



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**ÇANAKKALE BOĞAZI'NDAN GEÇEN GEMİLERDEN KAYNAKLANAN SERA
GAZİ EMİSYONLARININ TAHMİNLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEYMA ÖZEKİNCİ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ HİKMET ERBİYİK

**YALOVA
TEMMUZ 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

ÇANAKKALE BOĞAZI'NDAN GEÇEN GEMİLERDEN KAYNAKLANAN SERA GAZI
EMİSYONLARININ TAHMİNLEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞEYMA ÖZEKİNCİ
238106004

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ HİKMET ERBİYİK

YALOVA
TEMMUZ 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Çanakkale Boğazı'ndan Geçen Gemilerden Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonlarının Tahminlemesi” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Şeyma ÖZEKİNCİ

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ERBIYIK’a teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için aileme teşekkür ederim.

Temmuz– 2025

Şeyma ÖZEKİNCİ



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. HAVA KİRLİLİĞİ VE GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLAR.....	9
3.1. Hava Kirliliğinin Tanımı ve Genel Etkileri	10
3.2. Gemi Kaynaklı Emisyonların Özellikleri ve Başlıca Kirleticiler	10
3.2.1. Partikül madde.....	11
3.2.2. Karbonmonoksit (CO).....	11
3.2.3. Ozon (O ₃)	12
3.2.4. Azot bileşikleri (NO _x)	12
3.2.5. Kükürtdioksit (SO ₂).....	12
4. GEMİ KAYNAKLI EMİSYONUN HESAPLAMA MODELLERİ VE TAHMİNLEME YÖNTEMLERİ.....	14
4.1. Çanakkale Boğazı Verileri.....	14
4.1.1. Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemi sayısı ve türleri bilgisi	15
4.2. Pareto Analizi	18
4.3. Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Kirliliği Ölçüm Modelleri.....	19
4.3.1. Bottom up metodu.....	20
4.3.2. Top-Down metodu	21
4.4. Tahminleme Analizi	24
4.4.1. Lineer Regresyon Algoritması.....	26
4.4.2. Multilayer Perceptron Algoritması.....	26
4.4.3. SMOreg algoritması	26
4.5. Tahmin Yöntemlerinin Hata Ölçüm Teknikleri.....	27
4.5.1. Ortalama mutlak hata, Mean absolute error (MAE)	27
4.5.2. Ortalama mutlak yüzde hatası, Mean absolute percentage error(MAPE).....	27

4.5.3. Kök ortalama kare hata, Root mean square error (RMSE)	27
5. GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN HESAPLANMASI VE TAHMİNLEME BULGULARI.....	29
5.1. 2024 Yılı Gemi Geçiş Sayılarının Pareto Analizi Bulguları.....	29
5.2. Trozzi ve Vaccaro Yöntemi Emisyon Analizi Bulguları.....	29
5.3. Makine Öğrenme Algoritmaları ile Gemi Emisyonlarının Tahminlemesi	41
5.3.1. Tahmin metodolojileri bulguları	47
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR.....	62
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....	68



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

CH ₄	: Metan
CO	: Karbonmonoksit
CO ₂	: Karbondioksit
E	: East (Doğu)
G	: Gram
h	: Saat
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt-saat
Mt	: Milyon ton
N	: North (Kuzey)
NO ₂	: Azot dioksit
NO _x	: Azot okstiler
O ₃	: Ozon
PM _{2.5}	: 2.5 µm'den daha küçük partiküler maddeler
PM ₁₀	: 10 µm'den daha küçük partiküler maddeler
ppm	: Parts per million (Milyonda bir parça)
SO ₂	: Sülfür dioksit
SO _x	: Sülfür/kükürt oksitler
StdDev	: Standard deviation (Standart sapma)
%	: Yüzde

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AIS	: Otomatik Tanımlama Listesi
COVID-19	: Coronavirus Disease 2019 (2019 Yeni Koronavirüs Hastalığı)
DVM	: Destek vektör makineleri
DVR	: Destek vektör regresyonu
DWT	: Deadweight Tonnage (Bir geminin yolcu, yakıt, gemi malzemeleri ve su dâhil taşıyabileceği en fazla ağırlıktır.)
GHG	: Greenhouse Gas (Sera gazı)
IEA	: International Energy Agency (Uluslararası Enerji Ajansı)
IMO	: International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
Km	: Kilometre
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğalgaz)
LTSM	: Long Short-Term Memory (Uzun Kısa Süreli Bellek — bir tür RNN)
MAE	: Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error (Ortalama Mutlak Yüzde Hatası)
MSE	: Mean Square Error (Ortalama Kare Hata)
MEET	: Methodologies for Estimating Emissions from Transport (Ulaştırmadan Kaynaklı Emisyon Tahmin Yöntemleri)
RMSE	: Root Mean Square Error (Kök Ortalama Kare Hata)
RNN	: Recurrent Neural Network (Yinelemeli Sinir Ağı)
SCLCC	: Spatio-Temporal Ship Clustering with Learning-based Components (Öğrenmeye Dayalı Uzamsal-Zamansal Gemi Kümeleme Modeli)

SECA	: Sulfur Emission Control Areas (Sülfür Emisyon Kontrol Alanları)
SMOreg	: Sequential Minimal Optimization Regression (Sıralı Minimal Optimizasyon Regresyonu)
STSA	: Spatio-Temporal Search Algorithm (Uzamsal-Zamansal Arama Algoritması)
TFT	: Temporal Fusion Transformer (Zaman Serisi için Derin Öğrenme Modeli)
TRENDS	: Transport and Environment Reporting Mechanism (Ulaştırma ve Çevre Raporlama Sistemi)
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
MLP	: Multilayer Perceptron (Çok Katmanlı Algılayıcı)
PM	: Partiküler maddeler
VOC	: Volatile Organic Compounds (Uçucu Organik Bileşikler)
WEKA	: Waikato Environment for Knowledge Analysis (Veri Madenciliği Yazılımı)
WoS	: Web of Science(Bilimsel Atıf Dizini)



TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Çanakkale Boğazı coğrafi bilgi tablosu [37]	15
Tablo 4.2. Gemi ana makine ve jeneratörlerin yük faktörleri [47]	23
Tablo 4.3. Gemi türlerine göre tam yükte yakıt tüketimi [47]	23
Tablo 4.4. Seyir halindeki gemilerin emisyon faktörleri (Kg/ton yakıt) [48]	24
Tablo 5.1. Gemi tiplerine göre Çanakkale geçişi yakıt tüketimi.....	31
Tablo 5.2. Çanakkale Boğazı gemi tiplerine göre yakıt tüketimi (ton).....	31
Tablo 5.3. Genel kargo gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton) ...	34
Tablo 5.4. Dökme yük gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)	36
Tablo 5.5. Konteyner gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)	38
Tablo 5.6. Türü belirtilmemiş tanker gemileri 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)	40
Tablo 5.7. Genel kargo gemisi emisyon tahmin performansları karşılaştırması.....	50
Tablo 5.8. Dökme yük gemisi emisyon tahmin performansları karşılaştırması.....	53
Tablo 5.9. Konteyner gemisi emisyon tahmin performansları karşılaştırması	55
Tablo 5.10. Türü belirtilmemiş tanker gemileri emisyon tahmin performansları karşılaştırması.....	58

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yıllara göre yayın sayılarının dağılımı [5].....	4
Şekil 2.2. Ülkelerin yayın sayılarına göre dağılımı [5]	5
Şekil 2.3. Bilimsel disiplinlere göre yayın sayılarının ağaç haritası [5]	6
Şekil 3.1. Sera gazı emisyonları (CO ₂ eşdeğeri), 1990 – 2023 [18]	9
Şekil 4.1. Yıllara göre Çanakkale Boğazı gemi geçişleri [39]	16
Şekil 4.2. Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin yıllara göre gros tonaj değişimi [39]	17
Şekil 4.3. 2019-2024 Geçiş yapan gemilerin aylık dağılımı [39]	17
Şekil 4.4. Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin tiplerine ve yıllara göre dağılımı[39]	18
Şekil 4.5. WEKA GUI Chooser Arayüzü	25
Şekil 5.1. 2024 Yılı Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemi türlerinin pareto analizi	29
Şekil 5 2. Çanakkale Boğazı geçiş güzergâhı [65].....	30
Şekil 5.3. Weka Preprocess ekranı	43
Şekil 5.4. Genel kargo gemisi CO ₂ değişkeninin özet istatistikleri	43
Şekil 5.5. Genel kargo gemisi PM değişkeninin özet istatistikleri.....	44
Şekil 5.6. Genel kargo gemisi emisyon değişkenlerine ait frekans dağılımı	45
Şekil 5.7. WEKA Forecast basic configuration parametre seçimleri.....	46
Şekil 5.8. WEKA Forecast advanced configuration algoritma seçimi.....	46
Şekil 5.9. Lag Creation Seçimi.....	47
Şekil 5.10. Genel kargo gemisi NO _x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025).....	48
Şekil 5.11. Genel kargo gemisi CO ₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	49
Şekil 5.12. Genel kargo gemisi PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	49
Şekil 5.13. Dökme yük gemisi NO _x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025).....	51
Şekil 5.14. Dökme yük gemisi CO ₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	51
Şekil 5.15. Dökme yük gemisi PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	52
Şekil 5.16. Konteyner gemisi NO _x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025).....	53
Şekil 5.17. Konteyner gemisi CO ₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)	54
Şekil 5.18. Konteyner gemisi PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	55
Şekil 5.19. Türü belirtilmemiş tanker gemileri NO _x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025).....	56
Şekil 5.20. Türü belirtilmemiş tanker gemileri CO ₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	57
Şekil 5.21. Türü belirtilmemiş tanker gemileri PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025).....	57

ÇANAKKALE BOĞAZI'NDAN GEÇEN GEMİLERDEN KAYNAKLANAN SERA GAZI EMİSYONLARININ TAHMİNLEMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının çevresel etkileri ele alınmış; Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemilere ait emisyonlar analiz edilmiştir. Mevcut veriler kullanılarak bu emisyonların tahmin edilmesine yönelik bir modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, 2019–2025 dönemini kapsayan 75 aylık gemi geçiş istatistiklerine dayanarak Trozzi ve Vaccaro metodolojisi ile karbon emisyonları hesaplanmıştır.

Tahminleme sürecinde, Trozzi ve Vaccaro metodolojisi ile elde edilen karbon emisyon verileri kullanılarak Weka yazılımı aracılığıyla Lineer Regresyon, Multilayer Perceptron (MLP) ve Sequential Minimal Optimization for Regression (SMOreg) algoritmaları uygulanmış; modellerin performansları Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) metrikleriyle karşılaştırılmıştır.

Çalışma, yalnızca mevcut emisyon düzeylerini raporlamakla kalmayıp, aynı zamanda elde edilen tahminleme çıktıları ile literatüre katkı sağlamayı ve çevresel planlamada ve emisyon kontrol stratejilerinin geliştirilmesinde karar alıcılara destek sağlayabilecek nitelikte bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çanakkale Boğazı, Emisyon, Tahminleme

ESTIMATING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM SHIPS PASSING THROUGH THE DARDANELLES

ABSTRACT

In this thesis, the environmental impacts of greenhouse gas emissions from ships have been examined, and the emissions of vessels passing through the Dardanelles Strait have been analyzed. A modeling study was conducted to estimate these emissions using the available data. Within the scope of the study, carbon emissions were calculated based on ship passage statistics covering the period from 2019 to 2025 (75 months), using the Trozzi and Vaccaro methodology.

During the prediction process, the carbon emission data obtained through the Trozzi and Vaccaro methodology were used to apply Linear Regression, Multilayer Perceptron (MLP), and Sequential Minimal Optimization for Regression (SMOreg) algorithms via Weka software. The performance of the models was compared using evaluation metrics such as Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), and Root Mean Square Error (RMSE).

This study not only reports the current levels of emissions but also aims to contribute to the literature through the forecasting results and to provide decision-makers with informative insights for environmental planning and the development of emission control strategies.

Keywords: Dardanelles Strait, Emission, Forecasting

1. GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği, sanayileşmenin artması ile birlikte enerji ihtiyacının da artmasına bağlı olarak atmosferdeki karbon salınımlarının hızla yükselmesiyle günümüzün insanlık ve çevre için en kritik çevresel sorunlarından biri haline gelmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, küresel karbon emisyonları 2024 yılında %0,8 artış göstererek 37,8 gigaton ile tüm zamanların en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Bu artış sonucunda atmosferdeki CO₂ konsantrasyonlarının da 422,5 parts per million (ppm) ile rekor seviyeye çıkmıştır. Bu değer, 2023 yılına kıyasla yaklaşık 3 ppm daha fazla ve sanayi öncesi seviyelerin ise %50 üzerinde olduğunu göstermiştir [1]. Deniz taşımacılığı kaynaklı karbondioksit (CO₂) salınımının, dünya genelinde sera gazı emisyonlarının 2018'de 1056 milyon ton ile %2.89'unu oluşturulduğu görülmüştür [2]. Bu oran, birçok ülkenin sebep olduğu emisyon miktarından yüksektir bu sebeple de denizcilik faaliyetleri kaynaklı emisyon azaltma politikaları ciddiyle ele alınmaktadır.

Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO), 2022'de Akdeniz'de gemi kaynaklı emisyonların azaltılması için MEPC 79'uncu dönem toplantısında Akdeniz, 1 Mayıs 2025 itibarıyla MARPOL Ek VI kapsamında resmî olarak Sülfür Emisyon Kontrol Alanı (Med SO_x ECA) ilan edilmiştir. Bölgede faaliyet gösteren gemilerin yakıtlarındaki sülfür oranı artık %0,1 ile sınırlandırılmıştır. Akdeniz, dünyanın en yoğun deniz yollarından biri olmakla birlikte Dünya çapındaki küresel kurvaziyer seferlerinin %17'sinden fazlasının ve dünya deniz filosunun %24'ünün bu bölgede faaliyet gösterdiği tahmin edilmektedir [3].

İstanbul ve Çanakkale Boğazı ile Marmara Denizi'nden oluşan Türk Boğazları, Karadeniz ile Akdeniz arasındaki tek doğal su yolu olması nedeniyle stratejik bir öneme sahiptir. Toplam 164 deniz mili uzunluğundaki bu dar ve karmaşık sistem, jeopolitik, ekonomik ve çevresel açıdan büyük bir değer taşımaktadır. Çanakkale Boğazı, bu sistemin önemli bir bileşeni olarak yaklaşık 37,8 deniz mili uzunluğa sahiptir. Genişliği bazı bölgelerde 0,7 deniz miline kadar düşmekte, özellikle Nara Burnu gibi keskin dönüş noktaları ve güçlü yüzey ile dip akıntıları nedeniyle gemiler bu bölgede düşük hızla seyretmek zorunda kalmaktadır [4]. Bu düşük hız rejimi, motor yük faktörünün artmasına ve yakıt tüketiminin verimsiz bir şekilde gerçekleşmesine neden olarak birim mesafe başına düşen emisyon yoğunluğunu diğer su yollarına kıyasla belirgin biçimde artırmaktadır.

Bu bağlamda, Çanakkale Boğazı'ndaki gemilerden kaynaklanan emisyonların izlenmesi ve ileriki yıllar için modellenmesi, hem bölgedeki hava kalitesinin korunarak insan sağlığı ve

Çevrenin gözetilmesi hem de Türkiye'nin uluslararası denizcilik işlerindeki konumunun güçlendirilmesi açısından stratejik öneme sahiptir. Bu çalışmanın başlıca amacı, ulusal emisyon envanterine katkı sağlamayı sağlamak ve Türkiye'nin iklim değişikliğiyle mücadelesine yönelik veri temelli politika ve stratejilerin geliştirilmesine destek olmaktır.

Bu çalışmada öncelikle, Çanakkale Boğazı'nın stratejik önemi ve gemi kaynaklı emisyon faktörleri ele alınmıştır. Ardından, Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemilerin neden olduğu emisyonların hesaplanması ve tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda kullanılan gemi geçiş verileri, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın yayımladığı "Türk Boğazları Gemi Geçiş İstatistikleri" raporuna dayanmaktadır. İlk olarak, 2024 yılına ait gemi geçişleri incelenmiş ve Pareto analizi uygulanarak en sık geçen dört gemi türü belirlenmiştir. Bu gemi türlerinin neden olduğu karbon emisyonları, 2019 yılından 2025 yılının ilk çeyreğine kadar olan dönemi kapsayacak şekilde Trozzi–Vaccaro yöntemi kullanılarak Microsoft Excel aracılığıyla hesaplanmıştır. Elde edilen verilerin ilk 60 ayı eğitim, son 15 ayı ise test verisi olarak ayrılmıştır.

Tahminleme sürecinde, WEKA yazılımı kullanılarak Lineer Regresyon, SMOreg ve çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) algoritmaları uygulanmıştır. Modelleme sonuçları grafiklerle sunulmuş, algoritmaların performansı ise MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hata), MAE (Ortalama Mutlak Hata) ve RMSE (Kök Ortalama Kare Hata) metrikleri üzerinden karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Tezin son bölümünde tartışma, sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

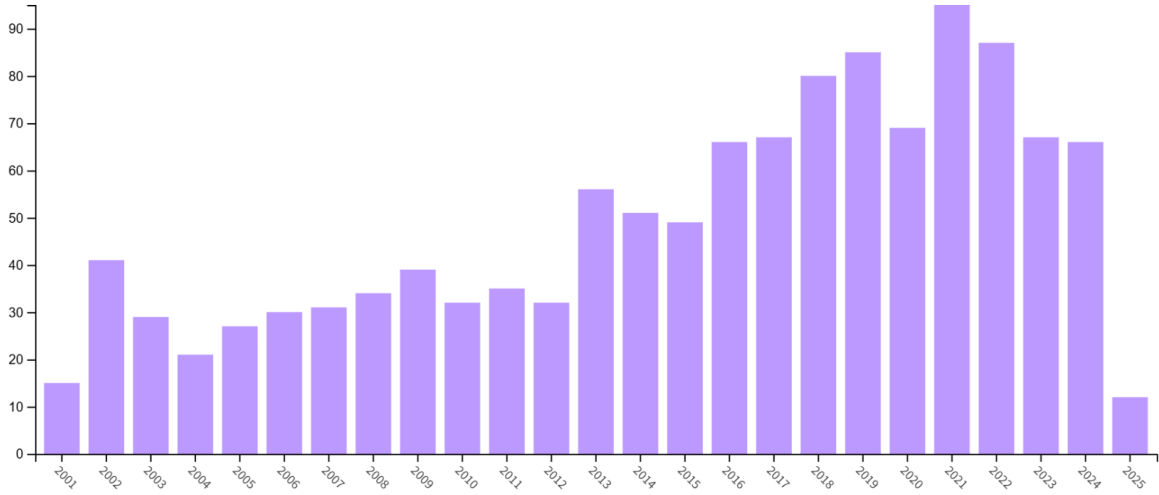
2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmaya ait bibliyografik veriler, Web of Science (WoS) Core Collection'dan 27/03/2025 tarihinde gerçekleştirilen Gelişmiş Arama Sorgusu (Advanced Search Query) ile elde edilmiştir. WoS, dünya çapında en tanınmış bilimsel atıf indeks veri tabanlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan arama sorgusu şu şekildedir:

(((((ALL=(emission estimation)) OR ALL=(emission prediction)) OR ALL=(emission calculation)) AND ALL=(Maritime)) OR ALL=(sea way)) AND ALL=(time series))

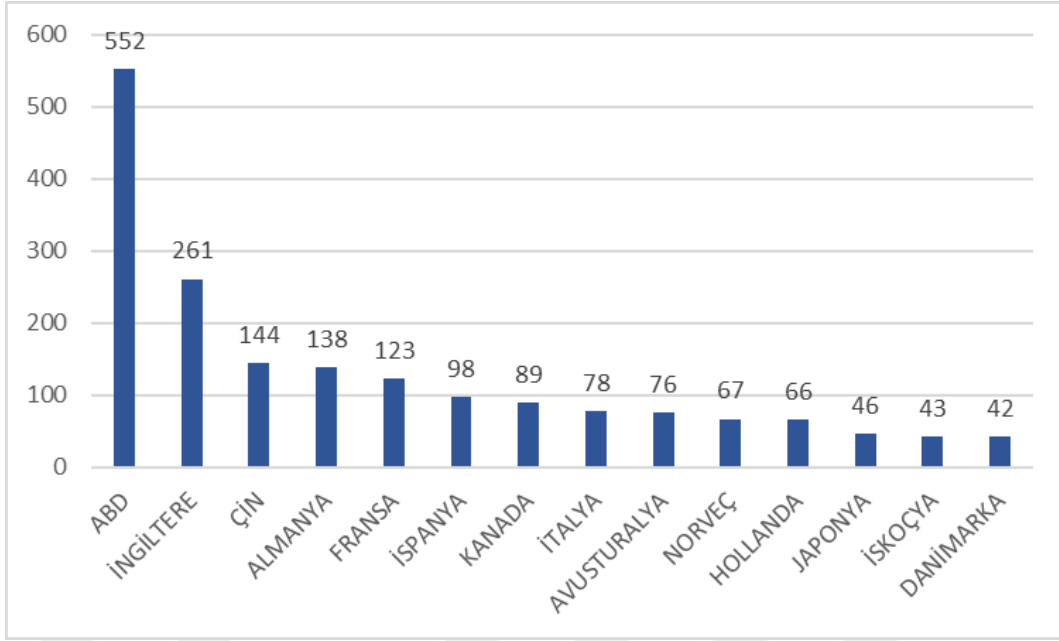
Bu sorgu sonucunda, emisyon tahmini ve zaman serileriyle ilgili 1355 makale tespit edilmiştir. Veri setindeki en erken tarihli yayın 1980 yılına ait olup, bu durum alandaki araştırmaların köklü bir geçmişe sahip olduğunu ve aynı zamanda gelişmekte olduğunu göstermektedir. 1994 yılına yaklaşıldıkça, yapılan çalışmaların sayısının çift haneli rakamlara ulaştığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın odak noktasının gemi kaynaklı emisyonların zaman serisi analizleri olarak belirlenmesi amacıyla, karayolu taşımacılığı ve sanayi kaynaklı emisyonlar ile ilgili anahtar kelimeler arama sorgusuna dâhil edilmemiştir. Bu sayede, gemi kaynaklı emisyonların zaman serisiyle tahminini ele alan çalışmalar seçilmiş, konu kapsamının dışında kalan daha genel çalışmalar ise filtrelenmiştir.

Şekil 2.1'de sunulan Yıllara göre yayın sayılarının dağılımı, 2001-2012 döneminde görece düşük ve dalgalı bir trendi ortaya koymaktadır. Bu süre zarfında yayın sayıları 15 ile 40 arasında dalgalanmakta ve tutarlı bir artışı göstermemektedir. 2013 yılından itibaren ise yayın sayılarında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Bu artış, 2016–2021 döneminde daha da belirginleşerek, yayın sayılarının en yüksek seviyelere ulaştığı bir dönem halini almıştır. Özellikle 2021 yılında, yaklaşık 95 yayınlı zirve noktası kaydedilmiştir. 2022 ve 2023 yıllarında ise yayın sayılarında kısmi bir azalma yaşanmış olsa da yine de önceki yıllara kıyasla yüksek düzeyde kaldığı görülmektedir. 2025 yılına ilişkin veriler, yılın henüz tamamlanmamış olması nedeniyle sınırlı görünmekte ve bu nedenle kapsamlı bir değerlendirme için yeterli veri bulunmamaktadır. Buna karşın, genel olarak bakıldığında 2013'ten sonraki dönemde yayın faaliyetlerinde kayda değer bir artış yaşandığı ve araştırma üretkenliğinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir.



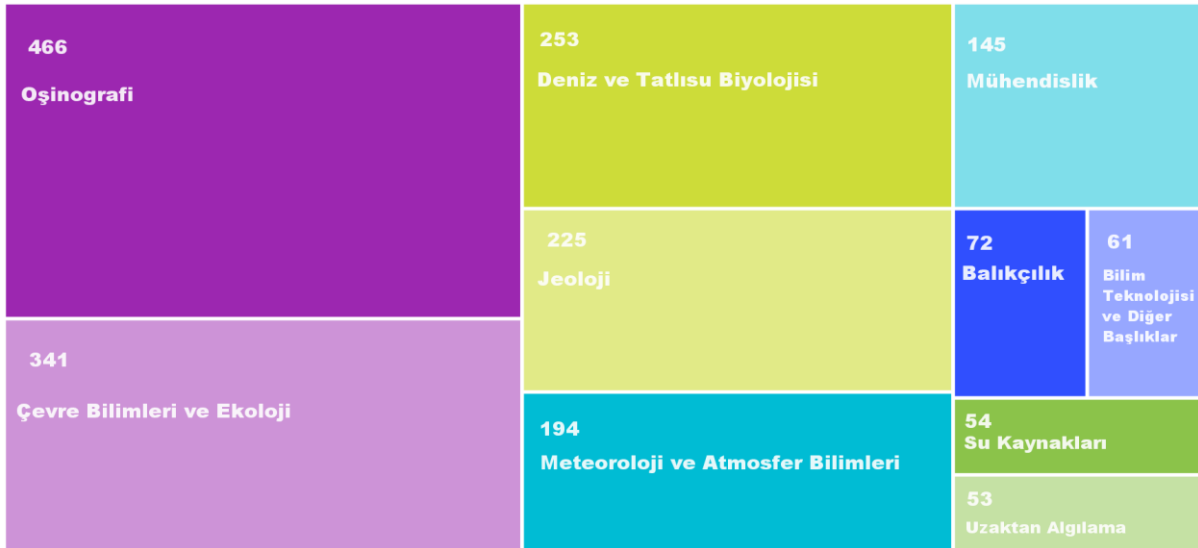
Şekil 2.1. Yıllara göre yayın sayılarının dağılımı [5]

Şekil 2.2’de Ülkelerin yayın sayılarına göre dağılımına bakıldığında, bilimsel üretkenlik açısından ülkeler arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. En fazla yayına sahip ülke açık ara farkla Amerika Birleşik Devletleri (ABD) olup, 552 yayın ile ilk sırada yer almaktadır. ABD’yi sırasıyla 260’tan fazla yayın ile İngiltere, 140 civarında yayınla Çin Halk Cumhuriyeti, Almanya ve Fransa izlemektedir. İspanya, Kanada, İtalya ve Avustralya gibi ülkeler orta düzeyde yayın sayısına sahipken; Norveç, Hollanda, Japonya ve İskoçya gibi ülkelerde yayın sayısı daha düşük düzeylerde seyretmektedir. Listenin son sıralarında ise İsrail, Yeni Zelanda, Yunanistan, Güney Kore ve İsviçre gibi ülkeler yer almakta, bu ülkelerde yayın sayılarının oldukça sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu dağılım, ilgili konuda yapılan çalışmaların coğrafi olarak büyük ölçüde belirli ülkelerde yoğunlaştığını göstermektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde yürütülen araştırmaların, bilimsel literatürde daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Türkiye ise grafikte yer almamaktadır; bu durum, konuya ilişkin yayın sayısının henüz sınırlı düzeyde olduğunu ve uluslararası literatürde daha görünür olma ihtiyacını ortaya koymaktadır. Şekil 2.2’de yalnızca başlıca ülkelerin yer alması, diğer ülkelerin görece düşük yayın sayılarının olması ve grafiğin okunabilirliğini kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır.



Şekil 2.2. Ülkelerin yayın sayılarına göre dağılımı [5]

Yayınlarla ilişkin çalışma alanları Şekil 2.3. Bilimsel disiplinlere göre yayın sayılarının ağaç haritası farklı bilimsel disiplinlerdeki yayın sayılarının görsel dağılımını ortaya koymaktadır. Görselde en geniş alanı kaplayan ve dolayısıyla en fazla sayıda yayına sahip olan disiplin, 466 yayın ile Oşinografi olarak öne çıkmaktadır. Bunu sırasıyla 341 yayınla Çevre Bilimleri ve Ekoloji 253 yayınla Deniz ve Tatlısu Biyolojisi ve 225 yayınla Jeoloji takip etmektedir. Diğer disiplinler görece daha az sayıda yayına sahip olmakla birlikte; Mühendislik, Meteoroloji ve Atmosfer Bilimleri ve Balıkçılık gibi alanlarda da kayda değer düzeyde araştırma yapıldığı gözlemlenmektedir. Bu dağılım, yayınların büyük oranda deniz bilimleri ve çevre ile ilişkili disiplinlerde yoğunlaştığını göstermekte; dolayısıyla bu alanların bilimsel araştırmalarda öncelikli konular arasında yer aldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2.3. Bilimsel disiplinlere göre yayın sayılarının ağaç haritası [5]

Literatürde, deniz taşımacılığı kaynaklı karbon emisyonlarının zaman serisi analizleriyle tahmin edilmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır.

Xie ve diğ. [6], Tianjin Limanı çevresindeki deniz alanında, eksik veya hatalı otomatik tanımlama sistemi (AIS) verilerini işleyerek gemilerin sera gazı emisyonlarını yüksek çözünürlüklü mekânsal ve zamansal envanterle tahmin etmek için TFT zaman serisi modeli kullanmaktadır. Çalışma, yedi kanal, sekiz demirleme alanı ve 205 rıhtımı kapsayarak CO₂, N₂O ve CH₄ emisyonlarını titizlikle değerlendirmektedir. Amaç, yetkililerin yeşil dönüşüm girişimleriyle uyumlu olarak etkili ve hedefe yönelik emisyon azaltım politikaları uygulayabilmesi için veri destekli içgörüler sağlamaktır. Tianjin Limanı'nda yapılan analizler, geliştirilen modelin RNN ve LSTM'ye kıyasla daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Hussain ve diğ. [7], çalışmada Pakistan'daki Muhammad Bin Qasim Limanı'nı ele almışlardır. 2020 yılına ait faaliyet verilerine dayanarak yürütülen çalışmada, gemi türleri ve operasyon modlarına göre CO₂, NO_x, SO₂ gibi başlıca kirleticiler için emisyon miktarları ve sosyal maliyetleri hesaplanmıştır. "Activity-based" ya da diğer adıyla "bottom-up approach" (aşağıdan yukarıya yaklaşım) yöntemini kullanmıştır. Sonuçlar, CO₂'nin toplam emisyonların %92'sinin karbon dioksit (CO₂), %5'inin azot oksit (NO_x), ve %1,5'inin kükürt dioksit (SO₂) olduğunu belirlemiştir; ayrıca konteyner gemilerinin %64, tankerlerin ise %24 oranında toplam emisyonlara katkı sağladığını saptamıştır. Bu çalışmada, özellikle Kasım ve Aralık aylarında emisyonların %20'nin üzerine çıktığı, yani mevsimsel dalgalanmaların etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Feng ve diğ. [8], Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) verilerini kullanarak yeni bir uzamsal-zamansal arama algoritması (STSA) ile modüler derin öğrenme modeli (SCLCC) geliştirmiştir. COVID-19 öncesi ve sonrası verilerle yapılan deneylerde, STSA algoritmasının gemi seyir durumlarını yüksek doğrulukla belirlediği, SCLCC modelinin ise ani gelişen olaylara karşı dayanıklı ve yüksek tahmin performansına sahip olduğu bulunmuştur. Yapılan çalışma ile COVID-19 pandemisinin gemi emisyonları üzerindeki etkisini açıkça göstermiştir.

Wang ve diğ. [9], sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) taşıyan gemilere ait Otomatik Tanımlama Sistemi verilerine odaklanmıştır. Gemi seyir verilerinin işlenmesi, LSTM modeliyle gelecekteki hareketlerin öngörülmesi ve ardından emisyonların hesaplanmasını içeren üç aşamalı bir yöntem uygulamıştır. Sonuçlar, mevcut emisyonların olduğundan az raporlandığını ve LSTM modelinin yüksek doğrulukla tahmin yapabildiğini ortaya koymuştur.

Acciaro ve McKinnon [10], 2012 yılına ait 2300 konteyner taşımacılığında kaynaklanan karbon emisyonları araştırılmıştır. BSR Clean Cargo Working Group'un yakıt tüketimi verilerini kullanarak ekonometrik modelleme yöntemi ile gemi yaşı, boyutu ve hızı gibi değişkenlerin emisyon üzerindeki etkisini incelenmiştir. Sonuçlar, taşıyıcılar arasında enerji verimliliği ve karbon yoğunluğu bakımından önemli farklar olduğunu göstermiştir.

Ju ve Hargreaves [11], Singapur Batı Boğazı'ndaki gemi kaynaklı karbondioksit (CO₂) emisyonlarını inceleyerek, ülkenin 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %50 oranında azaltma hedefinin gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceğini değerlendirmiştir. Bu amaçla, Otomatik Tanımlama Sistemi (AIS) verileri ve Singapur Denizcilik Veri Merkezi'nden elde edilen statik bilgiler kullanılmış ve MEET ile TRENDS yöntemleri aracılığıyla gemi başına saatlik emisyonlar hesaplanmıştır. Çalışmanın bulguları, gemi türleri ve bayraklarına göre emisyon düzeylerindeki değişimleri ortaya koymuş, ayrıca COVID-19 pandemisi sırasında trafik hacmi ve emisyon seviyelerindeki azalmaları da incelemiştir.

Greene ve diğ. [12], ham petrolün deniz taşımacılığının "well-to-tank" karbon emisyonlarını değerlendirmek için 28.000'den fazla sevkiyat örneği kullanarak her bir yolculuğun karbon emisyonlarını tahmin etmişlerdir. Emisyon hesaplamaları, taşıma mesafesi ve gemi verimliliği gibi faktörlere dayanarak yapılmıştır. Sonuçlar, emisyonların en önemli belirleyicisinin mesafe olduğunu ortaya koymakta ve emisyonları azaltmak için yerel sevkiyatların artırılmasının öncelikli bir adım olması gerektiğini vurgulamaktadır.

Mersin, Bayırhan ve Yıldırım [13], tarafından yapılan çalışmada, Kanal İstanbul Projesi'nin gemi kaynaklı emisyonlar üzerindeki olası etkileri incelenmiştir. Çalışmada, gemi trafiği ve

tonajındaki gelecekteki değişiklikleri tahmin etmek için Weka yazılımı kullanılarak Gauss süreçleri ve SMO regresyonu gibi iki farklı zaman serisi tahmin yöntemi uygulanmış, SMO regresyonu daha başarılı sonuçlar vermiştir. Ardından, gemilerin toplam yakıt tüketimi hesaplanmış ve Trozzi ve Vaccaro yöntemleriyle karbon dioksit, azot oksit, uçucu organik bileşikler, partikül madde ve kükürt oksit gibi emisyonlar tahmin edilmiştir.

Mersin ve Mısırlıoğlu [14], tarafından yapılan çalışmada, emisyon hesabı için yeni yaklaşım geliştirerek farklı gemi türleri için ton/mil başına taşınan yük temelinde minimum enerji verimliliği standartlarına değinmişlerdir. Yaptıkları araştırma ile gemi emisyonlarının çevresel etkilerine dair bilgiler iletmış ve deniz taşımacılığında enerji verimliliğinin artırılmasının önemi anlatılmıştır.

Savaş ve Bilgili [15], Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemilere ait 2020 yılı verileri işlenerek bu gemilerin oluşturduğu emisyonlar hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak emisyonların çevreye verdikleri zararlar ve çözüm yolları üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmalar, deniz taşımacılığında karbon emisyonlarının modellenmesinde farklı yöntemlerin kullanıldığını ve özellikle yapay zekâ tabanlı yaklaşımların ön plana çıktığını ortaya koymaktadır.

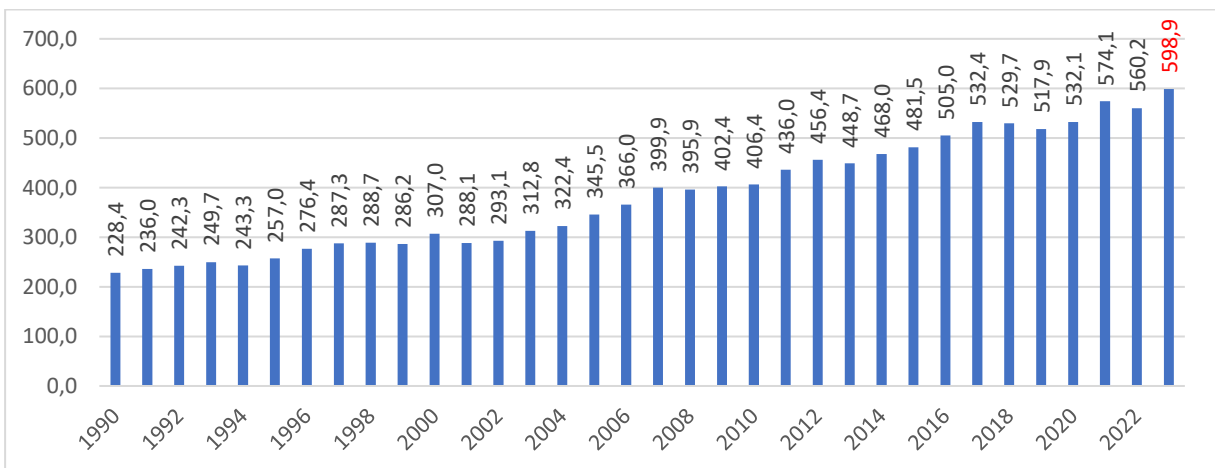
Literatür incelendiğinde, mevcut çalışmaların genellikle büyük liman bölgeleri ve küresel rotalar üzerine odaklandığını, Türkiye özelinde ise bu kapsamda yapılan akademik çalışmaların oldukça sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu tez çalışması, Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemilere ait yerel veriler kullanılarak oluşturulan özgün bir emisyon envanteri sunmaktadır. Bölgesel düzeyde gerçekleştirilen bu analiz, genel filo ya da küresel veri setlerine dayanan çalışmalardan farklı olarak, yerel emisyon dinamiklerini ortaya koyarak literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Gemi türlerinin belirlenmesinde kullanılan Pareto analizi, modelleme sürecine veri temelli ve sistematik bir yaklaşım kazandırmış; bu yöntem, benzer çalışmalarda nadiren kullanılan bir araç olarak çalışmanın özgünlüğünü artırmıştır. Ayrıca, emisyon değerlerinin makine öğrenmesi algoritmalarıyla tahmin edilmesi, analizlere öngörücü bir boyut kazandırmakta ve sürdürülebilir deniz taşımacılığına yönelik bölgesel çevre politikalarının geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

3. HAVA KİRLİLİĞİ VE GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLAR

Sanayi devrimi ile endüstriyel üretim hızlanmış yüksek kapasite kullanımının sonucunda dünyanın doğal düzenine yapılan müdahaleler çevresel sorunlara neden olmuştur. Kitle üretimi ile milletler ekonomik olarak büyürken öte yanda küresel ısınma, çevresel kirlilik, iklim değişiklikleri baş göstermiştir. Nüfustaki artış, ekonomik büyüme ile ekosistemdeki sorunlar arasındaki ilişki zaman içerisinde tartılmış ve çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çevresel kirlilik ve iklimsel değişiklikle mücadele kapsamında 1997 yılında Kyoto protokoli hazırlanmıştır. 160 ülke tarafından imzalanan bu protokolün amacı atmosferdeki sera gazı emisyonunun tehlikeli seviyede artmaması için ülkelerin emisyonlarını sınırlamaktır [16].

2009 yılında Türkiye de Kyoto Protokolünü imzalamıştır. Türkiye bu protokolü imzalayarak 2008-2012 yılları arasında salınan sera gazı emisyonunu 1990 yılına kıyasla %8 oranla azaltmayı kabul etmiştir [17].

Aşağıda Şekil 3.1’ de 1990-2023 yılları arasında Türkiye sera gazı envanteri sonuçları verilmiştir [18]. 2023 yılı toplam sera gazı emisyonunun 558,3 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. 1990 yılında 228,4 Mt olan emisyonların yıllar içinde artış göstererek 2023 itibarıyla 598,9 Mt’a ulaştığı görülmüştür. Özellikle 2000’li yılların ortasından itibaren emisyonlar da belirgin bir artış olduğu gözlemlenirken, 2018-2021 yılları arasında nispeten yatay bir seyir izlenmiştir. Ancak 2022 ve 2023 yıllarında tekrar hızlı bir yükseliş dikkat çekmektedir. 2023 yılı ise en yüksek sera gazı emisyonunun gerçekleştiği yıl olarak öne çıkmakta ve Türkiye’nin karbon ayak izinin yıllar içinde ciddi şekilde arttığını göstermektedir.



Şekil 3.1. Sera gazı emisyonları (CO₂ eşdeğeri), 1990 – 2023 [18]

3.1. Hava Kirliliğinin Tanımı ve Genel Etkileri

Hava kirliliği, çeşitli sabit ve hareketli kaynaklardan kaynaklanan, hem doğrudan salınan (birincil emisyonlar) hem de atmosferde oluşan (ikincil emisyonlar) gazlar ve parçacıkların karmaşık bir heterojen karışımıdır [19].

Hava kirliliği, sadece çevresel sistemlere entegre olmayıp aynı zamanda politik, sosyal ve ekonomik sistemlere entegre sistemik bir risktir [20].

Hava kirliliği, sağlık açısından en büyük çevresel risklerden biri olarak kabul edilmektedir. 2019 senesinde şehirlerde ve kırsal bölgelerdeki hava kirliliğinin dünya genelinde senede yaklaşık 4,2 milyon erken ölüme neden olduğu tahmin edilmiştir; bu ölümler, kardiyovasküler ve solunum yolu hastalıklarına ve kanserlere yol açan ince partikül maddelere maruz kalmaktan kaynaklanmaktadır. Devletler daha temiz ulaşım, enerji verimliliği sağlanmış evler, geliştirilmiş atık yönetimi gibi konularında uygulamalar, yatırımlar ve politikalar ile hava kirliliği seviyelerini önemli miktarda düşürebilir. Hava kirliliği seviyelerini düşürerek; inme, kalp hastalıkları, akciğer kanseri ve astım da dâhil olmak üzere hem kronik hem de akut solunum yolu hastalıklarından kaynaklanan hastalık yükünü azaltabilirler [21].

3.2. Gemi Kaynaklı Emisyonların Özellikleri ve Başlıca Kirleticiler

Deniz taşımacılığı, uluslararası taşımacılığın bir parçası olarak oldukça karmaşık ve geniş bir ekonomik faaliyettir. Gelişimi dünya piyasalarının gelişimine sıkı sıkıya bağlı olup ekonomik döngülerle de yakından ilişkilidir. Bu sebeple küresel ekonominin evrimine önemli katkıda bulunmaktadır. Deniz taşımacılığı, üretim ile pazar arasındaki en ucuz yol olup büyük miktarlarda malın kısa sürede güvenli koşullarda taşınmasını sağlamaktadır [22].

Dünya genelinde deniz ticareti 2023'te 2022 yılına kıyasla %2,4 oranında büyümüştür. Dünya ticaret hacminin %80'inden fazlası denizyolu ile gerçekleştirilmektedir. Deniz taşımacılığının 2024 yılında %2 ve 2029 yılına kadar yılda ortalama %2,9 büyümesi öngörülmektedir [23].

Denizyolu taşımacılığı, Dünya genelinde olduğu gibi Türkiye'nin dış ticaretin için de kilit rol oynamaktadır. Ülkemizde de; denizyolu, taşınan yük miktarı ve değeri açısından en büyük paya sahip taşıma biçimidir. TÜİK verilerine göre, 2023 yılında ihracatın %56'sı denizyoluyla ithalatın ise %53,9'u denizyoluyla gerçekleştirilmiştir [24].

Son 50-60 yıl boyunca dünya ekonomisinin benzersiz bir şekilde büyümesine destek olan deniz taşımacılığı, gemi inşası, işletmesi ve yönetimindeki teknolojik ilerlemeler sayesinde, daha güvenli, daha güvenilir ve daha verimli hizmetleri daha düşük maliyetlerle sunarak artan talebi

karşılamaya devam etmektedir. Ayrıca, taşınan her ton-mil kargo başına düşen emisyon gramı açısından çevre dostu taşıma yöntemidir [25].

İnsan faaliyetleri, özellikle üretim ve günlük yaşamda fosil yakıtların yoğun şekilde kullanılması, kükürt dioksit ve ince partiküller gibi önemli hava kirleticilerinin salınımına yol açarak çevresel hava kalitesini olumsuz etkiler [26]. Sağlık açısından en fazla dikkat çeken kirleticiler arasında partikül madde (PM), karbon monoksit (CO), ozon (O₃), nitrojen dioksit (NO₂) ve kükürt dioksit (SO₂) yer alır. Bu çeşitli kirleticilere hem kısa hem de uzun süreli maruz kalmanın bir sonucu olarak sağlık sorunları ortaya çıkabilir [27].

3.2.1. Partikül madde

Havadaki PM, parçacıkların boyutuna göre tanımlanmıştır; kaba parçacıklar veya PM₁₀ (çapı 10 µm veya daha az), ince parçacıklar veya PM_{2.5} (çapı 2,5 µm veya daha az) ve ultra ince parçacıklar veya nanopartiküller (çapı 0,1 µm'den küçük). Parçacıkların boyutu ve bileşimi öncelikle kaynağına bağlıdır. Havadaki PM₁₀, temel olarak rüzgardan, araçların hareketi, yolların tozu, inşaat çalışmaları ve endüstriyel emisyonların sonucu olarak ortaya çıkar. PM_{2.5} ise motorlu yol trafiği, enerji santralleri, petrol, kömür veya odun kullanılarak yapılan endüstriyel ve konut ısıtması dahil olmak üzere esas olarak fosil yakıtların yanmasından elde edilir. Bu şekilde oluşan parçacıklar genellikle karbon, geçiş metalleri, karmaşık organik moleküller, sülfat ve nitratlardan oluşur. Araç motor egzozu (özellikle dizel egzozu) özellikle nanopartiküller açısından zengindir; bunlar, PM_{2.5}'in toplam kütlesinin yalnızca çok küçük bir kısmına katkıda bulunurken, belirli bir kütle için daha büyük bir reaktif yüzey alanına sahiptir [28].

3.2.2. Karbonmonoksit (CO)

CO (karbonmonoksit), renksiz ve kokusuz bir gazdır ve yüksek miktarda bulunduğu zararlı olabilir. CO, bir şeylerin yanması sırasında ortaya çıkar. Dış ortam havasına CO salan başlıca kaynaklar; otomobiller, kamyonlar ve fosil yakıt yakan tüm diğer araçlar ya da makineleridir. Ev içinde de CO salınımına; bacasız gaz ve gazyağı sobaları, sızdıran bacalar ve kaloriferler ile gazlı ocaklar gibi çeşitli eşyalar CO yayarak iç ortam hava kalitesini olumsuz yönde etkileyerek sağlık açısından risk oluşturabilir. Kapalı alanlarda oluşabilecek yüksek seviyedeki karbonmonoksit (CO) içeren havaya maruz kalmak, kan dolaşımı ile kalp ve beyin gibi hayati organlara taşınabilen oksijen miktarını azaltarak baş dönmesi, kafa karışıklığı, bilinç kaybı ve ölüme neden olabilir. Açık havada CO seviyesinin çok yükselmesi pek olası değildir. Ancak dış ortamda artan CO seviyesi, kalp hastalığına sahip kişiler için endişe verici olabilir. Bu

kişilerde kalp, normalden da fazla oksijene ihtiyaç duyduğu zamanlarda oksijenlenmiş kanı yeterince alamaz. Bu nedenle, egzersiz sırasında veya stres altında olduklarında CO'nun etkilerine karşı daha hassastırlar. Bu tür durumlarda, kısa süreli yüksek CO maruziyeti kalbe giden oksijenin azalmasına ve göğüs ağrısına (anjina) neden olabilir [29].

3.2.3. Ozon (O₃)

Ozon (O₃), üç oksijen atomunun bir araya gelmesiyle oluşan yüksek derecede reaktif bir gazdır. Doğal süreçler sonucunda veya insan faaliyetleriyle sebebiyle oluşabilmektedir. Atmosferin farklı katmanlarında farklı etkilere sebep olmaktadır. Stratosferde bulunan ve "ozon tabakası" olarak adlandırılan bölgedeki ozon, Güneş'ten gelen zararlı ultraviyole (UV) ışınlarının yeryüzüne ulaşmasına engel olarak canlı yaşamı için koruyucu bir işlev üstlenir. Troposferde oluşan ozon ise insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere sebep olur. Bu seviyedeki ozon, uçucu organik bileşikler (VOC) ile azot oksitlerin (NO_x) güneş ışığı ve sıcaklığın etkisiyle fotokimyasal reaksiyonlara girmesi sonucu oluşmaktadır. Troposferde yani yer yüzeyine yakın olan ozonun büyük bölümü insan faaliyetlerine bağlı olup; VOC emisyonları kimya tesisleri, benzin istasyonları, boya ve baskı atölyelerinden, NO_x emisyonları ise enerji santralleri, sanayi kazanları ve motorlu taşıtlardan kaynaklanmaktadır. Ozon maruz kalındığında, solunum yollarındaki biyolojik moleküllerle kimyasal reaksiyona girmesi ile birçok olumsuz sağlık etkisine yol açabilmektedir [30].

3.2.4. Azot bileşikleri (NO_x)

Azot dioksit (NO₂), suda çözüneabilen, kırmızımsı kahverengi renkte ve güçlü oksitleyici özelliklere sahip bir gazdır. Başlıca oluşum sebebi yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yakıt yanmalarıdır. Özellikle ısıtma sistemleri, ulaşım araçları, sanayi faaliyetleri ve enerji üretim tesisleri kaynaklıdır. Başlıca ev içi kaynaklarını yakıtla çalışan fırınlar, şömineler, gazlı ocaklar ve ısıtıcı benzeri cihazlardır. NO₂'ye maruz kalınması sonucunda solunum yollarında tahrişe ve bununla birlikte solunum yolu hastalıklarının şiddetlenmesine neden olarak astım ve benzeri solunum rahatsızlıklarına neden olabilir [31].

3.2.5. Kükürtdioksit (SO₂)

Kükürt dioksit (SO₂); keskin kokuya sahip, renksiz ve oldukça reaktif bir hava kirleticidir. Bu gaz, hem insanlar hem hayvanlar hem de bitkiler için ciddi bir sağlık riski oluşturabilir. Kükürt dioksit emisyonlarının oluşmasının başlıca sebepleri fosil yakıtların yakılması ve doğal volkanik faaliyetlerdir. Kükürt dioksit, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açarak cilt ile göz, burun, boğaz ve akciğerlerdeki mukozaları tahriş eder. SO₂'nin yüksek seviyelerde

olması, özellikle ağır fiziksel aktiviteler esnasında solunum yollarında tahrişe ve iltihaplanmaya yol açabilir. Bu durum; derin nefes alırken ağrı, öksürük, boğazda yanma hissi ve nefes darlığı gibi semptomlarla kendini gösterebilir. SO₂'nin yüksek seviyeleri, akciğer fonksiyonlarını etkileyebilir, astım ataklarını artırabilir ve kalp hastalıkları olanların durumunu da kötüleştirebilir. Dahası bu gaz, havadaki diğer kimyasallarla da reaksiyona girebilir. Akciğerlere ulaşabilen küçük partiküllere dönüşerek benzer sağlık sorunlarına neden olabilir [32].



4. GEMİ KAYNAKLI EMİSYONUN HESAPLAMA MODELLERİ VE TAHMİNLEME YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada, Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin sebep olduğu sera emisyonların tahminlemesi WEKA programındaki makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak hesaplanmış; gemilerden kaynaklanan sera gazı emisyonları ise uluslararası düzeyde kabul görmüş hesaplama yöntemleriyle hesaplanmıştır. Emisyon hesaplamalarında kullanılan gemi geçiş istatistikleri, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'ndan alınmıştır. Çanakkale Boğazı, Türkiye'nin ve uluslararası deniz ticaretinin en büyük geçiş merkezlerinden biri olması ve 1 Mayıs 2025 itibarıyla Sülfür Emisyon Kontrol Alanı olarak seçilmesi nedeniyle çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışma, bölgenin emisyon potansiyelini anlamak ve gelecekteki olası çevresel etkileri değerlendirmek açısından önem arz etmektedir.

4.1. Çanakkale Boğazı Verileri

Çanakkale, Türkiye'nin kuzeybatısında, Balkan Yarımadası'nın Doğu Trakya topraklarına bir kıstakla bağlanan Gelibolu Yarımadası ile Anadolu'nun batı uzantısı olan Biga Yarımadası üzerinde kurulmuştur. Coğrafi koordinatları 25°35' - 27°45' doğu boylamları ile 39°30' - 40°45' kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Şehir, 9.737 km²'lik bir alanı kapsamaktadır [33]. Avrupa ve Asya kıtalarında toprakları bulunan Çanakkale; kuzeybatıda Edirne, kuzeyde Tekirdağ ve doğu ve güneydoğu yönünde Balıkesir il sınırları ile çevrilidir. Şehrin sınırlarına; Ege Denizi'nde yer alan Türkiye'nin en büyük adası Gökçeada ile Bozcaada ve Tavşan Adaları da dâhildir [34].

TÜİK'in 2023 yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları raporuna göre il ve ilçe merkezlerinde 353263, belde ve köylerde 217236 olmak üzere Çanakkale nüfusu toplam 570499 olmuştur [35]. Nüfus bakımından büyükşehir statüsünde olmasa da İstanbul ve İzmir karayolları üzerinde bulunması, Avrupa ve Asya kıtalarını birbirine bağlaması ile önemli bir liman kentidir [36].

Çanakkale Boğazı, Biga ve Gelibolu yarımadalarının arasında, kuzeybatı-güneybatı doğrultusunda bulunan Ege ve Marmara denizlerini birleştiren doğal bir su yoludur. İstanbul Boğazı aracılığıyla Karadeniz'e, Cebelitarık boğazı ve Süveyş kanalı aracılığı ile de açık denizlere bağlanmaktadır. Boğaz'ın coğrafi koordinatları kuzeyde Zincirbozan Feneri'nden geçen boylam (40° 25'.25 N – 026° 45'.24 E), güneyde Kumkale ile (40° 00'.51 N – 026° 11'.88 E) Mehmetçik'i (40° 02'.67 N – 026° 10'.42 E) birleştiren hat arasında bulunmaktadır.

Bu hattın uzunluğu 37 mil, yaklaşık 68,5 km'dir. Çanakkale boğazı, İstanbul Boğazı'nın yaklaşık iki katı uzunluğundadır.

Çanakkale Boğazı'nın en derin noktası Nara açıklarında 107 m, en sığ noktası ise Çardak Bankı üzerinde 2 m olup ortalama 65 metre derinliğe sahiptir. En geniş yeri Karanlık Liman-İntepe arası 5800 metre, en dar yeri ise Kilitbahir ile Çanakkale arası 1250 metredir [37].

Tablo 4.1. Çanakkale Boğazı coğrafi bilgi tablosu [37]

Özellik	Değer
Konum	Çanakkale Boğazı, Türkiye
Bağladığı Denizler	Karadeniz, Marmara, Akdeniz
En Geniş Yer	5,800 metre (5,8 km)
En Dar Yer	1,250 metre (1,25 km)
Maksimum Derinlik	107 metre
Uzunluk	37 deniz mili/ 68,5 kilometre

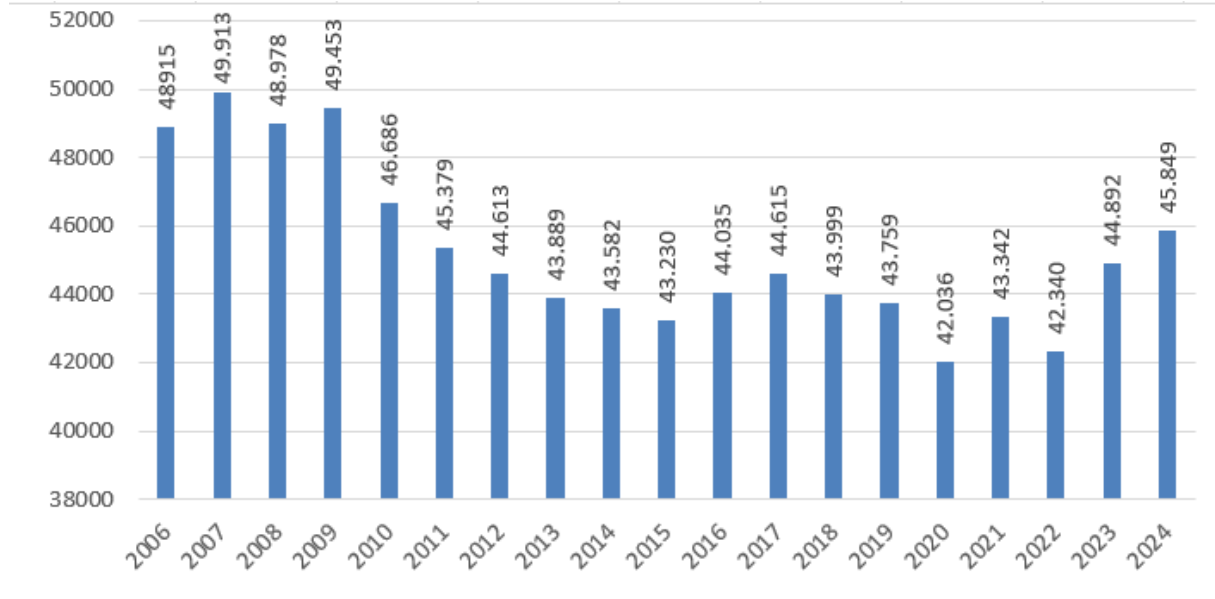
Marmara Denizi'ni Karadeniz'e İstanbul Boğazı ile Ege Denizi'ne de Çanakkale Boğazı ile bağlanmaktadır. Marmara Denizi 11.352 km² alanlı yarı-kapalı bir su kütesidir. Takriben 250 x 70 km gibi sınırlı bir alansal büyüklüğe sahip olan Marmara Denizi'nin ortalama derinliğinin ~300 m'dir [38].

4.1.1. Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemi sayısı ve türleri bilgisi

Çalışmada kullanılan veriler, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın "Türk Boğazları Gemi Geçiş İstatistikleri" raporuna dayanmaktadır. Bu rapor, Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin sayısına dair kapsamlı verileri içermektedir. Analizler, yılda ortalama olarak yaklaşık 45.000 geminin Çanakkale Boğazı'ndan geçtiğini göstermektedir. Bu yoğun gemi trafiği, bölgesel hava kalitesi üzerinde önemli bir etki yaratmakta ve hava kirliliğinin artmasına katkıda bulunmaktadır.

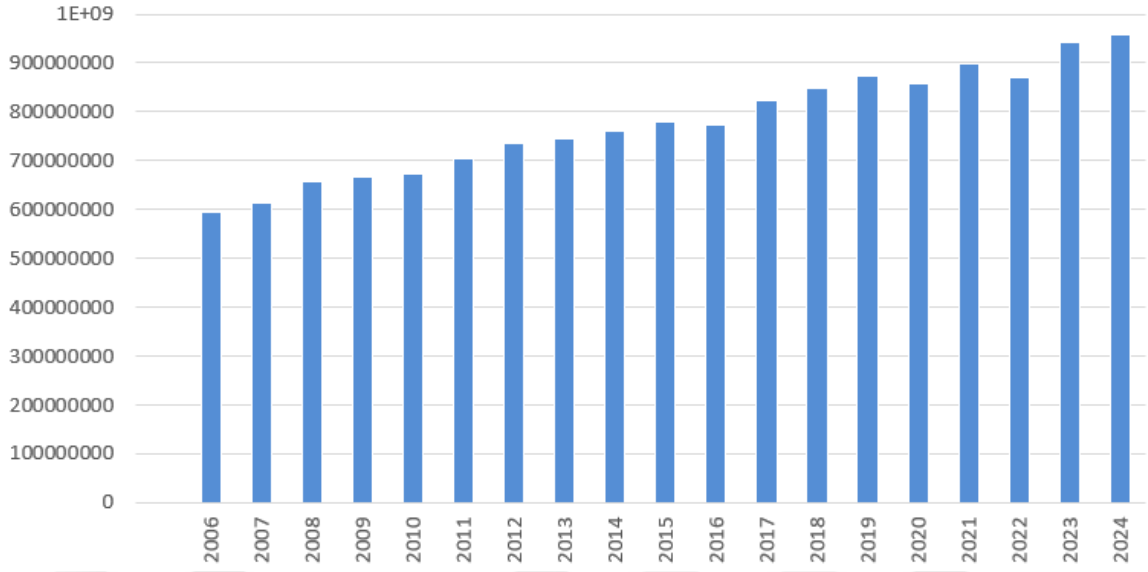
Grafikler, Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin yıllık gramaj tonajı ve gemi tiplerine göre dağılımını ayrıntılı bir şekilde sunmaktadır. Bu veriler, gemi trafiğinin zaman içindeki değişimini ve çeşitli gemi tiplerinin yıllık geçiş oranlarını göstermektedir. Ayrıca, grafikler boğazın gemi trafiği üzerindeki yükünü başta hava kirliliği olmak üzere diğer çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla da kullanılabilir.

Şekil 4.1’de 2006 yılı ile 2024 yılı arasında geçiş yapan gemi sayıları verilmiştir. Bu verilere göre gemi sayısının yıllar içinde azaldığı görülmüştür. 2006-2024 yılı arasında ortalama 45237, 2024 yılında ise Çanakkale Boğazı’ndan geçiş yapan gemi sayısının 45849 olduğu görülmüştür.



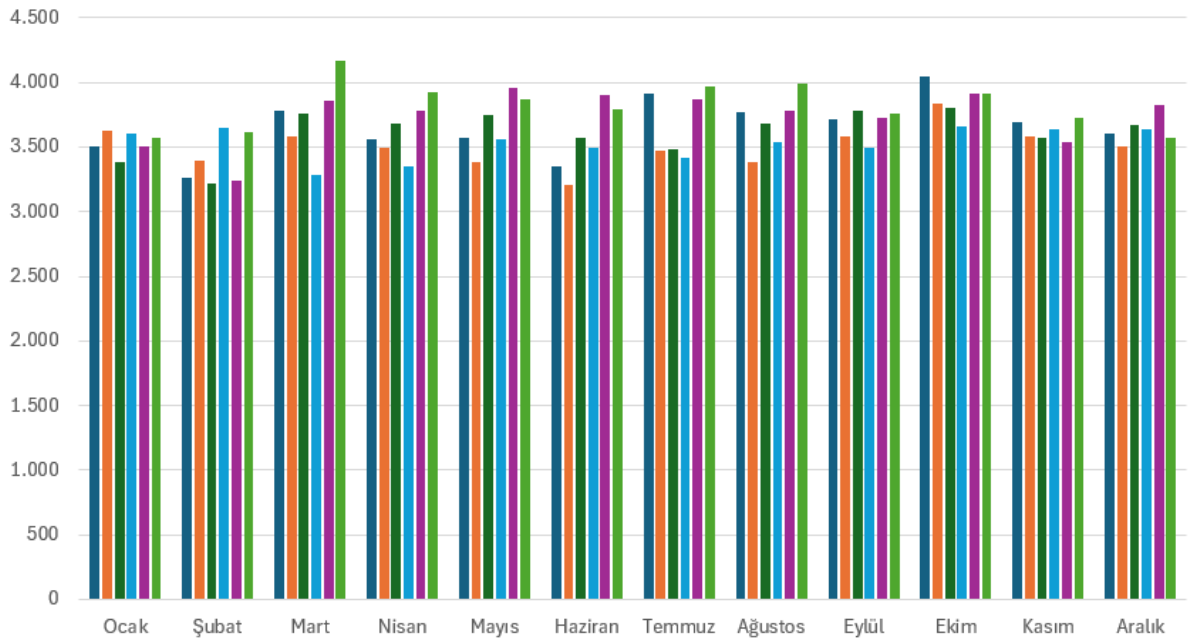
Şekil 4.1. Yıllara göre Çanakkale Boğazı gemi geçişleri [39]

Şekil 4.2’de Çanakkale Boğazı’ndan geçiş yapan gemilerin yıllara göre gros tonaj değişimi verilmiştir. 2006-2024 yılları arasında geçiş yapan gemilerin toplam gros tonaj miktarlarında artış gözlenmektedir. 2006 yılında toplam gros tonaj 595826240 iken 2024 yılı ile 958384821’e ulaşmıştır. Şekil 4.1’de yıllar içinde gemi sayısının azaldığını görürken Şekil 4.2’de ise gros tonajın arttığı açıkça görülmektedir. Buradan yola çıkarak gemi kapasitelerinin yıllar içinde arttığı söylenebilir.



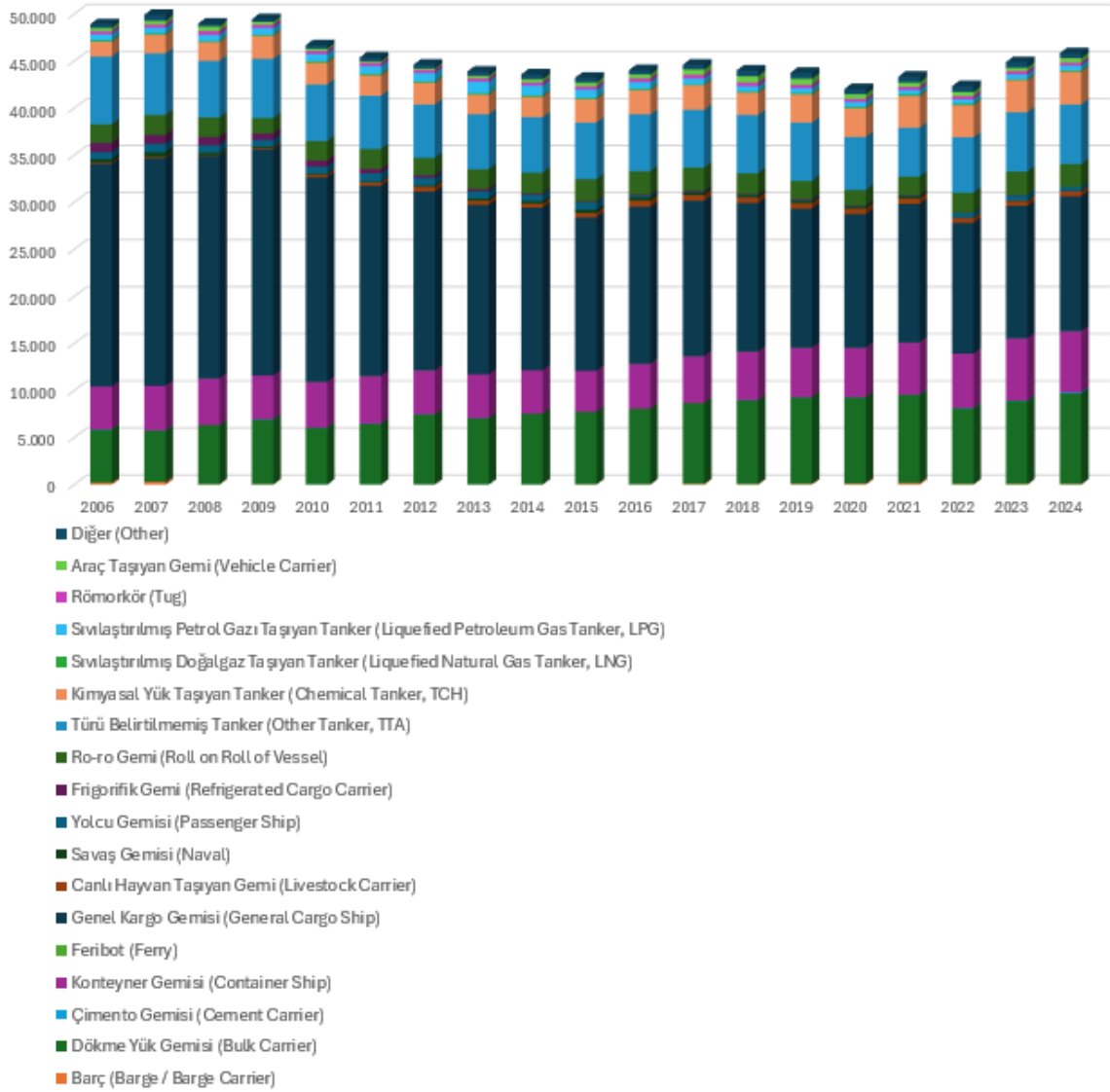
Şekil 4.2. Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin yıllara göre gros tonaj değişimi [39]

Şekil 4.3'te 2019-2024 yılları arasında geçiş yapan gemilerin aylık dağılımı gösterilmiştir. 2019-2022 yıllarında en yüksek gemi sayısına Ekim ayında ulaşılmıştır. Ancak 2023 yılında, Mayıs ayında 3953 gemi ile en yüksek geçiş sayısı gözlemlenmiştir; sonraki en yüksek sayıya yine Ekim ayında 3918 gemi adediyle ulaşılmıştır. 2024 yılı en yüksek gemi sayısına ise 4171 ile mart ayında onu 3968 ile temmuz ayı izlemiştir. En az gemi geçişinin ise genellikle yılın ilk üç ayında olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.3. 2019-2024 Geçiş yapan gemilerin aylık dağılımı [39]

Şekil 4.4'te 2006 - 2024 yılı arasında geçiş yapan gemi tipleri verilmiştir. 2006 ile 2024 yılları toplam geçiş sayılarının ise birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. “Genel Kargo Gemisi”, “Dökme Yük Gemisi”, “Konteyner Gemisi”, “Tanker”, “Kimyasal Yük Taşıyan Tanker”, “Ro-ro Gemisi” ve diğer gemi tipleri başlıca Çanakkale Boğazı’ndan geçiş yapan gemi tipleridir.



Şekil 4.4. Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin tiplerine ve yıllara göre dağılımı[39]

4.2. Pareto Analizi

Pareto analizi, 19.yüzyılda İtalyan ekonomist Vilfredo Pareto tarafından bazı faktörlerin diğer faktörlerden daha fazla etki yarattığı gözlemine dayanarak ortaya çıkmıştır. “80/20” kuralı

olarak da bilinmektedir. 80/20 oranı, çoğu durumda sonuçları etkileyenin az sayıdaki faktörlerden elde edildiğini gösteren genel bir eğilim olduğu yönündedir [40].

Pareto analizi farklı şekillerde uygulanabilse de genel olarak altı adımda gerçekleşir [41];

Adım 1: Problemin belirlenmesi ve listelenmesidir. Burada probleme sebep olan tüm sorunlar yazılmalıdır.

Adım 2: Sorunların temel nedenleri tespit edilir.

Adım 3: Problemlerin puanlanmasıdır. Burada soruna bağlı olarak puan verilir. Kârlılığı etkileyen bir sorunun maliyetine göre veya müşteri memnuniyetini düşüren şikâyetin sayısına göre puanlama yapılabilir.

Adım 4: Sorunların ana nedenlerine göre gruplandırılır.

Adım 5: Her grubun puanları toplanır, en yüksek puan en öncelikli olacak şekilde en az puana doğru işlem yapılır.

Adım 6: Aksiyon alınır. En öncelikli problem veya problem grubu ele alınarak çözüme odaklanılır.

Analizi daha anlaşılır kılmak için grafik kullanılır. Bunun için her problemin puanını toplam puana bölerek bir yüzde değeri elde edilir. Daha sonra, iki dikey ve bir yatay eksen içeren bir grafik çizilir. Sol dikey eksen, toplam problem puanına kadar olan değerlerle işaretlenir. Sağ dikey eksen, 0'dan %100'e kadar ölçeklendirilir. Problemler, en yüksek puan sol baştan başlayarak en düşük olan puan sonda olacak şekilde dikey sütun olarak yatay eksen üzerine çizilir. Son olarak, birden fazla problemin çözülmesi ile toplam problemlerin ne kadarının giderildiğini görmek için bir çizgi grafiği eklenir. Çizgi grafiği sıfır noktasından başlayarak her problem sınıflandırmasının kümülatif yüzdesini göstermeli ve sağ ekseninde %100'e ulaşarak sona erer.

4.3. Gemilerden Kaynaklanan Egzoz Kirliliği Ölçüm Modelleri

Denizyolu taşımacılığı, diğer ulaşım araçlarına kıyasla nispeten verimli olsalar da, insan sağlığına ve çevreye zararlı etkileri olabilen azot oksitler, kükürt dioksit ve partikül madde gibi önemli miktarda kirlетici madde salmaktadırlar [42].

Artan çevresel kaygılar sebebiyle, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) gibi uluslararası kuruluşlar, gemi emisyonlarını düzenlemek ve azaltmak adına stratejiler geliştirmektedir. 2018 yılında kabul edilen gemilerden kaynaklanan sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasına

yönelik ilk strateji, IMO'nun 2050 yılına kadar deniz taşımacılığından kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarını en az %50 oranında azaltma taahhüdünü içermektedir. Stratejinin yönü net olsa da, uygulanma süreci halen belirsizliğini korumaktadır [43].

Bu kirleticilerin çevresel etkilerini azaltabilmek ve uluslararası düzenlemelere uyum sağlamak adına, gemilerden kaynaklanan egzoz emisyonlarının doğru şekilde ölçülmesi ve modellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, farklı ölçüm ve tahmin yöntemleri geliştirilmiş olup, gemi tipi, motor gücü, yakıt türü ve seyir koşulları gibi parametrelere dayalı hesaplamalar aracılığıyla emisyon miktarları belirlenebilmektedir.

Gemilerden kaynaklanan hava kirliliği (özellikle CO₂) hesaplamasında birçok yöntem kullanılmaktadır. Emisyon modellemesi için yaygın olarak kullanılan iki yöntemin birinci geminin yaktığı yakıtın cinsine ve yakıtın miktarına göre kurulan formül/model “Bottom Up” (aşağıdan yukarıya) olarak adlandırılır. İkincisi yöntem ise geminin tipi, geminin tonajı, yaptığı seyir süresi, ana ve yardımcı makine tipini ve makine çalışma süresini içeren “Top Down” (yukarıdan aşağıya) olarak adlandırılmaktadır.

4.3.1. Bottom up metodu

Bottom up yöntemi gemilere özgü operasyonel verilere dayanarak ayrıntılı emisyon hesaplaması yapar. Gemi operasyon modları duruma göre seyir, düşük hız bölgesi, manevra ve limanda bekleme - soğuk demirleme olarak tanımlanır. Her bir gemi için bulunduğu operasyon durumuna göre gemi tipi, gerçek hız, motor gücü, yük faktörü, mod süresi ve hem ana/yardımcı motorlar hem de kazanlar için emisyon faktörleri parametreleri dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için öncelikle tek bir gemi çağrısı (call) bazında toplanmalı, ardından DWT (Deadweight Tonnage) aralıklarına göre gruplandırılmalı ve son olarak gemi tipi bazında yıllık toplam değerler hesaplanmalıdır. Emisyon analizi Formül (4.1) aşağıda gösterilmiştir [44].

$$E = P \times LF \times A \times EF \quad (4.1)$$

E : Toplam emisyon miktarı (gram [g])

P : Motorun maksimum sürekli güç değeri (kilowatt [kW])

LF : Yük faktörü (motorun o anki güç yüzdesi, genellikle 0–1 arası)

A : Faaliyet süresi (saat [h])

EF : Emisyon faktörü (gram/kilowatt-saat [g/kWh])

4.3.2. Top-Down metodu

Toplam yakıt kullanımı ve genel istatistiklere dayalı emisyon tahmini yapar. Top-down metodolojisi toplam yakıt tüketimi verilerini esas alması ve daha çok yerel ölçekli analizler için kullanılırken bottom-up metodolojisinin çeşitli avantajları bulunmaktadır. Ancak, bottom-up metodunda veri bilgisinin doğru ve eksiksiz olması gerekir. Bottom up metodolojisi hesaplamasında kullanılan, gemilerin motor gücü gibi teknik bilgileri veya işletim modu gibi gemi özelliklerinin belirsiz olması, emisyon hesaplamalarını belirsizlik kılabilmektedir. Bu yöntemde belirtilen yük faktörlerinin sabit olduğu veya gemi davranışlarının belirli işletim modlarında değişmediği varsayımı gerçek hayatta oluşabilen değişkenlikleri yansıtmayabilir [45]. Top-Down metodunda kullanılan başlıca iki yöntem bulunmaktadır: Entec UK Limited yöntemi ile Trozzi ve Vaccaro yöntemi.

Entec UK Limited yöntemi, Avrupa Birliği Çevre Komisyonu tarafından geliştirilmiştir. İngiliz ENTEC firması tarafından geliştirilen bu yöntemin hesaplanmasında Gemi tipi, Gemi tonajı, Geminin gittiği mesafe, Manevrada geçirdiği süre, Limanda/alargada geçirdiği süre, Geminin ana ve yardımcı makine tipi ile Ana ve yardımcı makine gücünün parametreleri kullanılmaktadır. Tüm bu veriler ışığında hesaplama Formülleri (4.2, 4.3, 4.4) aşağıda verilmiştir [46].

$$E_{SEYİR} = \frac{D \times [ME \times \%ME_{LF} + AE \times \%AE_{LF}] \times EF_{SEYİR}}{V} \quad (4.2)$$

D : Geminin seyir süresince kat ettiği mesafe (mil)

ME : Ana Makine Gücü (kW)

$\%ME_{LF}$: Ana Makine Yük Faktörü

AE : Yardımcı Makine Gücü (kW)

$\%AE_{LF}$: Yardımcı Makine Yük Faktörü

EF_{seyir} : Geminin seyir sırasında emisyon faktörü (g/kWh)

V : Knot cinsinden hız

$$E_{MANEVRA} = T \times [ME \times \%ME_{LF} + AE \times \%AE_{LF}] \times EF_{MANEVRA} \quad (4.3)$$

T : Geminin manevrada geçirdiği süre (saat)

ME : Ana Makine Gücü (kW)

%ME_{LF}: Ana Makine Yük Faktörü

AE : Yardımcı Makine Gücü (kW)

%AE_{LF} : Yardımcı Makine Yük Faktörü

EF_{manevra}: Manevra sırasındaki emisyon faktörü (g/kWh)

$$E_{LIMAN} = T \times AE \times \%AE_{LF} \times EF_{LIMAN} \quad (4.4)$$

T : Geminin limanda geçirdiği süre (saat)

AE : Yardımcı Makine Gücü (kW)

%AE_{LF} : Yardımcı Makine Yük Faktörü

EF_{liman}: Liman veya alargada emisyon faktörü (g/kWh)

Carlo Trozzi ve Rita Vaccaro tarafından Top down metodolojisi ise 1998 yılında projelendirilip 2006 yılında güncellenmiştir. Trozzi ve Vaccaro (1998) Metodolojisine göre gemi kaynaklı hava kirliliği (emisyon analizi) formülü, Formül (4.5)'te verilmiştir [47].

$$E_i = \sum_{jklm} E_{ijklm} \quad (4.5)$$

$$E_{ijklm} = S_{jkm}(GT) \times t_{jklm} \times F_{ijlm}$$

$$S_{jkm}(GT) = C_{jkm}(GT) \times P_m$$

i : Kirlетici gazlar (NO_x, SO_x, CO, CO₂, VOC, PM)

j : Yakıt

k : Gemi tipi

l : Makine tipi

m : Seyir modu (seyir, manevra, aborda)

E_i : Kirlетici gazların toplam emisyonu

E_{ijklm} : Geminin m seyir moduna göre l makine tipi ve k gemi tipine göre yakılan j tipi yakıtın toplam i kirlilik emisyonu

S_{jkm}(GT) : Gemi tonajına göre k tipi geminin m seyir moduna göre j tipi yakıt miktarı

t_{jklm} : Geminin m seyir moduna göre l makine tipi ve k gemi tipine göre yakılan j tipi yakıtın günlük seyir süresi

Fijlm : Geminin m seyir moduna göre l makine tipi ve yakılan j tipi yakıtın oluşturduğu i kirlilik emisyonunun ortalama emisyon faktörü

Cjkm(GT) : Gemi tonajına göre k gemi tipine göre tam güçte tükettiği günlük j tipi yakıt miktarı

Pm : Geminin m seyir moduna göre yaktığı yakıt miktarının, tam yükteki yakıt miktarına oranı

Gemilerin bulundukları seyir moduna göre yakıt tüketiminin, tam yükteki yakıt miktarına oranı Tablo 4.2’de verilmiştir [47].

Tablo 4.2. Gemi ana makine ve jeneratörlerin yük faktörleri [47]

İşletme Modu	Ana Makine Yük Faktörü	Jeneratör Yük Faktörü	Jeneratör Sayısı
Seyirde	%80	%75	1
Manevrada	%40	%75	2
Limanda/Demirde	%0	%75	1

Trozzi ve Vaccaro'ya göre, gemilerin tiplerine ve tonajlarına bağlı olarak harcayacakları ortalama günlük yakıt tüketimleri Tablo 4.3’te sunulmuştur [47].

Tablo 4.3. Gemi türlerine göre tam yükte yakıt tüketimi [47]

Gemi Tipi	Günlük Ortalama Tüketim (Ton)	Gemi Tonajına Göre Günlük Yakıt Tüketimi (Ton)
Dökme Yük Gemisi	33,80	$C_{jk} = 20,186 + 0,00049 \times \text{Gemi Tonajı}$
Tanker	41,15	$C_{jk} = 14,685 + 0,00090 \times \text{Gemi Tonajı}$
Kuru Yük Gemisi	21,27	$C_{jk} = 9,8197 + 0,00143 \times \text{Gemi Tonajı}$
Konteyner	65,88	$C_{jk} = 8,0552 + 0,00235 \times \text{Gemi Tonajı}$
Yolcu / Ro-Ro / Kargo	32,28	$C_{jk} = 12,3834 + 0,00156 \times \text{Gemi Tonajı}$
Yolcu Gemisi	70,23	$C_{jk} = 16,904 + 0,00198 \times \text{Gemi Tonajı}$
Hızlı Feribot	80,42	$C_{jk} = 39,483 + 0,00972 \times \text{Gemi Tonajı}$
Koster	21,27	$C_{jk} = 9,8197 + 0,00143 \times \text{Gemi Tonajı}$
Gezi Tekneleri / Yatlar	3,38	$C_{jk} = 3,380 + 0,00100 \times \text{Gemi Tonajı}$
Römorkörler	14,35	$C_{jk} = 5,6511 + 0,00148 \times \text{Gemi Tonajı}$
Balıkçı Gemisi	5,51	$C_{jk} = 1,9387 + 0,00448 \times \text{Gemi Tonajı}$
Diğer (Askeri, Hizmet vb.)	26,40	$C_{jk} = 9,7126 + 0,00091 \times \text{Gemi Tonajı}$
Tüm Gemiler – Ortalama	32,78	$C_{jk} = 16,263 + 0,00100 \times \text{Gemi Tonajı}$

Tablo 4.4’te, egzoz gazı emisyonlarının miktarını hesaplamak için kullanılan seyir halindeki gemilerin makine tiplerine göre emisyon faktörleri (kg kirlilik/ton yakıt) yakıt cinsinden olmak üzere gösterilmiştir [48].

Tablo 4.4. Seyir halindeki gemilerin emisyon faktörleri (Kg/ton yakıt) [48]

Makine Tipi	NO _x (kg/ton)	SO ₂ (kg/ton)	CO (kg/ton)	CO ₂ (kg/ton)	VOC (kg/ton)	PM (kg/ton)
Yüksek Devirli Dizel						
Mak.	60	10	2,8	3200	1,0	0,52
Orta Devirli Dizel Mak.	57	10	7,4	3200	2,4	1,2
Düşük Devirli Dizel Mak.	87	54	7,4	3200	2,4	7,6

4.4. Tahminleme Analizi

İstatistiksel yöntemler ve bilgisayar teknolojileri kullanılarak büyük veri kümeleri içerisindeki desenlerin ve içgörülerin bulunması sürecine veri madenciliği denir. Bu süreç araştırmacıların daha doğru kararlar almasına yardımcı olur. Veri madenciliğin alt dallarından biri olan öngörü analizi, gelecekteki olayları tahmin etmek amacıyla desenleri ve eğilimleri belirlemek için kullanılır. Verilerdeki bağlantıların ve örüntülerin keşfedilmesini içeren bu süreç, makine öğrenmesi algoritmaları aracılığıyla gerçekleştirilir. Pazarlama, sağlık ve finans gibi sektörlerde, olası fırsat ve riskleri belirlemek ve karar alma süreçlerini geliştirmek amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır [49].

Tahminleme yöntemleri, nitel (kalitatif) ve nicel (kantitatif) yöntemler olarak iki ana kategoride sınıflandırılır. Nitel öznel deneyimler ve bağlamı anlamaya odaklanarak karmaşık sosyal süreçler hakkında derinlemesine içgörüler sunar. Nicel yöntemler ise nesnellik ve istatistiksel titizlik gerektirir. Teorilerin değerlendirilmesi ve büyük veri kümelerinde eğilimlerin bulunması için sistematik bir çerçeve sağlar [50].

Nitel yöntemler, nesnelerin, olguların, durumların, kişilerin, anlamların ve olayların niteliklerini, yani özelliklerini ortaya çıkarmaya odaklanırken öte yandan, nicel yaklaşımlar bu özelliklerin niceliğine, yani sayılarına veya miktarına odaklanır [51].

Nicel tahmin yöntemleri, geçmişteki veriler kullanarak bir tahmin modelinin oluşturulmasıyla oluşur. Model, verilerdeki desenleri biçimsel olarak özetleyerek değişkenin geçmiş ve mevcut değerleri arasındaki istatistiksel bağlantıyı ifade eder. Daha sonra da, gelecekteki eğilimleri tahmin etmek için kullanılır. Özetle, nicel tahmin modeli geçmiş ve mevcut davranışı geleceğe yansıtmak için kullanılır [52].

Son yıllarda, nicel tahminleme yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu artırmak amacıyla çeşitli yazılımlar geliştirilmiştir. Bu bağlamda, özellikle makine öğrenmesi temelli algoritmaların uygulanmasına olanak tanıyan açık kaynaklı yazılımlar, tahminleme çalışmalarında sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu yazılımlardan biri olan Weka (Waikato

Environment for Knowledge Analysis), veri madenciliği ve tahminleme modellerinin uygulanması konusunda literatürde geniş bir yer edinmiştir. Weka, GNU Genel Kamu Lisansı (GPL) kapsamında yayımlanan açık kaynak kodlu bir makine öğrenimi yazılımıdır [53]. Bu, Weka programının yazılımlarının herkes tarafından özgürce kullanılabileceği, incelenebileceği, değiştirilebileceği ve geliştirilebileceği anlamına gelir [54].

WEKA açık kaynak kodlu bir uygulama olup Waikato Üniversitesi tarafından ekonomik kâr gütmenden bilimsel araştırma ve çalışmalar için geliştirilmiştir. Weka ile makine öğrenmesi, veri madenciliği ve analizi yapılabilmektedir. Weka genellikle makine öğrenmesi yöntemleri üzerine görselleştirme, sınıflandırma, kümeleme, zaman serileri öngörü tahmin veri ön işleme gibi birçok çeşitli yöntem ve algoritmalar uygulanmaktadır. Bu çalışmada, WEKA öngörü tahmin eklentisi olarak WEKA Versiyon 3.8.6 versiyon kullanılmıştır. WEKA uygulaması açıldığında, Şekil 4.5’te gösterilen kullanıcı arayüzü karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.5. WEKA GUI Chooser Arayüzü

Grafik arayüzün, “Applications” başlığı altında “Explorer, experimenter, KnowledgeFlow, Workbench, Simple CLI” olmak üzere 5 farklı seçim yapılabilmektedir. Ana kullanıcı arayüzü, “Explorer” sekmesidir.

WEKA; karar ağaçları, sinir ağları ve otomatik model seçimi araçları gibi çeşitli algoritmalarla zaman serisi analizi için güçlü bir platform sunmaktadır. Bu algoritmalar zaman serisi içindeki geçmiş verileri analiz ederek çalışır. Veri setindeki bilgilere dayanarak geleceğe yönelik tahminler yapabilir. Verilerin hangi trende yöneldiğini, mevsimsel koşulların bu trende nasıl

etki ettiğini, uzun vadeli eğilimlerin yaratacağı sonuçları ve verinin belirli zaman dilimlerinde olağan dışı durumların olup olmadığını analiz ederek tahminler yapabilir.

4.4.1. Lineer Regresyon Algoritması

Doğrusal Regresyon (Linear Regression) algoritması, iki değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılır. Bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellenir. Bu algoritma modeli ile bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait aktarılan verilere dayanarak, bağımlı değişkenin gelecekte alacağı değeri tahmin etmeyi mümkün kılar [55].

4.4.2. Multilayer Perceptron Algoritması

Multilayer Perceptron (MLP), geriye yayılım (Back Propagation) yöntemi kullanan denetimli öğrenme tekniğine sahip bir yapay sinir ağı türüdür. MLP'nin giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmanlı bir yapıdan yararlanmaktadır. Her bir nöron, bir sonraki katmandaki tüm nöronlarla bağlantılıdır. MLP'nin, lineer olmayan problemlerle başa çıkmada sıklıkla kullanılmaktadır [56].

4.4.3. SMOREG algoritması

SMOREG algoritması, regresyon amaçlı destek vektör makinelerini (DVM) uygulamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu modelde parametreler, farklı öğrenme algoritmaları aracılığıyla elde edilebilir. Kullanılacak algoritma, RegOptimizer seçeneği ile belirlenmektedir. Varsayılan olarak tanımlanan ve en yaygın kullanılan yöntem ise Shevade, Keerthi ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen RegSMOImproved algoritmasıdır [57].

SMOREG algoritması destek vektör makineleri olarak adlandırılan yöntemleri kullanarak hesaplama yapar. Destek Vektör Makineleri (DVM), veri setlerinde farklı sınıfları ayıran en iyi düzlemi (veya hiper düzlemi) bulmaya çalışır. Eğer veri doğrusal olarak ayrılamiyorsa, DVM bu veriyi daha yüksek bir boyuta taşıyarak doğrusal olarak ayrılabilir hale getirir. Bu, kernel dönüşümü adı verilen bir yöntemle yapılır.

DVM'ler, yalnızca eğitim verisi üzerinde değil, eğitim sırasında görülmeyen yeni veriler üzerinde de doğru sonuçlar verebilir, yani genelleme yeteneği çok yüksektir. Bu özellik, DVM'yi diğer yöntemlere (örneğin yapay sinir ağları ve karar ağaçları gibi) göre avantajlı kılar [58].

SMOreg, destek vektör regresyonu (DVR) modelini eğitmek amacıyla Sıralı Minimal Optimizasyon (Sequential Minimal Optimization) algoritmasını kullanan bir regresyon tekniğidir [59].

4.5. Tahmin Yöntemlerinin Hata Ölçüm Teknikleri

Forecast modellerini değerlendirmek için, genellikle doğruluk ve önyargı (veya yanlılık) terimleri üzerinde durulur. Doğruluk, tahmin ve gerçek değerler arasındaki mesafeyi ifade eder. Bir tahmin modelindeki hatalar diğer yönlerdeki hatalardan önemli ölçüde daha büyükse yani gerçek modelden daha yüksek veya daha düşük tahminler yapıyorsa önyargılıdır. Özet olarak, tüm tahmin modellerinde amaç, doğruluğu en üst düzeye çıkarmak ve önyargıyı/yanlılığı en aza indirmektir. Bu yüzden birden çok model adayını belirli bir veri setine yerleştirdikten sonra, bir sonraki adım en iyi tahmin modelini karşılaştırmak ve seçmektir [60].

Bu çalışmada kullanılan algoritmaların performans değerlendirmeleri için hata ölçüm yöntemleri MAE, MAPE, RMSE kullanılmıştır.

4.5.1. Ortalama mutlak hata, Mean absolute error (MAE)

Mean Absolute Error(MAE), mutlak hata değerlerinin ortalamasıdır. Hataların mutlak değerleri dikkate alınır, böylece pozitif ve negatif hataların gerçek değerle arasındaki uzaklık bulunur. Formülü denklem 1’ de verilmiştir [61].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |e_t| \quad (4.6)$$

Denklemde bulunan e_t hata terimi, n analiz için gözlem sayısıdır. Yani tahmini değer ile gerçek değer arasındaki farkı ifade etmektedir.

4.5.2. Ortalama mutlak yüzde hatası, Mean absolute percentage error(MAPE)

MAPE, tahmin edilen değerlerle gerçek değerler arasındaki farkları yüzdelik olarak ifade eder. Formülü denklem 2’ de verilmiştir [62].

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|e_t|}{a_t} \times 100 \quad (4.7)$$

Denklemde bulunan e_t hata terimi, a_t gerçek değer, n ise analiz için gözlem sayısıdır.

4.5.3. Kök ortalama kare hata, Root mean square error (RMSE)

Kök ortalama kare hata yani kısaca RMSE, 3 basit adımla hesaplanır. İlk olarak toplam hata değerlerinin karesi alınır yani bireysel kare hataların toplamı olarak elde edilir. Bu adımda hedeflenen büyük hatalardır çünkü büyük hatalar, küçük hatalardan daha büyük bir etkiye

sahiptir. İkinci adımda toplam kare hata n'ye bölünerek ortalama kare hata (Mean Square Error -MSE) elde edilir. Üçüncü ve son adım, MSE'nin karekökünü alınarak RMSE bulunur [63]. Formülü denklem 3' de verilmiştir [64]. Denklemden bulunan e_t hata terimi, n ise analiz için gözlem sayısıdır.

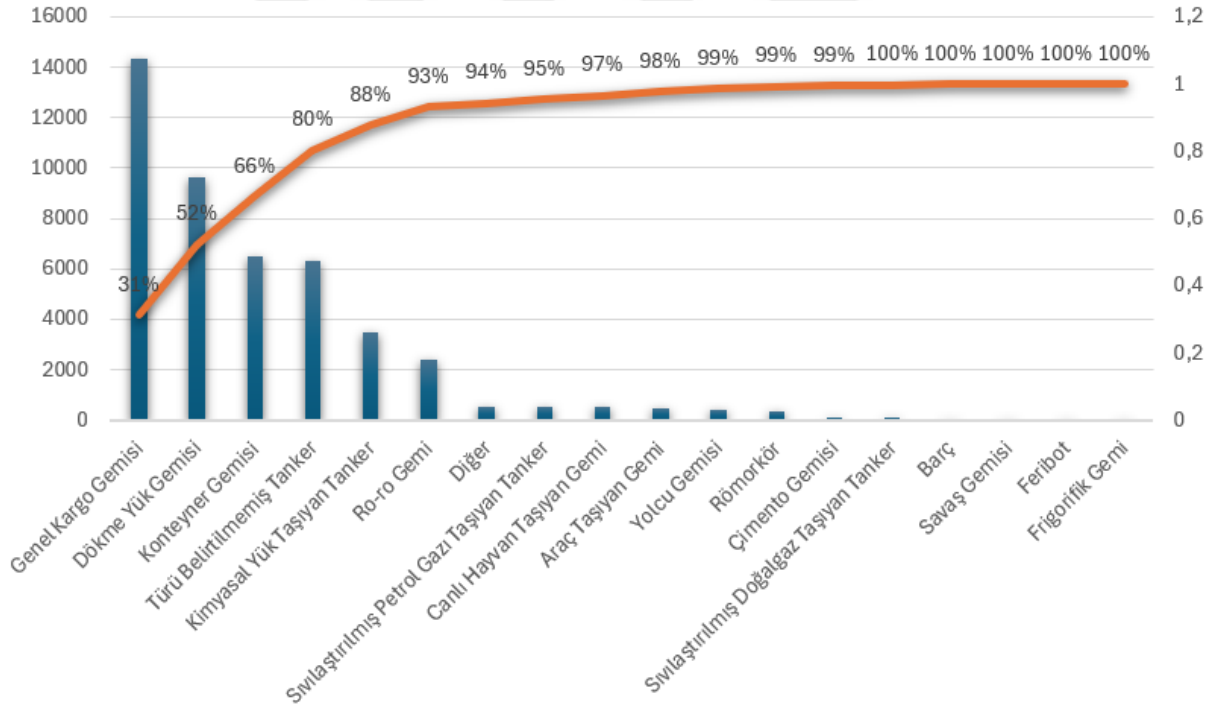
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum e_t^2} \quad (4.8)$$

5. GEMİ KAYNAKLI EMİSYONLARIN HESAPLANMASI VE TAHMİNLEME BULGULARI

5.1. 2024 Yılı Gemi Geçiş Sayılarının Pareto Analizi Bulguları

“Türk Boğazları Gemi Geçiş İstatistikleri” verileri kullanılarak yapılan analizde, 2024 yılı itibarıyla toplamda 45849 geminin Çanakkale Boğazı kullandığı gözlemlenmiştir. Bu gemilerin %31,3’ünü oluşturan 14337 adet “Genel Kargo Gemisi” ve %21’ini oluşturan 9619 adet “Dökme Yük Gemisi”, toplam geçişlerin %52,2’sini teşkil etmektedir. Bu bağlamda, farklı gemi türlerinin karbon emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla Pareto analizi kullanılacak ve emisyonların %80’ini oluşturan ana gemi tiplerine odaklanılacaktır.

Şekil 5.1’de, 2024 yılı itibarıyla Çanakkale Boğazı’ndan geçen gemi türlerinin Pareto analizi sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, “Genel Kargo Gemisi”, “Dökme Yük Gemisi”, “Konteyner Gemisi” ve “Türü Belirtilmemiş Tanker” gemi tipleri, toplam gemi geçişlerinin %80’ini oluşturduğu görülmüştür.



Şekil 5.1. 2024 Yılı Çanakkale Boğazı’ndan geçen gemi türlerinin pareto analizi

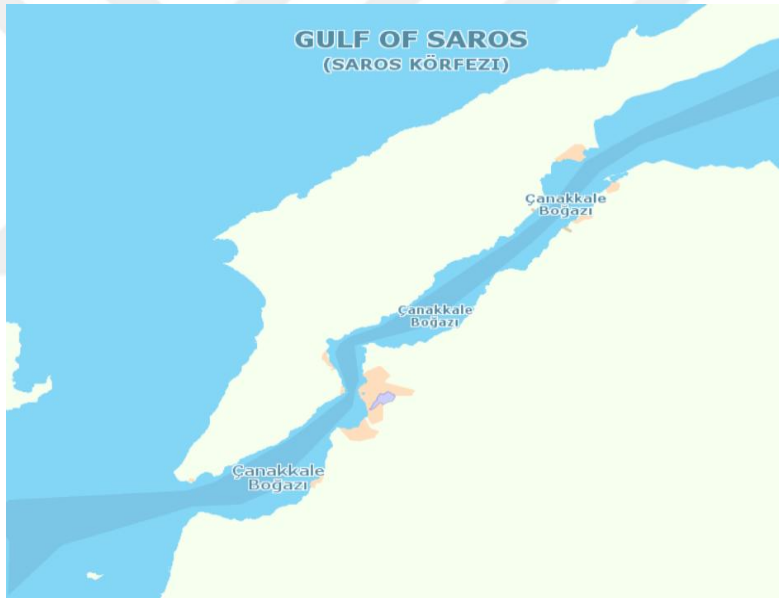
5.2. Trozzi ve Vaccaro Yöntemi Emisyon Analizi Bulguları

Çanakkale Boğazı’ndan geçiş yapan gemilerden kaynaklı emisyonların hesaplanabilmesi için gerekli olan gemi türleri ve geçiş sayıları verilerine T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı’nın yayınladığı Türk Boğazları Gemi Geçiş İstatistikleri kullanılmıştır.

Bu çalışmada gemi kaynaklı emisyonların hesaplanmasında Trozzi ve Vaccaro (1998) yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin tercih edilmesinin başlıca sebebi verinin kısıtlı olduğu koşullarda da güvenilir sonuçlar verebilmesidir. Yöntem kapsamında, toplam yakıt tüketimi esas alınarak emisyon hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalarda ve Trozzi ve Vaccaro'nun (1998) geliştirdiği emisyon analiz metodolojisinden Formül (4.5)'ten yararlanılmıştır [47].

Trozzi ve Vaccaro'ya göre, gemilerin tiplerine ve tonajlarına bağlı olarak harcayacakları ortalama günlük yakıt tüketimleri Tablo 4.3'te belirlenmiş ve bu değerler emisyon hesaplamalarında referans olarak kullanılmıştır. Ancak kullanılan veri setleri, gemilerin boyut, hız ve operasyonel koşullar gibi detaylı teknik özelliklerini içermemektedir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, genelleştirilmiş ve temsili tahminler olduğu belirtilmektedir.

Çanakkale Boğazı, koordinatları 40.2° K ve 26.4° D konumundadır. Çanakkale Boğazı'nın geçiş güzergâhları Şekil 5.2'de verilmiştir [65].



Şekil 5 2. Çanakkale Boğazı geçiş güzergâhı [65]

Çanakkale Boğazı'nın uzunluğu yaklaşık 37 deniz mili olup, Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Yönetmeliği'ne göre gemilerin İstanbul ve Çanakkale Boğazlarından geçiş hızı, karaya göre saatte 10 deniz milidir [66].

Bu bilgiler dikkate alınarak, $Mesafe = Hız / Zaman$ formülü kullanılarak hesaplandığında, bir geminin Çanakkale Boğazı'nı geçiş süresi yaklaşık 3,7 saat (3 saat 42 dakika) olarak hesaplanmaktadır. Bu süre, günlük zaman birimiyle yaklaşık 0,154 güne karşılık gelmektedir.

Yapılan hesaplamalarda, bir geçiş sırasında tüketilen yakıt miktarı; her gemi tipi için kabul edilen günlük yakıt tüketimi değeri bu oranla çarpılması yoluyla elde edilmiştir. Bu kapsamda, Tablo 4.3'te verilmiş olan değeri, gemi tiplerine göre Çanakkale Boğazi geçişinde bir gemi için harcanan yakıt miktarları ton cinsinden hesaplanarak aşığıdaki Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Gemi tiplerine göre Çanakkale geçişi yakıt tüketimi

Gemi Tipi	Günlük Yakıt Tüketimi (ton/gün)	Çanakkale Geçişi Yakıt Tüketimi (ton)
Genel Kargo Gemisi	21,27	3,28
Dökme Yık Gemisi	33,8	5,21
Konteyner Gemisi	65,88	10,16
Tanker	41,15	6,34

Tablo 5.2'de, 2019–2025 yıllarının ilk çeyreğini kapsayan dönemde Çanakkale Boğazi'ndan geçen gemi tiplerine ait yıllık toplam yakıt tüketimleri (ton cinsinden), Microsoft Excel kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.2. anakkale Boğazi gemi tiplerine göre yakıt tüketimi (ton)

AYLAR	Genel Kargo Gemisi	Dökme Yık Gemisi	Konteyner Gemisi	Türü Belirtilmemiş Tanker
2019-01	1.242	702	411	515
2019-02	1.115	693	377	487
2019-03	1.264	768	434	586
2019-04	1.233	672	455	512
2019-05	1.199	690	463	531
2019-06	1.134	637	413	506
2019-07	1.249	827	450	577
2019-08	1.263	886	442	478
2019-09	1.282	825	426	500
2019-10	1.368	901	468	532
2019-11	1.222	813	455	477
2019-12	1.200	790	444	477
2020-01	1.187	776	440	534
2020-02	1.090	766	430	462
2020-03	1.151	810	451	512
2020-04	1.229	781	423	510
2020-05	1.178	707	416	495
2020-06	1.120	601	410	434
2020-07	1.146	759	443	441
2020-08	1.150	797	423	414
2020-09	1.280	802	415	458

Tablo 5.2. (Devam) Çanakkale Boğazı gemi tiplerine göre yakıt tüketimi (ton)

AYLAR	Genel Kargo Gemisi	Dökme Yük Gemisi	Konteyner Gemisi	Türü Belirtilmemiş Tanker
2020-10	1.321	860	442	483
2020-11	1.197	782	461	435
2020-12	1.148	729	465	466
2021-01	1.140	705	444	434
2021-02	1.101	673	431	400
2021-03	1.316	716	475	522
2021-04	1.287	716	464	456
2021-05	1.297	743	478	473
2021-06	1.228	711	454	439
2021-07	1.187	747	454	420
2021-08	1.238	883	454	427
2021-09	1.275	930	462	387
2021-10	1.226	901	491	423
2021-11	1.190	799	439	400
2021-12	1.228	825	456	415
2022-01	1.166	796	467	457
2022-02	1.229	860	442	440
2022-03	1.094	587	471	496
2022-04	1.193	552	443	429
2022-05	1.191	548	474	532
2022-06	1.143	604	492	482
2022-07	1.130	614	469	521
2022-08	1.207	670	479	483
2022-09	1.104	652	488	486
2022-10	1.149	733	513	492
2022-11	1.128	730	512	490
2022-12	1.146	703	517	566
2023-01	1.110	687	516	529
2023-02	1.000	689	449	469
2023-03	1.233	774	539	537
2023-04	1.174	734	531	548
2023-05	1.273	777	562	570
2023-06	1.289	689	579	543
2023-07	1.248	739	569	539
2023-08	1.168	743	581	548
2023-09	1.149	723	574	537
2023-10	1.210	737	607	542
2023-11	1.063	755	520	429
2023-12	1.156	786	577	501

Tablo 5.2. (Devam) Çanakkale Boğazı gemi tiplerine göre yakıt tüketimi (ton)

AYLAR	Genel Kargo Gemisi	Dökme Yük Gemisi	Konteyner Gemisi	Türü Belirtilmemiş Tanker
2024-01	1.098	776	536	497
2024-02	1.113	752	551	490
2024-03	1.323	898	569	573
2024-04	1.147	858	544	572
2024-05	1.134	811	569	576
2024-06	1.147	792	555	536
2024-07	1.292	835	533	553
2024-08	1.315	847	523	558
2024-09	1.176	767	529	555
2024-10	1.241	793	537	515
2024-11	1.208	771	524	433
2024-12	1.143	719	527	457
2025-01	1.185	687	569	484
2025-02	1.007	608	504	458
2025-03	1.189	703	537	532

1 Ocak 2020 itibariyle, uluslararası denizcilikte kullanılan yakıtlardaki maksimum kükürt oranı %3,5'ten, %0,5'e düşürülmüştür. 2020 yılı itibarı ile SO₂ emisyon faktörü hesaplaması %0,5 oranı dikkate alınarak hesaplanmıştır [67].

Dünya deniz ticaret filosunun yaklaşık %66'sı yavaş devirli dizel motorlar, %32'si orta devirli dizel motorlar ve %2'si diğer motor tiplerini kullanmaktadır [65, 66, 67]. Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemiler için de bu oranların geçerli olduğu varsayılmış; kullanım oranları oldukça sınırlı olduğu için buhar ve gaz türbinli motorlar çalışmaya dâhil edilmemiştir.

Çanakkale Boğazı'ndan geçiş yapan gemilerin sadece seyir modu hesaplamaya katılmış ve Trozzi ve Vaccaro analiz metodolojisindeki seyir modu emisyon faktörleri kullanılmıştır. Seyir modu emisyon faktörleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Emisyon analiz hesaplamalarına manevra, liman/demir modu ve yardımcı makine emisyonları dâhil edilmemiştir.

Bu tablolardaki değerler, Trozzi ve Vaccaro alıntı metodolojisi kullanılarak bulunmuştur. SO₂ için 2020 sonrası ile SO₂ emisyon faktörü hesaplaması %0,5 oranı dikkate alınarak hesaplanması, 2020 yılı öncesi ile arasında oluşan belirgin farkı gözler önüne sermiştir.

Genel kargo gemisi 2019–2025 yıllarının ilk çeyreğini kapsayan dönem için hesaplanmış egzoz emisyon değerleri Tablo 5.3'te ton cinsinden sunulmuştur. 2019–2025'in ilk çeyreğini kapsayan dönemde, genel kargo gemilerine ait emisyon değerlerinde dalgalanmalar görülmüş;

ancak zamanla emisyon seviyelerinin nispeten sabitlenme eğilimi gösterdiği, 2024 yılının sonlarına doğru ve 2025 yılı başında ise yeniden artış eğilimi sergilediği gözlemlenmiştir.

Tablo 5.3. Genel kargo gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2019-01	250,5	127,2	23816,8	10428,8	7,7	17,6
2019-02	224,9	114,2	21381,5	9362,4	6,9	15,8
2019-03	254,9	129,5	24238,7	10613,6	7,9	17,9
2019-04	248,7	126,3	23644,2	10353,3	7,7	17,5
2019-05	241,8	122,8	22992,3	10067,8	7,5	17,0
2019-06	228,7	116,2	21745,8	9522,0	7,1	16,1
2019-07	251,9	127,9	23951,1	10487,6	7,8	17,7
2019-08	254,7	129,4	24219,5	10605,2	7,9	17,9
2019-09	258,6	131,3	24583,9	10764,7	8,0	18,2
2019-10	275,9	140,1	26233,0	11486,8	8,5	19,4
2019-11	246,5	125,2	23433,3	10260,9	7,6	17,3
2019-12	242,0	122,9	23011,4	10076,2	7,5	17,0
2020-01	239,4	17,9	22762,1	9967,0	7,4	16,9
2020-02	219,8	16,4	20902,0	9152,5	6,8	15,5
2020-03	232,1	17,4	22071,8	9664,7	7,2	16,3
2020-04	247,9	18,5	23567,5	10319,7	7,6	17,4
2020-05	237,6	17,8	22589,6	9891,4	7,3	16,7
2020-06	225,9	16,9	21477,3	9404,4	7,0	15,9
2020-07	231,1	17,3	21975,9	9622,7	7,1	16,3
2020-08	231,9	17,4	22052,6	9656,3	7,2	16,3
2020-09	258,2	19,3	24545,5	10747,9	8,0	18,2
2020-10	266,4	19,9	25331,7	11092,2	8,2	18,8
2020-11	241,4	18,1	22953,9	10051,0	7,5	17,0
2020-12	231,5	17,3	22014,3	9639,5	7,1	16,3
2021-01	229,9	17,2	21860,9	9572,4	7,1	16,2
2021-02	222,1	16,6	21113,0	9244,9	6,9	15,6
2021-03	265,4	19,9	25235,9	11050,2	8,2	18,7
2021-04	259,6	19,4	24679,8	10806,7	8,0	18,3
2021-05	261,6	19,6	24871,5	10890,6	8,1	18,4
2021-06	247,7	18,5	23548,4	10311,3	7,6	17,4
2021-07	239,4	17,9	22762,1	9967,0	7,4	16,9
2021-08	249,7	18,7	23740,1	10395,2	7,7	17,6
2021-09	257,1	19,2	24449,6	10705,9	7,9	18,1
2021-10	247,3	18,5	23510,0	10294,5	7,6	17,4
2021-11	240,0	18,0	22819,7	9992,2	7,4	16,9
2021-12	247,7	18,5	23548,4	10311,3	7,6	17,4

Tablo 5.3. (Devam) Genel kargo gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2022-01	235,2	17,6	22359,4	9790,7	7,3	16,6
2022-02	247,9	18,5	23567,5	10319,7	7,6	17,4
2022-03	220,6	16,5	20978,8	9186,1	6,8	15,5
2022-04	240,6	18	22877,2	10017,4	7,4	16,9
2022-05	240,2	18	22838,8	10000,6	7,4	16,9
2022-06	230,5	17,2	21918,4	9597,5	7,1	16,2
2022-07	227,9	17	21669,1	9488,4	7	16
2022-08	243,4	18,2	23145,7	10134,9	7,5	17,1
2022-09	222,7	16,7	21170,5	9270,1	6,9	15,7
2022-10	231,7	17,3	22033,4	9647,9	7,2	16,3
2022-11	227,5	17	21630,7	9471,6	7	16
2022-12	231,1	17,3	21975,9	9622,7	7,1	16,3
2023-01	223,9	16,7	21285,6	9320,4	6,9	15,8
2023-02	201,7	15,1	19176,2	8396,8	6,2	14,2
2023-03	248,7	18,6	23644,2	10353,3	7,7	17,5
2023-04	236,8	17,7	22512,8	9857,8	7,3	16,7
2023-05	256,7	19,2	24411,3	10689,1	7,9	18,1
2023-06	260	19,4	24718,1	10823,5	8	18,3
2023-07	251,7	18,8	23931,9	10479,2	7,8	17,7
2023-08	235,6	17,6	22397,8	9807,5	7,3	16,6
2023-09	231,7	17,3	22033,4	9647,9	7,2	16,3
2023-10	244	18,3	23203,2	10160,1	7,5	17,2
2023-11	214,4	16	20384,3	8925,8	6,6	15,1
2023-12	233,1	17,4	22167,7	9706,7	7,2	16,4
2024-01	221,4	16,6	21055,5	9219,7	6,8	15,6
2024-02	224,5	16,8	21343,1	9345,6	6,9	15,8
2024-03	266,8	20	25370,1	11109	8,2	18,8
2024-04	231,3	17,3	21995,1	9631,1	7,1	16,3
2024-05	228,7	17,1	21745,8	9522	7,1	16,1
2024-06	231,3	17,3	21995,1	9631,1	7,1	16,3
2024-07	260,6	19,5	24775,6	10848,7	8	18,3
2024-08	265,2	19,8	25216,7	11041,8	8,2	18,7
2024-09	237,2	17,7	22551,2	9874,6	7,3	16,7
2024-10	250,3	18,7	23797,7	10420,4	7,7	17,6
2024-11	243,6	18,2	23164,8	10143,3	7,5	17,1
2024-12	230,5	17,2	21918,4	9597,5	7,1	16,2
2025-01	239	17,9	22723,8	9950,2	7,4	16,8
2025-02	203,1	15,2	19310,4	8455,6	6,3	14,3
2025-03	239,8	17,9	22800,5	9983,8	7,4	16,9

Dökme yük gemisi 2019–2025 yıllarının ilk çeyreğini egzoz emisyon değerleri Tablo 5.4’te ton cinsinden sunulmuştur. Tabloya bakıldığında, yaz aylarında ve yıl sonlarına doğru emisyonların arttığı, ilkbahar ve kış aylarında ise nispeten düşüş eğilimi olduğu görülmüştür. 2022 yılında ani düşüş olduğu ama genel olarak, 2023’ten itibaren yeniden yükseliş olduğu görülmüştür.

Tablo 5.4. Dökme yük gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2019-01	224,9	114,2	21382,7	9363,0	6,9	15,8
2019-02	222,0	112,8	21108,6	9243,0	6,9	15,6
2019-03	246,0	125,0	23393,1	10243,3	7,6	17,3
2019-04	215,3	109,3	20468,9	8962,9	6,6	15,2
2019-05	221,0	112,3	21017,2	9202,9	6,8	15,6
2019-06	204,1	103,7	19402,9	8496,1	6,3	14,4
2019-07	264,9	134,6	25190,2	11030,2	8,2	18,6
2019-08	283,8	144,2	26987,3	11817,1	8,8	20,0
2019-09	264,3	134,2	25129,3	11003,5	8,2	18,6
2019-10	288,6	146,6	27444,2	12017,2	8,9	20,3
2019-11	260,4	132,3	24763,8	10843,5	8,0	18,3
2019-12	253,1	128,5	24063,2	10536,7	7,8	17,8
2020-01	248,6	18,6	23636,8	10350,0	7,7	17,5
2020-02	245,4	18,4	23332,2	10216,6	7,6	17,3
2020-03	259,5	19,4	24672,4	10803,5	8,0	18,3
2020-04	250,2	18,7	23789,1	10416,7	7,7	17,6
2020-05	226,5	16,9	21535,0	9429,7	7,0	15,9
2020-06	192,5	14,4	18306,3	8015,9	5,9	13,6
2020-07	243,1	18,2	23118,9	10123,2	7,5	17,1
2020-08	255,3	19,1	24276,4	10630,1	7,9	18,0
2020-09	256,9	19,2	24428,7	10696,8	7,9	18,1
2020-10	275,5	20,6	26195,4	11470,3	8,5	19,4
2020-11	250,5	18,7	23819,5	10430,0	7,7	17,6
2020-12	233,5	17,5	22205,2	9723,1	7,2	16,4
2021-01	225,8	16,9	21474,1	9403,0	7,0	15,9
2021-02	215,6	16,1	20499,4	8976,2	6,7	15,2
2021-03	229,4	17,2	21809,2	9549,7	7,1	16,1
2021-04	229,4	17,2	21809,2	9549,7	7,1	16,1
2021-05	238,0	17,8	22631,6	9909,8	7,3	16,8
2021-06	227,8	17,0	21656,9	9483,0	7,0	16,0
2021-07	239,3	17,9	22753,4	9963,2	7,4	16,8
2021-08	282,9	21,2	26896,0	11777,1	8,7	19,9
2021-09	297,9	22,3	28327,6	12404,0	9,2	21,0
2021-10	288,6	21,6	27444,2	12017,2	8,9	20,3
2021-11	256,0	19,1	24337,3	10656,7	7,9	18,0
2021-12	264,3	19,8	25129,3	11003,5	8,2	18,6
2022-01	255,0	19,1	24246,0	10616,7	7,9	18,0
2022-02	275,5	20,6	26195,4	11470,3	8,5	19,4
2022-03	188,0	14,1	17879,9	7829,2	5,8	13,2

Tablo 5.4. (Devam) Dökme yük gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2022-04	176,8	13,2	16813,8	7362,4	5,5	12,4
2022-05	175,6	13,1	16691,9	7309	5,4	12,4
2022-06	193,5	14,5	18397,7	8055,9	6	13,6
2022-07	196,7	14,7	18702,3	8189,3	6,1	13,8
2022-08	214,6	16,1	20408	8936,2	6,6	15,1
2022-09	208,9	15,6	19859,8	8696,1	6,4	14,7
2022-10	234,8	17,6	22327	9776,5	7,2	16,5
2022-11	233,9	17,5	22235,6	9736,4	7,2	16,5
2022-12	225,2	16,8	21413,2	9376,3	7	15,9
2023-01	220,1	16,5	20925,8	9162,9	6,8	15,5
2023-02	220,7	16,5	20986,8	9189,6	6,8	15,5
2023-03	248	18,5	23575,8	10323,3	7,7	17,5
2023-04	235,1	17,6	22357,5	9789,8	7,3	16,6
2023-05	248,9	18,6	23667,2	10363,3	7,7	17,5
2023-06	220,7	16,5	20986,8	9189,6	6,8	15,5
2023-07	236,7	17,7	22509,8	9856,5	7,3	16,7
2023-08	238	17,8	22631,6	9909,8	7,3	16,8
2023-09	231,6	17,3	22022,4	9643,1	7,1	16,3
2023-10	236,1	17,7	22448,8	9829,8	7,3	16,6
2023-11	241,9	18,1	22997,1	10069,9	7,5	17
2023-12	251,8	18,8	23941,4	10483,4	7,8	17,7
2024-01	248,6	18,6	23636,8	10350	7,7	17,5
2024-02	240,9	18	22905,7	10029,9	7,4	17
2024-03	287,7	21,5	27352,9	11977,2	8,9	20,3
2024-04	274,9	20,6	26134,5	11443,7	8,5	19,3
2024-05	259,8	19,4	24702,9	10816,8	8	18,3
2024-06	253,7	19	24124,1	10563,4	7,8	17,9
2024-07	267,5	20	25433,9	11136,9	8,3	18,8
2024-08	271,3	20,3	25799,4	11296,9	8,4	19,1
2024-09	245,7	18,4	23362,6	10229,9	7,6	17,3
2024-10	254	19	24154,6	10576,7	7,8	17,9
2024-11	247	18,5	23484,5	10283,3	7,6	17,4
2024-12	230,3	17,2	21900,6	9589,7	7,1	16,2
2025-01	220,1	16,5	20925,8	9162,9	6,8	15,5
2025-02	194,8	14,6	18519,5	8109,3	6	13,7
2025-03	225,2	16,8	21413,2	9376,3	7	15,9

Konteyner gemisi 2019–2025 yıllarının ilk çeyreğini egzoz emisyon değerleri Tablo 5.5’te ton cinsinden sunulmuştur. Konteyner gemilerinin sayısı genel kargo ve dökme yük gemisine kıyasla az olsa da emisyon faktörleri hesaplandığında en yüksek emisyon değerlerine sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 5.5. Konteyner gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2019-01	256,8	130,4	24413,2	10689,9	7,9	18,1
2019-02	235,5	119,6	22393,6	9805,6	7,3	16,6
2019-03	271,1	137,7	25779,4	11288,2	8,4	19,1
2019-04	284,2	144,4	27026,7	11834,4	8,8	20,0
2019-05	289,2	146,9	27501,9	12042,4	8,9	20,4
2019-06	258,0	131,1	24532,0	10742,0	8,0	18,2
2019-07	281,1	142,8	26729,7	11704,3	8,7	19,8
2019-08	276,1	140,3	26254,5	11496,2	8,5	19,4
2019-09	266,1	135,2	25304,2	11080,1	8,2	18,7
2019-10	292,4	148,5	27798,9	12172,5	9,0	20,6
2019-11	284,2	144,4	27026,7	11834,4	8,8	20,0
2019-12	277,4	140,9	26373,3	11548,3	8,6	19,5
2020-01	274,9	20,6	26135,7	11444,2	8,5	19,3
2020-02	268,6	20,1	25541,8	11184,1	8,3	18,9
2020-03	281,7	21,1	26789,1	11730,3	8,7	19,8
2020-04	264,3	19,8	25126,0	11002,1	8,2	18,6
2020-05	259,9	19,4	24710,2	10820,0	8,0	18,3
2020-06	256,1	19,2	24353,8	10663,9	7,9	18,0
2020-07	276,8	20,7	26313,9	11522,3	8,5	19,5
2020-08	264,3	19,8	25126,0	11002,1	8,2	18,6
2020-09	259,3	19,4	24650,8	10794,0	8,0	18,2
2020-10	276,1	20,7	26254,5	11496,2	8,5	19,4
2020-11	288,0	21,5	27383,1	11990,4	8,9	20,3
2020-12	290,5	21,7	27620,7	12094,5	9,0	20,4
2021-01	277,4	20,8	26373,3	11548,3	8,6	19,5
2021-02	269,3	20,1	25601,2	11210,1	8,3	19,0
2021-03	296,7	22,2	28214,7	12354,6	9,2	20,9
2021-04	289,9	21,7	27561,3	12068,5	8,9	20,4
2021-05	298,6	22,3	28392,9	12432,6	9,2	21,0
2021-06	283,6	21,2	26967,3	11808,4	8,8	20,0
2021-07	283,6	21,2	26967,3	11808,4	8,8	20,0
2021-08	283,6	21,2	26967,3	11808,4	8,8	20,0
2021-09	288,6	21,6	27442,5	12016,4	8,9	20,3
2021-10	306,7	22,9	29165,1	12770,7	9,5	21,6
2021-11	274,3	20,5	26076,3	11418,2	8,5	19,3
2021-12	284,9	21,3	27086,1	11860,4	8,8	20,1
2022-01	291,7	21,8	27739,5	12146,5	9,0	20,5
2022-02	276,1	20,7	26254,5	11496,2	8,5	19,4
2022-03	294,2	22,0	27977,1	12250,5	9,1	20,7
2022-04	276,8	20,7	26313,9	11522,3	8,5	19,5
2022-05	296,1	22,2	28155,3	12328,6	9,1	20,8
2022-06	307,4	23,0	29224,5	12796,7	9,5	21,6
2022-07	293,0	21,9	27858,3	12198,5	9,0	20,6
2022-08	299,2	22,4	28452,3	12458,6	9,2	21,1

Tablo 5.5. (Devam) Konteyner gemisi 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2022-09	304,9	22,8	28986,9	12692,7	9,4	21,5
2022-10	320,5	24,0	30471,9	13342,9	9,9	22,6
2022-11	319,9	23,9	30412,5	13316,9	9,9	22,5
2022-12	323	24,2	30709,5	13447	10	22,7
2023-01	322,4	24,1	30650,1	13421	9,9	22,7
2023-02	280,5	21	26670,3	11678,3	8,7	19,7
2023-03	336,7	25,2	32016,3	14019,2	10,4	23,7
2023-04	331,7	24,8	31541,1	13811,1	10,2	23,4
2023-05	351,1	26,3	33382,5	14617,4	10,8	24,7
2023-06	361,7	27,1	34392,3	15059,6	11,2	25,5
2023-07	355,5	26,6	33798,3	14799,5	11	25
2023-08	363	27,2	34511,1	15111,6	11,2	25,5
2023-09	358,6	26,8	34095,3	14929,5	11,1	25,2
2023-10	379,2	28,4	36055,5	15787,8	11,7	26,7
2023-11	324,9	24,3	30887,7	13525	10	22,9
2023-12	360,5	27	34273,5	15007,5	11,1	25,4
2024-01	334,8	25,1	31838,1	13941,1	10,3	23,6
2024-02	344,2	25,8	32729,1	14331,3	10,6	24,2
2024-03	355,5	26,6	33798,3	14799,5	11	25
2024-04	339,8	25,4	32313,3	14149,2	10,5	23,9
2024-05	355,5	26,6	33798,3	14799,5	11	25
2024-06	346,7	25,9	32966,7	14435,3	10,7	24,4
2024-07	333	24,9	31659,9	13863,1	10,3	23,4
2024-08	326,7	24,4	31065,9	13603	10,1	23
2024-09	330,5	24,7	31422,3	13759,1	10,2	23,3
2024-10	335,5	25,1	31897,5	13967,2	10,4	23,6
2024-11	327,4	24,5	31125,3	13629	10,1	23
2024-12	329,2	24,6	31303,5	13707,1	10,2	23,2
2025-01	355,5	26,6	33798,3	14799,5	11	25
2025-02	314,9	23,6	29937,3	13108,8	9,7	22,2
2025-03	335,5	25,1	31897,5	13967,2	10,4	23,6

Türü belirtilmemiş tanker gemilerine ait 2019–2025 yıllarının ilk çeyreğini kapsayan egzoz emisyon değerleri Tablo 5.6’da ton cinsinden sunulmuştur. Emisyon değerlerinin 2020 yılında belirgin şekilde düştüğü, ancak 2022’den itibaren yeniden artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Diğer gemi türleriyle karşılaştırıldığında, en düşük emisyon değerlerinin bu gemi tipine ait olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.6. Türü belirtilmemiş tanker gemileri 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2019-01	200,8	102,0	19089,1	8358,7	6,2	14,1
2019-02	189,8	96,4	18051,2	7904,2	5,9	13,4
2019-03	228,4	116,0	21720,8	9511,0	7,1	16,1
2019-04	199,6	101,4	18977,9	8310,0	6,2	14,1
2019-05	207,0	105,1	19682,1	8618,3	6,4	14,6
2019-06	197,3	100,2	18755,5	8212,6	6,1	13,9
2019-07	224,9	114,3	21387,2	9364,9	6,9	15,8
2019-08	186,3	94,6	17717,6	7758,1	5,8	13,1
2019-09	194,9	99,0	18533,1	8115,2	6,0	13,7
2019-10	207,4	105,3	19719,2	8634,6	6,4	14,6
2019-11	186,0	94,5	17680,6	7741,9	5,7	13,1
2019-12	186,0	94,5	17680,6	7741,9	5,7	13,1
2020-01	208,2	15,6	19793,3	8667,0	6,4	14,7
2020-02	180,1	13,5	17124,6	7498,4	5,6	12,7
2020-03	199,6	14,9	18977,9	8310,0	6,2	14,1
2020-04	198,8	14,9	18903,7	8277,5	6,1	14,0
2020-05	193,0	14,4	18347,8	8034,0	6,0	13,6
2020-06	169,2	12,7	16086,7	7044,0	5,2	11,9
2020-07	171,9	12,9	16346,2	7157,6	5,3	12,1
2020-08	161,4	12,1	15345,4	6719,4	5,0	11,4
2020-09	178,5	13,4	16976,3	7433,5	5,5	12,6
2020-10	188,3	14,1	17903,0	7839,3	5,8	13,3
2020-11	169,6	12,7	16123,8	7060,2	5,2	11,9
2020-12	181,7	13,6	17272,8	7563,4	5,6	12,8
2021-01	169,2	12,7	16086,7	7044,0	5,2	11,9
2021-02	155,9	11,7	14826,5	6492,2	4,8	11,0
2021-03	203,5	15,2	19348,5	8472,3	6,3	14,3
2021-04	177,8	13,3	16902,2	7401,1	5,5	12,5
2021-05	184,4	13,8	17532,3	7677,0	5,7	13,0
2021-06	171,1	12,8	16272,1	7125,1	5,3	12,0
2021-07	163,7	12,2	15567,8	6816,8	5,1	11,5
2021-08	166,5	12,5	15827,3	6930,4	5,1	11,7
2021-09	150,9	11,3	14344,6	6281,2	4,7	10,6
2021-10	164,9	12,3	15679,0	6865,5	5,1	11,6
2021-11	155,9	11,7	14826,5	6492,2	4,8	11,0
2021-12	161,8	12,1	15382,5	6735,6	5,0	11,4
2022-01	178,2	13,3	16939,2	7417,3	5,5	12,5
2022-02	171,5	12,8	16309,1	7141,4	5,3	12,1
2022-03	193,4	14,5	18384,8	8050,3	6,0	13,6
2022-04	167,2	12,5	15901,4	6962,8	5,2	11,8
2022-05	207,4	15,5	19719,2	8634,6	6,4	14,6
2022-06	187,9	14,1	17865,9	7823,1	5,8	13,2
2022-07	203,1	15,2	19311,5	8456,0	6,3	14,3
2022-08	188,3	14,1	17903,0	7839,3	5,8	13,3

Tablo 5.6. (Devam) Türü belirtilmemiş tanker gemileri 2019–2025 ilk çeyrek egzoz emisyon değerleri (ton)

AYLAR	NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	VOC	PM
2022-09	189,5	14,2	18014,2	7888	5,8	13,3
2022-10	191,8	14,3	18236,6	7985,4	5,9	13,5
2022-11	191	14,3	18162,4	7952,9	5,9	13,4
2022-12	220,6	16,5	20979,5	9186,4	6,8	15,5
2023-01	206,2	15,4	19608	8585,9	6,4	14,5
2023-02	182,8	13,7	17384	7612,1	5,6	12,9
2023-03	209,3	15,7	19904,5	8715,7	6,5	14,7
2023-04	213,6	16	20312,3	8894,3	6,6	15
2023-05	222,2	16,6	21127,7	9251,3	6,9	15,6
2023-06	211,7	15,8	20126,9	8813,1	6,5	14,9
2023-07	210,1	15,7	19978,7	8748,2	6,5	14,8
2023-08	213,6	16	20312,3	8894,3	6,6	15
2023-09	209,3	15,7	19904,5	8715,7	6,5	14,7
2023-10	211,3	15,8	20089,9	8796,9	6,5	14,9
2023-11	167,2	12,5	15901,4	6962,8	5,2	11,8
2023-12	195,3	14,6	18570,2	8131,4	6	13,7
2024-01	193,7	14,5	18421,9	8066,5	6	13,6
2024-02	191	14,3	18162,4	7952,9	5,9	13,4
2024-03	223,4	16,7	21238,9	9300	6,9	15,7
2024-04	223	16,7	21201,9	9283,8	6,9	15,7
2024-05	224,5	16,8	21350,1	9348,7	6,9	15,8
2024-06	209	15,6	19867,5	8699,5	6,4	14,7
2024-07	215,6	16,1	20497,6	8975,4	6,7	15,2
2024-08	217,5	16,3	20682,9	9056,6	6,7	15,3
2024-09	216,4	16,2	20571,7	9007,9	6,7	15,2
2024-10	200,8	15	19089,1	8358,7	6,2	14,1
2024-11	168,8	12,6	16049,7	7027,8	5,2	11,9
2024-12	178,2	13,3	16939,2	7417,3	5,5	12,5
2025-01	188,7	14,1	17940	7855,5	5,8	13,3
2025-02	178,5	13,4	16976,3	7433,5	5,5	12,6
2025-03	207,4	15,5	19719,2	8634,6	6,4	14,6

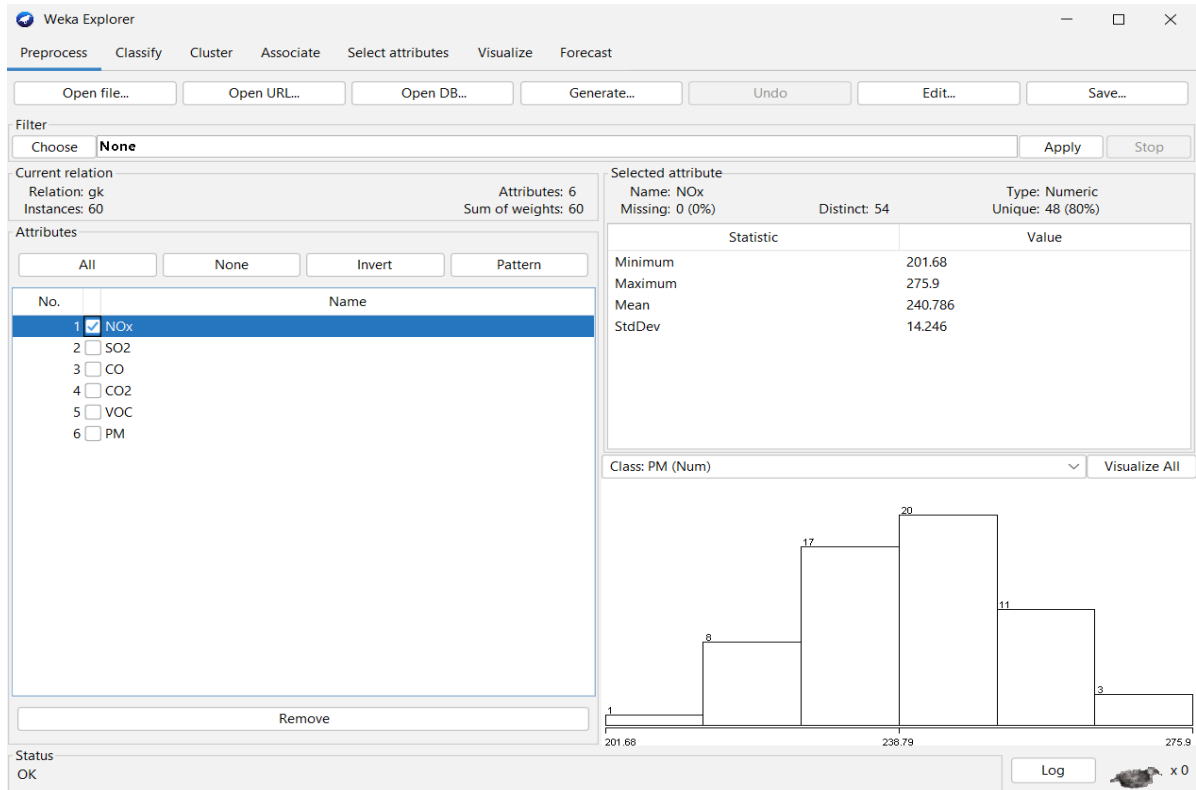
5.3. Makine Öğrenme Algoritmaları ile Gemi Emisyonlarının Tahminlemesi

Bu çalışma da tahminleme analizi WEKA programının Explorer sekmesi ile gerçekleştirilmiştir. Geçmiş yıllardaki emisyon değerlerini içeren veriler Şekil 4.5'te gösterilen “Explorer” ekranının preprocess bölümünde (ön işleme) open file sekmesinden .csv formatında düzenlenerek aktarılmıştır. Attributes penceresinde gemi türüne göre yıllara göre emisyon değerleri gözükmemektedir. Veri seti tarih başlangıç olarak 2019 Ocak başı, bitiş tarihi olarak 2025

Mart tarihleri arası 75 aylık veriyi içermektedir. 2019-2023 yılları arası 60 aylık dönem eğitim, sonraki 15 aylık dönem ise test verisi olarak bölünmüştür. Bu veriler aylık toplam gemi geçiş istatistikleri dikkate alınarak hesaplanan emisyon değerleri ile oluşturulmuştur. Bu bölüm, Weka'nın tahminleme sürecinde uygulanan adımları içermektedir.

Bu bölümdeki tahminleme sürecinde, çevresel etkileri ve veri tutarlılığı göz önünde bulundurularak NO_x, CO₂ ve PM emisyonlarına odaklanılmıştır. SO_x emisyonları ise, Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından 2020 yılında yürürlüğe konulan %0,5 kükürt sınırı nedeniyle ani bir düşüş sergilemiş ve bu durum, modellemeye uygun yeterlilikte veri sunmadığı için analiz dışında bırakılmıştır. Ele alınan NO_x, CO₂ ve PM kirleticileri ise, hem hava kirliliği hem de iklim değişikliği açısından kritik öneme sahip olması nedeniyle çalışmanın temel odağını oluşturmuştur.

Şekil 5.3'te genel kargo gemisi emisyon değerleri preprocess ekranında verilmiştir. Buna göre veri ön işleme sürecinde, emisyon verileri içerisinde yer alan NO_x (azot oksit) emisyonu değişkeni seçilerek, NO_x verilerinin istatistiklerine ulaşılmıştır. Bu değişken için yapılan analiz sonucunda, veri setinde eksik değer bulunmadığı (missing: 0) ve tüm değerlerin sayısal tipte (numeric) olduğu tespit edilmiştir. NO_x emisyon değerlerinin dağılımına bakıldığında; minimum değer 201,68, maksimum değerin ise 275,9 olduğu; ortalama (mean) emisyon miktarının 3240,786 ve standart sapmanın (StdDev) ise 14,246 olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu bulgular, NO_x emisyonlarının yıllar içinde belirli bir değişkenlik gösterdiğini ve veri setinin tahminleme modelleri için uygun olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3. Weka Preprocess ekranı

Şekil 5.4. Genel kargo gemisi CO₂ (karbondioksit) emisyonu özet istatistiklerine yer verilmiştir. CO₂ değişkeni seçilerek yapılan ön analizde veri setinin numeric olduğu, eksik değer içermediği minimum değer 8396,8 maksimum değerin ise 11486,82 olduğu görülmektedir. Bu aralık içerisinde yer alan emisyon değerlerinin aritmetik ortalaması 10024,94, standart sapması ise 3583,149 olarak hesaplandığı görülmüştür.

Selected attribute	
Name: CO2	Type: Numeric
Missing: 0 (0%)	Unique: 48 (80%)
Distinct: 54	
Statistic	Value
Minimum	8396.8
Maximum	11486.82
Mean	10024.94
StdDev	593.149

Şekil 5.4. Genel kargo gemisi CO₂ değişkeninin özet istatistikleri

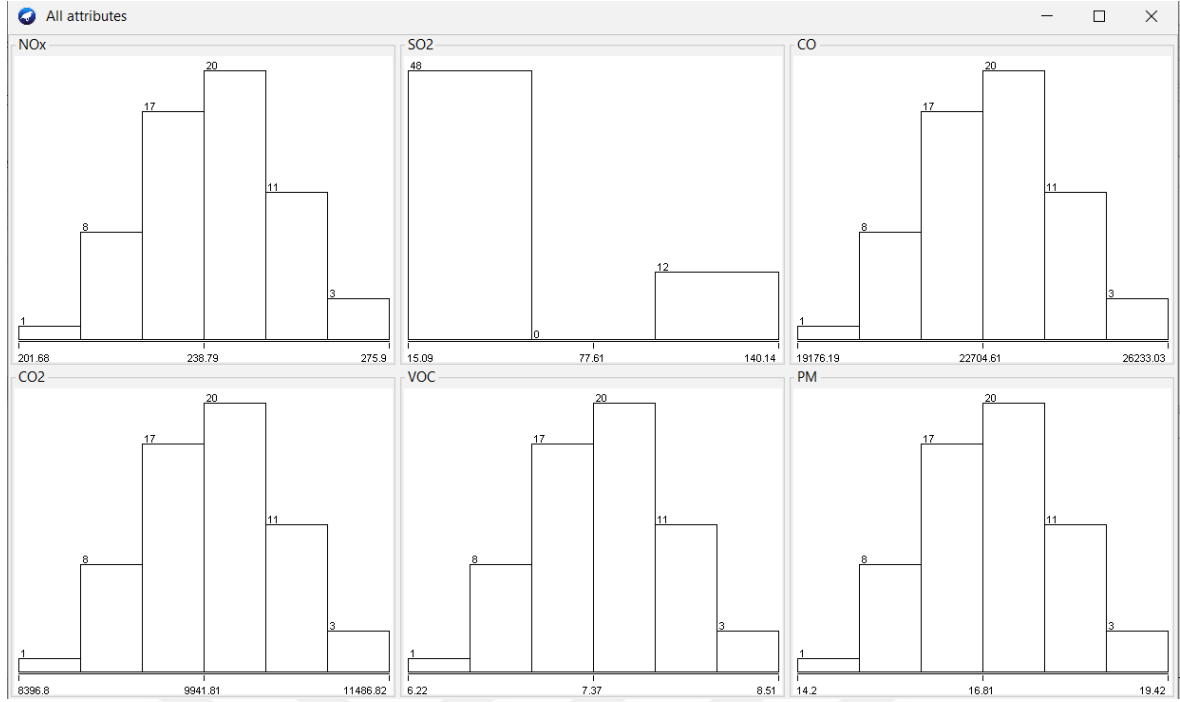
Şekil 5.4. Genel kargo gemisi PM emisyonuna emisyonu özet istatistiklerini yer verilmiştir. Yapılan betimsel analizde, değişkenin veri kümesinde eksiksiz ve numeric olduğu belirlenmiştir. PM değerlerinin minimumu 14,2, maksimumu ise 19,42 olarak hesaplanmıştır. Değişkenin aritmetik ortalaması 16,949, standart sapması ise 1,003 olarak tespit edilmiştir.

Selected attribute	
Name: PM	Type: Numeric
Missing: 0 (0%)	Distinct: 54
	Unique: 48 (80%)
Statistic	Value
Minimum	14.2
Maximum	19.42
Mean	16.949
StdDev	1.003

Şekil 5.5. Genel kargo gemisi PM değişkeninin özet istatistikleri

Yalnızca tanımlayıcı istatistikler olması ve veri ön işleme adımları genel olarak tüm değişkenler için benzer şekilde uygulanması sebebiyle tekrara neden olmaması sadece genel kargo gemisi örnekleri ile açıklanmaya çalışılmıştır.

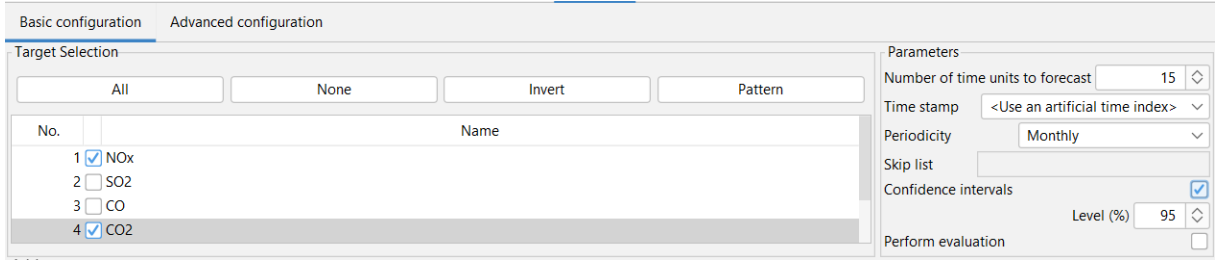
Şekil 5.6, genel kargo gemisi emisyon verilerinin WEKA yazılımı aracılığıyla görselleştirilmiş hali olup, NO_x, SO₂, CO, CO₂, VOC ve PM değişkenlerine ait frekans dağılımlarını göstermektedir. Her bir değişken için gözlem değerlerinin hangi aralıkta yoğunlaştığı dikey çubuklar aracılığıyla ifade edilmiştir.



Şekil 5.6. Genel kargo gemisi emisyon değişkenlerine ait frekans dağılımı

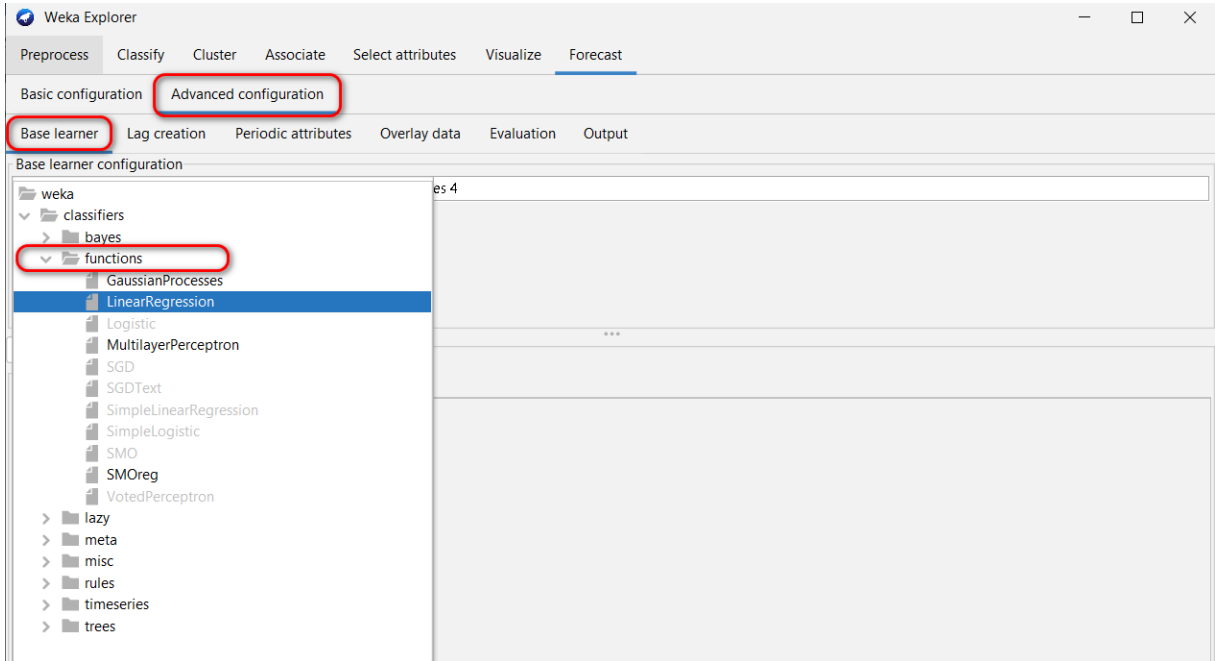
WEKA uygulaması, tahmininde iki yapılandırma bulunmaktadır. Bunlar “Basic configuration” (Temel Yapılandırma) ve “Advanced configuration” (İleri Düzey Yapılandırma) olarak adlandırılmaktadır. Temel yapılandırmada, zaman damgası (timestamp), periyodiklik ve tahmin edilecek birim sayısı gibi önemli parametreler mevcuttur. “Time stamp”, bir olayı tanımlayan bir bilgi dizisidir ve genellikle gün ve saat olarak temsil edilir, bazen bir saniyenin küçük bir kısmına kadar hassas olabilir. Advanced configuration ise 'Base learner' (Temel öğrenici) seçeneği bulunur; burada, seçilen öğrenme algoritmasına özgü yapılandırılmış parametreler yer almaktadır [71].

Forecast (tahminleme) bölümünü seçerek, kullanılacak parametrelerin belirlenmesi için öncelikle basic configuration penceresinden tahminleme yapılacak emisyon değişkenleri seçilir. Daha sonra sağ tarafta bulunan parametrelerden tahminleme yapılacak 2024-2025 ilk çeyrek süreci 15 olarak “number of time to forecast” alanına, “time stamp” bölümünden veri setindeki use an artificial time index seçilmiştir. Periyodik olarak tekrarlamayı ise “periodicity” bölümünde aylık olarak belirtilmiştir. Güven aralığı seviyesi, varsayılan olarak %95 seçili kalmış ve değiştirilmemiştir. Basic configuration penceresi parametre seçimi şekil 5.7’de gösterilmiştir.



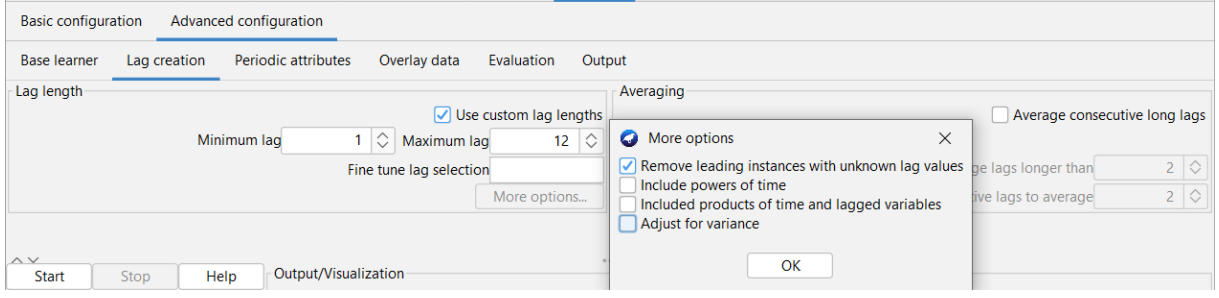
Şekil 5.7. WEKA Forecast basic configuration parametre seçimleri

Tahminleme için parametre seçimleri yapıldıktan sonra “Advanced Configuration” sekmesi “Base learner” penceresinden Şekil 5.8’de de gösterilen makine öğrenmesi algoritmalarından öncelikle açıklamak adına “LinearRegression” seçim yapılmıştır.



Şekil 5.8. WEKA Forecast advanced configuration algoritma seçimi

Algoritmalarından LinearRegresyon belirledikten sonra “lag creation” (geçikme oluşturma) sekmesinde tahminlemede dikkate alması için aşağıdaki parametre ve değerleri kullanılmıştır. Lag Creation paneli, gecikmeli değişkenlerin nasıl oluşturulacağını yönetildiği bölümdür. Bu değişkenler, geçmiş ve güncel veriler arasındaki ilişkiyi öğrenme algoritmalarının kullanabileceği temel mekanizmadır. Bu nedenle, “Use custom lag lengths” seçeneği ile min ve max lag değerleri belirlenir. Çalışmada üç farklı algoritmanın aynı koşullarda karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla, tüm modellerde varsayılan gecikme değerleri kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Lag Creation Seçimi

Lag Creation'da belirtilen seçeneklere ek olarak, 'More Options' butonuna tıklayarak açılan pencerede 'Remove leading instances with unknown lag values' seçeneğini işaretlenerek, LinearRegresyon algoritması için gerekli gecikme değerleri tamamlanmıştır. Bu seçeneği işaretlemenin sebebi, gecikme değeri bilinmeyen önde gelen aylık verilerin analizin dışında tutulmasını sağlamaktır. Zamanın üst dereceleri veya interaktif etkiler gibi yapay karmaşıklıklar modele dâhil edilmemiştir.

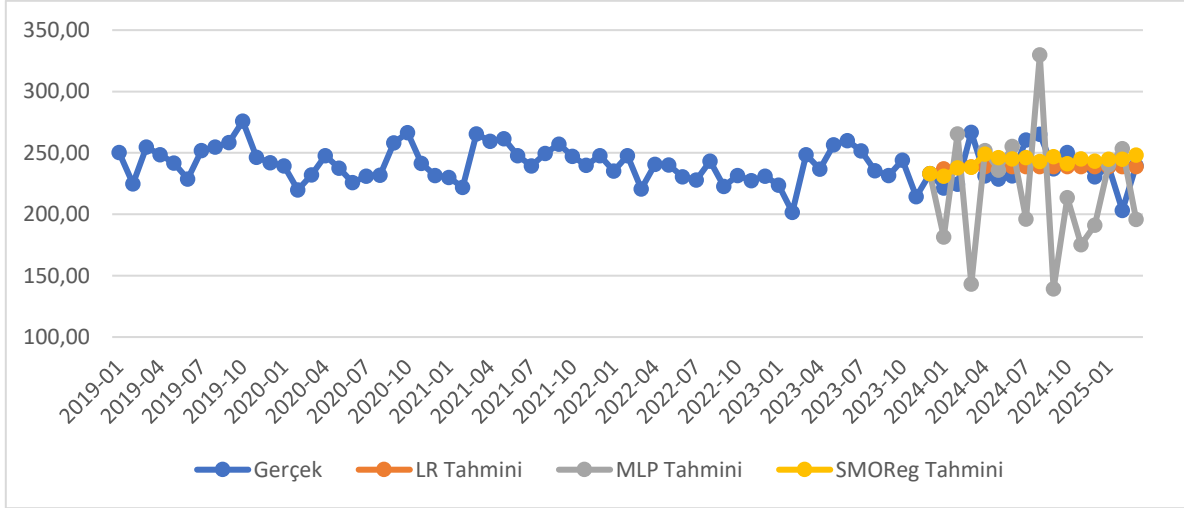
Tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmek ve ölçmek için hata teknikleri büyük önem taşır. Bu hata ölçümleri, tahmin edilen değerler ile gerçek sonuçlar arasındaki farkı belirler. Bu çalışmada, eğitim verilerinin değerlendirilmesi kapsamında üç temel performans metriği: Mean absolute error (MAE), Root mean square error (RMSE) ve Mean Absolute percetage error (MAPE) kullanılmıştır.

5.3.1. Tahmin metodolojileri bulguları

Weka uygulaması ile gerçekleştirilen csv veri formatına uygun olarak oluşturulan algoritmaların çıktıları bu bölümde verilmiştir. 2019-2024 yılları arasındaki 60 aylık veri seti eğitim, 2024-2025 ilk çeyreklik dönemdeki veri seti test için kullanılmıştır. Model, geçmiş verilerdeki kalıpları öğrenerek 2024 yılı ve 2025'in ilk çeyreği için 15 aylık tahmin oluşturmuştur. Model performansı ise hata metrikleri (MAE, MAPE, RMSE) ile değerlendirilmiştir.

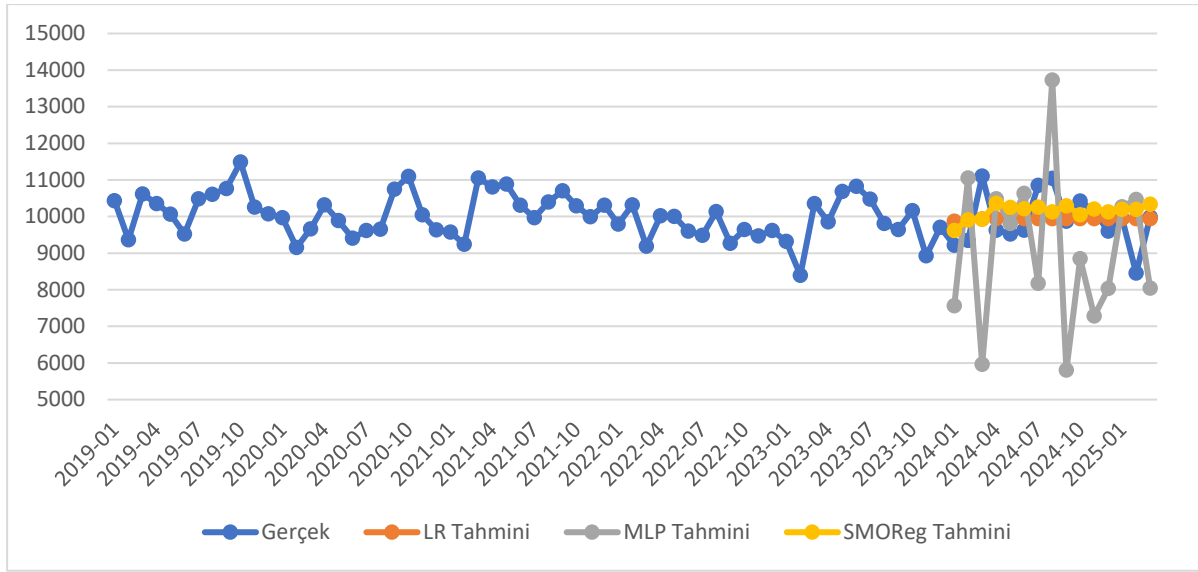
Şekil 5.10'da, genel kargo gemilerine ait NO_x emisyonlarının 2019–2025 yılları arasındaki hesaplanmış emisyon değerleri ile Lineer Regresyon, Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve SMOReg algoritmaları kullanılarak elde edilen tahmin sonuçları görselleştirilmiştir. 2019–2023 dönemi, model eğitiminde kullanılan verileri temsil ederken; 2024–2025 arası, tahmin edilen değerlerin gerçek ölçümlerle karşılaştırıldığı test dönemini oluşturmaktadır. Grafik incelendiğinde, Lineer Regresyon ve SMOReg algoritmalarının daha stabil tahminler ürettiği, MLP algoritmasının ise bazı periyotlarda yüksek sapmalar gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu

durum, MLP'nin karmaşık desenleri öğrenme kapasitesine karşın aşırı öğrenmeye (overfitting) yatkın olabileceğini göstermektedir. SMOReg modeli ise hem genel eğilimi takip etme hem de sapmaları minimize etme açısından dengeli bir performans sergilemiştir.



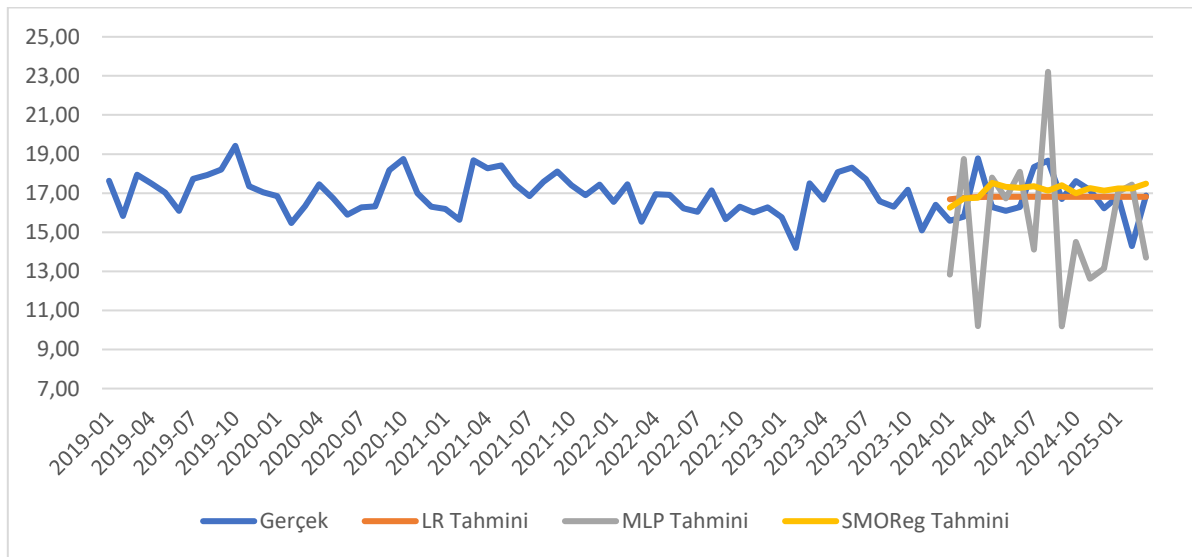
Şekil 5.10. Genel kargo gemisi NO_x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025)

Şekil 5.11’de, genel kargo gemilerine ait CO₂ emisyon değerlerinin 2019–2025 yılları arasındaki gerçek değerleri ile Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg algoritmaları tarafından üretilen tahmin değerleri grafikte sunulmuştur. Grafik, 2019–2023 dönemine ait eğitim verileri ve 2024–2025 dönemine ait tahmin sonuçlarını içermektedir. 2024 sonrası gerçek ve algoritmaların ürettiği tahmin değerleri incelendiğinde; Lineer Regresyon modelinin durağan bir tahmin eğiliminde olduğu, MLP modelinin ise özellikle bazı aylarda ciddi sapma değerler ürettiği dikkat çekmektedir. SMOReg algoritması ise Lineer Regresyon algoritmasına yakın artış gösteren tahmin değerleri ürettiği görülmüştür.



Şekil 5.11. Genel kargo gemisi CO₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

Şekil 5.12’de, genel kargo gemilerinden kaynaklanan PM (Partikül Madde) emisyonlarının 2019–2025 yılları arasındaki gerçek değerleri ile Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg algoritmaları kullanılarak yapılan tahmin değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik, 2019–2023 dönemini eğitim verisi olarak, 2024–2025 dönemini ise tahmin ve test süreci olarak göstermektedir. Gerçek değerler incelendiğinde PM emisyonlarında dönemsel dalgalanmaların sınırlı olduğu, değerlerin çoğunlukla 15–18 bandında seyrettiği görülmektedir. Buna bağlı olarak, Lineer Regresyon ve SMOReg algoritmalarının daha durağan ve gerçekleşen değerlere yakın sonuçlar ürettiği gözlemlenirken, MLP algoritmasının gerçekleşen değerlerden zaman zaman yüksek sapmalar yaşadığı görülmüştür.



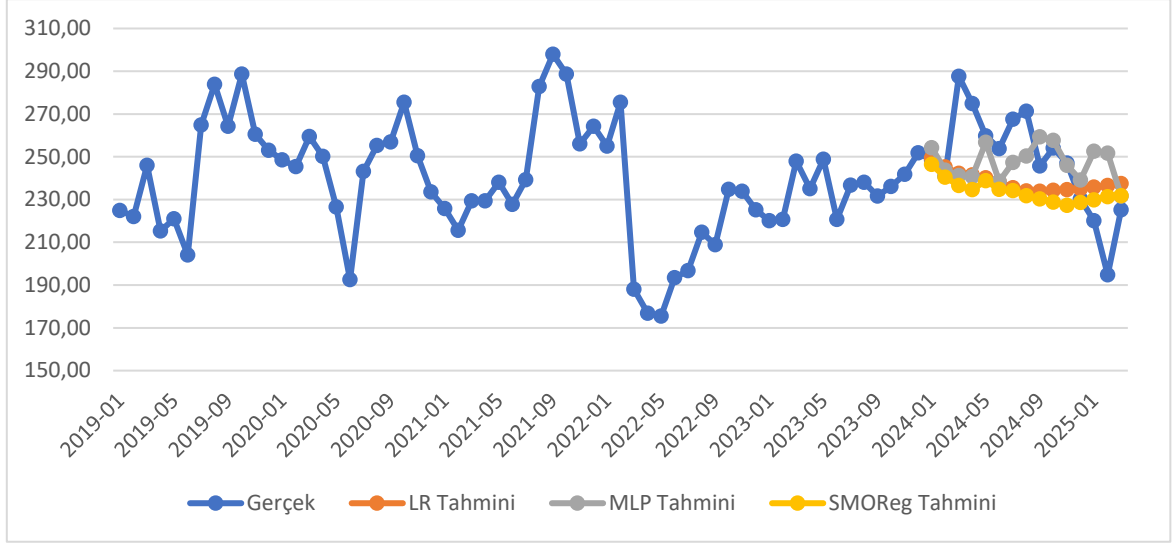
Şekil 5.112. Genel kargo gemisi PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

Tablo 5.7’de, genel kargo gemisi için geliştirilen üç farklı makine öğrenmesi algoritmasının NO_x, CO₂ ve PM kirleticilerine yönelik tahmin performans metrikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Lineer Regresyon algoritmasının, emisyon verilerinin üç kirleticisi için de en düşük hata oranlarına ulaştığı görülmüştür. SMOReg algoritmasının da Lineer Regresyon’a yakın sonuçlar üreterek kararlı bir performans göstermiştir. Buna karşılık MLP algoritmasının, veri setindeki ani değişimlere ve sınırlı veri sayısına karşı aşırı öğrenmeye yatkınlık gösterdiği grafiklerde görülmüştür, bu sebeple de diğer algoritmalarla kıyasla yüksek sapmalar ve başarısız tahmin performansı sergilemiştir.

Tablo 5.7. Genel kargo gemisi emisyon tahmin performansları karşılaştırması

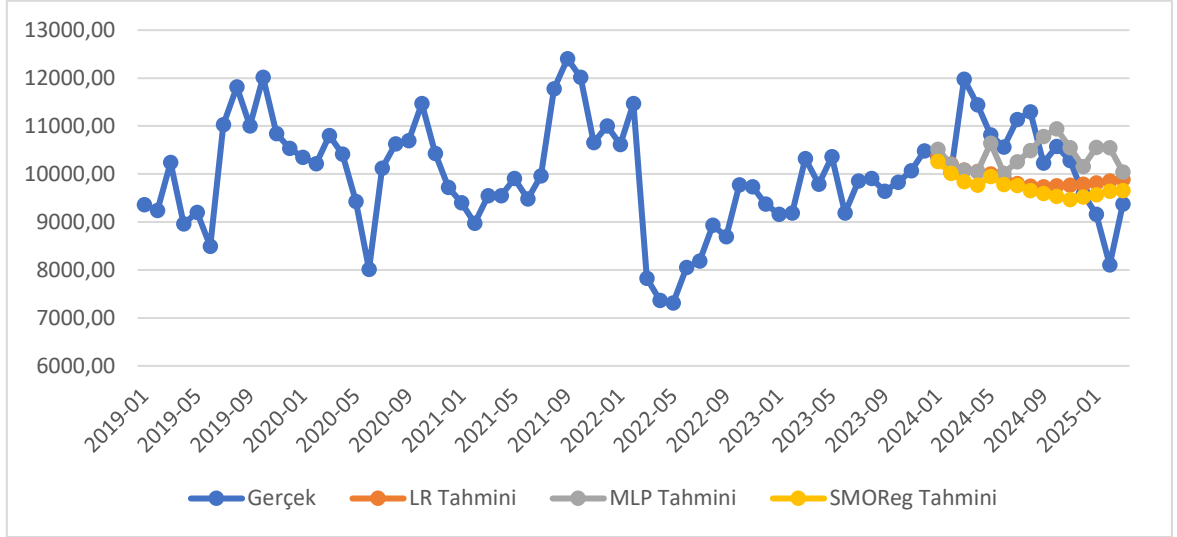
Kirleticisi	Metrik	Linear Regression	MLP	SMOReg
NO _x	MAE	12,92	48,22	15,06
	MAPE (%)	5,46	19,92	6,43
	RMSE	16,56	57,49	17,84
CO ₂	MAE	537,97	2023,09	627,37
	MAPE (%)	5,46	20,07	6,43
	RMSE	689,48	2392,96	742,78
PM	MAE	0,91	3,39	1,06
	MAPE (%)	5,46	19,87	6,43
	RMSE	1,17	3,97	1,26

Şekil 5.13’te, dökme yük gemilerine ait NO_x emisyonlarının 2019–2025 yılları arasındaki gerçek değerleri ile Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg algoritmaları kullanılarak üretilen tahmin değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 2019–2023 dönemi eğitim verisi olarak değerlendirilmiş, 2024–2025 dönemi ise modellerin tahmin doğruluğunu test etmek amacıyla kullanılmıştır. Grafiğin bütünü incelendiğinde, NO_x emisyonlarının zaman içinde belirgin dalgalanmalar gösterdiği, periyodik olarak düşüşler ve yükselişler sergilediği gözlemlenmektedir. Özellikle 2021 sonu ve 2022 başlarında belirgin bir düşüşün ardından, 2023 sonuna doğru tekrar yükseliş eğilimine girdiği görülmektedir. Tahmin modelleri incelendiğinde, Lineer Regresyon algoritmasının eğilimsel farklılıkları yeterince yansıtamadığı, veriyi ortalamaya yakın düz bir çizgiyle modellediği görülmektedir. MLP algoritması, eğilimleri öğrenmede daha başarılı görünse de bazı dönemlerde sapmalar ürettiği de gözlemlenmiştir. SMOReg algoritması ise daha dengeli tahminler üretmiş, veri setindeki ani değişimlere karşı daha istikrarlı bir performans sergilemiştir.



Şekil 5.13. Dökme yük gemisi NO_x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025)

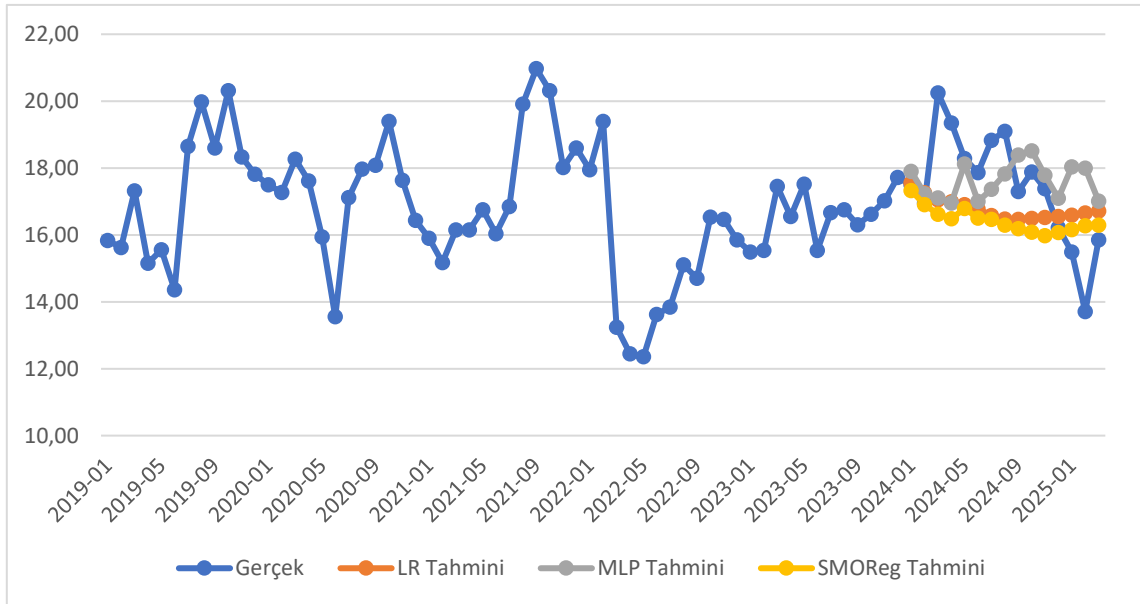
Şekil 5.14’te, dökme yük gemilerinden kaynaklanan CO₂ emisyonlarının 2019–2025 yılları arasındaki gerçek değerleri ile Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg algoritmaları tarafından yapılan tahminler karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. CO₂ emisyonlarında özellikle 2020–2022 döneminde yüksek dalgalanma ve ani düşüşler olduğu gözlemlenmiştir. Lineer Regresyon ve SMOReg algoritmalarının istikrarlı sonuçlar ürettiği ama eğitim verilerindeki deseni MLP algoritmasına kıyasla öğrenmede zayıf kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.14. Dökme yük gemisi CO₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025)

Şekil 5.15’te, dökme yük gemilerinin 2019–2025 yılları arasındaki PM (Partikül Madde) emisyonlarına ilişkin gerçek değerler ile Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg algoritmalarıyla yapılan tahmin sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Gerçek değerler incelendiğinde

PM emisyonlarının belirli dönemlerde dalgalanma gösterdiği, özellikle 2020 ve 2022 yıllarında ani yükselme ve düşüşlerin yaşandığı görülmektedir. Lineer Regresyon algoritması, bu değişkenliği yansıtmakta zayıf kalmış, tahmin eğrisi genel ortalamaya yakın sabit bir çizgi olarak kalmıştır. Bu nedenle kısa vadeli varyasyonları ve yapısal kırılmaları yakalamakta yetersiz kalmıştır. MLP algoritması, tahmin döneminde eğilimlere daha duyarlı bir performans göstermiş, ancak özellikle 2024 ortasında gözlemlenen dalgalanmalarda sapmalar olduğu gözlemlenmiştir. SMOREg algoritması ise PM emisyonları için istikrarlı ve dengeli tahminler üretmiştir. Tahmin çizgisi, hem gerçek eğilimle uyumlu seyretmiş hem de ani sıçramalardan kaçınarak daha güvenilir bir sonuç profili ortaya koymuştur.



Şekil 5.15. Dökme yük gemisi PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

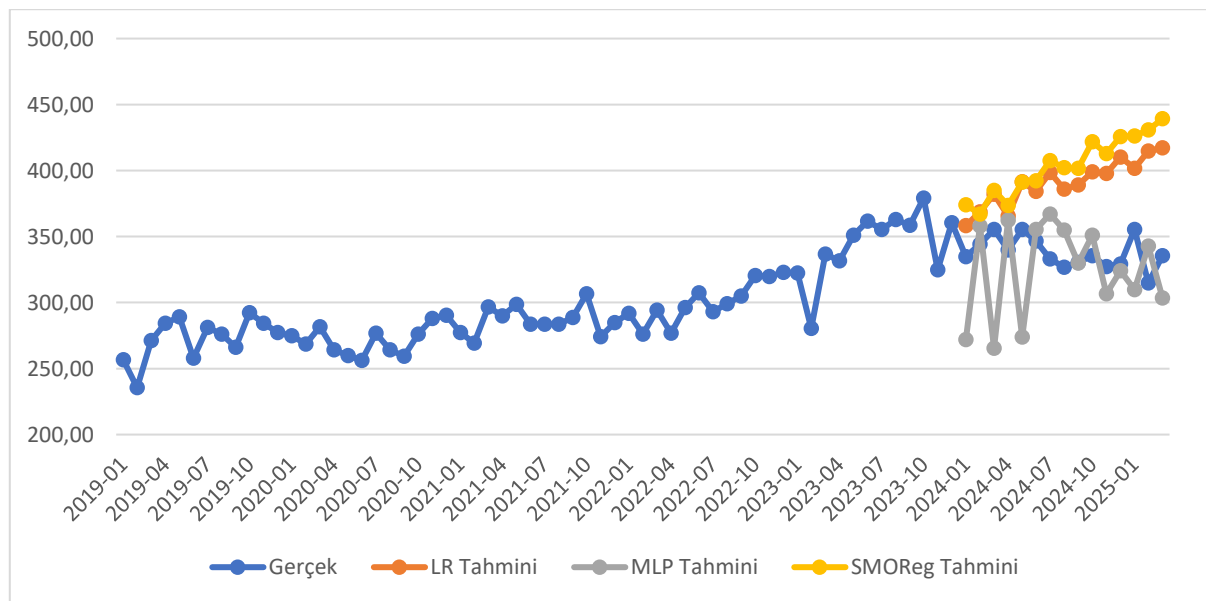
Tablo 5.8’de, dökme yük gemilerine ait NO_x, CO₂ ve PM kirleticileri için Lineer Regresyon, MLP ve SMOREg algoritmalarının tahmin performansları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. NO_x tahminlerinde, en düşük MAE (18,09) ve RMSE (24,58) değerleri MLP algoritmasında elde edilmiştir. Bu sonuç, MLP'nin NO_x emisyonlarındaki varyasyonları diğer algoritmalara göre daha başarılı şekilde modellediğini göstermektedir. CO₂ tahminlerinde de MLP algoritması en düşük MAE (819,14) ve MAPE (%8,19) değerlerini vermiştir. Ancak RMSE değerinin (1049,17) Lineer Regresyon’dan daha yüksek olması, tahmin değerlerindeki sapmalarda dikkat çekmektedir. PM tahminlerinde, tüm algoritmaların performansları birbirine oldukça yakındır. MLP algoritması, MAE değeri açısından en düşük hata ile (%1,40) en iyi sonuçları verirken, Lineer Regresyon algoritması daha düşük RMSE (%1,73) ile daha istikrarlı

tahminler üretmiştir. SMOReg algoritması ise her üç metrikte de en yüksek hata oranlarını üretmiş, bu nedenle PM tahminlerinde diğer iki algoritmanın gerisinde kalmıştır.

Tablo 5.8. Dökme yük gemisi emisyon tahmin performansları karşılaştırması

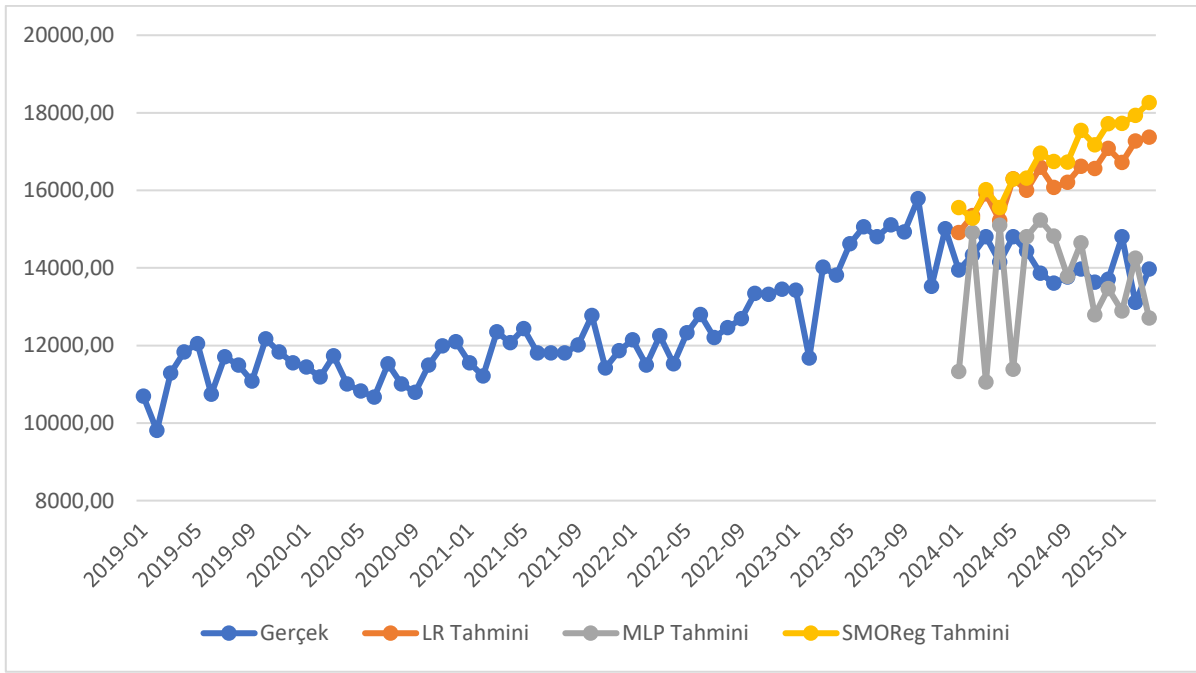
Kirletici	Metrik	Lineer Regresyon	MLP	SMOReg
NO _x	MAE	20,45	18,09	21,45
	MAPE (%)	8,2	7,5	8,47
	RMSE	24,61	24,58	26,39
CO ₂	MAE	851,25	819,14	890,48
	MAPE (%)	8,21	8,19	8,45
	RMSE	1024,69	1049,17	1097,67
PM	MAE	1,44	1,4	1,52
	MAPE (%)	8,2	8,3	8,54
	RMSE	1,73	1,81	1,87

Şekil 5.16’da, konteyner gemilerine ait NO_x emisyonlarının 2019–2025 dönemine ilişkin gerçek değerleri ile Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg algoritmaları tarafından yapılan tahmin sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekilde NO_x emisyonlarının zamanla artış eğilimi gösterdiği dikkat çekmektedir, bu eğilim tahmin modellerine farklı şekillerde yansıttığı görülmüştür. Lineer Regresyon algoritması, artan trendi doğrusal biçimde sürdürerek gerçek verilere kısmen paralel bir tahmin üretmiştir. SMOReg algoritması ise artışı daha güçlü bir şekilde öngörmüş ve 2025’e doğru yükselişi hızlandırmıştır. MLP algoritması ise tahmin döneminde belirgin dalgalanmalar sergilemiş ve bazı aylarda gerçeğe yakın, bazı aylarda ise önemli sapmalar göstermiştir.



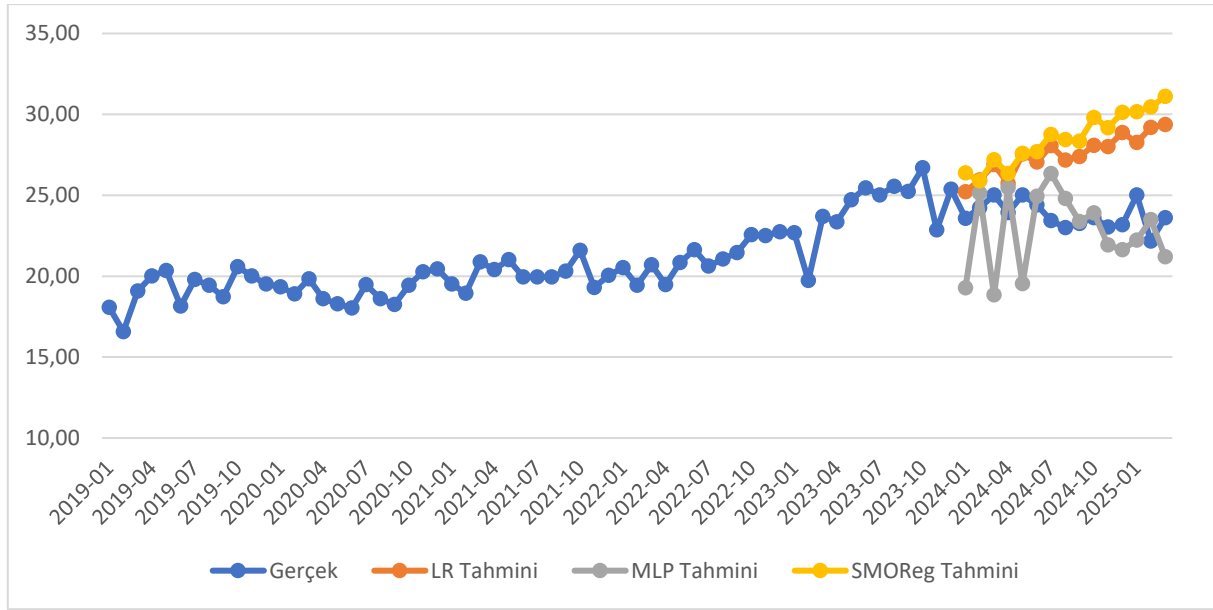
Şekil 5.16. Konteyner gemisi NO_x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025)

Şekil 5.17’de, konteyner gemilerine ait CO₂ emisyonlarının 2019–2025 dönemine ilişkin gerçek değerleri ile üç farklı makine öğrenmesi algoritması tarafından yapılan tahmin sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde konteyner gemileri kaynaklı CO₂ emisyonlarında yıllar içinde belirgin bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Lineer Regresyon ve SMOReg algoritmalarının bu artışın ilerleyen aylarda da dalgalanmalı olsa da artarak devam edeceğini öngörmüştür. MLP algoritmasının ilk aylarda gerçek değerlerden uzak değerler ürettiği görülse de ilerleyen dönemlerde Lineer Regresyon ve SMOReg algoritmalarına kıyasla gerçek değerlere daha yakın değerler üretmiştir.



Şekil 5.17. Konteyner gemisi CO₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

Şekil 5.18’de, konteyner gemilerinden kaynaklanan PM (Partikül Madde) emisyonlarının 2019–2025 dönemine ait gerçek değerleri ile üç farklı makine öğrenmesi algoritması (Lineer Regresyon, MLP ve SMOReg) tarafından yapılan tahmin sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Gerçek veriler incelendiğinde, PM emisyonlarında zaman içinde kademeli bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Bu eğilim, özellikle 2023 yılı sonrasında belirginleşmiştir. Tahmin modelleri ise bu eğilimi farklı şekillerde yansıtmıştır. Lineer Regresyon modeli, önceki yıllardaki artış trendini kararlı ve dengeli şekilde devam ettirerek öngöründe bulunmuştur. SMOReg algoritması bu eğilimi daha güçlü bir şekilde izleyerek 2025’e doğru PM emisyonlarında daha yüksek değerler tahmin etmiştir. MLP algoritması ise yine diğer iki modele kıyasla daha dengesiz ve dalgalı bir performans göstermiştir; bazı tahmin noktaları gerçek değerlere oldukça yakinken, bazı aylarda önemli sapmalar görülmüştür.



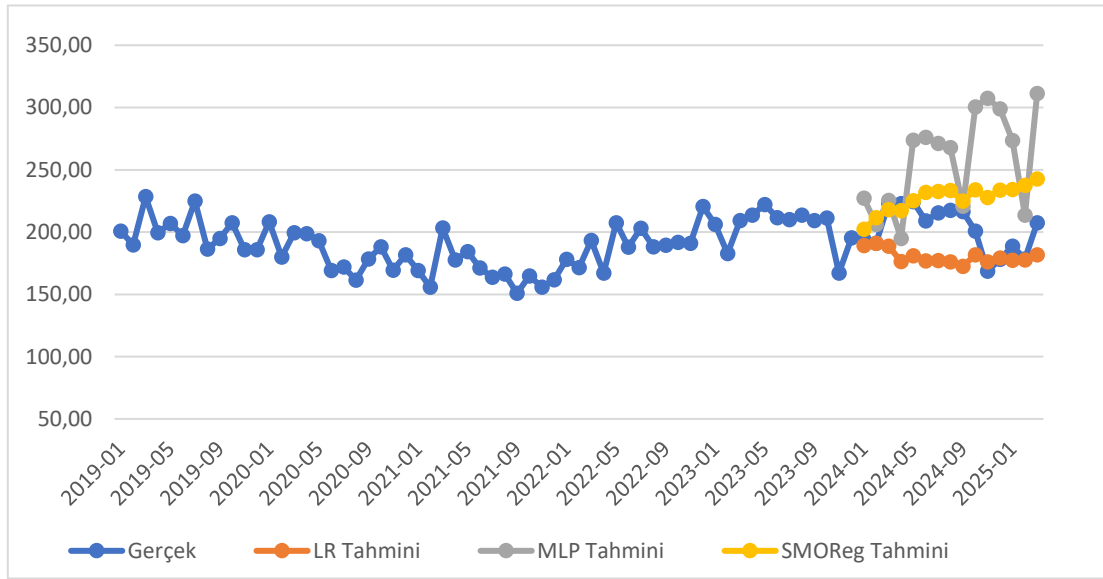
Şekil 5.18. Konteyner gemisi PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

Tablo 5.9'da konteyner gemilerine ait NO_x, CO₂ ve PM emisyonlarının tahmin performans metrikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Hata değerleri incelendiğinde MLP algoritması genel olarak en düşük değerleri vererek en başarılı tahmin performansını göstermiştir. Özellikle NO_x tahminlerinde 32,62 MAE ve %9,53 MAPE ile en düşük hata oranlarına ulaşmış; benzer şekilde CO₂ ve PM için de sırasıyla 1356,68 MAE, %9,52 MAPE ve 2,22 MAE, %9,21 MAPE değerleriyle diğer algoritmalarla kıyasla üstünlük sağlamıştır. Lineer Regresyon modeli, MLP'ye kıyasla daha yüksek ancak SMOReg'e göre daha dengeli ve ortalama bir performans sergilemiştir. SMOReg algoritması ise üç kirlotici açısından da en yüksek hata oranlarını üretmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, konteyner gemilerinden kaynaklanan emisyonların zaman serisi tahmininde MLP algoritması, doğruluk ve tutarlılık bakımından en başarılı model olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 5.9. Konteyner gemisi emisyon tahmin performansları karşılaştırması

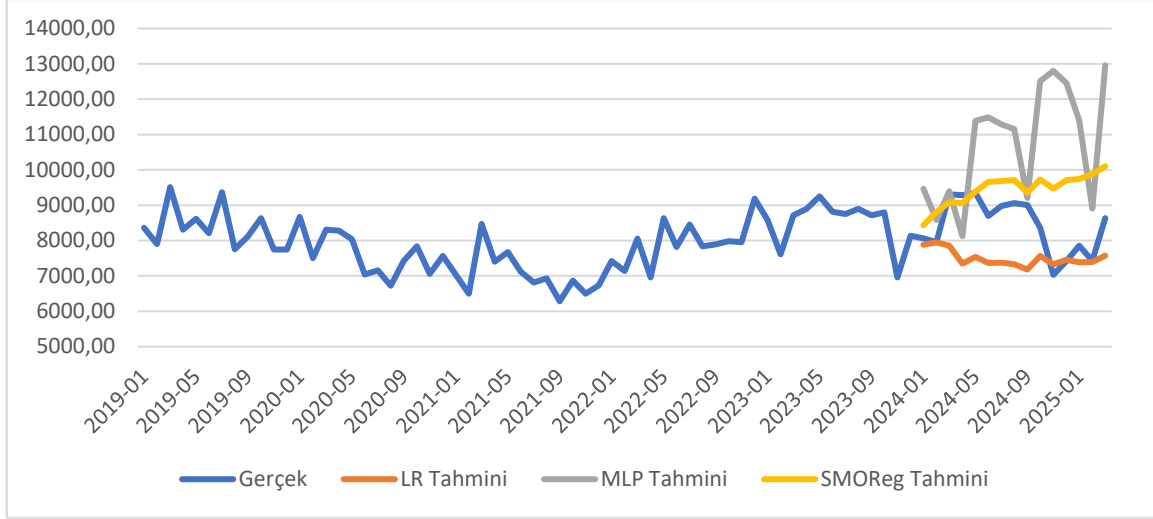
Kirleticiler	Metrik	Lineer Regresyon	MLP	SMOReg
NO _x	MAE	53,36	32,62	65,77
	MAPE (%)	16,00	9,53	19,71
	RMSE	58,24	41,67	71,66
CO ₂	MAE	2221,55	1356,68	2729,13
	MAPE (%)	16,00	9,52	19,64
	RMSE	2424,79	1732,50	2974,27
PM	MAE	3,76	2,22	4,73
	MAPE (%)	16,00	9,21	20,13
	RMSE	4,10	2,84	5,15

Şekil 5.19'da, türü belirtilmemiş tanker gemilerine ait NO_x emisyonlarının 2019–2025 dönemine ilişkin gerçek ve tahmin değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 2019–2023 yılları arasındaki gözlemlenen NO_x emisyon değerlerinin istikrarlı ve düşük dalgalanmalara sahipken, 2024–2025 döneminde yapılan tahminlerde algoritmalar arası performans farkları gözlemlenmiştir. Özellikle MLP algoritmasının tahminlerinde yüksek dalgalanmalar gözlemlenirken, Lineer Regresyon daha düşük ve istikrarlı değerler üretmiş, SMOREg algoritması ise kademeli bir artış eğilimi sergilemiştir.



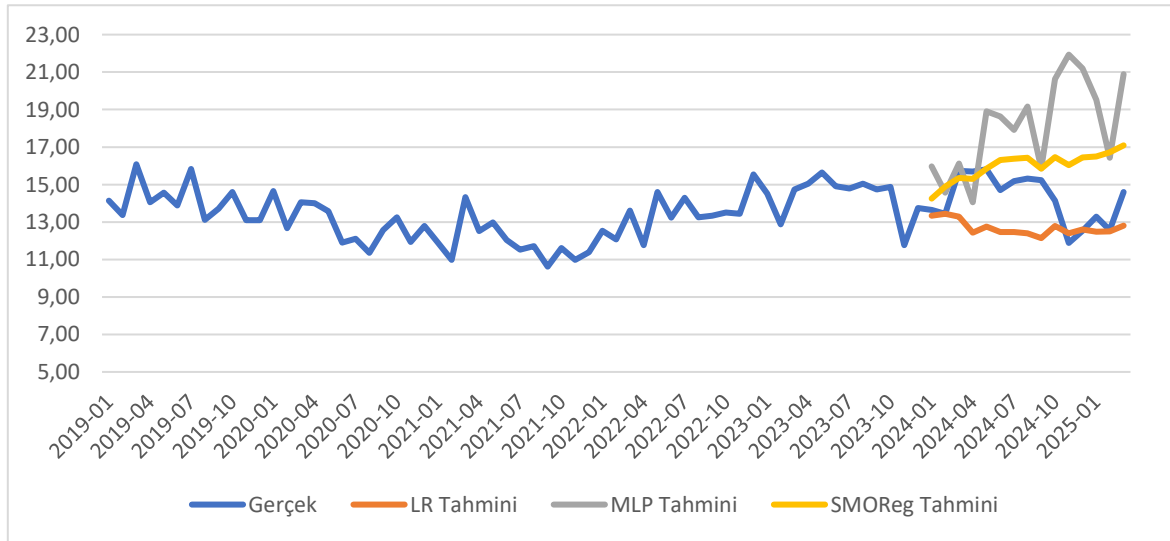
Şekil 5.19. Türü belirtilmemiş tanker gemileri NO_x gerçek ve tahmin değerleri (2019–2025)

Şekil 5.20'de, türü belirtilmemiş tanker gemilerine ait 2019–2025 dönemine yönelik CO₂ emisyonlarının gerçek ve üç farklı algoritma ile tahmin edilen değerleri görsel olarak karşılaştırılmıştır. 2019–2023 yılları arasında gözlemlenen emisyon değerleri, görece düşük varyanslı ve yatay seyirli bir eğilim göstermektedir. Bu örüntüye karşılık, tahmin sürecinde kullanılan algoritmaların her biri farklı desenler üretmiştir. MLP algoritması, bazı dönemlerde oldukça yüksek sapmalar ve dalgalanmalar sergileyerek gerçek değerlerin üzerinde tahminler üretmiştir. Lineer Regresyon (LR) ise düşük sapma oranıyla daha tutarlı sonuçlar üretmekle birlikte, gerçek eğilimin altında kalan düz çizgisel bir yapı göstermiştir. SMOREg algoritması, tahmin periyodunda hem gerçek değerlere yakın seyretmiş hem de kademeli bir artış eğilimiyle daha uyumlu sonuçlar sunmuştur.



Şekil 5.20. Türü belirtilmemiş tanker gemileri CO₂ gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

Şekil 5.21'de, türü belirtilmemiş tanker gemilerinin 2019–2025 dönemine ait PM emisyonlarının gerçek ve tahmin değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 2019–2023 tarihleri arasında nispeten dalgalı ancak belirgin bir artış ya da azalış eğilimi göstermeyen bir seyir izlenmiştir. Tahmin sonuçlarına göre, MLP algoritması, yüksek varyanslı ve düzensiz tahminler üretmiş; bu da modelin aşırı öğrenmeye yatkın olabileceğini düşündürmektedir. Lineer Regresyon algoritması, daha düz ve düşük seviyelerde tahminler yaparak gerçek değerlere yakın ancak genel eğilimi tam olarak yansıtamayan bir performans sergilemiştir. SMOReg algoritması ise, PM emisyon eğilimlerine daha uygun bir seyirle ilerleyerek gerek seviye gerek eğilim açısından görece daha başarılı tahminler sunmuştur.



Şekil 5.21. Türü belirtilmemiş tanker gemileri PM gerçek ve tahmin değerleri (2019-2025)

Tablo 5.10’da, türü belirtilmemiş tanker gemileri için NO_x, CO₂ ve PM emisyonlarının tahmin performansları; MAE, MAPE ve RMSE metriklerine göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, Lineer Regresyon algoritması tüm kirleticiler için en düşük hata oranlarını üretmemekle birlikte, daha istikrarlı ve dengeli sonuçlar sağlamıştır. MAPE değerinin her bir kirletici için %10–11 civarında seyretmesi, modelin genel eğilimi iyi yakalayabildiğini göstermektedir. Buna karşılık, MLP algoritması, özellikle PM ve CO₂ tahminlerinde oldukça yüksek MAE ve RMSE değerleri üretmiştir. Bu durum, modelin aşırı öğrenme veya veri deseniyle uyumsuzluk problemi yaşadığını düşündürmektedir. Her üç kirletici için de MAPE oranının %30’un üzerinde olması, modelin düşük tahmin güvenilirliğine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. SMOReg algoritması ise Lineer Regresyon’a kıyasla biraz daha yüksek hata değerleri üretmiş olsa da, MAPE değerleri %13–14 bandında kalmıştır. Bu sonuçlar, SMOReg’in aşırı sapmalardan kaçındığını ancak tahmin seviyelerinde zaman zaman yetersiz kaldığını göstermektedir. Genel değerlendirmede, türü belirtilmemiş tanker gemileri için Lineer Regresyon algoritması, hem düşük hata oranları hem de daha tutarlı sonuçlar vermesi açısından en başarılı model olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 5.10. Türü belirtilmemiş tanker gemileri emisyon tahmin performansları karşılaştırması

Kirleticiler	Metrik	Lineer Regresyon	MLP	SMOReg
NO _x	MAE	23,33	59,29	26,21
	MAPE (%)	10,91	30,57	13,84
	RMSE	29,00	72,03	32,83
CO ₂	MAE	971,35	2467,65	1084,99
	MAPE (%)	10,91	30,56	13,76
	RMSE	1207,42	2997,77	1360,30
PM	MAE	1,64	4,09	1,84
	MAPE (%)	10,91	30,15	13,84
	RMSE	2,04	4,96	2,31

Yapılan tahminleme analizleri sonucunda, her bir gemi türü ve kirletici için farklı düzeylerde başarı sağlayan makine öğrenmesi algoritmaları gözlemlenmiştir. Genel kargo gemilerinde, Lineer Regresyon algoritması hem NO_x, CO₂ hem de PM emisyonlarında en düşük MAE ve MAPE değerleriyle öne çıkmış; bu durum, bu gemi türündeki emisyonların görece daha istikrarlı ve doğrusal eğilimler göstermesiyle ilişkilendirilebilir. Dökme yük gemilerinde ise algoritmalar arasında daha dengeli bir performans gözlemlenmiş, özellikle MLP algoritması NO_x ve CO₂ emisyonlarında en düşük MAE ve RMSE değerlerini sağlamıştır. Bu durum, bu gemi türüne ait emisyon verilerinin Lineer Regresyon’a göre daha karmaşık yapılar barındırdığını ve yapay sinir ağlarının bu değişkenliği daha iyi modelleyebildiğini

göstermektedir. Konteyner gemilerinde de MLP algoritması diğer iki algoritmaya öne çıkmaktadır. Özellikle PM ve CO₂ gibi daha dalgalı seyreden emisyon verilerinde MLP, diğer iki algoritmaya göre çok daha düşük hata oranları üretmiştir. Türü belirtilmemiş tanker gemilerinde ise Lineer Regresyon öne çıkmaktadır. Özellikle PM ve CO₂ tahminlerinde daha düşük hata değerleri üretmiş; MLP algoritması ise bu gemi türü için yüksek sapma göstermiştir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çanakkale Boğazı, farklı tonaj ve tiplerde yoğun gemi trafiğine ev sahipliği yapmaktadır. Bu yoğunluk, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı tarafından yayımlanan "Türk Boğazları Gemi Geçiş İstatistikleri" ile de doğrulanmaktadır. Öyle ki, 2024 yılı itibarıyla Çanakkale Boğazı'nı kullanan gemi sayısının 45.849'a ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu denli yoğun bir trafiği olan bir su yolunda, gemi kaynaklı karbon emisyonlarının analiz edilmesi sürdürülebilirlik açısından büyük önem arz etmektedir. Ancak, tüm gemi geçişlerinin ayrı ayrı analiz edilmesi, hem veri hacminin büyüklüğü hem de hesaplama sürecinin karmaşıklığı nedeniyle oldukça zorlu ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu sebeple, Çanakkale Boğazı'ndan geçen gemi emisyonlarının analizinde veri büyüklüğü ve hesaplama karmaşıklığı nedeniyle tüm gemi geçişleri yerine, Pareto analizine göre toplam geçişlerin %80'ini oluşturan dört ana gemi türü (genel kargo, dökme yük, konteyner ve tanker) odak alınmıştır. Trozzi-Vaccaro yöntemiyle bu gemilerin 2019-2025 dönemindeki yakıt tüketimleri ve NO_x, CO, CO₂, VOC ile PM emisyonları hesaplanmıştır. Makine öğrenmesi ile tahmin sürecinde, 2019–2024 arası 60 aylık dönem eğitim verisi olarak değerlendirilmiş; 2024 ve 2025 ilk çeyreğine ait 15 aylık dönem test verisi olarak kullanılarak NO_x, CO₂ ve PM kirleticileri için zaman serisi tahminleri gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak, MLP algoritması yüksek varyanslı ve trendli veri setlerinde konteyner ve dökme yük gemileri için başarılı sonuçlar verirken, Lineer Regresyon daha durağan yapılar içeren genel kargo ve tanker gemileri emisyon serilerinde daha isabetli tahminler üretmiştir. SMOReg ise çoğu durumda orta düzeyde bir performans sergileyerek genel denge sağlayan bir algoritma olarak öne çıkmıştır.

Çalışmada kullanılan zaman serisi analizlerinin tahmin performansı, COVID-19 pandemisinin küresel deniz ticaretinde yarattığı ani düşüşler ve Rusya-Ukrayna savaşının tedarik zincirlerinde sebep olduğu dalgalanmalar nedeniyle kısmen sınırlı kalmıştır. Bu olağanüstü küresel olaylar, gemi trafiği ve emisyon eğilimlerinde geleneksel modellerin öngörmekte zorlandığı yapısal kırılmalara yol açmıştır. Özellikle 2020-2022 dönemindeki ani değişimler, makine öğrenmesi algoritmalarının tarihsel eğilimleri doğru şekilde öğrenmesini güçleştirmiştir.

Gelecekte bu çalışmaya katkı sunmak isteyen araştırmacılar için aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir: Öncelikle, meteorolojik veriler, bölgesel düzenlemeler ve ekonomik göstergeler gibi ek değişkenlerin tahmin modeline entegre edilmesi, emisyon tahminlerinin doğruluğunu

artırabilir. Ayrıca, küresel krizlerin etkisinin azaldığı daha uzun dönemli ve istikrarlı veri setlerinin kullanımı, algoritmaların tarihsel desenleri daha sağlıklı öğrenmesini sağlayacaktır. Son olarak, anomali tespit yöntemlerinin uygulanması, olağan dışı dönemlerin (örneğin pandemi ve savaş gibi krizlerin) model üzerindeki etkisinin minimize edilmesine ve daha kararlı tahminlerin elde edilmesine katkı sağlayabilir. Bu önerilerin hayata geçirilmesiyle, modelin esnekliği ve genellenebilirliği artacak; böylece tahminlerin karar alma süreçlerinde daha etkin biçimde kullanılması mümkün olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] International Energy Agency, “CO2 Emissions – Global Energy Review 2025 – Analysis”, [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>, [Accessed: Jun. 12, 2025]
- [2] International Maritime Organization, “Fourth Greenhouse Gas Study 2020”, [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>, [Accessed: Jun. 12, 2025].
- [3] International Maritime Organization, “WhatsNewNews”, [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-2254.aspx>, [Accessed: Jun. 12, 2025].
- [4] E. Basar, “Investigation into marine traffic and a risky area in The Turkish Straits System: Canakkale Strait”, *Transport*, vol. 25, no. 1, pp. 5-10, 2010, DOI: 10.3846/transport.2010.01.
- [5] Web of Science, “Advanced Search Query”, [Online]. Available: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/45fa5e23-c07a-4af4-b29b-3f0e4f4f6df6-016a481254/relevance/1>, [Accessed: Mar. 27, 2025].
- [6] W. Xie, Y. Feng, X. Song, and J. Zhang, “Maritime greenhouse gas emission estimation and forecasting through AIS data analytics: A case study of Tianjin Port in the context of sustainable development”, *Frontiers in Marine Science*, vol. 10, 2023, DOI: 10.3389/fmars.2023.1308981.
- [7] I. Hussain, H. Wang, M. Safdar, Q. B. Ho, T. D. Wemegah, and S. Noor, “Estimation of shipping emissions in developing country: A case study of Mohammad Bin Qasim Port, Pakistan”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19, pp. 19, 2022, DOI: 10.3390/ijerph191911868.
- [8] Y. Feng *vd.*, “A novel method for ship carbon emissions prediction under the influence of emergency events”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 165, no. 104749, 2024, DOI: 10.1016/j.trc.2024.104749.
- [9] Y. Wang, D. Watanabe, E. Hirata, and S. Toriumi, “Real-time management of vessel carbon dioxide emissions based on automatic identification system database using deep learning”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no.8, pp. 871, 2021, DOI: 10.3390/jmse9080871.
- [10] M. Acciaro and A. McKinnon, “Carbon emissions from container shipping: An analysis of new empirical evidence”, *An analysis of new empirical evidence. International journal of transport economics: Rivista internazionale di economia dei trasporti: XLII*, no.2, pp. 211-228, 2015.
- [11] Y. Ju and C. A. Hargreaves, “The impact of shipping CO2 emissions from marine traffic in Western Singapore Straits during COVID-19”, *Sci. Total Environ.*, vol. 789, pp. 148063, 2021.

- [12] S. Greene, H. Jia, and G. Rubio-Domingo, "Well-to-tank carbon emissions from crude oil maritime transportation", *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 88, no. 102587, 2020.
- [13] K. Mersin, İ. Bayırhan, and M. Yıldırım, "Possible effects of the Canal Istanbul Waterway Project on ship emissions: Challenges and prospects", *J. Coast. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 210-222, 2024, DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-22-00094.1.
- [14] K. Mersin and T. Mısırlıoğlu, "A new approach for calculating ship emissions and energy efficiency of a fleet using the Cobb-Douglas Function", *J. Coast. Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 1182-1188, 2024.
- [15] A. Savaş and L. Bilgili, "Emission estimation of ship traffic in the Dardanelles", *Çanakkale Onsekiz Mart Univ. J. Mar. Sci. Fish.*, vol. 5, no. Special Issue, 2022, DOI: 10.46384/jmsf.1134339.
- [16] A. T. Bayramoğlu and A. K. Yurtkur, "Türkiye’de Karbon emisyonu ve ekonomik büyüme ilişkisi: Doğrusal olmayan eşbütünleşme analizi", *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 16, no. 4, pp. 4, 2016, DOI: 10.11616/basbed.vi.455402.
- [17] V. Özdemir, "Türkiye’nin karbonizasyon indeksinin temel enerji göstergelerine bağlı olarak yapay sınır ağları ile tanımlanması", *Gazi Üniversitesi Mühendis.-Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 26, no 1, pp. 1, 2011.
- [18] Türkiye İstatistik Kurumu, "Sera Gazı Emisyon İstatistikleri", [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2023-53974>, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [19] S. Robertson and M. R. Miller, "Ambient air pollution and thrombosis", *Particle and Fibre Toxicology*, vol. 15, no. 1, pp. 1, 2018, DOI: 10.1186/s12989-017-0237-x.
- [20] J. Buekers, K. Stassen, L. Int Panis, K. Hendrickx, and R. Torfs, "Ten years of research and policy on particulate matter air pollution in hot spot Flanders", *Environ. Sci. Policy*, vol. 14, no. 3, pp. 3, 2011, DOI: 10.1016/j.envsci.2010.10.012.
- [21] World Health Organization, "Ambient (outdoor) air pollution", [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health), [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [22] B. Romeo, "International relations development strategies from the perspective of maritime freight transport development", *Ann. Constanța Marit. Univ.*, vol. 17, no. 25, pp. 25, 2016.
- [23] United Nations Conference on Trade and Development, "Review of Maritime Transport 2024", 2024, [Online]. Available: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [24] T.C. Ticaret Bakanlığı Uluslararası Hizmet Ticareti Genel Müdürlüğü, "Dış Ticaret Lojistiği 2024", T.C. Ticaret Bakanlığı, Ankara, 2024, [Online]. Available: <https://ticaret.gov.tr/data/5b87bf9113b8761160fa1258/D%C4%B1%C5%9F%20Ticaret%20Lojisti%C4%9Fi%202024.pdf>, [Accessed: Jun. 10, 2025].

- [25] M. Luo, "Emission reduction in international shipping-the hidden side effects", *Marit. Policy Manag.*, vol. 40, no. 7, pp. 7, 2013.
- [26] Y. Zhang, X. Cui, and L. Liu, "Environmental regulation, green technology progress and haze reduction and carbon reduction", *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 31, no. 25, pp. 25, 2024, DOI: 10.1007/s11356-023-29903-w.
- [27] World Health Organization, "Air quality, energy and health", [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [28] L. K. Lim, M. R. Mutsuddy, and S. A. Vanchiere, "Air pollution and stroke", *J. Stroke*, vol. 20, no. 1, pp. 2–11, Jan. 2018, DOI: 10.5853/jos.2017.02894.
- [29] U.S. Environmental Protection Agency, "Basic information about carbon monoxide (CO) outdoor air pollution," [Online]. Available: <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution>, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [30] U.S. Environmental Protection Agency, "What is Ozone?" [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ozone-pollution-and-your-patients-health/what-ozone>, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [31] World Health Organization, "Types of pollutants", [Online]. Available: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [32] U.S. National Park Service, "Sulfur dioxide effects on health - Air," [Online]. Available: <https://www.nps.gov/subjects/air/humanhealth-sulfur.htm>, [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [33] Çanakkale Ticaret ve Sanayi Odası, "Coğrafi konum", [Online]. Available: <https://www.canakkaletso.org.tr/%C3%87anakkale/Co%C4%9FrafikiKonum/tabid/16899/Default.aspx>, [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [34] Türkiye Cumhuriyeti Kültür ve Turizm Bakanlığı, "Coğrafya," [Online]. Available: <https://canakkale.ktb.gov.tr/TR-70467/cografya.html>, [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [35] Türkiye İstatistik Kurumu, "TÜİK Kurumsal", [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2023-49684>, [Accessed: Jun. 21, 2025].
- [36] İ. Güner and H. Yazıcı, "Çanakkale Boğazında ulaşım", *Türk Coğrafya Derg.*, no. 35, pp. 25-50, 2014, DOI: 10.17211/tcd.70053.
- [37] B. Tozar, "Türk boğazlarında tehlikeli yük taşıyan gemi trafiği ve denizel çevrenin korunma önlemlerinin incelenmesi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, 2008.
- [38] İ. Öztürk, "Bilimsel Veriler ışığında Marmara Denizi ve Türk boğazlar sistemi: Güncel 3d hidrodinamik modelleme. Su Bütçesi ve Kalitesi, iklim değişimi ve Kanal İstanbul etkileri", *Türkiye Bilim. Akad.*, 2021.

- [39] Türkiye Cumhuriyeti Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, “Türk Boğazları Gemi Geçiş İstatistikleri - Denizcilik İstatistikleri”, <https://denizcilikistatistikleri.uab.gov.tr/turk-bogazlari-gemi-gecis-istatistikleri> [Accessed: Jun. 21, 2025].
- [40] T. Powell and T. Sammut-Bonnici, “Pareto analysis”, 2014, [Online]. Available: <https://www.um.edu.mt/library/oar/bitstream/123456789/21815/1/sammut-bonnici%20pareto%20analysis.pdf>, [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [41] C. Brooks, “What is a pareto analysis”, *Bus. News Dly. Sr.*, vol. 29, no. 1, pp. 1, 2014.
- [42] Z. Zhang, W. Zheng, Y. Li, K. Cao, M. Xie, and P. Wu, “Monitoring sulfur content in marine fuel oil using ultraviolet imaging technology”, *Atmosphere*, vol. 12, no. 9, pp. 1182, 2021.
- [43] P. Serra and G. Fancello, “Towards the IMO’s GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping”, *Sustainability*, vol. 12, no. 8, pp. 3220, 2020, DOI: 10.3390/su12083220.
- [44] U.S. Environmental Protection Agency, Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories: Final report, EPA-420-R-09-005, 2009. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/2009-port-inventory-guidance.pdf>
- [45] H. Liu *et al.*, “Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia”, *Nat. Clim. Change*, vol. 6, no. 11, pp. 1037-1041, 2016.
- [46] World Ports Sustainability Program, *Service contract for the World Ports Sustainability Program*, International Association of Ports and Harbors, Technical Report MOVE/B4/2019-108, 2020, [Online]. Available: <https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/Service-Contract.pdf>, [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [47] C. Trozzi and R. Vaccaro, “Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships”, 1998, [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/355994>, [Accessed: Jun. 12, 2025].
- [48] C. Trozzi and R. Vaccaro, “Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships: a 2006 update”, *Poster presented at 2nd Environment & Transport Conference (including 15th Transport and Air Pollution conference)*, pp. 12-14. 2006.
- [49] S. Gupta, “A comparative study of data mining techniques for predictive analytics”, *Neuroquantology*, vol. 17, no. 03, 2023, DOI: 10.48047/nq.2019.17.03.2014.
- [50] J. Odiadi, “Qualitative and quantitative research in business studies: Managing”, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 4876332, 2024, DOI: 10.2139/ssrn.4876332.
- [51] H. Berends, H. van der Bij, and J. E. van Aken, Ed., “Qualitative research methods”, *Problem Solving in Organizations: A Methodological Handbook for Business Students*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 129-142, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511618413.014.
- [52] D. C. Montgomery, C. L. Jennings, and M. Kulahci, *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. John Wiley & Sons, 2015.

- [53] University of Waikato, “Weka 3 - Data mining with open source machine learning software in Java”, [Online]. Available: <https://ml.cms.waikato.ac.nz/weka/index.html>, [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [54] Wikimedia Commons, “Dosya:Weka-3.5.5.png - Vikipedi”, [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weka-3.5.5.png>, [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [55] C. Karaca and H. Karacan, “Çoklu regresyon metoduyla elektrik tüketim talebini etkileyen faktörlerin incelenmesi”, *Selçuk Üniversitesi Mühendis. Bilim Ve Teknol. Derg.*, vol. 4, no. 3, pp. 182-195, 2016.
- [56] S. Nosratabadi, S. Ardabili, Z. Lakner, C. Mako, and A. Mosavi, “Prediction of Food Production Using Machine Learning Algorithms of Multilayer Perceptron and ANFIS”, *Agriculture*, vol. 11, no. 5, pp. 5, 2021, DOI: 10.3390/agriculture11050408.
- [57] Weka Documentation, “SMOreg,” [Online]. Available: <https://weka.sourceforge.io/doc.stable/weka/classifiers/functions/SMOreg.html>, [Accessed: Jun. 18, 2025].
- [58] Z. B. Güven and T. T. Bilgin, “Zaman Serileri Madenciliği Kullanılarak Nüfus Artışı Tahmin Uygulaması”, *Acad Inf.*, pp. 5-7, 2014.
- [59] Smola and Schölkopf, “Learning with Kernels”, *Stat. Comput.*, vol. 14, pp. 3, 1998, DOI: 10.1023/A:1007122929671.
- [60] S. Wang and W. A. Chaovalitwongse, “Evaluating and comparing forecasting models,” *Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 2011. DOI: 10.1002/9780470400531.eorms0307.
- [61] W. Wang and Y. Lu, “Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 324, p. 012049, Mar. 2018, DOI: 10.1088/1757-899X/324/1/012049.
- [62] S. Makridakis, S. C. Wheelwright, and R. J. Hyndman, *Forecasting methods and applications*. John Wiley & sons, 2008.
- [63] C. J. Willmott and K. Matsuura, “Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance”, *Clim. Res.*, vol. 30, no.1, pp. 1, 2005.
- [64] K. van Werkhoven, T. Wagener, P. Reed, and Y. Tang, “Rainfall characteristics define the value of streamflow observations for distributed watershed model identification”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, no. 11, 2008, DOI: 10.1029/2008GL034162.
- [65] MarinePlan, “MarinePlan | Boat route planner & nautical map,” [Online]. Available: <https://maps.marineplan.com/?lat=40.277172&lon=26.53342>. [Accessed: Jun. 21, 2025].
- [66] Türkiye Cumhuriyeti, “Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Yönetmeliği,” *Resmî Gazete*, no. 30859, Aug. 15, 2019. [Online]. Available: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/08/20190815-2.htm>

- [67] Deniz Ticaret Odası, “IMO 2020 - Temiz hava için temiz denizcilik hk.”, [Online]. Available: <https://www.denizticaretodasi.org.tr/tr/haberler/imo-2020-temiz-hava-icin-temiz-denizcilik-hk-1613-1>, [Accessed: Jun. 19, 2025].
- [68] D. M. E, “Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of SO₂ and NO_x,” 2009, [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/Envec/taxation/ship_emissions/pdf/mainfinal.pdf. [Accessed: Jun. 10, 2025].
- [69] J. J. Corbett and P. Fischbeck, “Emissions from Ships”, *Science*, vol. 278, no. 5339, pp. 823-824, 1997, DOI: 10.1126/science.278.5339.823.
- [70] European Commission, *Final report: Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*, Entec, Windsor House Gadbrook Business Centre, U.K., 2002.
- [71] T. M. Usha and S. A. A. Balamurugan, “Seasonal Based Electricity Demand Forecasting Using Time Series Analysis”, *Circuits Syst.*, vol. 7, no. 10, pp. 10, 2016, DOI: 10.4236/cs.2016.710283.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve ortaöğrenimini Kocaeli'de, lise öğrenimimi ise İstanbul'da tamamladı. 2018 yılında Erciyes Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Lisans Programı'ndan mezun oldu. 2023 yılında Yalova Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na başladı.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Ş. Özekinci ve H. Erbıyık, “Çanakkale Boğazı gemi geçişlerinin Weka ile Tahmini”, *Karadeniz 17th International Conference on Social Sciences*, Rize/Türkiye, 8-10 Kasım 2025, pp. 95-96.

