

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL BOĞAZINDA GEMİ KAYNAKLI EGZOZ
EMİSYONLARININ HESAPLANMASI VE HAVA
KALİTESİNE ETKİSİNİN AERMOD DİSPERSİYON
MODELİ İLE BELİRLENMESİ

Araks EKMEKÇİOĞLU

DOKTORA TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Kaan ÜNLÜGENÇOĞLU

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL BOĞAZINDA GEMİ KAYNAKLI EGZOZ
EMİSYONLARININ HESAPLANMASI VE HAVA
KALİTESİNE ETKİSİNİN AERMOD DİSPERSİYON MODELİ
İLE BELİRLENMESİ

Araks EKMEKÇİOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 30.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Kaan ÜNLÜGENÇOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yalçın DURMUŞOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Aykut SAFA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Tarık KOÇAL, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “İstanbul Boğazı’nda Gemi Kaynaklı Egzoz Emisyonlarının Hesaplanması ve Hava Kalitesine Etkisinin Aermod Dispersiyon Modeli ile Belirlenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Araks EKMEKÇİOĞLU



*Aileme,
Biricik Eşime
ve
Canım Oğluma...*

TEŞEKKÜR

Çalışmamda desteğini ve hoşgörüsünü esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ'ye ve eş danışman hocam Dr. Kaan ÜNLÜGENÇOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Bilgi ve tecrübesiyle her konuda desteklerinden ötürü Prof. Dr. Sadullah Levent KUZU'ya sonsuz şükranlarımı sunarım. Tez izleme sürecinde çalışmama katkılarından dolayı Doç. Dr. Aykut SAFA'ya ve Doç. Dr. Yalçın DURMUŞOĞLU'na da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü sürecimde desteklerinden dolayı tüm Arkas Denizcilik ailesine ve Arkas Denizcilik Grup Başkan Yardımcısı Ali İbrahim KONTAYTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; çalışma sürecinde gösterdiği anlayış için biricik eşim Elvin'e, canım oğlum Aden'e ve bugünlere gelmemde sonsuz emeği ve katkısı olan aileme sonsuz teşekkürler...

Araks EKMEKÇİOĞLU

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	9
1.3 Kirleticiler ve İlgili Kurallar	9
2 MATERYAL ve METOT	14
2.1 Çalışma Alanı	14
2.2 Emisyon Hesaplama	17
2.3 Dispersiyon Modelleme	24
3 BULGULAR ve DEĞERLENDİRME	33
3.1 Emisyonlar	33
3.2 Dispersiyon	44
4 SONUÇ	51
KAYNAKÇA	54
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	60

SİMGE LİSTESİ

NO _x	Azot Oksit
B	Breadth (genişlik)
E	Emisyon
EF	Emisyon Faktörü
GRT	Gross Tonnage (Brüt Kayıtlı Tonaj)
P	Güç (kW)
V	Hız
CO	Karbon Monoksit
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
SO ₂	Kükürt Dioksit
L	Length (boy)
CH ₄	Metan
NMVOG	Metan Olmayan Uçucu Organik Bileşikler
m	Metre
m ³	Metreküp
µg	Mikrogram
PM ₁₀	Partikül Madde
h	Saat
A	Saat cinsinden makine çalışma süresi
VOC	Uçucu organik bileşikler
LF	Yük Faktörü

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AB	Avrupa Birliği
AERMOD	American Meteorological Society-Environmental Protection Agency Regulatory Model (Amerikan Meteoroloji Topluluğu-Çevre Koruma Ajansı Düzenleyici Modeli)
AIS	Otomatik Tanımlama Sistemi
BSFC	Fren Spesifik Yakıt Tüketimi
CALPUFF	Kaliforniya Puff
DWT	Deadweight Tonnage (Ölü Ağırlık Tonajı)
ECA	Emisyon Kontrol Alanı
EPA	United States Environmental Protection Agency (Amerika Çevre Koruma Ajansı)
HC	Hidrokarbonlar
HFO	Ağır Fuel Oil
HKDYY	Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği
HSD	Yüksek Devirli Makine
IMO	International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
IPA	Etki Yolu Yaklaşımı
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
İHA	İnsansız Hava Aracı
KEGM	Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gaz
MARPOL	Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MSD	Orta Devirli Makine
PEMS	Taşınabilir Emisyon Ölçüm Sistemi
RPM	Dakika Başına Devir Sayısı
SCR	Seçici Katalitik İndirgeme
SEA	Gemi Emisyonları Değerlendirme
SECA	Sülfür Emisyon Kontrol Alanı
SENEM	Gemi Enerji ve Emisyon Modeli
SSD	Düşük Devirli Makine



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 İstanbul Boğazı.....	15
Şekil 2.2 Hava kalitesi modellerinin genel yapısı	25
Şekil 2.3 Sarıyer İstasyonu	26
Şekil 2.4 Sarıyer ve Kartal ölçüm istasyonları	27
Şekil 2.5 Gemilerin örnek rotası.....	29
Şekil 2.6 Model alanı.....	30
Şekil 2.7 Gridler	31
Şekil 3.1 Gemi tiplerinin yıllara yıllık geçiş sayıları.....	35
Şekil 3.2 Yıllara göre kirletici miktarları (ton).....	41
Şekil 3.3 Kirleticilerin yüzdesel dağılımı (8 yıllık toplam).....	42
Şekil 3.4 SO ₂ dağılım haritası.....	47
Şekil 3.5 NO _x dağılım haritası.....	48
Şekil 3.6 PM ₁₀ dağılım haritası.....	49
Şekil 3.7 CO dağılım haritası	50

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 İstanbul Boğazı gemi geçiş istatistik özeti.....	16
Tablo 2.2 Kıyı Emniyeti'nden temin edilen veriler	17
Tablo 2.3 Gemilerin teknik özellikleri	18
Tablo 2.4 Dizel makine hız/devir tanımları	20
Tablo 2.5 NO _x emisyon faktörleri (g/kWh)	21
Tablo 2.6 Fren spesifik yakıt tüketimi (BSFC) (g/kWh)	22
Tablo 2.7 CO emisyon faktörleri (g/kWh).....	23
Tablo 2.8 HKDYY kirletici limit değerleri.....	24
Tablo 3.1 Gemi türleri.....	33
Tablo 3.2 Gemi türleri ve özellikleri.....	36
Tablo 3.3 Gemi türlerine göre kirletici miktarları (ton/yıl).....	38
Tablo 3.4 Toplam emisyonlar (ton/yıl)	40
Tablo 3.5 Kullanılan yakıt türüne göre PM ₁₀ ve SO ₂ miktarları (ton/yıl).....	43
Tablo 3.6 Kandilli hesaplanan konsantrasyonlar (µg/m ³).....	44
Tablo 3.7 Kandilli ölçüm istasyonu değerler (µg/m ³).....	45
Tablo 3.8 Gemi kaynaklı emisyonların katkısının yüzdesel dağılımı.....	45

İSTANBUL BOĞAZINDA GEMİ KAYNAKLI EGZOZ EMİSYONLARININ HESAPLANMASI VE HAVA KALİTESİNE ETKİSİNİN AERMOD DİSPERSİYON MODELİ İLE BELİRLENMESİ

Araks EKMEKÇİOĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kaan ÜNLÜGENÇOĞLU

Deniz taşımacılığı sektörü, fosil yakıtlara bağımlılığı ve kıyı bölgelerine yakınlığı nedeniyle önemli bir çevresel risk oluşturmaktadır. Deniz trafiği ve çevresel etkilerin, özellikle de hava kirliliğinin kesişimi, giderek artan bir endişe ve kapsamlı araştırma alanı haline gelmiştir. Uluslararası Denizcilik Örgütü, değişen koşullara uyum sağlamak için emisyon önleme tedbirlerini düzenli olarak güncellemektedir.

Bu tez, İstanbul Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonlarını ve bunların hava kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Büyük bir kentsel alanı ayıran hayati bir su yolu olan İstanbul Boğazı, yoğun trafiği ve yoğun nüfuslu bölgelere yakınlığı göz önüne alındığında, bu çevresel etkileri anlamak için bir vaka çalışması sunmaktadır. Bu çalışma, 2014'ten 2021'e kadar sekiz yıllık bir süre boyunca Boğaz'dan geçen transit gemilerden kaynaklanan azot oksit, partikül madde, karbon monoksit ve kükürt dioksit emisyonlarını

hesaplamaktadır. Çalışma ikili bir yaklaşım kullanmaktadır, emisyonların sayısal tahmini ve yer seviyesindeki kirletici konsantrasyonlarını hesaplamak için hava kalitesi dağılım modellemesi. Çalışmanın kapsadığı sekiz yıllık dönem boyunca, İstanbul Boğazı'ndaki deniz trafiğinden kaynaklanan emisyonlar kapsamlı bir şekilde tahmin edilmiş ve ölçüm istasyonlarının ortam hava kalitesi verileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar daha sonra, kirleticiler için sınır değerler belirleyerek hava kalitesini korumayı ve iyileştirmeyi amaçlayan Türkiye'de Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği tarafından belirlenen hava kalitesi standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Denizcilik faaliyetlerinden kaynaklanan önemli kirleticilerin yer seviyesi konsantrasyonlarını hesaplamak için AERMOD dağılım modeli kullanılmıştır. Hesaplanan bu konsantrasyonlar daha sonra Kandilli hava kalitesi izleme istasyonundan alınan ölçüm verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım, denizcilik sektörünün özellikle hava kalitesine ilişkin çevresel ayak izinin odaklanmış bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Sayısal emisyon hesaplamalarını gerçek ölçümler ile karşılaştıran bu çalışma, teorik tahminler ile gözlemlenebilir çevresel etkiler arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Çevresel modellemede sofistike bir araç olan AERMOD Dağılım Modelinin kullanılması, yer seviyesindeki emisyon dağılımlarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu uygulama, tahmin edilen emisyon rakamlarını mekânsal ve zamansal olarak çözümlenmiş çevresel etki haritalarına dönüştürerek gemi emisyonlarının Boğaz bölgesinin hava kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, çevre politikası ve düzenleyici çerçeveler için önemli çıkarımlara sahiptir. Çalışma, deniz trafiğinin bölgesel azot oksit ve kükürt dioksit emisyonlarına önemli katkısını vurgulamakta ve Uluslararası Denizcilik Örgütü kükürt üst sınırı gibi düzenleyici tedbirlerin kükürt dioksit seviyelerini azaltmadaki etkinliğini göstermektedir. Politikacılar ve denizcilik sektörü, gelişmiş emisyon azaltma teknolojilerinin benimsenmesine öncelik vermeli ve İstanbul'da ek Emisyon Kontrol Alanları uygulamayı düşünmelidir. Boğaz'ın hava kalitesini iyileştirmek için hava kalitesini olumsuz etkilemeyen alternatif yakıtların teşvik edilmesi agresif bir şekilde sürdürülmelidir. Daha hassas önlemler için daha iyi zamansal çözümlüğe sahip ayrıntılı bir emisyon envanterinin geliştirilmesi de gereklidir.

Böyle bir yaklaşım çevresel etki değerlendirmelerinin daha doğru yapılmasını sağlayacak ve geleceğe yönelik tahminlerin doğruluğunu arttıracaktır. Bulguların politika oluşturma sürecine entegre edilmesi sadece bilimsel bilgiyi iletmemekle kalmayacak, aynı zamanda daha sürdürülebilir bir denizcilik endüstrisini teşvik edecek ve böylece kentsel hava kalitesi ve halk sağlığı üzerindeki etkisini azaltacaktır. Çalışmada hava kirliliğini azaltmak ve halk sağlığını korumak için kapsamlı ve ileri görüşlü stratejilerin benimsenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. İstanbul'da emisyon envanteri için sağlam bir temel sunan bu araştırma, daha temiz denizcilik uygulamalarının ilerlemesini desteklemekte olup küresel sürdürülebilirliğe ulaşmayı ve iklim değişikliği hedeflerini ele almayı amaçlayan gelecekteki çevre politikalarına rehberlik edecektir.

Anahtar Kelimeler: Emisyonlar, denizcilik, İstanbul Boğazı, hava kalitesi, aermod, modelleme

ESTIMATION OF EXHAUST EMISSIONS FROM SHIPS IN THE STRAIT OF İSTANBUL AND DETERMINATION OF THE EFFECT ON AIR QUALITY BY AERMOD DISPERSION MODEL

Araks EKMEKÇİOĞLU

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ

Co-supervisor: Dr. Kaan ÜNLÜGENÇOĞLU

The maritime transportation sector poses a significant environmental risk due to its dependence on fossil fuels and proximity to coastal areas. The intersection of maritime traffic and environmental impacts, particularly air pollution, has become an area of growing concern and extensive research. The International Maritime Organization regularly updates its emission prevention measures to adapt to changing conditions.

This thesis investigates exhaust emissions from ships passing through the Bosphorus and their impact on air quality. As a vital waterway cutting through a large urban area, the Bosphorus provides a case study to understand these environmental impacts, given its heavy traffic and proximity to densely populated areas. This study calculates emissions of nitrogen oxides, particulate matter, carbon monoxide and sulfur dioxide from transit vessels passing through the Bosphorus over an eight-year period from 2014 to 2021. The study uses a dual approach, numerical estimation of emissions and air quality dispersion modeling to calculate ground-level pollutant concentrations. Over the eight-year period covered by the

study, emissions from maritime traffic in the Bosphorus were comprehensively estimated and compared with ambient air quality data from measurement stations. The results were then compared with air quality standards set by the Regulation on Air Quality Assessment and Management in Turkey, which aims to protect and improve air quality by setting limit values for pollutants. The AERMOD dispersion model was used to calculate ground-level concentrations of important pollutants from maritime activities. These calculated concentrations were then compared with measurement data from the Kandilli air quality monitoring station. This approach allowed for a focused examination of the environmental footprint of the maritime industry, particularly in relation to air quality. By comparing numerical emission calculations with actual measurements, this study bridges the gap between theoretical estimations and observable environmental impacts. The use of the AERMOD Dispersion Model, a sophisticated tool in environmental modeling, allows a detailed examination of ground-level emission distributions. This application investigates the impacts of ship emissions on the air quality of the Bosphorus region by transforming estimated emission figures into spatially and temporally resolved environmental impact maps.

The findings from this study have important implications for environmental policy and regulatory frameworks. The study highlights the significant contribution of maritime traffic to regional nitrogen oxides and sulfur dioxide emissions and demonstrates the effectiveness of regulatory measures such as the International Maritime Organization sulphur cap in reducing sulfur dioxide levels. Policymakers and the shipping industry should prioritize the adoption of advanced emission reduction technologies and consider implementing additional Emission Control Areas in Istanbul. To improve the air quality of the Bosphorus, the promotion of alternative fuels that do not adversely affect air quality should be aggressively pursued. The development of a detailed emissions inventory with better temporal resolution for more precise measures is also necessary.

Such an approach would enable more accurate environmental impact assessments and improve the accuracy of future estimations. Integrating the findings into the policy-making process will not only advance scientific knowledge, but also promote a more sustainable maritime industry, thereby reducing its impact on urban air quality and public health. The study emphasizes the need to adopt

comprehensive and forward-thinking strategies to reduce air pollution and protect public health. By providing a solid basis for an emissions inventory in Istanbul, this research supports the advancement of cleaner maritime practices and will guide future environmental policies aimed at achieving global sustainability and addressing climate change targets.

Keywords: Emissions, maritime, Bosphorus, air quality, aermoc, modeling



Küresel ticaret ve ekonomide önemli yeri olan denizcilik endüstrisi, özellikle kirletici emisyonlar yoluyla çevresel dinamiklerde de etkin bir rol oynamaktadır. Stratejik açıdan önemli bir su yolu olan İstanbul Boğazı, uzun zamandır kıtalar ve kültürler arasında köprü kuran hareketli bir deniz yolu olmuştur. Bu önemli Boğaz sadece bağlantı ve ticaretin bir sembolü değil, aynı zamanda özellikle gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonları yoluyla önemli bir çevresel etki kaynağını temsil etmektedir. Gemilerden kaynaklanan kirletici emisyonların hava kalitesi üzerindeki etkilerini anlamaya ve azaltmaya yönelik ihtiyaç, bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Deniz trafiği ve çevresel etkilerin kesişimi, özellikle hava kirliliği açısından, son yıllarda artan bir endişe ve kapsamlı araştırma alanı olmuştur. Bu tez, bu kesişimin önemli bir yönüne odaklanmaktadır. İstanbul Boğazı'nda seyreden gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonlarının hesaplanması ve kirleticilerin dağılım analizi ile bunların hava kalitesi üzerindeki müteakip etkileri çalışmanın odak noktasıdır. Büyük bir kent merkezini ikiye bölen kritik bir su yolu olan Boğaz, deniz trafiğinin çevresel etkilerini anlamak için bir vaka çalışması sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 2014 - 2021 yılları arasını kapsayan sekiz yıllık bir süre boyunca, İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerden kaynaklanan azot oksitler (NO_x), partikül madde (PM_{10}), karbon monoksit (CO) ve kükürt dioksit (SO_2) emisyonları hesaplanmaktadır. Çalışmada iki aşamalı bir yöntem kullanılarak amaca yönelik çıktılar sunulmaktadır. İlk aşamada, emisyonlar sayısal olarak tahmin edilmiş, ikinci aşamada hava kalitesi dağılım modellemesi ile kirleticilerin yer seviyesindeki konsantrasyonları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından yapılan hava kalitesi ölçümlerinden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır [1]. Bu ikili yaklaşım sadece bulguların güvenilirliğini arttırmakla kalmamakta, aynı zamanda gerçek ve tahmini emisyon senaryolarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Çalışma, emisyonları hesaplamak için sayısal bir yaklaşım benimseyerek hesaplanan çıktıları İBB tarafından toplanan gerçek ölçüm sonuçları ile

karşılaştırarak çevre araştırmalarının en ileri noktasında kaynak oluşturmaktadır. Bu karşılaştırma sadece kullanılan hesaplama yöntemlerinin doğruluğunu onaylamakla kalmamaktadır. Aynı zamanda teorik tahminler ile gözlemlenebilir çevresel etkiler arasında somut bir bağlantı sağlamakta ve deniz trafiğinin hava kalitesine etkisini ortaya koymaktadır.

Çalışmanın diğer bileşeni de çevresel modellemede sofistike bir araç olan Amerikan Meteoroloji Topluluğu - Çevre Koruma Ajansı Düzenleyici Modelidir (AERMOD Dağılım Modeli) [2]. Gemi kaynaklı emisyonlar için bir dağılım modeli oluşturularak hesaplanan emisyonların yer seviyesindeki dağılımı ve konsantrasyonu incelenmektedir. Bu uygulama, soyut emisyon rakamlarını mekânsal ve zamansal olarak çözümlenmiş bir çevresel etki haritasına dönüştürdüğü ve gemi emisyonlarının İstanbul Boğazı üzerindeki hava kalitesini nasıl etkilediğine dair net bir çıktı sunduğu için önemlidir.

Bu çalışma politika ve düzenleyici çerçevelerin bilgilendirilmesi açısından değerlidir. Çalışma, İstanbul Boğazı'ndaki deniz trafiğinden kaynaklanan emisyonların ölçeğini ve niteliğini ortaya koyarak, bu tür emisyonların kentsel hava kalitesi üzerindeki etkisini azaltmak için hedeflenen çevresel stratejilere duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Ayrıca, küresel sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği girişimleri bağlamında giderek daha önemli hale gelen deniz taşımacılığının çevresel etkisinin daha geniş bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Bunu yaparken, bu çalışma denizcilik faaliyetleri ile çevre yönetimi arasındaki boşluğu doldurmaya çalışmakta ve sürdürülebilir denizcilik uygulamalarının hava kalitesini, dolayısıyla İstanbul Boğazı çevresindeki nüfusun sağlık ve yaşam kalitesini korumadaki öneminin altını çizmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Kıtaları birbirine bağlayan hareketli bir deniz yolu olan İstanbul Boğazı, gemi emisyonları ve bunların hava kalitesi üzerindeki etkilerine ilişkin küresel ölçekte bir çalışma alanı sunmaktadır. Bu literatür incelemesi, stratejik öneme sahip bu Boğaz'dan geçen gemiler kaynaklı egzoz emisyonlarının, özellikle NO_x, PM₁₀, CO ve SO₂ gibi temel kirleticilere odaklanarak, çok yönlü boyutlarını ve bunların çevredeki hava kalitesi üzerindeki müteakip etkilerini vurgulamayı amaçlamaktadır.

Literatürde gemi emisyonları ve bunların çevresel etkilerine ilişkin mevcut çalışmayı şekillendiren çok çeşitli uygulamalar, teoriler ve bulgular bulunmaktadır. Bu çalışmaların merkezinde, gemilerden yayılan kirleticilerin analizi ve hava kalitesine etkileri yer almaktadır. Bu alandaki araştırmalar, konunun artan karmaşıklığını ve önemini yansıtacak şekilde, temel değerlendirmelerden sofistike modellere ve ampirik çalışmalara doğru evrilmiştir. Bu bölümde, gemi emisyonlarını tahmin etmek için benimsenen ve doğrudan ölçüm yaklaşımlarından gelişmiş modelleme tekniklerine kadar uzanan çeşitli metodolojiler ele alınacaktır.

Literatürde, gemi emisyonlarını hesaplamak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler genel olarak üç tipe ayrılabilir; faaliyete dayalı yöntemler, yakıt tüketimine dayalı yöntemler ve ampirik yöntemler. Her yöntemin kendi içerisinde avantajları ve sınırlamaları bulunmakta olup, yöntem seçimi veri mevcudiyetine, tahminin doğruluğuna ve eldeki kaynaklara bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Faaliyete dayalı yöntemler genellikle emisyon tahmininde aşağıdan yukarıya bir yaklaşım olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, gemi tipi, ana makine ve jeneratör güçleri, yakıt tipi, hız ve kat edilen mesafe bilgileri de dahil olmak üzere gemi faaliyeti hakkında ayrıntılı verilere dayanmaktadır. Emisyon faktörleri daha sonra emisyonları tahmin etmek için bu faaliyet verilerine uygulanır. Bu kategorideki yaygın bir yaklaşım, gemi hareketleri hakkında gerçek zamanlı bilgi sağlayan Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) verilerinin kullanılmasıdır. Bu konudaki çalışmaları incelediğimizde Gizem Kodak [3], gemi emisyonları üzerine yapılan akademik araştırmalarda AIS verilerinin kullanımını incelemiştir. Makalede gemi kaynaklı emisyonların hesaplanmasında AIS verileri kullanımını kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş olup gelişimi tartışılmıştır. Woo ve Im [4] Busan Limanındaki gemi emisyonlarının mekânsal dağılımını tahmin ve analiz etmişlerdir. Çalışma, 2019 yılı için CO₂, CO, NO_x, SO_x ve PM emisyonlarını hesaplamak üzere AIS verilerini kullanarak aşağıdan yukarıya yöntemle Kuzey Limanı'na geçiş yolunda yoğunlaşan önemli emisyonları vurgulamakta ve kıyı bölgelerinde yaşayan insanların sağlığını korumak için gemi hızı düzenlemesinin önemini altını çizmektedir. Ten vd. [5] çalışmalarında, AIS verilerini kullanarak Malakka Boğazı ve Singapur'daki deniz emisyonlarının derinlemesine bir analizini sunmuşlardır. Aşağıdan yukarıya yöntemini kullanarak CO, metan dışı organik bileşikler, partikül madde ve siyah karbon gibi kirleticilere odaklanılmıştır. Bojic vd. [6] ayrıntılı AIS

verilerini kullanarak liman alanlarındaki gemi emisyonlarını tahmin etmek için aşağıdan yukarıya, enerji tabanlı bir yöntem sunmuşlardır. Split Limanı'nda faaliyet gösteren farklı gemi türleri için CO₂, metan (CH₄), SO_x, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, metan olmayan uçucu organik bileşenler (NMVOC) ve CO emisyonlarını hesaplamak için kapsamlı bir model uygulamışlardır. Chen ve Yang [7] AIS tabanlı gemi emisyon tahminlerindeki ana belirsizlik kaynaklarını belirlemek için 29 makalenin sistematik bir incelemesini yapmışlardır. Çalışma, gemi emisyon envanterlerinin doğruluğunu artırmak için veri güvenilirliğini artırmayı, makine yükü hesaplama formüllerini standartlaştırmayı ve daha kapsamlı yerel emisyon ölçümleri yapmayı önermektedir. Toz vd. [8] 2018 yılında İzmir Körfezi'ndeki gemilerden kaynaklanan emisyonları (SO₂, NO_x, CO₂, PM₁₀ ve Hidrokarbonlar (HC)) hesaplamışlardır. Çalışmada ayrıntılı gemi faaliyeti analizi için AIS verilerini içeren aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanılmaktadır. Huang vd. [9] 2018 yılına ait AIS verilerini kullanarak orta Yangtze Nehri'nde çalışan gemiler için kapsamlı bir yıllık emisyon envanteri geliştirmişlerdir. Çalışmada eksik güç verilerine sahip gemilerin emisyonlarını tahmin etmek için dokuz ana makine gücü regresyon modeli kullanılmış ve emisyonların hava kalitesi etkisi değerlendirilmiştir. Wang vd. [10] AIS verilerini kullanarak gemi seyir durumlarını ve etkileşimlerini tanımak için yeni bir algoritma önermektedir. Kesin çevresel etki değerlendirmeleri için önemli olan gemi etkileşim davranışını bütünleştirerek karbon emisyonu hesaplamalarının doğruluğunu ve verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Çalışma, emisyonları ısı haritası olarak görüntülemek için görselleştirme sistemi sunmakta ve emisyon dağılımının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Boren vd. [11] konteyner gemilerinin yakıt tüketimi ve emisyonları üzerinde düşük hızda seyir, hava durumu ve rota optimizasyonun etkisini araştırmışlardır. Çalışma, emisyon hesaplamalarında yaygın olarak kullanılan kübik hız-güç ilişkisini eleştirel bir bakış açısıyla değerlendirmekte ve düşük hızda seyrin faydalarını sorgulamaktadır. Xiao vd. [12] AIS verilerini ve gemi trafiği emisyon tahmin modelini (STEAM2) kullanarak farklı gemi türlerinden kaynaklanan emisyonları dinamik yöntem altında analiz etmişlerdir. Emisyon Kontrol Alanı (ECA) politikalarının emisyonlar üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Bunların dışında da literatürde emisyon hesabında AIS verilerinden yararlanan birçok çalışma bulunmaktadır [13] [14] [15] [16]. Ayrıca literatürde AIS verilerini kullanmayan aşağıdan-yukarıya faaliyete dayalı yöntem kullanılan çok sayıda çalışma da mevcuttur [17] [18] [19] [20] [21] [22].

Ekmekçioğlu vd. [23] Türkiye'nin bir yıllık periyotta 4 büyük limanını ziyaret eden konteyner gemilerinden kaynaklanan NO_x, SO₂, CO₂, uçucu organik bileşikler (VOC), PM ve CO emisyonlarını aşağıdan yukarıya yöntemler [24] [25] kullanılarak hesaplamışlardır. Çalışmada regresyon analizi yapılmış ve konteyner gemileri için gros tonaja (GRT) dayalı farklı operasyonel modlar için emisyon tahminleri sağlayarak yeşil liman konseptine katkıda bulunulmuştur.

Yakıt tüketimine dayalı yöntemler genelde yukarıdan aşağıya yöntem olarak nitelendirilse de hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarıya bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Toplam yakıt satışları veya tüketim istatistiklerine dayalı olarak tüm bir filo veya denizcilik sektörü için emisyonların tahmin edilmesi gibi daha büyük bir ölçüğe uygulandığında, yukarıdan aşağıya yöntemle uyumludur. Belirli yakıt tüketim verilerine dayalı olarak tek bir geminin emisyonlarını hesaplamak için kullanıldığında, aşağıdan yukarıya bir yöntem haline gelir. Bu yöntemler emisyonları, gemiler tarafından tüketilen yakıt miktarına dayalı olarak tahmin eder. Farklı yakıt türleri için emisyon faktörleri ile birlikte kullanılan yakıt türü ve tüketim oranı hakkında doğru verilere ihtiyaç duyarlar. Tüketilen yakıt miktarını atmosfere salınan kirletici miktarıyla ilişkilendiren emisyon faktörlerini kullanırlar. Bu çalışmalardan birinde Zhou vd. [26] Çin'in Nanjing kentinde kentsel yolcu taşımacılığında kaynaklanan karbon emisyonlarını incelemiştir. Yukarıdan aşağıya bir yaklaşım kullanan çalışma, 2014'ten 2019'a kadar olan emisyonları analiz etmekte ve 2030 için gelecek senaryolarını araştırmaktadır. Çalışmada emisyon azaltma hedeflerine ulaşmak için elektrikli araçların oranının artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Garcia vd. [27] 2020 yılında Meksika Veracruz Limanı'ndaki kükürt dioksit emisyonlarını ve yakıt tüketimini tahmin etmek için yukarıdan aşağı yöntemlerini değerlendirmektedir. Bu bağlamda en uygun olanı bulmak için yedi farklı yöntemi incelemiştir. Çalışma, yük faktörü, makine gücü ve gemi türüne göre yakıt tüketimi gibi faktörleri dikkate alarak bu yöntemlerin uygulanabilirliğine ve doğruluğuna odaklanmakta ve liman emisyonlarının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Ampirik yöntemler, sensörler ve diğer izleme ekipmanları kullanılarak gemilerden kaynaklanan emisyonların doğrudan ölçülmesini içerir. Bu yaklaşım en doğru emisyon verilerini sağlar ancak uygulanması daha yoğun kaynak gerektirdiğinden daha maliyetli ve lojistik açıdan zor olabilmektedir.

Peng vd. çalışmalarında [28] taşınabilir emisyon ölçüm sistemi (PEMS) kullanarak yedi gemi üzerinde kapsamlı emisyon ölçümleri yapmışlardır. CO, HC, NO_x ve PM için emisyon faktörlerini (EF) ayrıntılı olarak ortaya koyan çalışma, seyir sırasında manevraya kıyasla daha yüksek emisyonlar olduğunu göstermektedir. Zhou vd. [29] gemi emisyonlarının tüm hava koşullarında gerçek zamanlı olarak izlenmesine yönelik yenilikçi bir sistemi tanıtmaktadırlar. Bu sistem, taşınabilir egzoz izleme cihazlarını, modern yazılım teknolojilerini kullanan bir veri izleme platformunu ve veri analizi için bir bulut sunucusunu entegre ederek, deniz yasalarının uygulanma verimliliğini artırmayı ve emisyon kontrol alanlarının oluşturulmasını desteklemeyi amaçlamaktadır. Mocherino vd. [30] Napoli Limanı'ndaki gemi emisyon tahminlerini doğrulamak için AIS verileriyle deneysel bir yaklaşımı entegre etmektedir. Çalışmada gemi üzerinde ölçülen kirletici konsantrasyonları ile tahmin yöntemleri karşılaştırılmış, özellikle SO₂ ve NO_x için AIS tabanlı tahminlerin etkinliğinin altı çizilmiştir. Deng vd. [31] gemilerden kaynaklanan SO₂ emisyonlarını izlemek için dağınık bir mini ölçüm sensörü ile donatılmış yeni, düşük maliyetli ve verimli bir insansız hava aracı (İHA) sistemi sunmaktadır. Bu sistem, ECA bölgelerinde yakıt kükürt içeriği standartlarının ihlallerinin tespit edilmesini sağlayarak deniz hukuku uygulama verimliliğini artırmayı ve gemi kirliliğini azaltmayı amaçlamaktadır. Çalışma, Yangtze Nehri'nde yapılan kapsamlı testlerle sistemin etkinliğini ortaya koymakta, SO₂ ölçümlerinin doğruluğunu ve sistemin uyumsuz gemileri tespit etme kabiliyetini doğrulamaktadır.

Emisyon hesaplama yöntemlerini karşılaştıran çalışmalardan Ekmekçioğlu vd.'nin [32] çalışması gemi emisyonlarının tahmin edilmesine yönelik yakıt bazlı (yukarıdan aşağıya) ve faaliyet bazlı (aşağıdan yukarıya) yaklaşımları karşılaştıran kapsamlı bir analiz sunmaktadır. Çalışmada bir konteyner gemisinin 2019'daki 37 günlük seferi ayrıntılı bir vaka çalışması olarak değerlendirilmektedir. İki yöntem arasındaki tutarsızlıkları ortaya koyan çalışma, aynı zamanda emisyon modellerinde tutarlılık bulmaktadır. Ayrıca yakıt tüketimini azaltmak ve liman trafiğini optimize etmek gibi hassas önlemlerin deniz taşımacılığının çevresel etkisini azaltabileceğini öne sürmektedir. Topic vd. [33], çalışmalarında Gemi Emisyonları Değerlendirme (SEA) yöntemini sunmuşlardır. Bu yöntem, gemi emisyonlarını tahmin etmek için hem aşağıdan yukarıya hem de yukarıdan aşağıya yöntemlerin güçlü yönlerini birleştiren hibrit bir yaklaşımdır. Tichavska ve Tovar

[34] limanlardaki gemi emisyonlarının dış maliyetlerini hesaplamak için kullanılan metodolojileri kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarıya yaklaşımları eleştirel bir şekilde değerlendirmişler ve en etkili aşağıdan yukarıya yöntem olarak Etki Yolu Yaklaşımını (IPA) vurgulamışlardır.

Emisyonların ve hava kalitesi modellenmesi kullanılarak kirleticilerin yer seviye konsantrasyonlarının birlikte hesaplandığı çalışmalarda Ekmekçiöglü vd. [2] Türkiye'nin en büyük limanlarından olan Ambarlı ve Kocaeli'nde limanlarına gelen gemiler kaynaklı emisyonları ENTEC yöntemini [24] kullanarak hesaplamışlardır. Çalışmada AERMOD dağılım modellenmesi ile, PM_{10} , NO_x ve SO_2 'nin yer seviyesindeki konsantrasyonları nokta ve çizgi kaynağı kullanılarak hesaplanmıştır ve revize edilmiş emisyon faktörlerine ihtiyaç duyulduğu öne sürülmüştür. Kuzu vd. [35], Bandırma Limanı'ndaki PM_{10} , NO_x , SO_2 ve CO emisyonlarını aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanarak hesaplamakta ve bunların çevresel maliyetlerini tahmin etmektedir. Çalışmada ayrıca, bu emisyonların Bandırma ilçesi genelindeki dağılımını analiz etmek için AERMOD hava kalitesi modeli kullanılmıştır. Duran-Grados vd. [36], deniz trafiğinden kaynaklanan NO_x , SO_x ve $PM_{2.5}$ emisyonlarının yerel hava kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için Gemi Enerji ve Emisyon Modeli (SEMEM) ve California Puff hava kalitesi modeli (CALPUFF) kullanmışlardır. Çalışma, denizcilik emisyonlarının hava kirliliği seviyelerine katkısını değerlendirmekte, bölgedeki denizcilik faaliyetlerinin çevresel etkilerine ilişkin farkındalık oluşturmakta ve potansiyel azaltma stratejilerine rehberlik etmektedir. Garbatov ve Georgiev [37], demir atarak liman sırası bekleyen gemilerden kaynaklanan kirlilik konsantrasyonunu tahmin etmek için değişken bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, gauss dağılım modeli kullanılarak liman yakınındaki belirli alıcılardaki hava kirliliği konsantrasyonları değerlendirilmiş ve karar vermeye yardımcı olarak limanların yakınındaki hava kalitesi yönetimini iyileştirmeyi amaçlanmıştır. Lanso vd. [38] yolcu gemisi endüstrisinin Kopenhag limanındaki hava kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Makine verilerini ve NO_x emisyon faktörlerini içeren 2018 yılı için mekânsal-zamansal bir emisyon envanteri geliştirmişlerdir. Gauss hüzme modeli olan Yerleşim Planı Operasyonel Meteorolojisi (OML-Multi) atmosferik dağılım modelini uygulamışlardır. Merico vd. [39], çalışmalarında denizcilik emisyonlarının İtalyan limanlarındaki hava kalitesi üzerindeki etkilerine ilişkin kapsamlı bir inceleme sunmuşlardır. Çalışmada

denizcilik faaliyetlerinin özellikle partikül madde ve gaz kirleticiler (nitrojen ve sülfür oksitler) açısından yerel hava kirliliğine önemli katkılarının altı çizilmiştir. Mensink ve Kallos [40] liman bölgelerindeki NO_x, SO_x, PM_{2.5} ve CO₂ gibi kirleticilerin dağılımını ve etkisini analiz etmek için çeşitli modelleme teknikleri kullanmışlardır. Araştırma, denizcilik faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonların genel hava kalitesini ne ölçüde etkilediğini anlamayı ve yoğun nüfuslu kıyı bölgelerinde gemicilik faaliyetlerinin yarattığı çevresel zorluklara ilişkin farkındalık sağlamayı amaçlamaktadır. Gan vd. [41] Gauss Puff modeli kullanarak Çin'in Shenzhen limanında gemi egzoz gazlarının yayılımını incelemişlerdir. Çalışma, aşağıdan yukarıya bir yaklaşımla emisyonları tahmin etmek için Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) verilerini kullanmıştır.

Literatürde İstanbul Boğazı ile ilgili yapılan çalışmalar da bulunmaktadır. Aydın Tokuşlu [42], meteorolojik faktörlerin (rüzgar hızı, sıcaklık, bağıl nem, basınç, yağış) İstanbul Boğazı'ndaki gemi emisyonlarının (NO_x, SO_x, PM) dağılımına etkisini analiz etmektedir. Çalışmada aşamalı çoklu regresyon ve korelasyon analizi kullanılarak, bu emisyonlar ile meteorolojik koşullar arasında önemli ilişkiler bulunmuş ve hava durumunun kirleticilerin dağılımında ve etkisinde önemli bir rol oynadığı öne sürülmüştür. Tokuşlu ve Burak [43] 2015 yılında İstanbul Boğazı'ndaki transit gemilerden kaynaklanan emisyonları hesaplamak için Carlo Trozzi ve Rita Vaccaro tarafından sunulan ayrıntılı bir analiz yöntemini [44] [45] [46] kullanmışlardır. NO_x, CO, SO_x, CO₂, PM ve VOC gibi kirleticiler de dahil olmak üzere kapsamlı bir emisyon envanteri sunmuşlardır. Bayırhan vd. [47] emisyon hesaplamaları için aşağıdan yukarıya yaklaşımını kullanmaktadır. Önemli deniz trafiğini göz önünde bulundurarak İstanbul Boğazı'ndaki gemi kaynaklı egzoz emisyonlarına odaklanmışlardır. Çalışma, gerçek gemi hareketleri ve makine bilgilerine dayanarak emisyonları hesaplamakta ve emisyonları ölçmek için matematiksel formüller kullanmaktadır. Kesgin ve Vardar [48] Çanakkale ve İstanbul Boğazlarından transit geçen gemilerin ve iç hatlarda çalışan yolcu gemilerinin NO_x, CO, CO₂, VOC ve PM emisyonlarını Trozzi v Vaccaro [44] tarafından geliştirilen yöntemle tahmin etmişlerdir. Çelen vd. [49] İstanbul atmosferindeki inorganik kirletici konsantrasyonlarını analiz etmişlerdir. Çalışmada ağır metaller ile sülfat, azot oksitler, karbon monoksit ve ozon gibi gazlara odaklanılarak 2017 ve 2018 yıllarına ait hava kalitesi verileri

değerlendirilmiştir. Çalışma, kirletici konsantrasyonlarındaki önemli mevsimsel ve lokal değişimleri ortaya koyarak kentsel faaliyetlerin ve COVID-19 pandemisinin hava kalitesi üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, yoğun nüfusun yaşadığı İstanbul Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerden kaynaklanan emisyonları hesaplayarak ve hava kalitesi dağılımı modellemesi uygulayarak gemi emisyonlarının bölgedeki hava kalitesine etkisini analiz etmektir. Ayrıca 2020 yılında yürürlüğe giren yönetmeliklerin zorunlu kıldığı deniz yakıtlarında düşük kükürtlü yakıt kullanımının hava kalitesine etkisinin incelenmesidir [50].

Çalışma iki aşamalı bir yöntem kullanmaktadır: ilk olarak, NO_x , PM_{10} , CO ve SO_2 emisyonlarını sayısal olarak tahmin etmekte; ikinci olarak, bu kirleticilerin yer seviyesindeki konsantrasyonlarını hesaplamak için AERMOD dağılım modelini kullanmaktadır. Çalışma, sonuçları İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin hava kalitesi ölçüleriyle karşılaştırarak yöntemlerini doğrulamakta ve deniz trafiğinin hava kalitesini nasıl etkilediğine dair ayrıntılı bir değerlendirme sunmaktadır.

Genel olarak bu çalışma, gemi emisyonlarının etkisini azaltmak ve sürdürülebilir denizcilik uygulamalarını teşvik etmek için hedeflenen çevresel stratejilere duyulan ihtiyacı vurgulayarak politika ve düzenleyici çerçeveleri bilgilendirmeyi amaçlamaktadır.

1.3 Kirleticiler ve İlgili Kurallar

Çalışmada incelenen gemi kaynaklı emisyonlar NO_x , SO_2 , CO ve PM'dir. Bu bölümde bu kirleticiler ve ilgili regülasyonlar ile ilgili genel bilgilendirme yapılacaktır.

1.3.1 NO_x

Azot monoksit (NO) ve azot dioksiti (NO_2) kapsayan azot oksitler (NO_x) önemli atmosferik kirleticilerdir. Doğal olarak oluşmalarına rağmen, insan faaliyetleri, özellikle de yanma süreçleri, çevredeki konsantrasyonlarını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu faaliyetler arasında deniz taşımacılığı, gemilerin ağırlıklı olarak makinelerde fosil yakıtları yakması yoluyla NO_x yayması ile kayda değer bir

katkıda bulunmaktadır.

Küresel ticaret için hayati önem taşıyan gemicilik endüstrisi aynı zamanda başta NO_x olmak üzere önemli bir hava kirliliği kaynağıdır. Bu emisyonlar, yüksek sıcaklıkların nitrojen ve oksijen arasındaki reaksiyonu kolaylaştırarak NO_x ürettiği gemi makinelerinde deniz dizel yakıtlarının yanmasından kaynaklanmaktadır. Gemi makinelerinin spesifik özellikleri ve deniz taşımacılığında yaygın olarak kullanılan ağır fuel oil (HFO), yüksek NO_x emisyon seviyelerine katkıda bulunur. NO_x oluşumunu etkileyen iki önemli parametre yanma odası sıcaklığı ve hava/yakıt oranıdır [51].

Gemi kaynaklı NO_x emisyonlarının hava kalitesi ve iklim üzerinde geniş kapsamlı etkileri vardır. Bu kirleticiler duman ve asit yağmuru oluşumuna katkıda bulunarak insanlarda solunum sorunlarına yol açmakta ve ekosisteme zarar vermektedir. Ayrıca NO_x , bir sera gazı ve kentsel dumanın bir bileşeni olan troposferik ozonu üreten atmosferik reaksiyonlarda önemli bir rol oynamakta, böylece küresel ısınmayı şiddetlendirmekte ve halk sağlığını etkilemektedir. Sağlık açısından NO_x , çeşitli solunum rahatsızlıkları ve kardiyovasküler hastalıklarla ilişkilidir. Gemi kaynaklı NO_x emisyonlarının ele alınması yalnızca çevresel sürdürülebilirlik için değil, aynı zamanda halk sağlığının korunması için de önemlidir [52].

NO_x emisyonlarını azaltmayı amaçlayan Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), Mayıs 2005'te yürürlüğe giren Gemilerden Kaynaklanan Kirliliğin Önlenmesi Uluslararası Sözleşmesi (MARPOL) Ek VI kapsamında düzenlemeler oluşturmuştur. Bu yönetmelikler gemi egzozlarından kaynaklanan NO_x emisyonlarına sınırlar getirmektedir. NO_x standartları Kademe I olarak ilk 2005 yılında yürürlüğe girmiştir. Daha sıkı olan Kademe II NO_x standartları, 1 Ocak 2011 tarihinde veya sonrasında inşa edilen gemilere monte edilen makineler için getirilmiştir. Kademe III NO_x standartları en katı standartlardır ve 1 Ocak 2016 tarihinde veya sonrasında inşa edilen ve belirlenmiş Emisyon Kontrol Alanlarında (ECA) çalışan gemiler için geçerlidir [53] [54].

1.3.2 PM

Partikül Madde (PM), havada bulunan katı partiküller ve sıvı damlacıkların bir karışımını ifade eder. Deniz taşımacılığı bağlamında PM emisyonları, insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir çevresel endişe

kaynağıdır. Gemiler, akaryakıtın, özellikle de kükürt ve diğer yabancı maddeler bakımından yüksek olan ağır akaryakıtların yakılması yoluyla PM konsantrasyonlarına katkıda bulunmaktadır.

Gemi dizel makinelerinde yanma odasında yeterli sıcaklık, oksijen ve zaman bulunmaz ise partikül maddeler egzozdan dışarı atılmaktadır [55]. Gemilerden kaynaklanan PM emisyonları temel olarak sülfatlar, nitratlar, siyah karbon ve organik bileşiklerden oluşmaktadır. Bileşim büyük ölçüde kullanılan yakıt türüne ve makinenin yanma verimliliğine bağlıdır. Tipik olarak gemi yakıtındaki sülfür içeriğinden oluşan sülfatlar, PM emisyonlarının önemli bir bölümünü oluşturur. Gemi emisyonlarındaki başlıca PM kaynakları arasında sülfür oranı yüksek olan ve sülfat partikülü oluşumuna yol açan HFO'nun yakılması yer almaktadır. Ayrıca, gemi makinelerindeki yüksek sıcaklıktaki yanma siyah karbon ve organik karbon partiküllerinin oluşumuna yol açabilir.

Gemi kaynaklı PM kaynağından uzun mesafeler kat ederek hem kıyı hem de iç kesimlerde geniş bölgelerdeki hava kalitesini etkileyebilir. Partiküller akciğerlerin derinliklerine nüfuz edebilir ve hatta kan dolaşımına girerek solunum ve kardiyovasküler hastalıklara, erken ölümlere ve diğer ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir [56]. Ayrıca, gemilerden kaynaklanan PM, kirleticilerin toprak ve su üzerinde birikmesi yoluyla çevrenin bozulmasına katkıda bulunarak biyolojik çeşitliliği ve ekosistem sağlığını etkiler.

Gemilerden kaynaklanan PM emisyonlarını kontrol altına alma çabaları arasında daha düşük sülfür içerikli daha temiz yakıtların benimsenmesi, makine verimliliğinde iyileştirmeler ve yıkayıcılar gibi egzoz gazı temizleme sistemlerinin kurulması yer almaktadır. IMO bu emisyonları MARPOL Ek VI kapsamında düzenlemekte ve deniz yakıtlarında izin verilen kükürt içeriğini aşamalı olarak azaltmayı ve böylece PM emisyonlarını doğrudan etkilemeyi amaçlamaktadır [57].

1.3.3 SO₂

Kükürt dioksit (SO₂), esas olarak kükürt içeren yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan önemli bir hava kirleticidir. Denizcilik sektöründe gemiler, büyük ölçüde yüksek kükürt oranına sahip akaryakıt kullanımını nedeniyle önemli miktarda SO₂ yaymaktadır. Gemi emisyonlarındaki birincil SO₂ kaynağı, kükürt içeren HFO'nun yakılmasıdır. Bu yakıtların yüksek sülfür içeriği önemli miktarda SO₂ emisyonuna

yol açmaktadır. Sülfür içeren yakıt yakıldığında SO₂ üretir ve bu da geminin egzozundan atmosfere salınır [58].

SO₂ emisyonları, asit yağmurlarına katkıda bulunan, sucul ve karasal ekosistemlere zarar veren ve insan sağlığını etkileyen önemli bir çevresel sorundur. SO₂ atmosfere girdikten sonra çeşitli kimyasal reaksiyonlara girerek partikül maddenin (PM) bir bileşeni olan sülfat aerosolleri gibi ikincil kirleticilere katkıda bulunabilir. Atmosferde SO₂ oksitlenerek sülfürik asit oluşturabilir, asit yağmurlarına katkıda bulunabilir veya diğer bileşiklerle reaksiyona girerek solunduğunda zararlı olan ve atmosferik partikül maddeye katkıda bulunan sülfat partikülleri oluşturabilir.

Deniz taşımacılığı önemli bir SO₂ emisyonu kaynağıdır. Gemilerden kaynaklanan SO₂ emisyonlarının çevre ve insan sağlığı üzerinde geniş kapsamlı etkileri vardır. Okyanusların ve su yollarının asitlenmesine yol açarak su yaşamına ve ekosisteme zarar verebilecek asit yağmurlarının oluşumuna katkıda bulunurlar. Ayrıca, SO₂ atmosferde reaksiyona girerek ince partikül madde oluşturabilir, insanlarda solunum sağlığını olumsuz etkileyebilir ve özellikle yoğun limanlara ve İstanbul Boğazı gibi nakliye hatlarına yakın nüfuslarda kalp ve akciğer hastalıklarına yol açabilir.

Gemilerden kaynaklanan SO₂ emisyonlarının azaltılmasında düzenleyici tedbirler etkili olmaktadır. IMO, MARPOL Ek VI aracılığıyla deniz yakıtlarındaki sülfür içeriğini sınırlayan sıkı düzenlemeler getirmiştir. ECA dışında %4,5 olarak belirlenen kükürt limiti 1 Ocak 2012 tarihinde %3,5'e düşürülmüştür. Son olarak 1 Ocak 2020'den itibaren geçerli olmak üzere yakıtta olması gereken maksimum kükürt içeriği %0,5'e düşürülmüştür [57] [59]. Belirlenmiş ECA'larda ise gemiler tarafından kullanılan akaryakıt için daha sıkı kükürt içeriği sınırları uygulanmaktadır. Kükürt emisyonu kontrol alanlarındaki (SECA) kükürt içeriği sınırı 2015 yılından beri %0,1'dir [60]. Gemiler ayrıca atmosfere salınmadan önce egzoz gazlarındaki sülfür bileşiklerini gidermek için egzoz gazı temizleme sistemleri kullanabilirler. Düşük kükürtlü yakıtlara veya diğer alternatif enerji kaynaklarına geçiş de SO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir.

1.3.4 CO

Karbon monoksit (CO), esas olarak karbon içeren yakıtların eksik yanmasından kaynaklanan renksiz, kokusuz bir gazdır. CO, gemi makineleri yakıtı verimsiz bir şekilde yaktığında, yakıttaki karbonun eksik oksidasyonuna yol açarak üretilir. Başka bir deyişle yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni oksijen ile yakıtın buluşmamasıdır. CO makinenin silindirlerindeki kötü yanma sonucunda, silindire alınan yakıtın bir kısmının, silindir içerisinde yanarken yetersiz oksijenden dolayı tam yanmaması ve yakıt molekülünün iki yerine bir oksijen ile birleşmesi ile ortaya çıkan zehirli gazdır. Emisyon seviyesi kullanılan yakıt türüne, makine teknolojisine ve yanma koşullarına bağlı olarak değişebilir. Yanma verimliliği, makine tasarımı, operasyonel uygulamalar ve yakıt kalitesi gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Kötü yanma verimliliği, partikül madde, sülfür oksitler ve nitrojen oksitler gibi diğer kirleticilerle birlikte daha yüksek CO emisyonlarına yol açabilir. Makine yükü, bakım durumu, yakıt türü ve yanma sıcaklığı gibi faktörlerin tümü üretilen CO miktarını etkileyebilir.

Denizcilik bağlamında gemiler, ağır fuel oil, dizel gibi fosil yakıtları yakan makinelerin çalışması yoluyla CO emisyonlarına katkıda bulunurlar. CO bir kez yayıldıktan sonra nispeten kısa bir atmosferik ömre sahiptir, ancak zararlı bir kirletici olan CO troposferik ozon oluşturmak için havada reaksiyona girebilir. CO diğer kirleticilere kıyasla çevreye doğrudan daha az zararlı olsa da atmosferdeki varlığının dolaylı etkileri olabilir. Yer seviyesinde ozon oluşumuna ve ardından ciddi sağlık riskleri oluşturan kentsel duman oluşumuna katkıda bulunur.

Gemilerden kaynaklanan CO emisyonlarının azaltılması, yanma verimliliğinin ve yakıt kalitesinin iyileştirilmesini içerir. Bu, düzenli makine bakımı, daha temiz yanan yakıtların kullanılması ve CO'yu daha az zararlı olan karbondioksit (CO₂) oksitleyebilen katalitik konvertörler gibi gelişmiş teknolojilerin uygulanmasıyla başarılabılır [61]. Ayrıca IMO kapsamındaki düzenlemeler, gemilerden kaynaklanan genel emisyonları azaltmayı amaçlamakta ve dolaylı olarak CO seviyelerini etkilemektedir. 2024 yılında Avrupa Birliği (AB) sularında yürürlüğe giren karbon vergileri de CO ve CO₂ salınımını azaltma girişimlerinin etkili bir başlangıcı olmuştur [62].

Bu bölümde, çalışma alanı tanıtılacak ve emisyon hesaplamaları ve dağılım modellemesi için kullanılan materyaller ve metodolojiler hakkında ayrıntılı bilgi verilecektir. Bölüm, İstanbul Boğazı'nın coğrafi ve çevresel özelliklerine, çalışmada dikkate alınan gemi türlerine ve analiz edilen belirli kirleticilere genel bir bakışı içermektedir. NO_x, SO₂, CO ve PM₁₀ emisyonlarının tahmininde kullanılan veri kaynakları ve araçları açıklanacaktır. Ayrıca, bu emisyonların yerel hava kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde AERMOD dağılım modelinin girdileri açıklanacaktır. Sekiz yıllık bir dönem boyunca İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerden kaynaklanan kirletici miktarlarını tahmin etmek için kullanılan sayısal yöntemler detaylandırılacaktır. Ayrıca, modelin yapılandırılması, kirleticilerin taşınım ve dağılımı da dahil olmak üzere AERMOD dağılım modelinin uygulanması açıklanacaktır.

2.1 Çalışma Alanı

İstanbul Boğazı, İstanbul'u Avrupa ve Asya yakalarına ayırarak Karadeniz'i Marmara Denizi'ne ve Çanakkale Boğazı üzerinden Ege ve Akdeniz'e bağlamaktadır. İstanbul Boğazı, önemli miktarda deniz trafiğine ev sahipliği yapan, dünyanın en işlek su yollarından biridir. Bu önemli geçit, yüzyıllar boyunca imparatorlukların kaderlerini şekillendirerek ve küresel ticareti kolaylaştırarak bölgede çok önemli bir rol oynamıştır. İstanbul Boğazı, Bizans, Roma ve Osmanlı medeniyetleri için stratejik bir su yolu olarak hizmet vererek imparatorlukların yükselişine ve çöküşüne tanıklık etmiştir. Kıyıları Ayasofya, Topkapı Sarayı ve Rumeli Hisarı gibi mimari harikalarla doludur ve her biri Boğaz'ın ördüğü zengin tarih dokusunun birer kanıtıdır. Bu coğrafi ve stratejik konum, Karadeniz'den Akdeniz'e ve ötesine geçişe izin vermektedir ve deniz taşımacılığı için son derece önemlidir. Boğaz yaklaşık 31 km uzunluğunda olup, genişliği en dar noktasında 750 metre ile en geniş noktasında 3,7 km arasında değişmektedir. Boğazın deniz yüzeyinden 36,5 metre ile 124 metre arasında değişen derinliği, büyük gemilerin geçişini kolaylaştırırken farklı akıntılar ve su akış modelleri yaratmaktadır. [63]

Boğaz'ın hem Avrupa hem de Asya kıyılarında kentsel yerleşimler yer almakta ve bu da Boğaz'ın dinamik manzarasına katkıda bulunmaktadır. Boğaz'ın kıyıları yoğun bir nüfusa sahiptir ve İstanbul'un metropol nüfusu her iki kıyıya da yayılmaktadır; bu da Boğaz'ın kentsel gelişim ve çevre kalitesi üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır. Boğaz'ın stratejik konumu, Boğaziçi Köprüsü ve Fatih Sultan Mehmet Köprüsü gibi kıtalar arası ulaşımı kolaylaştırmanın yanı sıra mühendislik becerisinin de sembolü olan ikonik asma köprülerin inşa edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, Avrasya Tüneli kara araçları için bir su altı geçişi sunarak Boğaz'ın modern altyapıdaki rolünü ve trafik düzenleri ile emisyonlar üzerindeki etkisini daha da vurgulamaktadır. Şekil 2.1'de İstanbul Boğazı'nın bir görseli verilmiştir.



Şekil 2.1 İstanbul Boğazı [64]

Tarihi ve kültürel öneminin ötesinde İstanbul Boğazı, uluslararası deniz taşımacılığı için çok önemli bir güzergâh olarak hizmet vermekte, ticari malların taşınmasını kolaylaştırmakta ve ekonomik faaliyetleri teşvik etmektedir. Modern zamanlarda İstanbul Boğazı, malların Karadeniz ve Akdeniz arasındaki hareketini kolaylaştıran kilit bir deniz rotasına dönüşmüştür. Stratejik konumu onu dünyanın en işlek ve en önemli nakliye kanallarından biri haline getirmektedir. Ticari gemilerin bu dar geçitten akışı süreklilik arz etmekte, ekonomik canlılık getirmekte ancak aynı zamanda çevresel etkilere ilişkin endişeleri de artırmaktadır. İstanbul Boğazı, her yıl binlerce geminin geçtiği dünyanın en işlek su yollarından biridir. Ticari gemiler bu dar Boğaz'da seyrederek hem deniz güvenliği hem de çevrenin korunması

açısından risk yaratmaktadır. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın denizcilik istatistikleri veri tabanından [65] alınan İstanbul Boğazı yıllara göre gemi geçiş istatistik özeti Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 İstanbul Boğazı gemi geçiş istatistik özeti

Yıllar	Gemi Adedi	Toplam Gros Tonaj
2014	45.529	582.468.334
2015	43.544	565.216.784
2016	42.553	565.282.287
2017	42.978	599.324.748
2018	41.103	613.088.166
2019	41.112	638.892.062
2020	38.404	619.758.776
2021	38.551	631.920.375
2022	35.146	541.444.690
2023	39.000	621.638.378

Ticari gemiler için kritik bir geçit görevi gören İstanbul Boğazı gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonları açısından çevresel etkilerini anlama ve azaltma ihtiyacını güçlendirmektedir. Ayrıca hem ulusal düzeyde hava kalitesi hem de Boğaz'daki gemicilik faaliyetlerinin çevresel etkileri, emisyonlar ve bunların hava kalitesi üzerindeki etkilerine odaklanılarak mercek altına alınmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'nde (HKDYY) kirleticiler için limit değerleri belirlenmiştir [66].

Çalışmanın bu bölgedeki egzoz emisyonlarına odaklanması, Boğaz'ın yoğun trafiği ve kentsel yakınlığı göz önüne alındığında son derece önemlidir ve bu da onu hava kalitesi yönetimi ve politika geliştirme için kritik bir alan haline getirmektedir. Kuru yük gemilerinden tankerlere kadar çeşitli tipte gemiler Boğaz'da seyrederken havaya kirletici maddeler salarak hava kalitesinin bozulmasına katkıda bulunurlar. SO₂, NO_x, CO ve PM gibi kirleticilerin yerel nüfus ve ekosistem üzerinde etkileri vardır. Yerleşim alanlarının Boğaz'a yakınlığı, halk sağlığı üzerindeki etkiyi daha da arttırmaktadır.

2.2 Emisyon Hesaplama

Denizcilik sektöründen kaynaklanan emisyonların doğru bir şekilde tahmin edilmesi, Kurulu Güç (P), Yük Faktörü (LF), Çalışma Saatleri ve Emisyon Faktörü (EF) gibi temel değişkenlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına ve uygulanmasına bağlıdır. Bu bölümde, gemi tipleri ve inşa yılları gibi gemiye özgü kritik bilgileri de içerecek şekilde, her bir bileşeni toplamak ve hesaplamak için kullanılan materyaller tanımlanacaktır.

İstanbul Boğazı'nda seyreden gemilerden kaynaklanan emisyonları hesaplayabilmek için Kıyı Emniyeti Genel Müdürlüğü'nden (KEGM) boğaz deniz trafiğine ilişkin veriler alınmıştır. Bu veri seti, egzoz emisyonlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve İstanbul Boğazı'ndaki trafik modellerinin analiz edilmesi için kritik öneme sahip çok çeşitli gemilere özgü bilgileri kapsamaktadır. Çalışma dönemi boyunca (2014-2021) Boğaz'da seyreden her bir gemi için gemi adı, IMO numarası, gemi tipi, genişlik (B), boy (L), Deadweight Tonaj (DWT), Gros Tonaj (GRT), üretim yılı ve draft (su çekimi) gibi ayrıntılı kayıtlar derlenmiştir. Veriler arasında her geminin Boğaz'a giriş noktası (kuzey/güney), kalış süresi ve geçiş hızı gibi operasyonel parametrelerine ilişkin veriler de bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan ve KEGM tarafından sağlanan gemilere ait bilgiler Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Kıyı Emniyeti'nden temin edilen veriler

Gemi Adı	Geçiş Yönü	Bayrağı	B	GRT	Draft	Boğazda Kalış Süresi
Imo No	Gemi Tipi	L	DWT	Yaş	Giriş Tarih/Saat	Ortalama Geçiş Hızı

Kurulu Güç, bir geminin ana ve yardımcı makinelerinin kilowatt (kW) veya fren beygir gücü (bhp) cinsinden ölçülen toplam nominal güç çıkışını ifade eder. Bu bilgi, makinenin yakıt tüketim kapasitesini ve dolayısıyla kirletici madde üretimini etkilediğinden potansiyel emisyonların tahmin edilmesi için çok önemlidir. Emisyon hesabında kullanılan 21.789 adet farklı geminin ana makine gücü ve devir sayısı, yardımcı makine gücü, vb. gibi kurulu güce ilişkin veriler, "IHS Markit [67]" ve "Marine Traffic [68]" veri tabanından temin edilmiştir. Bu veri seti, her bir geminin makinelerine ilişkin ayrıntıları içermekte ve Boğaz'dan geçen gemilerin emisyon potansiyelinin doğru bir şekilde değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır.

Tablo 2.3'te sunulan veriler bu iki veri tabanından temin edilmiştir. En yüksek doğruluğu sağlamak için, bu bilgiler KEGM'den alınan verilerle çapraz referanslandırılarak özelliklerin kapsamlı bir şekilde karşılaştırılması ve doğrulanması sağlanmıştır.

Tablo 2.3 Gemilerin teknik özellikleri

IMO No	Ana Makine Gücü (kW)
Gemi Adı	Ana Makine Devir Sayısı (rpm)
Yapım Yılı	Ana Makine Marka / Modeli
Bayrağı	Ana Makine Silindir Sayısı
L	Ana Makine Silindir Çapı
V	Ana Makine Strok Sayısı
GRT	Yardımcı Makine Sayısı
DWT	Yardımcı Makine Gücü (kW)

EPA tarafından Şubat 2020'de yayınlanan "Limanla İlgili ve Mal Taşımacılığı Mobil Kaynak Emisyon Envanterlerinin Tahmini için Metodolojiler" isimli yayın limanlar ve ilgili faaliyetler için emisyon envanterlerinin oluşturulmasına yönelik kapsamlı kılavuzlar sunmaktadır [25]. Bu çalışma okyanus aşırı seyir yapan gemilerden kaynaklanan hava kirliliği etkilerinin anlaşılması için bu tür envanterlerin önemini özetlemektedir. İstanbul Boğazı'ndaki deniz trafiğinden kaynaklanan emisyonların tahmin edilmesine yönelik metodoloji, EPA'nın yayınında yer alan kılavuz ilkelerden uyarlanmıştır [25]. EPA'nın bu çalışması doğruluk için yerel verilerin kullanımını vurgulamakta ve düzenleyici, gönüllü veya araştırma amaçları için gerekli olan farklı ayrıntı düzeylerine hitap etmek için çeşitli metodolojiler sunmaktadır. Liman idareleri, operatörler ve devlet kurumları da dahil olmak üzere paydaşlara emisyonların tahmin edilmesi, azaltım stratejilerinin belirlenmesi ve çevre yönetimi ve planlaması için bilinçli kararlar alınmasında yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

Emisyon hesaplamaları, İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerin türü, sayısı, Boğaz'da kalış süresi gibi yerel faaliyet verilerinin, denizcilik sektöründe yaygın

olan belirli makine türleri ve yakıt kullanım modellerine göre uyarlanmış emisyon faktörleri ile entegre edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, her bir gemi tipinden kaynaklanan emisyonların operasyonel özelliklere ve makine tipleri ile kullanılan yakıtla karşılık gelen emisyon faktörlerine dayalı olarak hesaplanmasını içermektedir. Her bir gemi için NO_x, PM₁₀, CO ve SO₂ emisyonları 2.1 numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır [25].

$$E = P \times A \times EF \times LF \quad (2.1)$$

Buradaki sembollerin anlamı şu şekildedir:

- E, bir gemiden kaynaklanan ve gram (g) cinsinden hesaplanan toplam emisyon
- P, kilowatt (kW) cinsinden makine çalışma gücü
- A, saat (h) cinsinden makine çalışma süresi
- EF, g/kWh cinsinden ölçülen, makine tarafından birim enerji çıkışı başına üretilen spesifik emisyon faktörü
- LF, makineler için yük faktörü

Yardımcı makine olarak dizel jeneratörler çalışma kapsamına alınmış, kazanlar kapsam dışında bırakılmıştır. Denklemden “P” ile gösterilen ana makine ve yardımcı makine güçleri tüm gemiler için ayrı ayrı IHS Markit [67] ve Marine Traffic [68] veri tabanlarından elde edilmiştir. Formülde bulunan makine çalışma süreleri (A) KEGM’den elde edilen verilerde bulunan her bir gemi için Boğaz geçiş süreleridir. Ana makine yük faktörleri (LF) kıyı emniyeti genel müdürlüğü verilerinde bulunan gemilerin Boğaz geçiş ortalama hızlarının gemilerin dizayn hızına bölünmesi ile elde edilmiştir. Boğaz geçişi sırasında iki dizel jeneratörün devrede olduğu ve %50 yükte kullanıldığı kabul edilmiş ve yük faktörleri bu kabule göre kullanılmıştır.

Denizcilik kaynakları için emisyon faktörleri (EF), çeşitli operasyonel koşullar altında gemiler tarafından yayılan kirleticilerin miktarını hesaplamada kullanılan ampirik verilerden, laboratuvar ölçümlerinden ve saha çalışmalarından elde edilmektedir. Bu faktörler tipik olarak makine gücünün kilowatt-saati (g/kWh) başına gram kirletici olarak ifade edilir ve yakılan yakıt miktarı ile üretilen kirleticiler arasındaki ilişkiyi yansıtır. Emisyon faktörleri, deniz trafiği de dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan kaynaklanan emisyonların hesaplanmasında

kullanılan çok önemli bileşenlerdir. Denizcilik emisyonlarının tahmini bağlamında, EPA'nın çalışmasında [25] açıklandığı gibi, emisyon faktörleri gemi tipi, makine tipi, yakıt tipi ve operasyonel durum dahil olmak üzere denizcilik sektörünün özelliklerine göre uyarlanır.

IMO'nun yakıt kullanımı ile ilgili kuralları gereği 2020 öncesi maksimum sülfür oranı %3,5 olan yakıt (HFO), 2020 sonrası ise maksimum sülfür oranı %0,5 yakıt (örneğin, MDO veya VLSFO) kullanması zorunludur [57], [59]. Bu sebeple çalışmada gemilerin ana makinelerinin kullandığı yakıt 2020 öncesi HFO, 2020 ve sonrası ise MDO olarak kabul edilmiştir.

Emisyon faktörlerinin seçiminde makineler devir sayılarına göre üç kategoride sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma Tablo 2.4'te verilmiştir. Tabloda SSD, düşük devirli; MSD, orta devirli; HSD, ise yüksek devirli makinedir. Tabloda rpm dakika başına devir sayısını ifade etmektedir. Bu kategoriler EPA'nın çalışmasından alınmıştır [25].

Tablo 2.4 Dizel makine hız/devir tanımları

Makine Tipi	Devir Sayısı	Strok Tipi
SSD	< 500 rpm	2
MSD	500 - 1400 rpm	4
HSD	> 1400 rpm	4

İstanbul Boğazı'nda seyreden deniz araçlarından kaynaklanan NO_x emisyonlarının hesabı, metodolojinin kritik bir bileşeni olan emisyon faktörlerinin uygulanmasını içerir. Bu faktörler, çeşitli gemi tiplerini, makine modellerini, yakıt türlerini ve operasyonel durumları dikkate alarak gemiler tarafından yayılan NO_x miktarını tahmin etmekte çok önemlidir. Hesaplamalarda kullanılan NO_x emisyon faktörleri makine grubuna ve tipine, gemi yapım yılına, kullanılan yakıt türüne göre kategorizasyonu Tablo 2.5'te gösterilmektedir.

Tablo 2.5 NO_x emisyon faktörleri (g/kWh)

Makine Grubu	Yakıt Tipi	Yapım Yılı	Makine Tipi	EF	Makine Grubu	Yakıt Tipi	Yapım Yılı	Makine Tipi	EF
Ana Makine	MDO	<1999	SSD	17	Yardımcı Makine	MDO	<1999	MSD	10,9
			MSD	13,2				HSD	13,8
		2000-2010	SSD	16			2000-2010	MSD	9,8
			MSD	12,2				HSD	12,2
		2011-2015	SSD	14,4			2011-2015	MSD	7,7
			MSD	10,5				HSD	10,5
		>2016	SSD	3,4			>2016	MSD	2
			MSD	2,6				HSD	2,6
	HFO	<1999	SSD	18,1	Yardımcı Makine	HFO	<1999	MSD	14,7
			MSD	14				HSD	11,6
		2000-2010	SSD	17			2000-2010	MSD	13
			MSD	13				HSD	104
		2011-2015	SSD	15,3			2011-2015	MSD	11,2
			MSD	11,2				HSD	8,2
		>2016	SSD	3,4			>2016	MSD	2
			MSD	2,6				HSD	2,6

Fren Spesifik Yakıt Tüketimidir (BSFC), deniz araçlarından kaynaklanan emisyonların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için önemli bir parametredir. BSFC bir geminin makinesinin yakıt verimliliğinin bir ölçüsü olup kilowatt-saat başına gram (g/kWh) olarak ifade edilir ve birim güç çıkışı başına makine tarafından tüketilen yakıt miktarını gösterir. BSFC çalışma sırasında yakılan yakıt miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Emisyon hesaplamasında kullanılan BSFC değerleri, makine tipi ve çalışma durumuna göre kategorize edilerek Tablo 2.6'da gösterilmektedir. Partiküler madde (PM₁₀) ve kükürt dioksit (SO₂) kirleticilerinin hesaplanmasında bu BSFC değerleri kullanılmıştır. [25]

Tablo 2.6 Fren spesifik yakıt tüketimi (BSFC) (g/kWh)

Makine Grubu	Yakıt Tipi	Makine Tipi	BSFC (g/kWh)
Ana Makine	MDO	SSD	185
		MSD	205
	HFO	SSD	195
		MSD	215
Yardımcı Makine	MDO	MSD	217
		HSD	217
	HFO	MSD	227
		HSD	227

PM₁₀ için emisyon faktörü hesabında kullanılan formül Denklem 2.2’de verilmiştir.

$$EF_{PM_{10}} = PM_{base} + (S_{act} \times BSFC \times FSC \times MWR) \quad (2.2)$$

Buradaki sembollerin anlamı şu şekildedir:

- $EF_{PM_{10}}$, g/kWh cinsinden PM₁₀ için spesifik emisyon faktörü
- PM_{base} , sıfır yakıt sülfürünü varsayan baz emisyon faktörüdür. PM_{base} değeri kullanılan yakıt türüne göre değişmektedir. MDO için 0,1545 g/kWh, FO için 0,5761 g/kWh olarak kullanılmıştır.
- S_{act} , gerçek yakıt sülfür seviyesini (ağırlık oranını) ifade etmektedir. Kükürt azaltımı ile ilgili IMO tarafından getirilen sınırlamalar nedeni ile S_{act} değeri 2020 öncesi 0,027, 2020 sonrası ise 0,005 olarak kullanılmıştır. ECA bölgesinde ise bu değer 0,001 olmalıdır.
- $BSFC$, fren spesifik yakıt tüketimini ifade etmektedir. Kullanılan yakıt türüne ve makine devir sayısına göre Tablo 2.6’dan kullanılmıştır.
- FSC , doğrudan sülfat PM’e dönüştürülen yakıttaki kükürt oranını ifade etmektedir. FSC değeri PM₁₀ için 0,02247 olarak kullanılmıştır.[25]
- MWR , sülfat PM’in sülfüre moleküler ağırlık oranını ifade etmektedir. MWR değeri PM₁₀ için 224/32 (7) olarak kullanılmıştır.[25]

SO₂ için emisyon faktörü hesabında kullanılan formül Denklem 2.3'te verilmiştir.

$$EF_{SO_2} = BSFC \times S_{act} \times FSC \times MWR \quad (2.3)$$

Buradaki sembollerin anlamı şu şekildedir:

- *BSFC*, Fren spesifik yakıt tüketimini ifade etmektedir. Kullanılan yakıt türüne ve makine devir sayısına göre Tablo 2.6'dan kullanılmıştır.
- *S_{act}*, gerçek yakıt sülfür seviyesini (ağırlık oranını) ifade etmektedir. Kükürt azaltımı ile ilgili IMO tarafından getirilen sınırlamalar nedeni ile *S_{act}* değeri 2020 öncesi 0,027, 2020 sonrası ise 0,005 olarak kullanılmıştır. ECA bölgesinde ise bu değer 0,001 olmalıdır.
- *FSC*, doğrudan sülfat PM'e dönüştürülen yakıttaki kükürt oranını ifade etmektedir. *FSC* değeri SO₂ için 0,97753 olarak kullanılmıştır. [25]
- *MWR*, sülfat PM'in sülfüre moleküler ağırlık oranını ifade etmektedir. *MWR* değeri SO₂ için 64/32 (2) olarak kullanılmıştır. [25]

Gemilerden kaynaklanan CO emisyonlarının hesaplanması, büyük ölçüde, tüketilen yakıt birimi başına veya çeşitli gemi türleri tarafından kat edilen mesafe başına üretilen CO miktarını ölçen emisyon faktörlerine dayanmaktadır. Tablo 2.7'de çalışmada kullanılan spesifik CO emisyon faktörleri makine grubu ve tipine göre listelenmiştir.

Tablo 2.7 CO emisyon faktörleri (g/kWh)

Makine Grubu	Makine Tipi	EF
Ana Makine	SSD	1,4
	MSD	1,1
Yardımcı Makine	MSD	1,1
	HSD	0,9

Denklemlerin uygulanmasıyla çalışma dönemi boyunca İstanbul Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerden kaynaklanan emisyonların kapsamlı bir envanteri oluşturulabilmiştir. Bu envanter, bu emisyonların Boğaz bölgesindeki yer seviyesi kirletici konsantrasyonları üzerindeki etkisini değerlendirmek için hava kalitesi dağılım modellemesi de dahil olmak üzere daha ileri analizler için temel oluşturmuştur.

2.3 Dispersiyon Modelleme

Hava kirliliği, yaygın ölümlere neden olma potansiyeli ile insan sağlığı ve çevre için önemli tehditler oluşturmaktadır. Bu sorun özellikle plansız kentleşme, hızlı nüfus artışı, köyden kente göç, iyi planlanmamış sanayi bölgeleri ve yetersiz trafik yönetimi gibi faktörlerin hava kalitesinin bozulmasına büyük ölçüde katkıda bulunduğu metropollerde daha da ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Hava kirliliğinin etkin kontrolü, tüm kirletici kaynaklarla ilgili çeşitli kurum ve kuruluşlar arasında iş birliğini ve kamu desteğini gerektirmektedir.

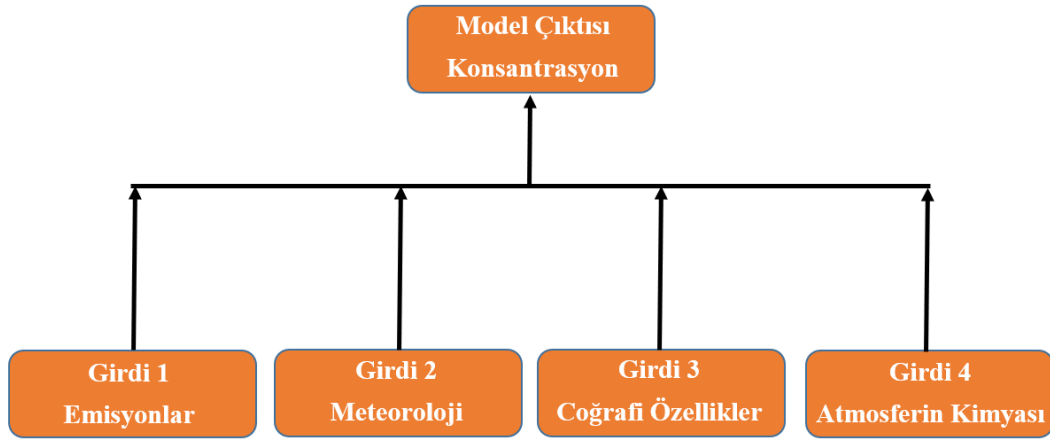
Hava kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla, diğer gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de bir dizi yasal düzenleme hayata geçirilmiştir. Bu düzenlemeler, sanayi, konutlarda ısınma ve ulaşım gibi kirlilik kaynaklarını kontrol altına almayı ve soluduğumuz havanın kalitesini güvence altına almayı amaçlamaktadır. Bu kirlilik kontrol önlemlerinin birincil amacı, hava kirliliğinin hem insan sağlığı hem de çevre üzerindeki zararlı etkilerini önlemek veya azaltmak için tasarlanmış hava kalitesi hedeflerine ulaşmaktır. Avrupa Birliği (AB) çevre mevzuatı ile uyumlu olan Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY) [66] ülkemizde hava kalitesi yönetimine ilişkin usul ve esasları belirlemektedir. Yönetmelik, hava kirliliğinin hem çevre hem de insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini önlemeyi veya azaltmayı amaçlayan net hava kalitesi hedefleri oluşturmak üzere tasarlanmıştır. Yönetmelikte, insan sağlığını ve çevreyi korumak amacıyla çalışmamızda incelenen SO₂, PM₁₀, CO ve NO_x de dahil 13 kirletici için sınır değerler belirlenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan model sonuçları ile limit değerler karşılaştırılacaktır. İnsan sağlığının korunmasını amaçlayan limit değerler Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8 HKDYY kirletici limit değerleri

Kirletici	Ortalama Süre	Limit Değer
SO ₂	Yıllık	20 µg/m ³
NO _x	Yıllık	30 µg/m ³
PM ₁₀	Yıllık	40 µg/m ³
CO	Maksimum günlük 8 saatlik ortalama	10.000 µg/m ³

Yönetmelik, hava kalitesinin değerlendirilmesine yönelik yöntem ve kriterleri ana hatlarıyla belirlemekte, halihazırda mevcut olan iyi hava kalitesini korumaya ve standartları karşılamayan alanlarda iyileştirmeye çalışmaktadır. Ayrıca Yönetmelik, hava kalitesi hakkında yeterli bilgi toplanmasını zorunlu kılmakta ve belirlenen uyarı eşikleri aracılığıyla halkın bilgilendirilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) önerdiği Gauss Plume AERMOD modeli kullanılmıştır [2] [69]. Bu bir kararlı durum dağılım modelidir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu model farklı arazi türlerine başarıyla uygulanabilmektedir. Herhangi bir kaynaktan atmosfere salınan kirletici gazın atmosferik ortamdaki genel davranışı Gauss dağılım modeli ile matematiksel olarak ifade edilebilir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi modelin girdileri emisyonlar, meteoroloji, coğrafi özellikler ve atmosferin kimyasıdır. Modelin çıktısı ise kirletici konsantrasyonlarıdır.



Şekil 2.2 Hava kalitesi modellerinin genel yapısı

Çalışmanın ilk kısmında hesaplanan emisyonlar bu kısımda kirleticilerin kütle girdisi olarak kullanılmıştır. Modeldeki emisyon kaynağı parametreleri; kirleticilerin emisyon debileri, kaynağın konumu, atık gazın sıcaklığı ve atık gazın atmosferdeki yükselmesidir (plume rise).

Modelin ikinci girdisi meteorolojik değişkenlerdir. Doğru ve ayrıntılı meteorolojik bilgiler hava kalitesinin modellenmesi için çok önemlidir. Meteorolojik veriler, kirleticilerin nasıl taşındığını, dağıldığını, seyreltildiğini ve atmosferden nasıl uzaklaştırıldığını doğrudan etkilediğinden hava kalitesi modelleri için temeldir. Meteorolojik parametreler; rüzgâr hızı ve yönü, sıcaklık, atmosferik stabilite, güneş

Radyosonde veri tabanı, bir meteoroloji balonu tarafından atmosfere taşınan meteorolojik araçlar olan radyosondeler tarafından toplanan atmosferik verilerin bir koleksiyonudur. Radyosondeler farklı irtifalarda sıcaklık, çığ noktası, basınç, rüzgâr hızı ve yönü gibi çeşitli atmosferik parametreleri ölçer. Toplanan veriler, hava koşullarının anlaşılması, tahmin ve iklim araştırmaları için önemli olan atmosferin dikey bir profilini sağlar [73]. Radyosonde verileri 40,9 Kuzey enlemi ve 29,15 Doğu boylamı koordinatlarında bulunan Kartal istasyonundan alınmıştır. Bu veriler rüzgâr yönü ve hızı, basınç yükseklik, hava sıcaklığı ve çığ noktası gibi verileri içermektedir. Şekil 2.4'te radyosonde verilerinin kullanıldığı Kartal istasyonu ve yer seviyesi ölçümlerinin kullanıldığı Sarıyer istasyonunun konumları birlikte gösterilmektedir [74].



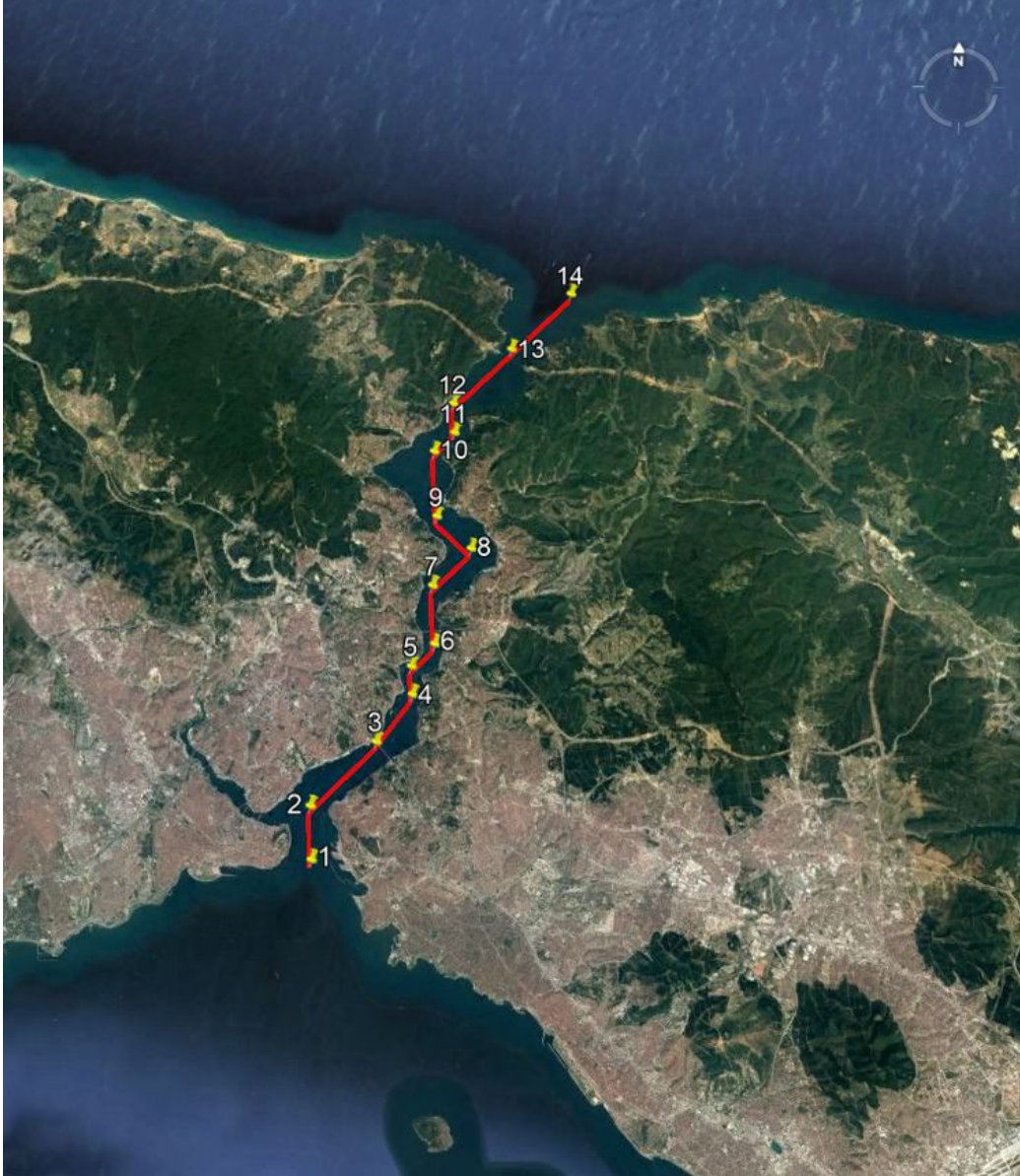
Şekil 2.4 Sarıyer ve Kartal ölçüm istasyonları

Üçüncü girdi ise yüzey topografyasıdır. Yüzey parametreleri; yüzey pürüzlülüğü, yükseklik, denizler veya kentsel alan ve hava kirleticilerin akışını ve dağılımını etkileyebilecek binaların veya diğer engellerin varlığı dahil olmak üzere kirleticilerin dağıldığı arazi hakkında bilgileri içerir. Arazi yüzeyinin fiziksel yerleşimi, hava akışını ve kirletici dağılım modellerini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu girdi 250 m x 250 m'lik gridlerle toplanmıştır. Yüzey haritasının grid kesişimi, kirletici konsantrasyonlarının tahmin edildiği modelin yer seviyesindeki reseptör noktalarıdır.

Dördüncü girdi olan atmosfer kimyası için parametreler; atmosferdeki kimyasal reaksiyonlar, kuru veya yaş birikim sayılabilir. Detaylı ve doğru meteorolojik ve topografik verilerin AERMOD gibi hava kalitesi modellerine dahil edilmesi gerçekçi simülasyonlar için hayati önem taşımaktadır. Bu veriler, atmosferdeki kirletici taşınımını yöneten fiziksel ve kimyasal süreçlerin anlaşılmasına yardımcı olur. Bu girdi verilerinin kalitesi, model tahminlerinin doğruluğunu önemli ölçüde etkiler ve mümkün olduğunca iyi doğrulanmış, yüksek çözünürlüklü ve sahaya özgü verilerin kullanılmasını gerekli kılar.

Önceki bölümde anlatıldığı şekilde oluşturulan emisyon envanterleri, kirleticilerin NO_x, PM, CO, SO₂ kirleticilerinin yer seviyesindeki konsantrasyonlarını ve İstanbul Boğazı bölgesindeki dağılımlarını değerlendirmek için gerçekleştirilen müteakip hava kalitesi dağılım modellemesi için temel verileri sağlamıştır. Metodolojinin uyarlanabilirliği ve kapsamlı yapısı, deniz trafiğinin İstanbul Boğazı'ndaki hava kalitesi üzerindeki çevresel etkisini değerlendirmek için sağlam bir çerçeve sağlamıştır.

Bu çalışmada alan kaynağı kullanılmıştır. İstanbul Boğazı 14 farklı noktaya bölünerek rota oluşturulmuştur. Gemilerin izlediği yol Şekil 2.5'te gösterilmiştir [74].



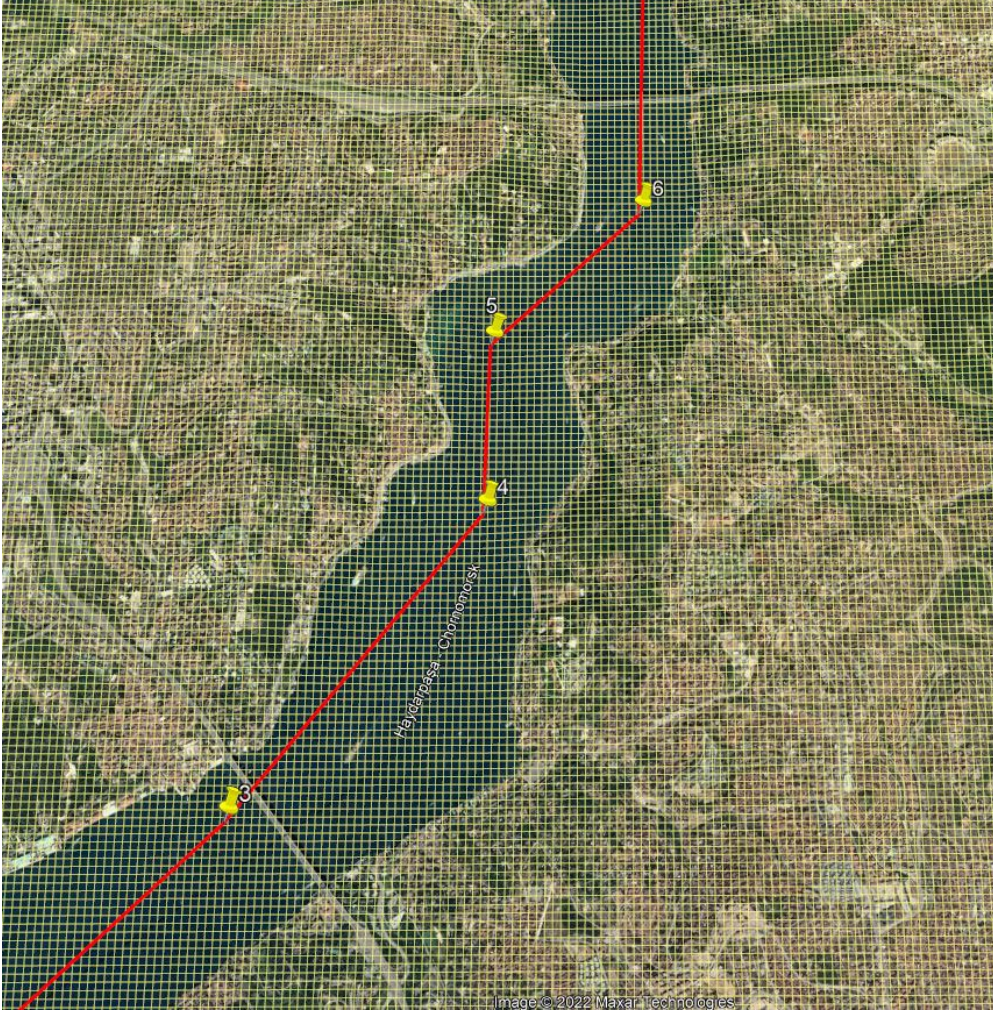
Şekil 2.5 Gemilerin örnek rotası

Çalışılan alan 50m X 50m gridlere bölünerek toplam 510 noktada emisyon konsantrasyonları hesaplanmıştır. Emisyonlar alan kaynak tipindedir. Oluşturulan model alanı Şekil 2.6'da, gridler ise Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Model alanı

Bu çalışmada, İstanbul Boğazı'ndan geçen gemilerden kaynaklanan emisyonların yerel hava kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için Amerikan Meteoroloji Derneği/Çevre Koruma Ajansı Düzenleyici Modeli (AERMOD) atmosferik dağılım modelleme sistemi kullanılmıştır. AERMOD, gezegensel sınır tabaka türbülans yapısına ve ölçeklendirme kavramlarına dayalı hava dağılımını içeren, çeşitli emisyon kaynaklarından gelen kirleticilerin kısa menzilli (50 km'ye kadar) dağılımını değerlendirmek için çok uygun hale getiren sabit durumlu bir tüy modelidir.



Şekil 2.7 Gridler

Atmosferik koşulları doğru bir şekilde modellemek için yüksek çözünürlüklü, sahaya özgü meteorolojik veriler kullanılmıştır. Bu veriler, AERMOD simülasyonları için gerekli olan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, sıcaklık ve atmosferik stabilite koşulları gibi girdileri sağlayan AERMET meteorolojik ön işlemcisi aracılığıyla işlenmiştir.

AERMOD modeli, çeşitli atmosferik ve mevsimsel koşullar altında kirleticilerin dağılımını simüle edecek şekilde yapılandırılmıştır. Modelleme alanı, Boğaz bölgesini ve gemi emisyonlarından etkilenmesi muhtemel çevre bölgeleri kapsayacak şekilde ayarlanmıştır. Alıcı konumları, konut, sanayi ve hassas bölgelerdeki konsantrasyon gradyanlarını yakalamak için stratejik olarak yerleştirilmiştir.

Model simülasyonları, kirleticilerin ayrıntılı mekânsal ve zamansal dağılımlarını sağlayarak deniz trafiğinden kaynaklanan hava kalitesi etkilerinin değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Sonuçlar, uyumluluğu değerlendirmek ve potansiyel sağlık riski alanlarını belirlemek için ilgili hava kalitesi standartları ve kılavuzlarıyla karşılaştırılmıştır.

Model doğrulaması, AERMOD tahminlerinin çalışma alanındaki mevcut ortam havası izleme verileriyle karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu adım, modelin yerel hava kalitesini ve gemi emisyonlarının etkilerini simüle etmede güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamıştır.



3.1 Emisyonlar

2014-2021 yılları arasında İstanbul Boğazı'ndan transit geçen toplamda 21.789 farklı geminin 331.027 hareketi olmuştur. Tablo 3.1'de çalışma süresince gemilerin Boğaz geçiş sayıları yıllara ve türlerine göre verilmiştir.

Tablo 3.1 Gemi türleri

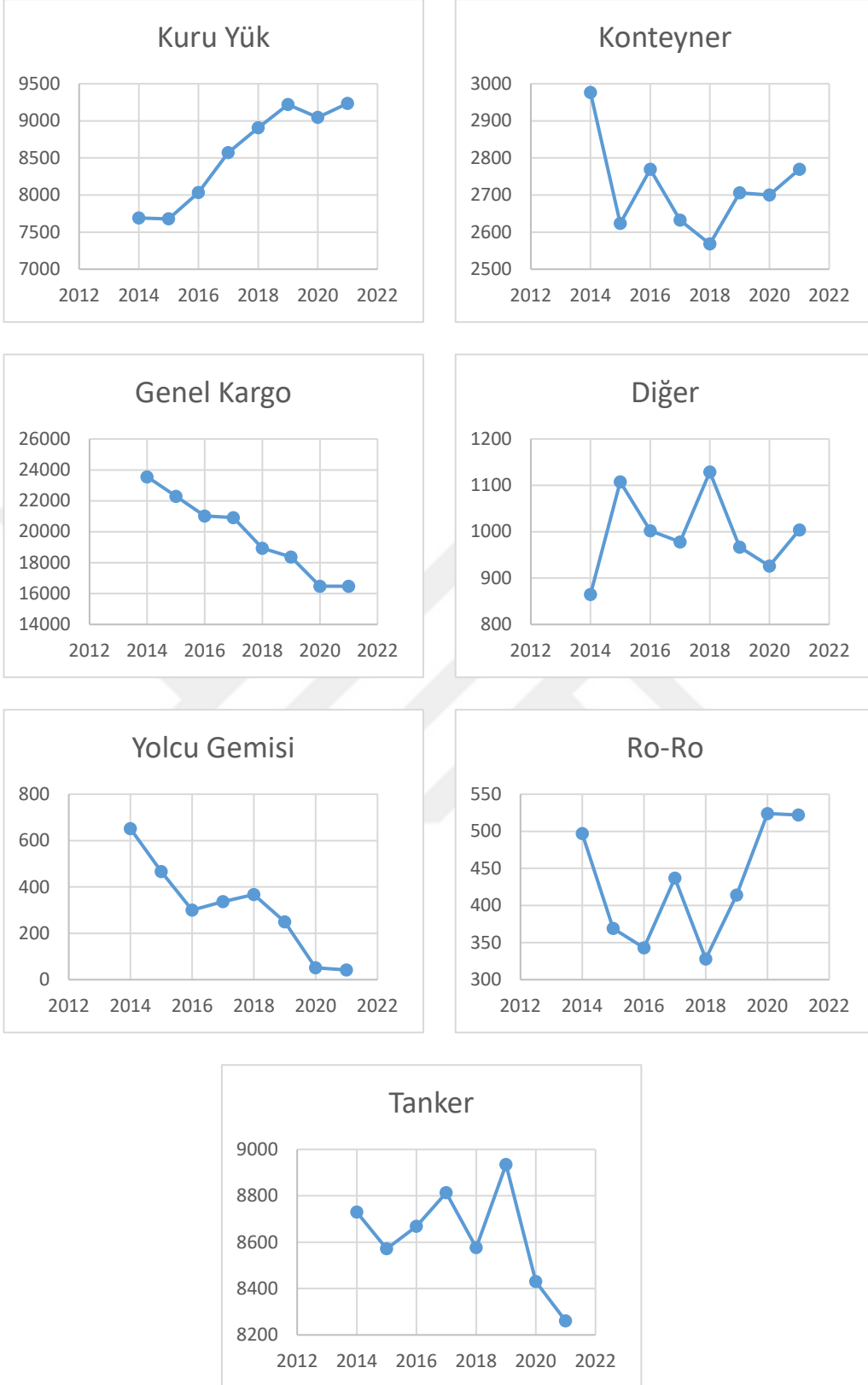
Yıl/ Tür	Kuru Yük	Konteyner	Genel Kargo	Diğer	Yolcu Gemisi	Ro-Ro	Tanker	Toplam
2014	7691	2976	23558	865	651	497	8730	44968
2015	7678	2623	22297	1108	466	369	8572	43113
2016	8032	2769	21021	1002	300	343	8668	42135
2017	8570	2632	20922	978	337	437	8813	42689
2018	8908	2568	18932	1129	367	328	8576	40808
2019	9220	2706	18364	967	250	414	8935	40856
2020	9045	2700	16478	926	51	524	8430	38154
2021	9235	2769	16472	1004	42	522	8260	38304
Toplam	68379	21743	158044	7979	2464	3434	68984	331027

Gemiler, kuru yük, konteyner, genel kargo, yolcu gemisi, ro-ro, tanker ve diğer olarak kategorize edilmiştir. Burada diğer kategorisi içerisindeki gemi türleri balıkçı gemileri, römorkörler, motor yatlar, tedarik gemileri, hayvan taşıyan gemiler, araştırma gemileri ve dalgıç gemileridir. Diğer kategorisi içinde bulunan gemilerde kazan veya yakıt ısıtma sistemleri bulunmadığından tüm yıllar için kullanılan yakıt MDO olarak kabul edilmiştir. Boğaz'dan geçiş yapan askeri gemiler çalışmada kapsam dışı tutulmuştur.

Yıllara bağlı olarak gemi türlerine göre Boğaz geçiş istatistikleri göz önünde bulundurulduğunda kuru yük gemilerinin sayıları yıllar içerisinde istikrarlı bir artış göstermiştir. Bu da tahıl, cevher veya kömür gibi dökme yüklerin deniz yoluyla yoğun bir şekilde taşındığına işaret etmektedir. Kademeli artış, bu tür ürünlere yönelik küresel talebin arttığına göstergesidir. Konteyner gemisi sayılarında inişli çıkışlı bir grafik vardır, ancak genel eğilim istikrarlıdır ve 2021'de 2014'e göre biraz daha düşük bir seviyede sona ermektedir. Bu durum, Boğaz üzerinden yapılan

konteyner ticaretinin nispeten sabit kaldığını göstermektedir. Genel kargo gemilerinde ise 2014 yılındaki yüksek geçiş sayısının ardından, gözle görülür bir düşüş eğilimi vardır. Bunun nedeni kargo taşımacılığı tercihlerindeki bir değişim, muhtemelen genel yüklerden özel yüklerin taşınmasına doğru bir hareket veya diğer makroekonomik faktörler olabilir. Diğer gemiler kategorisi, özel yük gemileri gibi standart kategorilere uymayan gemileri içerir. Farklı boyutlarda ve türlerde gemilerden oluştuğu için rakamlar oldukça değişkendir ve net bir eğilim göstermemektedir.

Özellikle 2019'dan 2021'e kadar, COVID-19 salgınının yolcu gemileri ticaretinin üzerindeki etkisini yansıtan önemli bir düşüş eğilimi vardır. Bu durum, seyahat kısıtlamaları ve güvenlik endişeleri nedeniyle seyahatlerin azalması yönündeki küresel eğilimlerle uyumludur. 2014'ten 2021'e kadar toplam Ro-Ro trafiği 3434 gemidir. Ro-Ro verilerinde öne çıkan husus, diğer gemi türlerindeki genel düşüş eğiliminin aksine 2020'deki artıştır; bu da muhtemelen pandemi sırasında değişen ekonomik talepler veya tedarik zinciri adaptasyonları nedeniyle bu gemiler tarafından tipik olarak taşınan malların ticaretinde bir esneklik veya bir kayma olduğunu göstermektedir. Ro-Ro sayıları yıllar boyunca net bir artış veya azalış eğilimi göstermemekte olup yolcu gemilerini önemli ölçüde etkileyen eğilimlerden daha az etkilenmiş görünmektedir. Bu durum, taşıdıkları yükün doğası gereği, kuru yük gemileri veya tankerler gibi diğer nakliye türlerini etkileyen dalgalanmalara karşı daha az hassas olmalarından kaynaklanıyor olabilir. Tanker gemilerinin verileri incelendiğinde trafiğinin yıllık dalgalanmalarla birlikte yıllar içinde nispeten istikrarlı bir seyir izlediği görülmektedir. Bu istikrar, genellikle tankerlerle taşınan petrol ve gaz gibi sıvı dökme yüklere yönelik istikrarlı talepten kaynaklanıyor olabilir. 2020 ve 2021'deki küçük düşüşler, COVID-19 salgını sırasında azalan endüstriyel faaliyetler ve seyahatler nedeniyle petrol ve gaza olan talebin azalmasıyla ilgili olabilir. Yukarıda analiz edilen gemi tiplerinin yıllara göre geçiş sayıları grafikleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Gemi tiplerinin yıllara yıllık geçiş sayıları

Tüm gemi geçiş sayıları göz önünde bulundurulduğunda en fazla gemi hareketi 2014 yılında gerçekleşmiş olup sonraki yıllarda bir azalma eğilimi göstermektedir. Bu tarihten sonra toplam rakamlar azalmış, 2020 ve 2021'de daha belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşe neden olarak yıllar içinde gemi boyutlarının büyümesi ve deniz ticaretinde büyük boyutlu gemilerin tercih edilmesi sebebiyle gemi sayılarının azalması sayılabilir. Ayrıca çalışmanın son yılları küresel salgınla aynı döneme denk gelmektedir ve salgının deniz trafiği üzerindeki olası etkisine işaret etmektedir.

Trafiğin büyük kısmını genel kargo gemileri oluşturmaktadır, bu da dökme olmayan ve konteynerize edilmemiş malların önemli bir kısmının bu Boğaz'dan geçtiğini göstermektedir. Tankerler de trafiğin önemli bir bölümünü temsil ederek Boğaz'ın petrol ve kimyasal madde taşımacılığı açısından önemini vurgulamaktadır. Son yıllarda, özellikle 2020 ve 2021 yıllarında toplam gemi sayısındaki genel düşüş eğilimi, COVID-19 salgınının küresel denizcilik faaliyetleri üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Son yıllarda yolcu gemilerindeki ciddi düşüş önemlidir ve pandemi sırasında yolcu seyahatlerindeki azalmayı göstermektedir.

Tablo 3.2'de gemi tiplerine göre ortalama makine güçleri ve yükleri, Boğaz geçiş süreleri ve dizayn hızları verilmiştir.

Tablo 3.2 Gemi türleri ve özellikleri

Tür / Özellikler	Ana Makine Gücü	Yardımcı Makine Gücü	V	T	Yük
Kuru Yük	7301	636	14	1,5	0,8
Konteyner	17794	1393	20	1,3	0,69
Genel Kargo	1984	230	12	1,8	0,83
Diğer	2725	418	13	1,7	0,8
Yolcu Gemisi	11089	1023	17	1,4	0,75
Ro-Ro	7845	756	17	1,4	0,7
Tanker	6785	635	13	1,4	0,78

Ana makine gücü her bir gemi türü için ana makinenin ortalama güç çıkışını kW cinsinden gösterir. Kuru yük gemileri ortalama 7301 kW ile orta düzeyde bir ana makine gücüne sahipken, konteyner gemileri ortalama 17794 kW ile en yüksek ana makine gücüne sahiptir. Bu yüksek güç daha büyük boyut ve daha yüksek hız

ihtiyacı nedeniyle gereklidir. Genel kargo gemileri en düşük ana makine gücüne sahiptir, bu da daha küçük olduklarını veya daha düşük hızlarda çalıştıklarını göstermektedir.

Yardımcı makine gücü, tipik olarak gemideki sistemlere güç sağlayan yardımcı jeneratörlerin ortalama güç çıkışıdır. Konteyner gemileri ortalama 1393 kW ile en yüksek yardımcı makine gücüne sahiptir, bu da konteyner gemilerinin soğutma ve diğer konteyner destek sistemleri için daha büyük güç talepleriyle ilişkilidir. Konteyner gemileri soğutuculu konteynerlar (reefer) da taşımaktadırlar, bu da ekstra güç ihtiyacı doğurmaktadır. Diğer gemi tipleri daha düşük yardımcı makine gücü değerlerine sahiptir.

Konteyner gemileri ortalama 20 knot ile en hızlı gemilerdir ve taşıdıkları mallar için daha hızlı teslimat sürelerine duyulan ihtiyacı yansıtırlar. Genel kargo gemileri en yavaş olanlardır ve ortalama hızları 12 knot olup operasyonel gereksinimleri ve kargo türleri için yeterlidir. Türk Boğazları ve Marmara Bölgesi Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü'ne göre İstanbul Boğazı'nda normal hız karaya göre 10 NM/saattir [75]. Bu hız, trafik kontrol istasyonlarına bilgi verilerek ve çarpışmalardan ve çevreye zararlı dalgalar yaratmaktan kaçınmak için aşılabilir.

Her bir gemi türünün Boğaz'dan geçiş ortalama süreleri incelendiğinde konteyner gemileri ortalama 1,3 saat ile en kısa geçiş süresine sahiptir ve bu da yüksek hızları ile uyumludur. Genel kargo gemileri 1,8 saat ile en uzun geçiş süresine sahiptir.

Yük, gemi ana makinesinin ortalama yük faktörünü temsil eder, burada %100 yük geminin ana makinesinin tam kapasitede çalıştığı anlamına gelir. Kuru yük gemileri ve diğer kategorisindeki gemiler 0,8 gibi yüksek yük faktörlerine sahiptir, bu da sık sık tam kapasiteye yakın seyir yaptıklarını gösterir. Konteyner gemileri ise ortalama 0,69 ile daha düşük bir yük faktörüne sahiptir, bu da daha düşük yakıt harcamı veya yüksek güçlü makineleri korumak isteğini göstermektedir.

Tablo 4.3, konteyner gemilerinin yüksek ana ve yardımcı makine güçleri ile hız ve verimlilik için tasarlandığını, ancak her zaman tam yükte çalışmadıklarını göstermektedir. Kuru yük gemileri ve tankerler, o kadar hızlı olmasalar da taşıdıkları mallara yönelik istikrarlı bir talep anlamına gelebilecek yüksek yük faktörleriyle çalışırlar. En düşük ana makine gücüne, en yavaş hıza ve en uzun transit süresine sahip olan genel kargo gemileri, kargolarının çeşitli doğası

nedeniyle yüksek güçlü makineleri de bulunmadığından hız kazanabilmek adına yüksek yükte seyir yapmaktadırlar. Yolcu gemileri ve Ro-Ro gemileri orta hızlara ve geçiş sürelerine sahiptir ve yük faktörleri çoğu zaman tam kapasitenin altında çalıştıklarını göstermektedir. Yapılan emisyon tahminleri için bu operasyonel parametreler, özellikle de makine güçleri ve yük faktörleri çok önemlidir.

Emisyonlar açısından, tablo belirli gemi trafiği türlerinde bir azalmaya karşılık geliyorsa, bu ilgili emisyonlarda potansiyel bir azalmaya işaret edebilir. Ancak bu durum, gemilerin yakıt verimliliği, yakıt türü ve operasyonel uygulamaları gibi faktörlere bağlı olacağından, emisyonlarda orantılı bir azalma anlamına gelmeyebilir. Örneğin, daha yeni gemiler, sefer sayısı azalsa bile sefer başına emisyonları azaltan daha temiz teknolojiler ve yakıtlar kullanıyor olabilir.

Tablo 3.3, İstanbul Boğazı'ndan geçen çeşitli gemi türleri için 2014'ten 2021'e kadar salınan yıllık emisyon miktarlarını göstermektedir. İncelenen kirleticiler NO_x, SO₂, CO ve PM₁₀ olup, bunlar deniz taşıtlarında kullanılan içten yanmalı makinelerin yaygın yanma ürünleridir.

Tablo 3.3 Gemi türlerine göre kirletici miktarları (ton/yıl)

NO _x	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Toplam
Kuru Yük	1222	1222	1222	1261	1283	1290	1283	1308	10091
Konteyner	811	667	663	665	670	671	713	706	5567
Genel Kargo	1051	995	944	970	883	907	797	762	7310
Diğer	47	69	50	52	62	47	47	50	423
Yolcu Gemisi	146	92	58	67	71	43	5	4	485
Ro-Ro	62	45	41	52	42	54	66	69	430
Tanker	1340	1311	1314	1333	1262	1287	1158	1109	10115

SO ₂	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Toplam
Kuru Yük	791	791	812	871	901	926	175	181	5448
Konteyner	530	438	438	445	444	450	87	88	2919
Genel Kargo	772	737	705	729	661	684	114	110	4513
Diğer	39	60	41	47	61	44	8	8	307
Yolcu Gemisi	112	66	40	47	49	29	1	1	346
Ro-Ro	41	30	27	37	31	38	9	10	223
Tanker	898	883	894	939	924	972	165	163	5837

Tablo 3.3 Gemi türlerine göre kirletici miktarları (ton/yıl) (devamı)

CO	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Toplam
Kuru Yük	103	104	106	114	118	121	124	128	918
Konteyner	68	56	56	57	58	58	61	61	475
Genel Kargo	87	82	78	81	74	76	68	66	611
Diğer	4	6	5	5	6	5	5	5	41
Yolcu Gemisi	12	7	5	5	6	3	0	0	39
Ro-Ro	5	4	3	4	4	5	5	6	36
Tanker	114	112	114	119	117	123	113	112	924

PM ₁₀	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Toplam
Kuru Yük	104	104	107	115	119	122	63	65	800
Konteyner	69	57	57	58	58	59	31	31	422
Genel Kargo	99	95	90	93	85	88	39	37	626
Diğer	4	6	4	4	6	4	1	1	30
Yolcu Gemisi	14	9	5	6	6	4	0	0	45
Ro-Ro	5	4	4	5	4	5	3	3	33
Tanker	118	116	117	123	121	128	58	58	839

Genel kargo gemileri, en fazla hareket sayısına sahip olmalarına rağmen, salınan emisyon miktarlarında lider değildir, bu da kuru yük gemileri ve tankerlere kıyasla daha küçük makine güçlerine sahip olmaları sebebiyledir. Tüm emisyonlarda üçüncü sıradadırlar. Konteyner gemileri, yüksek makine güçlerine rağmen tüm kirleticilerde orta sıradadır. Diğer gemiler, ro-ro ve yolcu gemileri tüm kirleticiler arasında en düşük emisyonlara sahiptir. Yolcu gemilerinin daha sonraki yıllarda önemli ölçüde daha düşük emisyonlara sahip olması azalan trafiklerine bağlanabilirken, ro-ro ve diğer gemiler operasyonel sayılarına rağmen sürekli olarak düşük emisyon seviyelerini korumaktadır.

Şekil 3.1 ve Tablo 3.3 birlikte incelendiğinde, trafik hacminin her zaman kirlilik seviyeleriyle doğrudan ilişkili olmadığı bir tablo ortaya çıkmaktadır. Genel kargo gemileri, sayılarına rağmen emisyon sıralamasında üstte yer almamaktadır, bu da daha düşük makine güçleri veya daha verimli ya da daha temiz operasyonlara işaret etmektedir. Tankerler ve kuru yük gemileri önemli ölçüde daha fazla kirletici yayarak çevresel etkilerinin ve muhtemelen daha düşük verimliliğin altını çizmektedir. Tüm gemi türlerinde 2020-2021 yıllarında SO₂ ve PM₁₀ emisyonlarındaki keskin düşüş, deniz yakıtlarındaki kükürt içeriğini sınırlayan yeni

düzenlemelerin yürürlüğe girmesinden kaynaklanmaktadır. Bu analiz, çevresel etkiyi anlamak ve emisyon azaltımına yönelik hedefli stratejiler geliştirmek için sadece trafik hacmine değil, aynı zamanda gemi tipi başına emisyon yoğunluğuna da bakmanın önemini vurgulamaktadır.

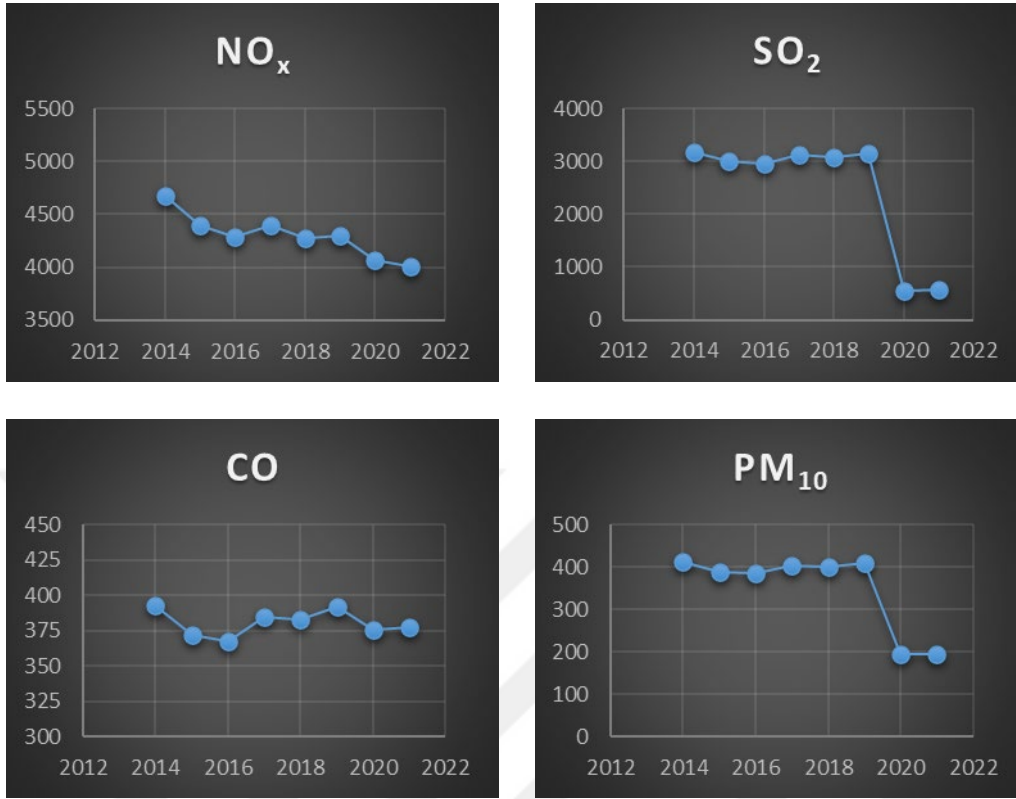
2014-2021 yılları arasında İstanbul Boğazı'nda 331.027 adet transit gemi hareketi gerçekleşmiştir. Bu gemilerden kaynaklanan NO_x, CO, PM₁₀, SO₂ miktarları ve gemi geçiş sayıları yıllara göre Tablo 3.4'te verilmektedir.

Tablo 3.4 Toplam emisyonlar (ton/yıl)

Yıl / Kirleticiler	NO _x	CO	PM ₁₀	SO ₂	Gemi Sayısı
2014	4679	393	413	3184	44968
2015	4401	372	390	3005	43113
2016	4291	367	385	2957	42135
2017	4400	385	404	3114	42689
2018	4273	383	400	3070	40808
2019	4299	392	410	3142	40856
2020	4069	376	196	559	38154
2021	4009	377	196	561	38304

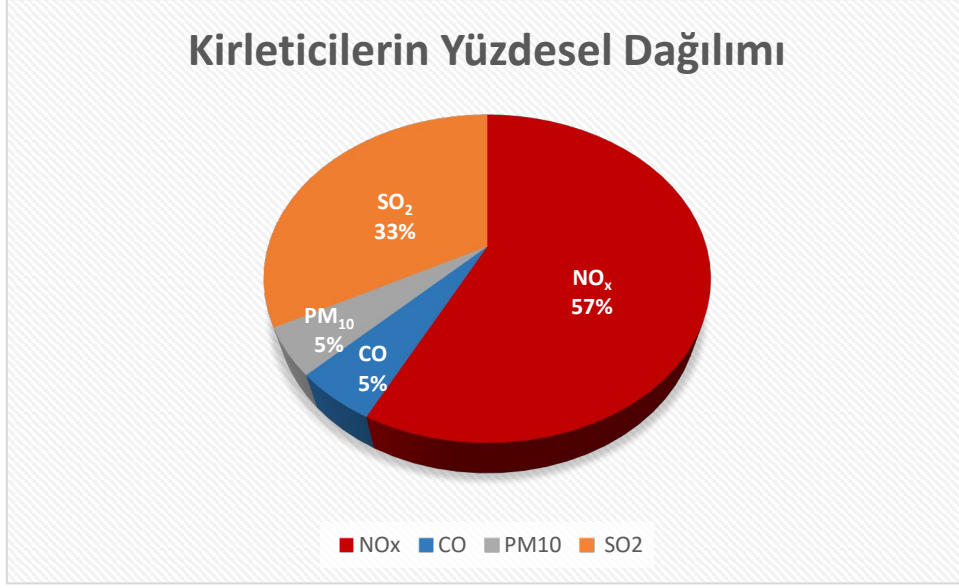
NO_x emisyonlarında yıllar içinde bir düşüş görülmektedir. 2014 yılında 4679 tondan başlayarak 2021 yılında 4009 tona gerilemiştir. Bu düşüş doğrusal değildir, emisyonlar dalgalanmakta ancak genel bir düşüş eğilimi göstermektedir. CO emisyonları nispeten istikrarlı olup 2014 yılında 393 tondan başlayıp yıllar boyunca küçük değişiklikler göstererek 2021 yılında 377 ton ile biraz daha düşük bir seviyede sona ermektedir. Değişimin küçük olması, bu kirleticinin için tutarlı emisyon seviyelerine işaret etmektedir. SO₂ emisyonları 2014 yılında 3184 ton iken 2020 yılına kadar istikrarlı bir seyir izlemiştir. 2020 ve 2021 yıllarında gözle görülür bir düşüş göstermiştir. PM₁₀ emisyonları 2014'te 413 tonla başlamakta, 2019'a kadar genellikle sabit kalmaktadır, 2020 ve 2021'de ani bir düşüşle neredeyse yarıya inerek 196 tonda kalmıştır. Bu önemli düşüş de SO₂'de olduğu gibi düşük sülfürlü yakıt kullanımına geçişi, yakıt kalitesindeki değişiklikleri yansıtmaktadır. Özellikle 2019'dan sonra emisyonlarda önemli bir düşüş görülmekte olup bu düşüşün nedeni IMO'nun 2020'de yürürlüğe giren ve küresel olarak daha düşük sülfürlü akaryakıt

kullanımını zorunlu kılan sülfür sınırlandırmasıdır. Şekil 3.2’de 2014-2021 yılları arasında NO_x, CO, PM₁₀, SO₂ emisyonlarının yıllara göre hesaplanan miktarları verilmiştir.



Şekil 3.2 Yıllara göre kirletici miktarları (ton)

Genel olarak sonuçlar NO_x, PM₁₀ ve SO₂ emisyonları için genel bir azalma eğilimine işaret etmektedir. Bu eğilim özellikle 2020'den itibaren SO₂ ve PM₁₀ emisyonları için daha da keskinleşmektedir. Azalan gemi sayısına rağmen CO emisyonları nispeten sabit kalmaktadır, bu da emisyon kontrollerindeki iyileştirmelerin veya düşük sülfürlü yakıt kullanımının CO emisyonlarını diğer kirleticiler kadar önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. PM₁₀ ve SO₂ emisyonlarındaki keskin düşüş, gemicilik sektörüne daha sıkı çevresel düzenlemelerin uygulandığı döneme denk gelmektedir ve bu da söz konusu önlemlerin etkinliğine işaret etmektedir. Özellikle 2020 ve 2021 yıllarında gemi geçişlerindeki düşüş eğilimi ve emisyonlardaki azalma, kısmen küresel nakliye ve ticarete aksamalara yol açan COVID-19 pandemisinin etkisinden kaynaklanmaktadır. 2014'ten 2021'e kadar 8 yıllık süre boyunca İstanbul Boğazı'ndaki gemilerden kaynaklanan toplam emisyon miktarlarına dayalı olarak kirleticilerin yüzdesel dağılımını gösteren grafiğini Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Kirleticilerin yüzdesel dağılımı (8 yıllık toplam)

NO_x, toplamın %57'sini oluşturarak gemilerden kaynaklanan emisyonların çoğunluğunu oluşturmaktadır. NO_x, genellikle içten yanmalı makinelerle ilişkili olarak hava kirliliğine önemli bir katkıda bulunmaktadır. NO_x emisyonları temel olarak deniz yakıtlarının yanmasıyla ortaya çıkar ve yüksek oranları, havadaki azot ve oksijenin çeşitli azot oksitleri oluşturmak üzere reaksiyona girdiği yüksek sıcaklıklarda çalışan gemi makinelerinin yoğun faaliyetini yansıtır. Hesaplamalarda %33'lük oran ile ikinci en büyük pay SO₂ emisyonudur. Bu kirlenici doğrudan gemi yakıtının sülfür içeriği ile ilgilidir. SO₂ emisyonları kullanılan yakıt türünün doğrudan bir sonucu olduğundan, veriler bu dönemde yüksek sülfürlü yakıtların önemli ölçüde kullanıldığını göstermektedir, ancak denizcilik yakıtlarındaki sülfür içeriğini azaltmaya yönelik son düzenlemelerin etkisi bu rakamı değiştirmiştir. Karbon monoksit emisyonları NO_x ve SO₂'ye kıyasla çok daha az yaygındır. CO tipik olarak yakıtın eksik yanması sonucu ortaya çıkar. Genel emisyon profilindeki nispeten küçük CO yüzdesi, gemilerdeki yanma süreçlerinin genellikle verimli olduğunu göstermektedir, çünkü CO genellikle yanma zayıf olduğunda önemli miktarlarda yayılır. CO emisyonları toplam emisyonların %5'ini oluşturmaktadır. Partikül madde emisyonları da toplam emisyonların %5'lik küçük bir kısmını oluştursa da yine de dikkate değerdir. Gemilerden kaynaklanan PM₁₀ emisyonları, yanma süreci ve makine bileşenlerinin aşınması ve yıpranması dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan gelebilir. PM₁₀'un emisyon profilindeki varlığı, daha küçük bir bölüm olmasına rağmen, partikül

maddenin gemicilik faaliyetinin tutarlı bir yan ürünü olduğunu göstermektedir.

Grafik, NO_x ve SO₂'nin İstanbul Boğazı'ndaki denizcilik faaliyetlerinden kaynaklanan baskın emisyonlar olduğunu göstermekte ve daha temiz yakıtlar veya egzozlar için arıtma sistemleri kullanmak gibi bu kirleticileri hedef alan stratejilere duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. CO ve PM₁₀'un nispeten daha küçük payları, genel emisyon profilinde daha az öne çıkmalarına rağmen, sağlık üzerindeki önemli etkileri nedeniyle bu emisyonların azaltılmasına yönelik çabaların göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Bu dağılım, denizcilik kaynaklarından kaynaklanan hava kirliliğini azaltmaya yönelik düzenleyici ve operasyonel çabalara rehberlik edebilir. Ayrıca 2024 yılında yürürlüğe giren AB karbon vergileri sebebiyle alternatif yakıtlara yönelim veya alınacak diğer önlemler ile karbon emisyonları da gelecekte azalacaktır.

Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) denizcilik yakıtlarının kükürt içeriğinin %3,5'ten %0,5'e düşürülmesini zorunlu kılan 2020 yönetmeliğinin İstanbul Boğazı'nda hava kalitesi üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Analizde iki senaryo ele alınmıştır: gemilerin yüksek kükürtlü fuel oil (HFO) kullanmaya devam ettiği bir senaryo ve düşük kükürtlü dizel yakıtına (MDO) geçtiği bir senaryo. Bu karşılaştırma, kükürt düzenlemesinin emisyonlar üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Tablo 3.5, her iki yakıt senaryosu altında 2020 ve 2021 yılları için hesaplanan PM₁₀ ve SO₂ emisyonlarını sunmaktadır.

Tablo 3.5 Kullanılan yakıt türüne göre PM₁₀ ve SO₂ miktarları (ton/yıl)

YEAR	PM ₁₀	SO ₂
2020 MDO	196	559
2020 HFO	394	3019
2021 MDO	196	561
2021 HFO	395	3032

2020 yılında, MDO kullanan gemiler 196 ton PM₁₀ yayarken, HFO kullanmaya devam etselerdi, emisyonlar 394 ton olacaktı. Bu da MDO'ya geçişin PM₁₀ emisyonlarını neredeyse yarıya indirdiğini göstermektedir. Tabloda gösterilen sonuçlar, MDO'ya geçişin PM₁₀ emisyonlarında yaklaşık %50'lik bir azalmayla sonuçlandığını göstermekte ve IMO'nun kükürt sınırı düzenlemesinin gemilerden kaynaklanan partikül madde emisyonlarını azaltmadaki etkinliğini ortaya koymaktadır.

IMO'nun kükürt içeriği düzenlemesinin sülfür dioksit SO₂ emisyonları üzerindeki etkisi daha da belirgindir. 2020 yılında MDO kullanımı 559 ton SO₂ emisyonuna neden olurken, HFO kullanımı 3019 ton SO₂'ye yol açacaktı. Yaklaşık %80'in üzerinde azalma kükürt üst sınırının gemiler tarafından yayılan en zararlı kirleticilerden birini azaltmadaki etkinliğini göstermektedir. SO₂ emisyonları için sonuçlar daha da çarpıcıdır ve gemiler MDO'ya geçtiğinde ciddi bir azalma göstermektedir. MDO ile SO₂ emisyonları HFO ile olanın yaklaşık altıda biri kadardır.

IMO'nun denizcilik yakıtlarındaki sülfür içeriğini azaltmaya yönelik düzenlemesinin İstanbul Boğazı'ndaki hava kalitesi üzerinde önemli bir olumlu etkisi olmuştur. HFO'dan MDO'ya geçiş, PM₁₀ emisyonlarında yaklaşık %50'lik bir azalmaya ve SO₂ emisyonlarında daha da büyük bir azalmaya yol açmıştır. Bu azalmalar hava kalitesinin iyileştirilmesi, hava kirliliğine bağlı sağlık risklerinin azaltılması ve çevrenin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Veriler, hava kalitesinde sürdürülebilir iyileşmeler sağlamak için düzenleyici tedbirlerin devam etmesinin ve emisyon standartlarına uyulmasının önemini vurgulamaktadır. Bu tür düzenlemelere bağlı kalınmaya devam edilmesi, hava kalitesi iyileştirmelerindeki ilerlemenin sürdürülmesi ve ilerletilmesi, dolayısıyla çevre ve halk sağlığının korunması için elzemdir.

3.2 Dispersiyon

41,06 kuzey enlemi ve 29,06 doğu boylamı koordinatlarında bulunan Kandilli ölçüm istasyonu için AERMOD [2] ile tek noktada modellenerek yıllık kirletici konsantrasyonları µg/m³ cinsinden hesaplanmıştır.

Tablo 3.6 Kandilli hesaplanan konsantrasyonlar (µg/m³)

	NO _x	SO ₂	CO	PM ₁₀
2014	9,77109	6,64869	0,82065	0,86241
2015	8,4638	5,7791	0,71542	0,75004
2016	8,9081	6,13875	0,76189	0,79926
2017	11,09408	7,85158	0,97073	1,01864
2018	12,01357	8,75504	1,07681	1,1246
2019	9,9497	7,27192	0,90725	0,94891
2020	6,50408	0,89353	0,60102	0,3133
2021	10,5808	1,48063	0,995	0,5173

Sonuçlar İBB Kandilli İstasyonu hava kalitesi ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [1]. Tek noktada hesaplanan yıllık ortalama konsantrasyonlar yıllara ve kirleticilere göre Tablo 3.6'da İBB'nin hava kalitesi ölçüm sonuçları ise Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.7 Kandilli ölçüm istasyonu değerler ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	NO _x	SO ₂	CO	PM ₁₀
2014	44,9	9,73	568,1	48
2015	36,1	9,54	623,8	44,2
2016	41,1	13,28	632,3	42,95
2017	36,03	13,4	715,5	40,2
2018	34,5	8,9	420,7	35,6
2019	33,5	11,09	484	33,8
2020	23,3	26,4	1726	28,3
2021	21,2	46,3	2846	32,14

Kandilli İstasyonu konumunda hesaplanan gemi kaynaklı emisyon konsantrasyonlarının hava kalitesine katkısı Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8 Gemi kaynaklı emisyonların katkısının yüzdesel dağılımı

	NO _x	SO ₂	CO	PM ₁₀
2014	%21,8	%68,3	%0,14	%1,8
2015	%23,4	%60,6	%0,11	%1,7
2016	%21,7	%46,2	%0,12	%1,9
2017	%30,8	%58,6	%0,14	%2,5
2018	%34,8	%98,4	%0,26	%3,2
2019	%29,7	%65,6	%0,19	%2,8
2020	%27,9	%3,4	%0,03	%1,1
2021	%49,9	%3,2	%0,03	%1,6

Gemi emisyonlarının bölgedeki NO_x seviyelerine katkısı, 2018'de gözle görülür bir artış ve 2021'de %49,9 ile en yüksek katkı ile dalgalanmalar göstermektedir. SO₂ konsantrasyonlarında 2018 yılı, ölçülen SO₂'nin %98,4'ünü oluşturan gemi emisyonları ile öne çıkmaktadır. Bu oranın 2020'de %3,4'e ve 2021'de %3,2'ye düşmesi, IMO 2020 yönetmeliğini takiben deniz yakıtlarındaki daha katı kükürt limitlerinin etkisini yansıtmaktadır. Gemilerin CO seviyesine katkısı çalışma süresince düşük seviyelerde gözlemlenmiştir. PM₁₀ seviyesine katkı, 2014'ten 2018'e kadar artan bir eğilimle değişmekte olup 2018'de %3,2 oranla en yüksek

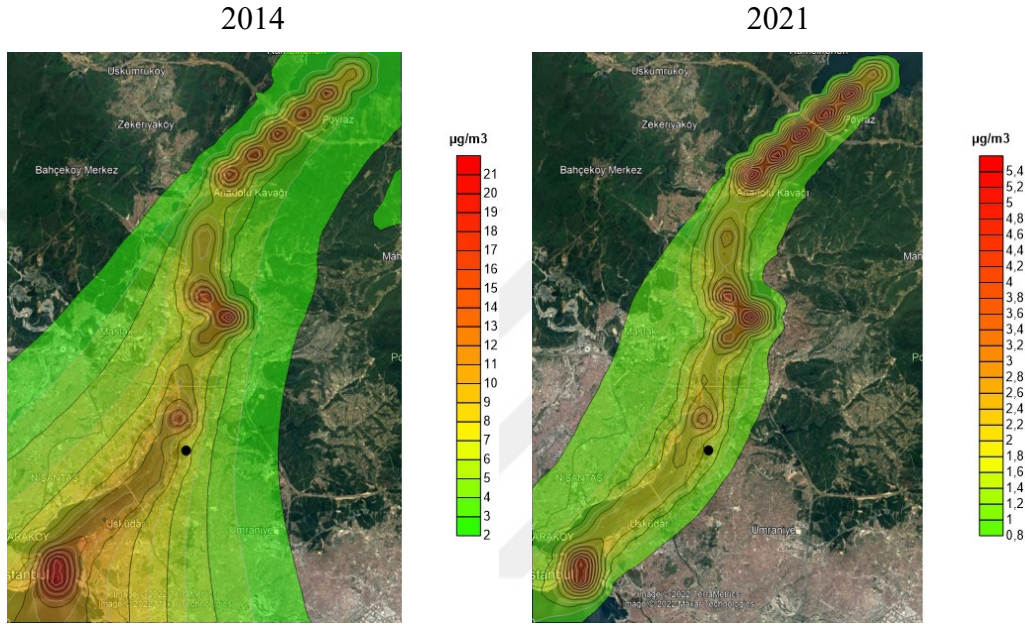
seviyesine ulaşmıştır. Ardından 2020 ve 2021 yıllarında azalmaktadır. Bu durum, gemilerin operasyonel faaliyetlerindeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır.

Gemilerin SO₂ seviyeleri üzerinde diğer kirleticilere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek bir etkiye sahip olduğu ve özellikle 2014 ve 2018'de yüksek katkıları olduğu açıktır. Bu yıllar, gemilerin SO₂ kirliliğine baskın katkıda bulunabileceğini ve bunun da gemiler tarafından kullanılan yakıtın sülfür içeriğine yakından bağlı olduğunu göstermektedir. Kömür ve petrolün enerji santrallerinde ve endüstriyel tesislerde yakılması veya özellikle çimento, kâğıt üretimi ve metal eritme ile ilgili olanlar olmak üzere bazı endüstriyel süreçler, kara trafiği karasal kaynak olarak SO₂ emisyonlarına katkıda bulunduğu bilinmektedir. SO₂ yüzdesinin 2019'dan 2020'ye önemli ölçüde düşmesi özellikle dikkat çekicidir ve gemicilik endüstrisinde daha düşük kükürtlü yakıtlara küresel geçişi yansıtmaktadır. Gemilerin NO_x kirliliğine katkısı, SO₂'den daha az baskın olsa da sürekli olarak dikkate değerdir. Ulaşılan sonuçlar, gemi emisyonlarından kaynaklanan NO_x'in İstanbul Boğazı'ndaki hava kirliliğinin önemli bir parçası olduğunu göstermektedir. CO için düşük yüzdeler, potansiyel olarak karayolu trafiği veya diğer kaynakların bölgedeki CO seviyelerine daha önemli katkıda bulunduğunu göstermektedir. PM₁₀ katkıları nispeten küçüktür ancak gemi trafiğindeki, yakıt türlerindeki ve yerel meteorolojik koşullardaki değişikliklerden etkilenebilecek bazı değişkenlikler göstermektedir.

Veriler, özellikle NO_x ve SO₂ için hava kirliliği kaynağı olarak gemiciliğin önemini vurgulamakta ve denizcilik sektöründen kaynaklanan sülfür emisyonlarını azaltmaya yönelik düzenleyici tedbirlerin etkinliğini desteklemektedir. Ayrıca, bu emisyonların çevresel etkilerini ele almak için sürekli izleme ve politika oluşturma gerekliliğini de vurgulamaktadır. Veriler, yakıtlardaki sülfür içeriğini hedefleyen düzenleyici eylemlerin gemicilikten kaynaklanan belirli kirlilik türlerini azaltmada oldukça etkili olabileceğini göstermektedir.

Genel olarak tablo, gemilerin SO₂ ve NO_x açısından önemli bir hava kirliliği kaynağı olduğunu ve hem mevzuat değişikliklerinden hem de gemicilik faaliyetlerindeki değişikliklerden etkilenebilecek yıldan yıla kayda değer dalgalanmalar olduğunu göstermektedir. CO ve PM₁₀ üzerindeki etki daha küçüktür ve bölgedeki bu kirleticilere birincil katkıda bulunanlar olarak diğer kaynaklara işaret etmektedir.

2014 ve 2021 yılları için tüm kirleticilerin emisyon dağılım haritaları çıkarılmıştır. Haritalar, 2014 ve 2021 yılları için İstanbul Boğazı'ndaki gemilerden kaynaklanan SO₂, NO_x, PM₁₀ ve CO emisyonlarının yıllık dağılımını göstermektedir. Konsantrasyon seviyeleri µg/m³ cinsinden gösterilmekte olup, renk gradyanı yeşilden (düşük konsantrasyonlar) kırmızıya (yüksek konsantrasyonlar) doğru değişmektedir. Haritalarda siyah nokta ile belirtilen bölge Boğaz'a en yakın ölçüm istasyonu olan Kandilli ölçüm istasyonunun konumunu göstermektedir.

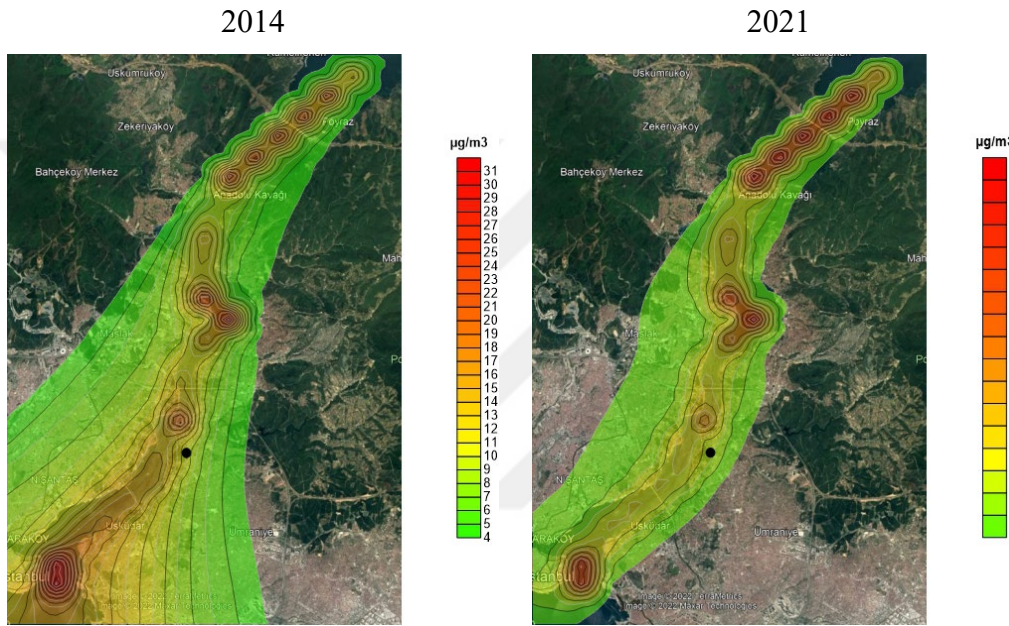


Şekil 3.4 SO₂ dağılım haritası

Şekil 3.4'te gösterilen SO₂ dağılım haritasında 2014 yılında en yüksek SO₂ konsantrasyonları İstanbul Boğazı'nın güney kesiminde, özellikle orta ve güney kesimlerinin yakınında gözlenmiştir. Konsantrasyon, yoğun gemi trafiğine veya emisyonlara işaret eden orta kısımda zirve yapmaktadır. Konsantrasyon seviyeleri merkezi bölgeden uzaklaştıkça kademeli olarak azalmakta, kuzeye doğru yayılmaktadır. 2021 itibariyle, SO₂ emisyonlarının dağılım modelinde gözle görülür bir değişiklik vardır. En yüksek konsantrasyonlar hala mevcuttur, ancak genel yoğunluk 2014'e kıyasla azalmış görünmektedir. Kuzey kesiminde nispeten daha yüksek SO₂ seviyeleri görülmektedir, ancak sıcak noktalar 2014 yılına göre daha az yaygın görünmektedir. 2014 ve 2021 yıllarındaki haritalar karşılaştırıldığında, SO₂ emisyonlarının kapsamı ve yoğunluğunda net bir azalma görülmektedir. Bu, dönem boyunca emisyon kontrol önlemlerinin ve daha sıkı düzenlemelerin etkili bir şekilde uygulandığını göstermektedir. SO₂ emisyonlarında

gözlenen azalma, 2014 ve 2021 yılları arasında uygulanan hava kalitesi düzenlemelerinin ve emisyon kontrol önlemlerinin etkinliğinin altını çizmektedir.

Kandilli istasyonu noktasında yıllık ortalama kükürt dioksit konsantrasyonu 2014 yılında $6,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iken 2021 yılında $1,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e düşmüştür. Bu değerler, Tablo 2.8'de verilen HKDYY'nin [66] düzenleyici sınır olan $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altındadır ve dönem boyunca etkili azaltım önlemlerine işaret etmektedir. Bu düşüş, daha temiz yakıtların uygulanması ve deniz yakıtlarındaki kükürt içeriğine ilişkin daha sıkı düzenlemeler gibi çabaların olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir.

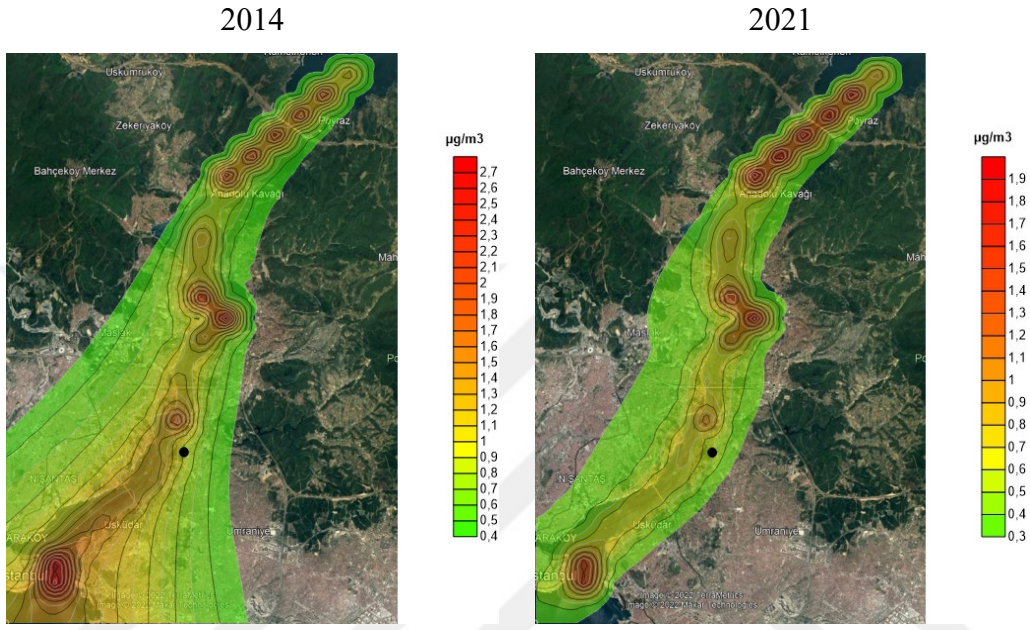


Şekil 3.5 NO_x dağılım haritası

Şekil 3.5'te verilen dağılım haritalarında 2014 yılında NO_x konsantrasyonları İstanbul Boğazı'nın güney tarafında daha yüksek seviyededir ve gemi trafiğinin en yoğun olduğu yerlerde önemli sıcak noktalar bulunmaktadır. NO_x seviyeleri, merkezi bölgelerden uzaklaşarak kuzey uçlara doğru yayılan bir düşüş göstermektedir. 2021 yılında ise yüksek konsantrasyonlar devam etmekte ve Boğaz'ın kuzey kısımları yüksek NO_x seviyeleri sergilemektedir,

Kandilli istasyonunda hesaplanan yıllık ortalama kirletici miktarına göre azot oksit emisyonları 2014 yılında $9,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iken 2021 yılında hafif bir artışla $10,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e yükselmiştir, ancak her iki değer de HKDYY'de belirtilmiş yasal sınır olan $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ün altında kalmaktadır. Hafif artış, iyileşmeler olsa da NO_x emisyonlarını azaltmak için ek önlemlerin gerekli olduğunu göstermektedir. NO_x bileşikleri,

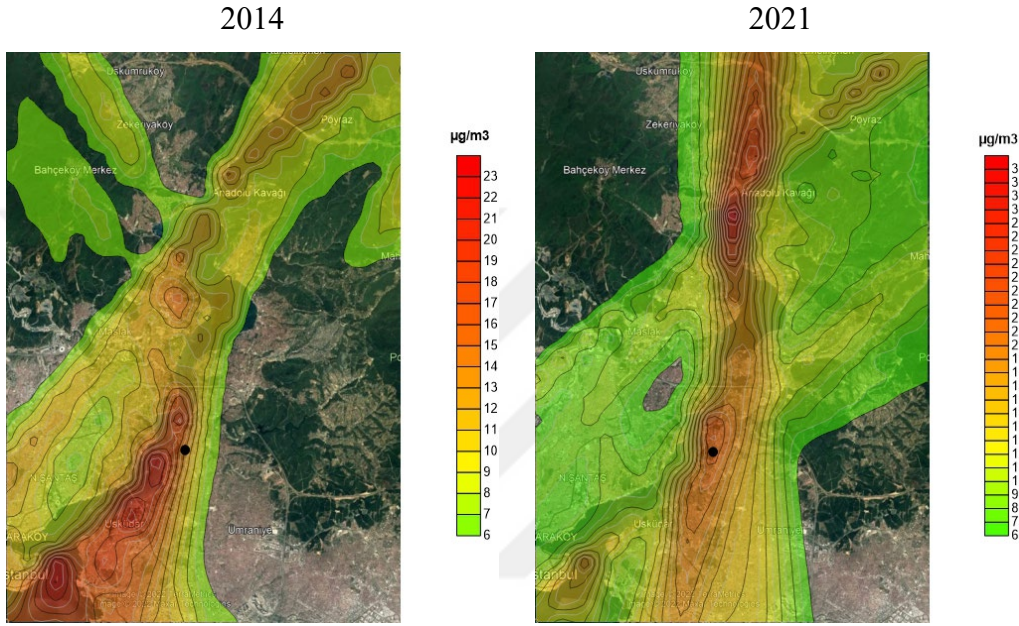
sağlık ve çevre için zararlı olan yer seviyesi ozon ve ince partikül madde oluşumuna katkıda bulunur. Bu emisyonları azaltmak için Seçici Katalitik İndirgeme (SCR) sistemlerinin benimsenmesi ve daha düşük NO_x salımlı makinelerin kullanılması gibi stratejiler daha fazla teşvik edilmelidir. NO_x konsantrasyonlarının sınır değerinin altında tutulması, hava kalitesi standartlarına uyumun sağlanması ve insan sağlığının korunması için çok önemlidir.



Şekil 3.6 PM₁₀ dağılım haritası

Şekil 3.6'da verilen PM₁₀ dağılım haritalarında 2014 yılında PM₁₀ konsantrasyonları Boğaz'ın güney ve orta kesimlerinde en yüksek seviyededir. En yoğun sıcak noktaların bu bölgelerde görülmesi, gemi trafiğinden kaynaklanan önemli emisyonlara işaret etmektedir. 2021 yılında, PM₁₀ emisyonlarının genel yoğunluğunda gözle görülür bir azalma olup güney, orta ve kuzey kesimlerde konsantrasyonlar dengelidir. Ancak özellikle kuzey bölgesinde hala yüksek konsantrasyonlar sergilemektedir. 2014-2021 yılları arasındaki haritalar karşılaştırıldığında, PM₁₀ emisyonlarının yoğunluğunda net bir azalma görülmektedir. Bu, emisyonları kontrol etmeye yönelik önlemlerin olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. PM₁₀ emisyonlarında gözlemlenen azalma, 2014 ve 2021 yılları arasında kabul edilen hava kalitesi düzenlemelerinin ve emisyon kontrol önlemlerinin etkinliğini vurgulamaktadır.

Partikül madde emisyonlarında Kandilli istasyonu konumunda kayda değer bir düşüş görülmüş, yıllık ortalama konsantrasyonlar 2014 yılında $0,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iken 2021 yılında $0,517 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e düşmüştür. Her iki değer de HKDYY'de belirtilen $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sınırının önemli ölçüde altındadır ve başarılı kontrol önlemlerini göstermektedir. Bu iyileşme, Boğaz bölgesinde daha temiz havaya doğru olumlu bir eğilim olduğunu göstermekte, bölge sakinleri ve çevre için yaşam kalitesini artırmaktadır.



Şekil 3.7 CO dağılım haritası

Şekil 3.7'da gösterilen CO dağılım haritalarında 2014 yılı için en yüksek konsantrasyonlar Boğaz'ın güney bölgesinde yoğunlaşmıştır. En yoğun sıcak noktalar bu bölgelerde görülmektedir ve kuzeye doğru yoğunluk azalmaktadır. 2021 yılına gelindiğinde, CO emisyonu dağılımında kuzey bölgelere çıkıldıkça konsantrasyonun arttığı görülmektedir. Ayrıca sıcak noktaların dağılımında gemi geçiş rotasından kıyı bölgelerindeki yaşam alanlarına doğru hafif bir kayma vardır. Diğer kirleticilerden farklı olarak CO için Tablo 2.8'de belirtilen HKDYY sınır değerleri [66] ile karşılaştırma yapabilmek için model ile 8 saatlik ortalamalar hesaplanmıştır. Kandilli istasyonu noktasında karbon monoksit emisyonları 2014 yılındaki $13,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerinden 2021 yılında $22,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerine artış göstermiştir ve her iki değer de yasal sınır olan $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ değerinin çok altındadır.

Sekiz yılı kapsayan bu çalışma boyunca, İstanbul Boğazı'ndaki deniz trafiğinden kaynaklanan emisyonlar niceliksel olarak analiz edilmiş ve ortam hava kalitesi verileriyle karşılaştırılmıştır. AERMOD dağılım modelini kullanan çalışma NO_x, SO₂, CO ve PM₁₀ konsantrasyonlarını hesaplamış ve bu bulguları Kandilli hava kalitesi izleme istasyonundan alınan ölçümlerle yan yana getirmiştir. Bu yaklaşım, denizcilik sektörünün özellikle hava kalitesine ilişkin çevresel ayak izinin odaklanmış bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Ayrıca sonuçlar Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği'nde kirleticiler için belirlenen sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2014 ve 2021 yılları arasında, yıllık ortalama yaklaşık 41.400 gemi olmak üzere toplam 331.027 gemi İstanbul Boğazı'ndan transit geçiş yapmıştır. Bu süre zarfında, bu gemilerden kaynaklanan yıllık ortalama emisyonlar, NO_x emisyonları için ortalama 4300 ton, SO₂ emisyonları için 2450 ton, CO emisyonları için 380 ton ve PM₁₀ emisyonları için 350 ton olarak hesaplanmıştır. Bu emisyonlar bölgedeki hava kalitesi ve çevre sağlığı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Özellikle, NO_x emisyonları toplam emisyonların %57'sini oluşturarak baskın olmuştur. NO_x bileşikleri, insan sağlığı ve çevre için zararlı olan yer seviyesindeki ozon ve ince partikül madde oluşumuna katkıda bulunduğu için bu önemli bir bulgudur. Toplam emisyonların %33'ünü oluşturan SO₂ emisyonlarının önemli oranı, deniz yakıtlarındaki kükürtün asit yağmurlarına ve yerel halk arasında solunum sorunlarına yol açabilen etkisinin altını çizmektedir. Her biri toplam emisyonların %5'ini oluşturan CO ve PM₁₀ emisyonları da kritik çevresel kaygılar yaratmaktadır.

Çalışma süresi olan 8 yılın ortalama değerleri incelendiğinde oluşturulan kirletici dağılım modeli ile Kandilli izleme istasyonu konumundaki tek noktada yıllık ortalama konsantrasyonlar NO_x için 9,66 µg/m³, SO₂ için 5,6 µg/m³, CO için 0,86 µg/m³ ve PM₁₀ için 0,80 µg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Boğaz bölgesindeki gemi emisyonlarından kaynaklanan hava kalitesi etkisinin bir görüntüsünü sunmaktadır. İBB ölçüm istasyonu sonuçları ile karşılaştırıldığında, bu kirleticilerin deniz trafiğinden kaynaklanan ortalama NO_x katkısı yaklaşık %30,

SO₂ katkısı %50, PM₁₀ katkısı %2 ve CO katkısı %0,13'tür. Bu rakamlar, gemiler kaynaklı farklı kirleticilerin yerel hava kalitesi üzerindeki değişen etkisini vurgulamaktadır. Yüksek orandaki SO₂ katkısı özellikle önemlidir ve gemilerden kaynaklanan kükürt emisyonlarının yerel hava kirliliğine önemli bir katkıda bulunduğunu göstermektedir.

Emisyon verilerinin HKDYY'de belirtilen düzenleyici sınır değerlerle karşılaştırıldığı analiz, 2014 ve 2021 yıllarında Boğaz bölgesinde hava kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir ilerleme kaydedildiğini ortaya koymaktadır. SO₂ emisyonları 2014 yılında yıllık ortalama 6,65 µg/m³'ten 2021 yılında 1,48 µg/m³'e düşmüştür ve bu değerler, 20 µg/m³'lük yasal sınırın altındadır. Benzer şekilde, PM₁₀ emisyonları da önemli ölçüde azalmış olup, konsantrasyonlar 2014 yılında 0,86 µg/m³ iken 2021 yılında 0,517 µg/m³'e düşmüştür. Her iki değer de 40 µg/m³ sınırının önemli ölçüde altında kalmıştır. Öte yandan, NO_x emisyonları 2014 yılında 9,77 µg/m³ iken 2021 yılında 10,58 µg/m³'e hafif bir artış göstermiştir. CO emisyonları, 2014 yılındaki 13,82 µg/m³ değerinden 2021 yılında 22,58 µg/m³ değerine yükselmiştir. Bu değerler, yasal sınır olan 10.000 µg/m³'ün önemli ölçüde altındadır.

Çalışmanın bulguları, denizcilik sektöründeki çevre politikaları açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır. Sonuçlar denizcilik sektörünün bölgedeki NO_x ve SO₂ emisyonlarının önemli bir kaynağı olduğunu göstermektedir. IMO 2020 sülfür üst sınırının yürürlüğe girmesiyle birlikte SO₂ emisyonlarındaki gözle görülür düşüş, sıkı düzenleyici politikaların olumlu etkisini ortaya koymaktadır. Bu arada, NO_x emisyonlarının ısrarla yüksek seviyelerde seyretmesi, mevcut önlemlerin yetersiz kalabileceği önemli bir alanı vurgulamakta ve gelişmiş emisyon kontrol stratejilerine duyulan ihtiyacın altını çizmektedir. Dolayısıyla bu çalışma, akademi ve denizcilik endüstrisinin gelecekteki çevre girişimlerini dayandırabileceği ve daha temiz denizcilik faaliyetlerinin ilerlemesini destekleyebileceği önemli bir ampirik temele katkıda bulunmaktadır.

Bu hedefi ilerletmek için, denizcilik endüstrisinin ve politika yapıcıların gelişmiş emisyon azaltma teknolojilerinin benimsenmesine öncelik vermeleri ve İstanbul'da ek Emisyon Kontrol Alanlarının uygulanmasını değerlendirmeleri önerilmektedir. Ayrıca, daha temiz alternatif yakıtların teşvik edilmesi agresif bir şekilde sürdürülmelidir. Denizcilik sektöründe daha düşük kirletici emisyon profiline sahip

alternatif yakıtların kullanımının teşvik edilmesi İstanbul Boğazı'nın hava kalitesinin iyileştirilmesi için önemlidir. Hava kalitesini iyileştirmek için hedeflenen stratejileri mümkün kılacak şekilde çeşitli kaynaklardan gelen emisyonları belirlemek ve ölçmek için daha kapsamlı izleme uygulanması, İstanbul Boğazı köprü bölgelerine emisyon ölçüm cihazları ve bunlara bağlı izleme istasyonları kurulması daha sağlıklı verilerin elde edilmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla gemicilik faaliyetlerinin hava kalitesine etkisini yakalamak için bölgedeki emisyon envanterinin daha iyi zamansal çözünürlük için geliştirilmesi daha doğru çözümler üretmek ve daha kesin önlemler alınması için gereklidir.

2024 yılında AB karbon vergilerinin uygulamaya konulması, denizcilik sektöründe karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik önemli bir adımı işaret etmektedir. Bu politika, karbon vergisi alınarak alternatif yakıtların ve diğer emisyon azaltıcı önlemlerin benimsenmesini teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Sonuç olarak, denizcilik şirketlerinin sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), biyo yakıtlar ve hidrojen gibi daha temiz teknolojilere ve yakıtlara geçişi hızlandırması muhtemeldir. Yakıt dönüşümüne ek olarak, denizcilik sektörünün yeni karbon vergisi düzenlemelerine uyum sağlamak için başka önlemlere de yatırım yapması muhtemeldir. Bu tedbirler arasında gemi tasarımında teknolojik gelişmeler yoluyla enerji verimliliğinin artırılması, yakıt tüketimini azaltmak için rotaların optimize edilmesi ve rüzgâr destekli tahrik teknolojilerinin benimsenmesi yer almaktadır. Bu tür stratejilerin uygulanması sadece karbon emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda denizcilik faaliyetlerinin genel sürdürülebilirliğini ve maliyet verimliliğini de artırır.

Bu çalışma gerçek zamanlı gemi hareketlerini ve operasyonel verileri içeren ve daha hassas çevresel etki değerlendirmelerini kolaylaştıran daha ayrıntılı emisyon envanterlerinin geliştirilmesini savunmaktadır. Daha doğru tahminler için gelecekte bu çalışma geliştirilerek gerçek zamanlı Boğaz trafik verileri dağılım modeline entegre edilebilir. Son olarak, bu yaklaşımların politika oluşturma sürecine entegre edilmesi sadece bilimsel anlayışı ilerletmekle kalmayacak, aynı zamanda kentsel hava kalitesi ve halk sağlığı üzerindeki etkisini azaltarak daha sürdürülebilir bir denizcilik endüstrisini teşvik edecektir.

- [1] “İBB Hava Kalitesi İzleme Merkezi”. Erişim: 15 Ocak 2024. [Çevrimiçi].
Erişim adresi:
https://havakalitesi.ibb.gov.tr/STN/STN_Report/StatisticsReport
- [2] A. Ekmekçioğlu, S. L. Kuzu, K. Ünlügençoğlu, ve U. B. Çelebi, “Assessment of shipping emission factors through monitoring and modelling studies”, *Sci. Total Environ.*, c. 743, s. 140742, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140742.
- [3] G. Kodak, “Reflections On Using Automatic Identification System (AIS) Data in Ship Emission Studies in The Academic Literature”, *Environ. Eng. Manag. J.*, c. 21, sy 9, ss. 1461-1470, 2022, doi: 10.30638/eemj.2022.129.
- [4] D. Woo ve N. Im, “Spatial Analysis of the Ship Gas Emission Inventory in the Port of Busan Using Bottom-Up Approach Based on AIS Data”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 9, sy 12, s. 1457, Ara. 2021, doi: 10.3390/jmse9121457.
- [5] K. H. Ten, H.-S. Kang, K. Y. Wong, C.-L. Siow, C.-H. Ong, ve Y. Liu, “Assessment of Ship Emission Inventory in Strait of Malacca and Singapore based on Automatic Identification System Data”, içinde *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, Ara. 2022, ss. 1092-1096. doi: 10.1109/IEEM55944.2022.9989888.
- [6] F. Bojic, A. Gudelj, ve R. Bošnjak, “An Analytical Model for Estimating Ship-Related Emissions in Port Areas”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 11, s. 2377, Ara. 2023, doi: 10.3390/jmse11122377.
- [7] X. Chen ve J. Yang, “Analysis of the uncertainty of the AIS-based bottom-up approach for estimating ship emissions”, *Mar. Pollut. Bull.*, c. 199, s. 115968, Şub. 2024, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115968.
- [8] A. Toz, M. Büber, B. Koseoglu, ve C. Sakar, “An estimation of shipping emissions to analysing air pollution density in the Izmir Bay”, *Air Qual. Atmosphere Health*, c. 14, Oca. 2021, doi: 10.1007/s11869-020-00914-7.
- [9] H. Huang, C. Zhou, L. Huang, C. Xiao, Y. Wen, ve Z. Lu, “Inland ship emission inventory and its impact on air 3 quality over the middle Yangtze River, China”.
- [10] S. Wang, Y. Xiao, T. Wang, ve S. Wang, “Study on Carbon Emission Calculation Method in Interaction Behavior of Inland Ships”, içinde *2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, Xi’an, China: IEEE, Ağu. 2023, ss. 1045-1053. doi: 10.1109/ICTIS60134.2023.10243819.
- [11] C. Borén, M. Grifoll, ve M. Castells-Sanabra, “Emissions Assessment of Container Ships Sailing under Off-Design Conditions”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 11, sy 10, s. 1983, Eki. 2023, doi: 10.3390/jmse11101983.

- [12] G. Xiao, T. Wang, X. Chen, ve L. Zhou, "Evaluation of Ship Pollutant Emissions in the Ports of Los Angeles and Long Beach", *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 10, sy 9, s. 1206, Ağu. 2022, doi: 10.3390/jmse10091206.
- [13] Y. Li vd., "Research on the carbon emissions traceability inventory and multi-horizon prediction of ship carbon emissions: a case study of Tianjin Port", *Front. Mar. Sci.*, c. 10, s. 1174411, Haz. 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1174411.
- [14] W. Ma ve S. Hao, "Ship emission accounting based on AIS data mining", içinde *2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, Hangzhou, China: IEEE, Ağu. 2020, ss. 273-276. doi: 10.1109/IHMSC49165.2020.10140.
- [15] G. Xiao, T. Wang, Y. Luo, ve D. Yang, "Analysis of port pollutant emission characteristics in United States based on multiscale geographically weighted regression", *Front. Mar. Sci.*, c. 10, s. 1131948, Şub. 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1131948.
- [16] J. Zhang, P. Tang, ve T. Lv, "A real-time calculation platform of ship air pollutant emission based on Flink", içinde *2022 5th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE)*, Wuhan, China: IEEE, Nis. 2022, ss. 785-788. doi: 10.1109/AEMCSE55572.2022.00157.
- [17] E. Doundoulakis ve S. Papaefthimiou, "A comparative methodological approach for the calculation of ships air emissions and fuel-energy consumption in two major Greek ports", *Marit. Policy Manag.*, c. 49, sy 8, ss. 1135-1154, Kas. 2022, doi: 10.1080/03088839.2021.1946610.
- [18] L. Vukić ve K. Lai, "Acute port congestion and emissions exceedances as an impact of COVID-19 outcome: the case of San Pedro Bay ports", *J. Shipp. Trade*, c. 7, sy 1, s. 25, Kas. 2022, doi: 10.1186/s41072-022-00126-5.
- [19] H. Lee, H. T. Pham, M. Chen, ve S. Choo, "Bottom-Up Approach Ship Emission Inventory in Port of Incheon Based on VTS Data", *J. Adv. Transp.*, c. 2021, ss. 1-16, Nis. 2021, doi: 10.1155/2021/5568777.
- [20] D. Pastorčić, R. Radonja, V. Knežević, ve V. Pelić, "Emission Inventory of Marine Traffic for the Port of Šibenik", *Pomorstvo*, c. 34, sy 1, ss. 86-92, Haz. 2020, doi: 10.31217/p.34.1.10.
- [21] G. Fuentes García vd., "Estimation of atmospheric emissions from maritime activity in the Veracruz port, Mexico", *J. Air Waste Manag. Assoc.*, c. 71, sy 8, ss. 934-948, Ağu. 2021, doi: 10.1080/10962247.2021.1902421.
- [22] J. Esteve-Pérez, M. D. Río-González, ve J. E. Gutiérrez-Romero, "Forecast Analysis of Pollutant Emissions of Cruise Ship Routes in Western Mediterranean", *Appl. Sci.*, c. 13, sy 14, s. 8149, Tem. 2023, doi: 10.3390/app13148149.
- [23] A. Ekmekçioğlu, K. Ünlügençoğlu, ve U. B. Çelebi, "Container ship emission estimation model for the concept of green port in Turkey", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, c. 236, sy 2, ss. 504-518, May. 2022, doi: 10.1177/14750902211024453.
- [24] "UK Ship Emissions Inventory (Final report)", ENTEC, 2010.

- [25] U.S. EPA, “Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emission Inventories (EPA-420-D-20-001)”, Şub. 2020.
- [26] X. Zhou, C. Du, Y. Yang, Z. Ming, H. Liu, ve J. Gao, “Carbon Emission Calculation and Scenario Analysis of Urban Passenger Transport in Nanjing”, içinde *2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT)*, Lanzhou, China: IEEE, Eki. 2021, ss. 248-252. doi: 10.1109/ICEERT53919.2021.00054.
- [27] G. Fuentes García, R. Sosa Echeverría, J. M. Baldasano Recio, J. D. W. Kahl, ve R. E. Antonio Durán, “Review of Top-Down Method to Determine Atmospheric Emissions in Port. Case of Study: Port of Veracruz, Mexico”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 10, sy 1, s. 96, Oca. 2022, doi: 10.3390/jmse10010096.
- [28] Y. Zhang, K. Zhao, D. Lou, ve L. Fang, “Study on the real-world emission characteristics of gaseous and particulate pollutants from an inland ship using a portable emission measurement system”, *Mar. Pollut. Bull.*, c. 184, s. 114205, Kas. 2022, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.114205.
- [29] F. Zhou, J. Liu, H. Zhu, X. Yang, ve Y. Fan, “A Real-Time Measurement-Modeling System for Ship Air Pollution Emission Factors”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 10, sy 6, s. 760, May. 2022, doi: 10.3390/jmse10060760.
- [30] L. Mocerino, F. Murena, F. Quaranta, ve D. Toscano, “Validation of the estimated ships’ emissions through an experimental campaign in port”, *Ocean Eng.*, c. 288, s. 115957, Kas. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115957.
- [31] M. Deng, S. Peng, X. Xie, Z. Jiang, J. Hu, ve Z. Qi, “A Diffused Mini-Sniffing Sensor for Monitoring SO₂ Emissions Compliance of Navigating Ships”, *Sensors*, c. 22, sy 14, s. 5198, Tem. 2022, doi: 10.3390/s22145198.
- [32] A. Ekmekçioğlu, K. Ünlügençoğlu, ve U. B. Çelebi, “Estimation of shipping emissions based on real-time data with different methods: A case study of an oceangoing container ship”, *Environ. Dev. Sustain.*, c. 24, sy 3, ss. 4451-4470, Mar. 2022, doi: 10.1007/s10668-021-01605-8.
- [33] T. Topic, A. J. Murphy, K. Pazouki, ve R. Norman, “Assessment of ship emissions in coastal waters using spatial projections of ship tracks, ship voyage and engine specification data”, *Clean. Eng. Technol.*, c. 2, s. 100089, Haz. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100089.
- [34] M. Tichavska ve B. Tovar, “External costs from vessel emissions at port: a review of the methodological and empirical state of the art”, *Transp. Rev.*, c. 37, sy 3, ss. 383-402, May. 2017, doi: 10.1080/01441647.2017.1279694.
- [35] S. L. Kuzu, L. Bilgili, ve A. Kiliç, “Estimation and dispersion analysis of shipping emissions in Bandırma Port, Turkey”, *Environ. Dev. Sustain.*, c. 23, sy 7, ss. 10288-10308, Tem. 2021, doi: 10.1007/s10668-020-01057-6.
- [36] V. Durán-Grados *vd.*, “The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain)”, *Sustainability*, c. 14, sy 19, s. 12507, Eyl. 2022, doi: 10.3390/su141912507.

- [37] Y. Garbatov ve P. Georgiev, “Stochastic Air Quality Dispersion Model for Defining Queuing Ships Seaport Location”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 10, sy 2, s. 140, Oca. 2022, doi: 10.3390/jmse10020140.
- [38] A. S. Lansø, M. Winther, S. S. Jensen, ve P. Løfstrøm, “Impact on air quality from increasing cruise ship activity in Copenhagen port”, *Environ. Res. Commun.*, c. 5, sy 2, s. 021003, Şub. 2023, doi: 10.1088/2515-7620/acb90c.
- [39] E. Merico, D. Cesari, E. Gregoris, A. Gambaro, M. Cordella, ve D. Contini, “Shipping and Air Quality in Italian Port Cities: State-of-the-Art Analysis of Available Results of Estimated Impacts”, *Atmosphere*, c. 12, sy 5, s. 536, Nis. 2021, doi: 10.3390/atmos12050536.
- [40] C. Mensink ve G. Kallos, Ed., *Air Pollution Modeling and its Application XXV*. içinde Springer Proceedings in Complexity. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-57645-9.
- [41] L. Gan, T. Lu, ve Y. Shu, “Diffusion and Superposition of Ship Exhaust Gas in Port Area Based on Gaussian Puff Model: A Case Study on Shenzhen Port”, *J. Mar. Sci. Eng.*, c. 11, sy 2, s. 330, Şub. 2023, doi: 10.3390/jmse11020330.
- [42] T. Aydin, “Investigation the influence of some meteorological factors on shipping air emissions in the Istanbul Strait”, *Sci. Bull. Nav. Acad.*, c. XXIV, sy 1, ss. 184-192, Tem. 2021, doi: 10.21279/1454-864X-21-I1-022.
- [43] A. Tokuşlu ve S. Burak, “Examination Of Exhaust Gas Emissions Of Transit Ships In The Istanbul Strait”, *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, c. 9, sy 1, ss. 59-66, Oca. 2021, doi: 10.21541/apjes.705918.
- [44] C. Trozzi ve R. Vaccaro, “Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships”, *Eur. Comm. Transp. RTD Programme 4th Framew. Programme Tech. Rep. Roma Italy*, 1998.
- [45] C. Trozzi ve R. Vaccaro, “Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships: a 2006 update”, *Environ. Transp. 2th Int. Sci. Symp. 15th Conf. Transp. Air Pollut. Reims Fr.*, 2006.
- [46] C. Trozzi, “Emission estimate methodology for maritime navigation”, *Techne Consult. Rep. San Antonio TexasTechne*, 2010.
- [47] İ. Bayirhan, K. MersiN, A. Tokuşlu, ve C. GaziOğlu, “Modelling of Ship Originated Exhaust Gas Emissions in the Strait of Istanbul (Bosphorus)”, *Int. J. Environ. Geoinformatics*, c. 6, sy 3, ss. 238-243, Ara. 2019, doi: 10.30897/ijegeo.641397.
- [48] U. Kesgin ve N. Vardar, “A study on exhaust gas emissions from ships in Turkish Straits”, *Atmos. Environ.*, c. 35, sy 10, ss. 1863-1870, Nis. 2001, doi: 10.1016/S1352-2310(00)00487-8.
- [49] C. Çelen, N. Çağlar, B. Gençer Balkis, ve A. Aksu, “Determination of the Distribution and Sources of Inorganic Pollutants in Particular Material in the Atmosphere of Istanbul”, *Int. J. Environ. Geoinformatics*, c. 10, sy 2, ss. 61-69, Haz. 2023, doi: 10.30897/ijegeo.1222756.
- [50] A. Ekmekçioğlu, U. B. Çelebi, K. Ünlügençoğlu, ve S. L. Kuzu, “Effect of the low sulphur regulations of maritime fuels on ambient air quality: a case

- study in the Bosphorus strait”, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Tem. 2024, doi: 10.1007/s13762-024-05901-4.
- [51] Z. Zhang, S. Zhou, H. Xi, ve M. Shreka, “A prospective absorption system for marine NO_x removal from simulated gas using Na₂SO₃/urea composite absorbents in bubble reactor”, *Fuel*, c. 288, s. 119709, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119709.
- [52] P. Yuan *vd.*, “Oxidation removal of NO by in situ Fenton system: Factors and optimization”, *Fuel*, c. 233, ss. 519-528, Ara. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.06.070.
- [53] S. Lion, I. Vlaskos, ve R. Taccani, “A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery”, *Energy Convers. Manag.*, c. 207, s. 112553, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112553.
- [54] “Nitrogen Oxides (NO_x) – Regulation 13”. Erişim: 06 Mayıs 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx)
- [55] L. Mueller *vd.*, “Characteristics and temporal evolution of particulate emissions from a ship diesel engine”, *Appl. Energy*, c. 155, ss. 204-217, Eki. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.05.115.
- [56] M. U. Ali, G. Liu, B. Yousaf, H. Ullah, Q. Abbas, ve M. A. M. Munir, “A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment”, *Environ. Geochem. Health*, c. 41, sy 3, ss. 1131-1162, Haz. 2019, doi: 10.1007/s10653-018-0203-z.
- [57] “Sulphur oxides (SO_x) and Particulate Matter (PM) – Regulation 14”. Erişim: 06 Mayıs 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx)
- [58] L. Kattner *vd.*, “Monitoring compliance with sulfur content regulations of shipping fuel by in situ measurements of ship emissions”, *Atmospheric Chem. Phys.*, c. 15, sy 17, ss. 10087-10092, Eyl. 2015, doi: 10.5194/acp-15-10087-2015.
- [59] T. Chu Van, J. Ramirez, T. Rainey, Z. Ristovski, ve R. J. Brown, “Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions”, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, c. 70, ss. 123-134, May. 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.04.001.
- [60] “Masterclass Emission Control Area”. Erişim: 06 Mayıs 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://static1.squarespace.com/static/6155b5bdada6ea1708c2c74d/t/662f1c2f7f6fd424b09a3851/1714363440367/ECA+Guide.pdf>
- [61] J. Herdzyk, “Decarbonization of Marine Fuels—The Future of Shipping”, 2021.
- [62] A. Ghazouani, W. Xia, M. Ben Jebli, ve U. Shahzad, “Exploring the Role of Carbon Taxation Policies on CO₂ Emissions: Contextual Evidence from Tax

- Implementation and Non-Implementation European Countries”,
Sustainability, c. 12, sy 20, s. 8680, Eki. 2020, doi: 10.3390/su12208680.
- [63] “Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. Bosphorus Strait”. Erişim: 14 Mart 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
<https://www.britannica.com/place/Bosphorus>
- [64] “Türk Boğazları Gemi Trafik Hizmetleri (TSVTS)”. Erişim: 07 Mayıs 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
https://afcan.org/dossiers_techniques/tsvts_gb.html
- [65] “T.C. UAB Denizcilik İstatistikleri”. Erişim: 05 Şubat 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://denizcilikistatistikleri.uab.gov.tr/turk-bogazlari-gemi-gecis-istatistikleri>
- [66] “Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği”. Erişim: 06 Mayıs 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=12188&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [67] “IHS Markit Global Sarl. SeaWeb; S&P Global Maritime & Trade.” Erişim: 19 Şubat 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
<https://maritime.ihs.com/Account2/Index>
- [68] “MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence”. Erişim: 06 Ocak 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.marinetraffic.com/>
- [69] S. L. Kuzu, L. Bilgili, ve A. Kiliç, “Estimation and dispersion analysis of shipping emissions in Bandırma Port, Turkey”, *Environ. Dev. Sustain.*, c. 23, sy 7, ss. 10288-10308, Tem. 2021, doi: 10.1007/s10668-020-01057-6.
- [70] L. M. Turtos Carbonell, M. Sanchez Gacita, J. D. J. Rivero Oliva, L. C. Garea, N. Diaz Rivero, ve E. Meneses Ruiz, “Methodological guide for implementation of the AERMOD system with incomplete local data”, *Atmospheric Pollut. Res.*, c. 1, sy 2, ss. 102-111, Nis. 2010, doi: 10.5094/APR.2010.013.
- [71] “Meteoroloji Genel Müdürlüğü - İstasyon Bilgileri Veritabanı”. Erişim: 06 Mayıs 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
<https://www.mgm.gov.tr/kurumsal/istasyonlarimiz.aspx>
- [72] “Google Haritalar”. Erişim: 05 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
<https://www.google.com/maps/place/41%C2%B008'47.0%22N+29%C2%B003'00.7%22E/@41.146382,29.050195,17z/data=!3m1!4b1!4m4!3m3!8m2!3d41.146382!4d29.050195?entry=ttu>
- [73] S. Laroche ve R. Sarrazin, “Impact of Radiosonde Balloon Drift on Numerical Weather Prediction and Verification”, *Weather Forecast.*, c. 28, sy 3, ss. 772-782, Haz. 2013, doi: 10.1175/WAF-D-12-00114.1.
- [74] “Google Haritalar”. Erişim: 05 Ocak 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
<https://www.google.com/maps>
- [75] “Türk Boğazları ve Marmara Bölgesi Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü”. Erişim: 31 Temmuz 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi:
https://www.un.org/Depts/los/LEGISLATIONANDTREATIES/PDFFILES/TUR_1994_Regulations.pdf

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Ekmekçiöğlü ve U. B. Çelebi “Investigation of Ship-Based Emissions In The Bosphorus”, *VII. International Scientific and Vocational Studies Congress – Science and Engineering (BILMES 2022)*

Makaleler

1. A. Ekmekçiöğlü, U. B. Çelebi, K. Ünlügençoğlü, ve S. L. Kuzu, “Effect of the low sulphur regulations of maritime fuels on ambient air quality: a case study in the Bosphorus strait”, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Tem. 2024, doi: 10.1007/s13762-024-05901-4.

