya da C1 test döngüsü için teknik kodu 2008 MCR'nin %50'sidir [38].

- $P_{PTO(i)}$, şaft jeneratörü tarafından sağlanan en fazla sürekli elektrik gücünün %75'idir.
- P_{ME} , ana makine gücünü temsil eder ve aşağıdaki formülle belirlenir. Şaft jeneratör gücü (P_{PTO}) her bir ana motor gücünden (MCR_{ME}) çıkarıldıktan sonra kalan gücün %75'i alınarak hesaplanır.
- $P_{ME(i)} = 0,75 \times (MCR_{ME(i)} - P_{PTO(i)})$
- V_{ref} , kapasitenin tanımlandığı koşullarda (yolcu ve Ro-Ro gemileri için koşul yaz draftlarıdır), sakin denizle birlikte derin suda geminin deniz mili/saat (deniz mili) cinsinden ölçülen kabul edilen değeridir. Şekil 3.1, referans hızın belirlenmesini temsil etmektedir.
- V_{ref} değerinin aşağıdaki koşullara göre düzenlenmesi gerekir:
 - Derin su
 - Rüzgârsız hava
 - Optimum yükleme durumu
 - Şaft jeneratörleri ve şaft motorları tarafından oluşturulan toplam sevk gücü.



Şekil 3.1: Referans hızın belirlenmesi [39].

PAE, yardımcı makinelerin gücünü temsil eder. Maksimum açık deniz yükleri durumunda, tahrik sistemleri, makineleri ve yaşam alanları, örneğin ana makine pompaları, seyir sistemleri ve cihazları ve güverte yaşam ekipmanlarına gereken güçtür. Kargo pompaları, kargo dişlisi, balast pompaları, soğutucular ve ambar fanları gibi sistemler için gereken güç bu güce dahil değildir. Ana makine gücü 10000 KW'tan fazla olan kargo gemileri ve ana makine gücü 10000 KW'ın altında olan gemiler için aşağıdaki formüller belirlenmiştir.

- $P_{AE(MCR(ME)>10000\text{ KW})} = (0.025 * \sum_{i=1}^{nME} MCR_{MEi}) + 250$
- $P_{AE(MCR(ME)<10000\text{ KW})} = (0.05 * \sum_{i=1}^{nME} MCR_{MEi})$
- Değer olarak kapasite (maksimum tasarım yükü);

- DWT dökme yük gemileri, gaz tankerleri, tankerler, Ro-Ro kargo gemileri, genel kargo gemileri, soğutmalı kargo taşıyıcı ve kombine taşıyıcılar için,

- Yolcu gemileri ve Ro-Ro gemileri için GRT,

- Konteyner gemilerinde DWT'nin % 70'i kullanılmaktadır [38].

CO₂ emisyon faktörü (C_F), gram cinsinden hesaplanan yakıt tüketimi ile gram cinsinden hesaplanan CO₂ emisyonu arasındaki boyutsuz dönüşüm faktörüdür. C_F, kullanılan yakıt türü ile ilgilidir. Bu değer aşağıda verilen tablodan okunur.

Çizelge 3.1: Farklı yakıt türleri için C_F değerleri [40].

Yakıt türü	Referans	Karbon içeriği	C _F (t-CO ₂ /t-Yakıt)
Dizel / Gaz Yağı	ISO 8217 DMX'den DMB'ye Kadar Sınıflar	0.8744	3.206
Hafif Akaryakıt (LFO)	ISO 8217 RMA'dan RMD'ye kadar Sınıflar	0.8594	3.151
Ağır Akaryakıt (HFO)	ISO 8217 RME- RMK Sınıfları	0.8493	3.114
Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG)	Propan Bütan	0.8182 0.8264	3.00 3.030
Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG)		0.75	2.75

F_J , geminin özel tasarım elemanlarını hesaba katan bir düzeltme faktörüdür. Buz sınıfı gemiler için, güç düzeltme faktörü standartlaştırılmış değerlere göre seçilir. Diğer gemi türleri için F_J değeri 1,0 olarak alınmalıdır.

F_W , dalga frekansı, dalga yüksekliği ve rüzgar hızı gibi deniz koşulları nedeniyle gemi hızındaki düşüşü gösteren boyutsal bir katsayıdır. F_W , MARPOL Ek VI, Reg. 20-21 tarafından sağlanan EEDI hesabı için 1'dir.

$F_{eff(i)}$ yenilikçi bir enerji verimliliği faktörüdür. $F_{eff(i)}$, atık enerji geri kazanım sistemi için 1 olarak alınmalıdır.

F_i katsayısı, herhangi bir teknik/düzenleme kapasite sınırlaması için kapasite faktörüdür. Ters söylenmedikçe 1.0 olarak alınabilir. F_i katsayısı, minimum f_{i0} ve f_{max} değerleri ile buz sınıfı tekneler için standartlara göre belirlenir. $F_{i,min}$ 1.0'dan küçük olamaz.

F_C katsayısı, kübik kapasite düzeltme faktörüdür ve kabul edilemez bir şekilde 1.0 olarak kabul edilmelidir. Dizel tahrikli doğal gaz taşıyıcılar için;

$F_C = R^{-0.56}$ kabul edilir.

3.2 Seyirde Gemilerde Enerji Verimliliği

Bu çalışmada, dört farklı geminin farklı emisyonları hesaplanmış ve emisyon miktarlarını etkileyen faktörlerin verimliliği nasıl değiştirdiği belirlenmiştir. İlk araştırma, bir sevk sistemi olarak tersinir pervanelerin kullanılmasının geminin güç ihtiyacını nasıl azalttığı ile ilgilidir. M/V SEDEF gemisinin pervane sistemi, şaft üzerindeki pervane çiftinin ters yönde dönmesi ile tasarlanmıştır. Amaç suya salınan dönme enerjisini ortadan kaldırmaktır. M/V ECLIPS gemisinin tek taraflı bir pervane sistemi vardır. Diğer sörveyde M/V KAAN KALKAVAN gemisinin ana makinesi common-rail sisteme sahiptir. M/V CAFER gemisinin ana makinesi, VIT (değişken enjeksiyon zamanlaması) sistemine sahip standart bir yakıt pompalama sistemine sahiptir. Birbirini karşılaştıran iki gemi kardeş gemilerdir.

3.2.1 Tersinir pervane sisteminin etkisi

M/V SEDEF gemisinden elde edilen verilere göre geminin ana hızı %53 yükte 16 knottur. M/V ECLIPS gemisi, %58 yükte aynı referans hızını yakalayabilir. İki gemi

de şaft jeneratör kullanmadan yol almıştır. Üstelik kargosuz seyretmişler ve hava şartları neredeyse aynı durumdadır.

M/V SEDEF'in aşağıdaki ana parametreleri şu şekilde ayarlanır:

$$MCR_{ME} = 5775 \text{ kW (}\%53 \text{ yük)}$$

$$\text{Kapasite} = 12205 \text{ DWT}$$

$$C_{F,ME} = 3.114$$

$$C_{F,AE} = 3.206$$

$$SFC_{ME} = 85 \text{ g / kWh}$$

$$SFC_{AE} = 55 \text{ g / kWh}$$

$$V_{ref} = 16 \text{ KN (şaft jeneratör / motor olmadan)}$$

$$MCR_{ME} = 5775 \text{ kW}$$

$$P_{ME} = 0,75 \times MCR_{ME} = 0,75 \times 5775 \text{ kW} = 4331,25 \text{ kW}$$

$$P_{AE} = 0,05 \times 5775 = 278,75 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} EEDI &= [(4331,25 \times 3,114 \times 85) + (278,75 \times 3,206 \times 55)] / (16 \times 12205 \times 0,7) \\ &= 8.82 \text{ gr CO}_2 / \text{ton nm.} \end{aligned}$$

M/V ECLIPS'in aşağıdaki ana parametreleri şu şekilde ayarlanır:

$$MCR_{ME} = 6090 \text{ kW (}\% 58 \text{ yük)}$$

$$\text{Kapasite} = 12205 \text{ DWT}$$

$$C_{F,ME} = 3.114$$

$$C_{F,AE} = 3.206$$

$$SFC_{ME} = 95 \text{ g / kWh}$$

$$SFC_{AE} = 65 \text{ g / kWh}$$

$$V_{ref} = 16 \text{ KN (şaftlı jeneratör / motor olmadan)}$$

$$MCR_{ME} = 6090 \text{ kW}$$

$$P_{ME} = 0,75 \times MCR_{ME} = 0,75 \times 6090 \text{ kW} = 4567,5 \text{ kW}$$

$$P_{AE} = 0,05 \times 6090 = 304,5 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} EEDI &= [(4567,5 \times 3,114 \times 95) + (304,5 \times 3,206 \times 65)] / (16 \times 12205 \times 0,7) \\ &= 10.34 \text{ g CO}_2 / \text{ton nm.} \end{aligned}$$

Hesaplamalarda görüldüğü üzere, M/V SEDEF gemisinin EEDI miktarı M/V ECLIPS gemisine göre %14 azalmıştır. Ters dönüşlü pervanelerde verimlilik artmaktadır. Aynı referans hıza ulaşılırken özgül yakıt tüketimi ve emisyon değeri %10-15 oranında azalmıştır.

322 Common-rail sisteminin etkisi

Bu araştırmada M/V KALKAVAN gemi ana makinasında Common-Rail yakıt pompası sistemi bulunmaktadır. M/V CAFER, VIT pompalama sistemine sahip bir gemidir. Aşağıdaki hesaplama, aynı referans hızı yakalayarak hava şartları neredeyse aynı durumda kargosuz seyreden iki gemi tarafından üretilen emisyon miktarı için sunulmuştur. Bu inceleme iki geminin de şaft jeneratörü kullanmadan yol aldığı durum içindir. M/V KAAN KALKAVAN'ın ana parametreleri aşağıdadır.

$$MCR_{ME} = 10624 \text{ kW (\%80 yük)}$$

$$\text{Kapasite} = 26700 \text{ DWT}$$

$$C_{F,AE} = 3.114$$

$$C_{F,AE} = 3.206$$

$$SFC_{ME} = 90 \text{ g / kWh}$$

$$SFC_{AE} = 45 \text{ g / kWh}$$

$$V_{ref} = 14 \text{ KN (şaft jeneratör / motor olmadan)}$$

$$MCR_{ME} = 10624 \text{ kW}$$

$$P_{ME} = 0,75 \times MCR_{ME} = 0,75 \times 10624 \text{ kW} = 7968 \text{ kW}$$

$$P_{AE} = (0,025 \times 10624) + 250 = 515,6 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} EEDI &= [(7968 \times 3.114 \times 90) + (515.6 \times 3.206 \times 45)] / (14 \times 26700 \times 0.7) \\ &= 8.9 \text{ gr CO}_2 / \text{ton nm.} \end{aligned}$$

M/V CAFER'in aşağıdaki ana parametreleri şu şekilde ayarlanır:

$$MCR_{ME} = 10890 \text{ kW (\%82 yük)}$$

$$\text{Kapasite} = 26700 \text{ DWT}$$

$$C_{F,ME} = 3.114$$

$$C_{F,AE} = 3.206$$

$$SFC_{ME} = 92 \text{ g / kWh}$$

$$SFC_{AE} = 47 \text{ g / kWh}$$

$$V_{ref} = 14 \text{ KN (şaft jeneratör / motor olmadan)}$$

$$MCR_{ME} = 10890 \text{ kW}$$

$$P_{ME} = 0,75 \times MCR_{ME} = 0,75 \times 10890 \text{ kW} = 8167,5 \text{ kW}$$

$$P_{AE} = (0,025 \times 8167,5) + 250 = 454,18 \text{ kW}$$

$$EEDI = [(8167,5 \times 3,114 \times 92) + (454,18 \times 3,206 \times 47)] / (14 \times 26700 \times 0,7) \\ = 9.20 \text{ g CO}_2 / \text{ton nm.}$$

Yapılan hesaplamalarda M/V KAAN KALKAVAN gemisinin EEDI miktarının M/V CAFER gemisinden %3 daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu, sistemin CO₂ ve SO₂ emisyonları elde etmek için işlevsel olduğu anlamına gelir. Yakıt tüketimi ve emisyon değeri %2-4 oranında azalmıştır.





4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gemilerde enerji verimliliği iyileştirme uygulamaları verimli bir işletme sağlanabilmesi ve emisyonların azaltılabilmesi açısından en önemli konulardan biridir. Bu tez çalışmasında, farklı pervane ve makine teknolojilerine sahip gemilerin emisyon oranları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılırken hava koşulları ve gemideki kargo aynı olacak şekilde seçilmiştir.

İnceleme yapılan ikiz gemilerden Turkon Holding filosundaki (M/V SEDEF) ters çevrilebilir pervane sistemi, diğerinde ise tek yönlü döner pervane sistemi bulunmaktadır. Hesaplama yapılan diğer gemilerde ise durum şu şekildedir; bir geminin ana makinesi (M/V KAAN KALKAVAN) common-rail yakıt sistemine sahipken, diğer geminin (M/V CAFER) ana makinesi ise in-line yakıt enjeksiyon sistemine sahiptir. Enerji verimliliği tasarım endeksi, hem hesaplamalardan elde edilmiştir, hem de gemilerin aynı referans hızına sahip olması için gerekli ana makine yükler altında hesaplanmıştır. Sonuç olarak, ters dönüşlü pervane ve common-rail yakıt pompası sistemine sahip gemiler, yakıt tüketimini ve makine yükünü azaltmış ve enerji verimliliğini artırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde saptanan enerji verimliliği değerlerinin işletme açısından önemli olduğu söylenebilir.

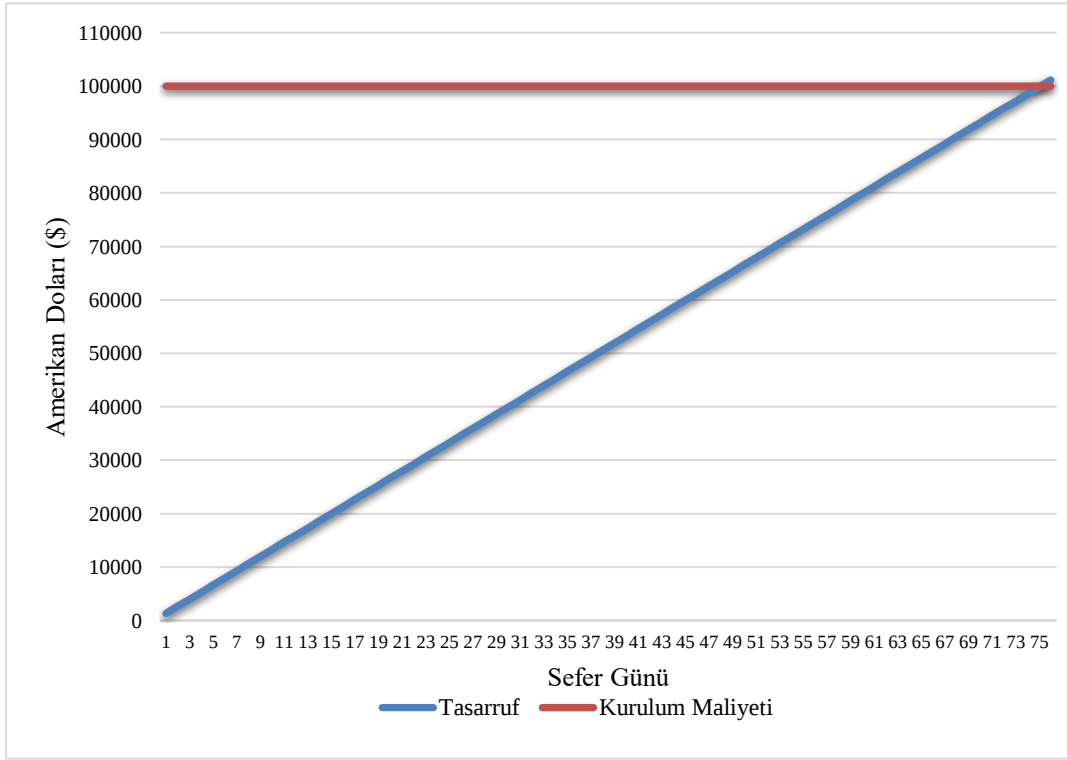
Yeni nesil pervane sistemleri gemilerde yaklaşık %10-15 oranında yakıt tasarrufu sağlayabilir. Bu oran alt sınırdan ele alınacak olursa yani günlük harcanan yakıttan %10 tasarruf edildiği durum için maliyet ve kar hesaplamaları aşağıda verilmiştir. Hesaplamalar için baz alınan seferdeki özellikler aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 4.1: Sefer özellikleri

Ele alınan gemi türü	Tanker
DWT	19000
Hız	10 kts
Sefer Mesafesi	303 deniz mili

Sefer Süresi	1 gün
Toplam Yakıt Maliyeti	13310 \$
CPP Kurulum Maliyeti	100000 \$
Yıllık Sefer Günü Sayısı	250 gün

Aşağıdaki şekilde CPP uygulaması yapıldıktan sonra aynı hatta seferlerine devam eden özellikleri yukarıda verilen bir gemi için amortisman süresi verilmiştir. CPP uygulamasını yapan denizcilik şirketi bu uygulama için harcadığı parayı yaklaşık 75 gün sonra uygulama sayesinde yakıt tüketiminin azaltılmasıyla elde ettiği karla amorti edebilecektir.



Şekil 4.1. CPP uygulamasının amortisman süresi

Bu şekilde bir gemi için CPP'nin kendini amorti etme süresi kabaca bir hesaplama yaklaşık 75 gündür. Bugünden sonra uygulamayı yapan şirket kara geçecektir. CPP uygulamasının yapıldığı ilk sefer yılında ise yaklaşık 232000 \$ kar elde edilecektir. Bir geminin ticari ömrünün yaklaşık 30 yıl olduğu varsayıldığında CPP uygulaması sayesinde ilk yıl 232000 \$ kar eden bir denizcilik şirketi ikinci yıl ve sonraki her yıl için CPP uygulaması maliyeti olmadığından yakıt maliyetini yılda 332750 \$

azaltılabilecektir. 30 yılda ise bu şirket CPP uygulaması sayesinde yaklaşık 9881750 \$ kar elde edecektir.

Çalışmada yapılan hesaplamalara ek olarak geminin enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar da sisteme dahil edilirse verimin %20-30 artılabileceği ortaya çıkmıştır. Çalışmada sunulan verimlilik artışı analiz tablosuna ek olarak seyir yönetimi açısından hız optimizasyonu, otomatik pilotun etkin kullanımı, hava yönlendirme, trim optimizasyonu, tekne ve pervane durum yönetimi, makine yönetimi şartları, ana makine, yardımcı makine, kazan ve yakıt yönetimi sorunlarının giderilmesi teknenin direncini azaltır ve yakıt tüketimini azaltarak enerji verimliliğini artıracığı belirlenmiştir.

Her 5 yılda bir tersane sırasında gemi işletmecileri tarafından yapılabilecek bu düzeltmeler, 5 yıllık akaryakıt harcama miktarı açısından benzer rakamlara denk gelmektedir. Bu uygulamaların sayesinde gemilerin emisyonları önemli ölçüde azalacaktır. Makine ve tekne teçhizatının izin verdiği her gemi yeşil bir gemiye dönüştürülmesi ve böylece geminin sürdürülebilirliği artırılması gerekmektedir. Bu işlemler hem ekipman hem de verimli bir gemi işletmeciliği açısından faydalı olacaktır.

Yapılacak bu işlemler haricinde gemiye katılan her yeni personel için bir kontrol listesi doldurulmalı ve verilen eğitimin personel üzerinde başarılı olup olmadığını kontrol etmek için kontrol listesi değerlendirilmelidir. Personel değerlendirme sonunda yetersiz görülmüşse, gemideki zabıtlar ve mühendisler tarafından eğitimin yeniden verilmesi faydalı olacaktır. Böylelikle personelin de gemi enerji verimliliği konusunda bilgilenmiş olması sağlanacak ve geminin sürdürülebilir bir işletme sistemine kavuşması sağlanabilecektir.



KAYNAKLAR

- [1-6] William Ejuvweyerome Odiete, (2020) Novel metric for managing the protection of humanity and the environment against pollution and its adverse effects, *Heliyon*, Volume 6, Issue 11, e05555, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05555>. Smith, T. W. P.; Jalkanen, J. P.; Anderson, B. A.; Corbett, J. J.; Faber, J.; Hanayama, S.; O’Keeffe, E.; Parker, S.; Johansson, L.; Aldous, L.; Raucci, C.; Traut, M.; Ettinger, S.; Nelissen, D.; Lee, D. S.; Ng, S.; Agrawal, A.; Winebrake, J. J.; Hoen, M.; Chesworth, S.; Pandey, A. Third IMO GHG Study 2014; International Maritime Organization (IMO) London, UK.
- [7] Jiaojun Deng, Xiaochen Wang, Zhilong Wei, Li Wang, Chenyu Wang, Zhenbin Chen, (2021) A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels, *Science of The Total Environment*, Volume 766, 144319, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144319>.
- [8] Lauri Kujanpää, Sebastian Teir, (2017) Implications of the New EU Maritime Emission Monitoring Regulation on Ship Transportation of CO₂, *Energy Procedia*, Volume 114, Pages 7415-7421, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1871>.
- [9] Maddox Danışmanlık (2012). Deniz Taşımacılığı Sektöründe Maliyet Etkili GNG Emisyonu Azaltımı Önündeki Pazar Engellerinin Analizi.
- [10] Jinxi Zhou, Hewen Wang, (2020) Study on efficient removal of SO_x and NO_x from marine exhaust gas by wet scrubbing method using urea peroxide solution, *Chemical Engineering Journal*, Volume 390, 124567, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124567>.
- [11] Yiu-hung Yau, Victor Rudolph, Kin-chung Ho, Cat Chui-man Lo, Kam-chau Wu (2017), Evaluation of different demulsifiers for Marpol oil waste recovery, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 17, 2017, Pages 40-49, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.02.013>.
- [12] Thuy Chu Van, Jerome Ramirez, Thomas Rainey, Zoran Ristovski, Richard J. Brown, (2019) Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 70, Pages 123-134, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>.
- [13] Isaac Animah, Augustus Addy-Lamptey, Francis Korsah, John Simon Sackey, (2018) Compliance with MARPOL Annex VI regulation 14 by ships in the Gulf of Guinea sub-region: Issues, challenges and opportunities, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 62, Pages 441-455, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.020>.
- [14] Thuy Chu Van, Ali Zare, Mohammad Jafari, Timothy A. Bodisco, Nicholas Surawski, Puneet Verma, Kabir Suara, Zoran Ristovski, Thomas Rainey, Svetlana Stevanovic, Richard J. Brown, (2019) Effect of cold start on engine

performance and emissions from diesel engines using IMO-Compliant distillate fuels, *Environmental Pollution*, Volume 255, Part 2, 113260, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113260>.

- [15] Xin Peng, Yuanqiao Wen, Lichuan Wu, Changshi Xiao, Chunhui Zhou, Dong Han, (2020) A sampling method for calculating regional ship emission inventories, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 89, 102617, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102617>.
- [16] Yewen Gu, Stein W. Wallace, Xin Wang, (2019) Can an Emission Trading Scheme really reduce CO₂ emissions in the short term? Evidence from a maritime fleet composition and deployment model, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 74, Pages 318-338, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.009>.
- [17] Ugur Kesgin, Nurten Vardar, (2001) A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits, *Atmospheric Environment*, Volume 35, Issue 10, Pages 1863-1870, ISSN 1352-2310, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00487-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00487-8).
- [18] Peiyong Ni, Xiangli Wang, Hu Li, (2020) A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines, *Fuel*, Volume 279, 118477, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118477>.
- [19] Burak Zincir, Cengiz Deniz, Martin Tunér, (2019) Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine, *Journal of Cleaner Production*, Volume 235, Pages 1006-1019, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.044>.
- [20] Aykan Karademir, (2006) Evaluation of the potential air pollution from fuel combustion in industrial boilers in Kocaeli, Turkey, *Fuel*, Volume 85, Issues 12–13, Pages 1894-1903, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.01.026>.
- [21] Frédéric Ledoux, Cloé Roche, Fabrice Cazier, Charles Beaugard, Dominique Courcot, (2018) Influence of ship emissions on NO_x, SO₂, O₃ and PM concentrations in a North-Sea harbor in France, *Journal of Environmental Sciences*, Volume 71, Pages 56-66, ISSN 1001-0742, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.03.030>.
- [22] Zhang Bo, Leonardus WW. Mihardjo, Mahidzal Dahari, Ahmed G. Abo-Khalil, Abdel-Rahman Al-Qawasmi, Abdeliazim Mustafa Mohamed, Towhid Parikhani, (2020) Thermodynamic and exergoeconomic analyses and optimization of an auxiliary tri-generation system for a ship utilizing exhaust gases from its engine, *Journal of Cleaner Production*, 125012, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125012>.
- [23] Ivica Ančić, Nikola Vladimir, Lidija Runko Luttenberger, (2018) Energy efficiency of ro-ro passenger ships with integrated power systems, *Ocean Engineering*, Volume 166, Pages 350-357, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.042>.

- [24] Oktay Çetin, M. Ziya Sogut, (2021) A new strategic approach of energy management onboard ships supported by exergy and economic criteria: A case study of a cargo ship, *Ocean Engineering*, Volume 219, 108137, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108137>.
- [25] Cheng Wang, Yonglin Ju, Yunzhun Fu, (2021) Comparative life cycle cost analysis of low pressure fuel gas supply systems for LNG fueled ships, *Energy*, Volume 218, 119541, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119541>.
- [26] Hongmei Chen, (2020) Simulation Research on Ship Electric Propulsion Speed Regulation System Based on Variable Structure Control and FPGA, *Microprocessors and Microsystems*, 103588, ISSN 0141-9331, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103588>.
- [27] Chun-yu Guo, Xiang-hai Zhong, Da-gang Zhao, Chao Wang, Jian-feng Lin, Ke-wei Song, (2020) Propulsion performance of large-scale ship model in real sea environment, *Ocean Engineering*, Volume 210, 107440, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107440>.
- [28] Thalís P.V. Zis, Harilaos N. Psaraftis, Fabian Tillig, Jonas W. Ringsberg, (2020) Decarbonizing maritime transport: A Ro-Pax case study, *Research in Transportation Business & Management*, Volume 37, 100565, ISSN 2210-5395, <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100565>.
- [29] Cheng Wang, Yonglin Ju, Yunzhun Fu, (2021) Comparative life cycle cost analysis of low pressure fuel gas supply systems for LNG fueled ships, *Energy*, Volume 218, 119541, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119541>.
- [30] Hye-Jeong Lee, Seung-Hoon Yoo, Sung-Yoon Huh, (2020) Economic benefits of introducing LNG-fuelled ships for imported flour in South Korea, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 78, 102220, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102220>.
- [31] Hao Chen, Zhigang Zhou, Jingjing He, Peng Zhang, Xuan Zhao, (2020) Effect of isopropanol and n-pentanol addition in diesel on the combustion and emission of a common rail diesel engine under pilot plus main injection strategy, *Energy Reports*, Volume 6, Pages 1734-1747, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.022>.
- [32] Nicolas Huneeus, Hugo Denier van der Gon, Paula Castesana, Camilo Menares, Claire Granier, Louise Granier, Marcelo Alonso, Maria de Fatima Andrade, Laura Dawidowski, Laura Gallardo, Dario Gomez, Zbigniew Klimont, Greet Janssens-Maenhout, Mauricio Osses, S. Enrique Puliafito, Nestor Rojas, Odón Sánchez- Ccoyllo, Sebastián Tolvet, Rita Yuri Ynoue, (2020) Evaluation of anthropogenic air pollutant emission inventories for South America at national and city scale, *Atmospheric Environment*, Volume 235, 117606, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117606>.

- [33] D. Toscano, F. Murena, (2020) Atmospheric ship emissions in ports: A review. Correlation with data of ship traffic, *Atmospheric Environment: X*, Volume 4, 100050, ISSN 2590-1621, <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100050>.
- [34] Yiqi Zhang, Jimmy C.H. Fung, Jimmy W.M. Chan, Alexis K.H. Lau, (2019) The significance of incorporating unidentified vessels into AIS-based ship emission inventory, *Atmospheric Environment*, Volume 203, Pages 102-113, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.055>.
- [35] E. Ekanem Attah, R. Bucknall, (2015) An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI, *Ocean Engineering*, Volume 110, Part B, Pages 62-74, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.040>.
- [36] A. Papanikolaou, G. Zaraphonitis, E. Bitner-Gregersen, V. Shigunov, O. El Moctar, C. Guedes Soares, D.N. Reddy, F. Sprenger, (2016) Energy Efficient Safe SHip Operation (SHOPERA), *Transportation Research Procedia*, Volume 14, Pages 820-829, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.030>.
- [37] Yuan hang Hou, Kai Kang, Xiao Liang, (2019) Vessel speed optimization for minimum EEOI in ice zone considering uncertainty, *Ocean Engineering*, Volume 188, 106240, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106240>.
- [38] Gerard Peet, (1994) The role of (environmental) non-governmental organizations at the Marine Environment Protection Committee (MEPC) of the International Maritime Organization (IMO), and at the London Dumping Convention (LDC), *Ocean & Coastal Management*, Volume 22, Issue 1, Pages 3-18, ISSN 0964-5691, [https://doi.org/10.1016/0964-5691\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0964-5691(94)90080-9).
- [39] Shukui Liu, Apostolos Papanikolaou, (2016) Fast approach to the estimation of the added resistance of ships in head waves, *Ocean Engineering*, Volume 112, Pages 211-225, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.022>.
- [40] Eun-Chan Kim, Jeong-Hwan Oh, Seung-Guk Lee, (2016) Consideration on the Maximum Allowable Dosage of Active Substances Produced by Ballast Water Management System Using Electrolysis, *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, Volume 4, Pages 88-96, ISSN 2405-5352, <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.008>.
- [41] Christoforos Mavrellos, Gerasimos Theotokatos, (2018) Numerical investigation of a premixed combustion large marine two-stroke dual fuel engine for optimising engine settings via parametric runs, *Energy Conversion and Management*, Volume 160, 2018, Pages 48-59, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.097>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Onur Yılmaz

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015 , İTÜ, Denizcilik Fakültesi, GMİM
- **Yükseklisans** : 2021, İTÜ, DUİM ABD