

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞIT KAYNAKLI EMİSYONLARIN FARKLI
KADEMELERDE HESAPLANMASI, MODELLENMESİ
VE ÖLÇÜM SONUÇLARI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Nedime Gaye Nur BALKANLI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Arslan SARAL

Eş Danışman

Prof. Dr. S. Levent KUZU

Haziran, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞIT KAYNAKLI EMİSYONLARIN FARKLI
KADEMELERDE HESAPLANMASI, MODELLENMESİ VE
ÖLÇÜM SONUÇLARI İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Nedime Gaye Nur BALKANLI tarafından hazırlanan tez çalışması 11.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Arslan SARAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. S. Levent KUZU
İstanbul Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Arslan SARAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar NUHOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÖZDEMİR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Arslan SARAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Taşıt Kaynaklı Emisyonların Farklı Kademelerde Hesaplanması, Modellenmesi ve Ölçüm Sonuçları ile Değerlendirilmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nedime Gaye Nur BALKANLI

İmza



Bu çalışma, “TÜBİTAK 1001 Programı’nın 122Y267” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme
ve
arkadaşıma

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen ve bana değerli katkılar sağlayan herkese teşekkür ederim. Eş danışmanım Prof. Dr. S. Levent Kuzu'ya, her aşamada gösterdiği engin bilgisi, rehberliği ve sürekli desteği için minnettarım. İyi ki hayatımda dediğim, sırt sırta verdiğim, yol arkadaşım, hocam Arş. Gör. Dr. Elif Yavuz'a, tez sürecimde gösterdiği ilgi ve değerli önerileriyle bana büyük katkı sağladığı için teşekkür ederim. Ayrıca, danışmanım Prof. Dr. Arslan Saral'a da araştırmamın her aşamasında sağladığı değerli destek ve yönlendirmeleri için teşekkürlerimi sunarım. Bu zorlu süreçte bana her zaman sonsuz destek veren, yanımda olan ve adeta benimle birlikte bu yüksek lisansı tamamlayan değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Varlıkları ve destekleri benim için her zaman en büyük motivasyon kaynağı olmuştur. Ayrıca, tez sürecinde ve hayatımın her anında yanımda olan, beni her zaman anlayan sevgili dostum Mümine Demir'e de ilgisi, anlayışı ve arkadaşlığı için çok teşekkür ederim.

Nedime Gaye Nur BALKANLI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1 GİRİŞ	19
1.1 Literatür Özeti	19
1.2 Tezin Amacı	20
1.3 Hipotez	21
2 ULAŞIM SEKTÖRÜ	22
2.1 Ulaşım Sektörüne Genel Bakış	22
2.2 Karayolu Taşımacılığı	22
2.2.1 Avrupa ve Türkiye’de Karayolu Taşımacılığı	22
2.3 Taşıt Kaynaklı Emisyonlar	24
2.3.1 Egzoz Emisyonları	25
2.3.2 Aşınma Emisyonları	25
2.3.3 Buharlaşıma Emisyonları	28
2.4 Taşıt Kaynaklı Emisyonların Özellikleri ve Etkileri	28
2.4.1 Karbon Monoksit	28
2.4.2 Azot Oksitler	29
2.4.3 Partikül Maddeler	29

2.4.4	Kükürt Dioksit	29
2.5	Hava Kalitesi standartları.....	30
2.6	Emisyon Standartlarının Gelişimi	31
2.6.1	Avrupa (Euro) Emisyon Standartlarının Gelişimi	32
2.6.2	Euro Emisyon Standartlarının Uygulanması	34
2.7	Emisyon Hesaplamaları	36
2.7.1	EMFAC	38
2.7.2	IVE	39
2.7.3	MOBILE ve MOVES	39
2.7.4	CMEM	40
2.7.5	COPERT Programı	40
3	HAVA DAĞILIM MODELLEMESİ	49
3.1	Gauss Dağılım Modeli	52
3.1.1	Çizgi Kaynaklar	52
4	MATERYAL METOT	54
4.1	Çalışma Alanı.....	54
4.2	Taşıt Sayımı	55
4.3	Emisyon Hesaplamaları	57
4.3.1	Tier 1 Yaklaşımı	58
4.3.2	Tier 2 Yaklaşımı	60
4.3.3	Tier 3 Yaklaşımı	62
4.3.4	COPERT Yazılımının Uygulanması	66
4.3.5	AERMOD Modelinin Uygulanması	67
4.3.6	AERMET Ön İşlemcisi	70
5	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	72
5.1	Araç Sayımı Sonuçları	72
5.2	Emisyon Sonuçları	73

5.2.1	Tier 1 Yaklaşımı Sonuçları	73
5.2.2	Tier 2 Yaklaşımı Sonuçları	79
5.2.3	Tier 3 Yaklaşımı Sonuçları	84
5.3	Dağılım Sonuçları	90
5.3.1	Model ve Ölçüm İstasyonu Verilerinin Karşılaştırılması	94
5.3.2	Yükseklik Etkisinin Tier'e Yansıması	97
5.3.3	HKDDY Değerleri ile Model Sonuçları Karşılaştırılması	99
6	SONUÇ	101
	KAYNAKÇA	103
	A MODEL SONUÇLARI	110
	B PERFORMANS ANALİZLERİ	123
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	125

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa
NH ₃	Amonyak
As	Arsenik
NO ₂	Azot dioksit
NO	Azot oksit
NO _x	Azot oksitler
Cu	Bakır
Ba	Baryum
β	Beta
Hg	Civa
Zn	Çinko
δ	Delta
N ₂ O ₃	Diazot trioksit
η	Eta
γ	Gama
CO ₂	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
Pb	Kurşun
SO ₂	Kükürtdioksit
CH ₄	Metan
Ni	Nikel
N ₂ O	Nitröz oksit
O ₃	Ozon
PM	Partikül madde
Se	Selenyum
ζ	Zeta

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CAA	Clean Air Act
CARB	Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu
CAFÉ	Avrupa için Temiz Hava Programı
CLRTAP	Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi
CMEM	Comprehensive Model Emission Model
COPERT	COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport
EEA	Avrupa Çevre Ajansı
EMFAC	EMission FACtors
GSYİH	Gayri Safi Yurtiçi Hasılası
HDV	Ağır Hizmet Araçları
HKDYY	Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
IVE	International Vehicle Emissions Model
LCV	Hafif Ticari Araçlar
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MOBILE	MOBILE Highway Vehicle Emission Factor Model
MOVES	MOtor Vehicle Emissions Simulator
NAAQS	Ulusal Çevresel Hava Kalitesi Standartları
NFR	Nomenclature for Reporting
NMVOC	Uçucu Organik Bileşikler (Metan Dışı)
PAH	Polisiklik Aromatik Hidrokarbon
PCB	Poliklorlu bifeniller
PCD	Poliklorlu Dioksinler
PCDD	Poliklorlu Dibenzo-p-dioksinler
PHEM	Passenger Car and Heavy-Duty Emission Model
POP	Kalıcı Organik Kirleticiler
RF	Azaltma Faktörü

TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNECE	Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
US-EPA	ABD Çevre Koruma Ajansı
UYM	Ulaşım Yönetim Merkezi
WHO	World Health Organization
VOC	Uçucu Organik Bileşik
YOLO	You Only Look Once



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Trafiğe kaydedilen araçların dağılımı yüzdesi (%), Aralık 2023	24
Şekil 2.2	Aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yaklaşımların entegrasyonu.....	38
Şekil 2.3	Temel metodolojinin uygulanmasına yönelik akım şeması	42
Şekil 3.1	Hava kirliliği probleminin etkenleri	51
Şekil 4.1	Çalışma Alanı	54
Şekil 4.2	UYM trafik yoğunluğu haritası	55
Şekil 4.3	FFmpeg programı ile kayıt	56
Şekil 4.4	COPERT veri girişi (sıcaklıklar ve bağıl nem)	66
Şekil 4.5	COPERT araç envanteri girişi	66
Şekil 4.6	AERMET veri akış süreci	70
Şekil 5.1	Tier 1’de farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan CO, NO _x ve PM emisyonlarının (g/m ² /sn) dağılımı.....	75
Şekil 5.2	Tier 2’de farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan CO, NO ve NO ₂ emisyonlarının (g/m ² /sn) dağılımı.....	81
Şekil 5.3	Tier 2’de farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan NO ₂ ve PM ₁₀ emisyonlarının (g/m ² /sn) dağılımı	82
Şekil 5.4	Tier 3’te farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan CO, NO ve NO ₂ emisyonlarının (g/m ² /sn) dağılımı.....	86
Şekil 5.5	Tier 3’te farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan NO ₂ ve PM ₁₀ emisyonlarının (g/m ² /sn) dağılımı	87
Şekil 5.6	Tier 1 yaklaşımı için farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımı ...	91
Şekil 5.7	Tier 2 yaklaşımı için farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımı ...	91
Şekil 5.8	Tier 3 yaklaşımı için farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımı ...	91
Şekil A.1	Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (13.03.2024).....	110
Şekil A.2	Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (14.03.2024).....	111
Şekil A.3	Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (18.03.2024).....	112
Şekil A.4	Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (23.03.2024).....	113

Şekil A.5 Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (31.03.2024).....	114
Şekil A.6 Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (01.04.2024).....	115
Şekil A.7 Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (02.04.2024).....	116
Şekil A.8 Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (02.04.2024).....	117
Şekil A.9 Tier yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (06.10.2024).....	118
Şekil A.10 Tier 1, 2 ve 3 yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (09.12.2024)	119
Şekil A.11 Tier 1, 2 ve 3 yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (07.01.2025)	120
Şekil A.12 Tier 1, 2 ve 3 yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (08.01.2025)	121
Şekil A.13 Tier 1, 2 ve 3 yaklaşımlarına ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (09.01.2025)	122

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 2023 yılı motor yakıt türlerine göre araçlar	23
Tablo 2.2 WHO limit değerleri	30
Tablo 2.3 HKDYY limit değerleri	31
Tablo 2.4 Euro emisyon standartlarının uygulanma yılları (binek araçlar ve hafif ticari araçlar için)	35
Tablo 2.5 Euro emisyon standartlarının uygulanma yılları (hafif ticari araçlar, ağır vasıtalar ve L kategori için)	36
Tablo 2.6 COPERT araç profili	43
Tablo 4.1 UYM'den elde edilen araç hızları.....	56
Tablo 4.2 İstanbul'da kayıtlı araçların sayısal dağılımı	57
Tablo 4.3 Tier 1 emisyon faktörleri	59
Tablo 4.4 Tier 1 yakıt tüketimi değerleri	60
Tablo 4.5 Tier 2 emisyon faktörleri (g/kg yakıt).....	61
Tablo 4.6 Tier 2 yakıt tüketimi değerleri (g/km)	62
Tablo 4.7 Tier 3 emisyon faktörleri (g/kg yakıt).....	65
Tablo 4.8 Tier 3 yakıt tüketimi değerleri (g/km)	65
Tablo 4.9 Modelde çizgi kaynağının tanımlanması	69
Tablo 5.1 Araç sayımı sonuçları	72
Tablo 5.2 Kirleticilere ait istasyon ölçüm değerleri.....	94
Tablo B.1 Model performansı analizi (Tiers-Ölçüm)	123

Taşıt Kaynaklı Emisyonların Farklı Kademelerde Hesaplanması, Modellenmesi ve Ölçüm Sonuçları ile Değerlendirilmesi

Nedime Gaye Nur BALKANLI

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Arslan SARAL

Eş-Danışman: Prof. Dr. S. Levent KUZU

Karayolu ulaşımı, özellikle büyük şehirlerde hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biridir. Bu çalışma, İstanbul-Beşiktaş Bulvarı'nda araç kaynaklı emisyonları tahmin etmek ve bu emisyonların atmosferdeki dağılımını modellemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Emisyon hesaplamaları, EMEP/EEA kılavuzundaki Tier 1 yaklaşımı ile, COPERT programı kullanılarak Tier 2 (Euro standartları ve yakıt türleri dikkate alınarak) ve Tier 3 (Tier 2'ye ek olarak hız verileri de dahil edilerek) yöntemleriyle hesaplanmıştır. Trafik akış verileri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezi'nin gerçek zamanlı kamera kayıtlarından, yoğun saatlerde (17:00–18:00) ve 15 farklı gün için elde edilmiştir. Araç hız verileri ise en düşük gözlemlenen değerlere göre belirlenmiştir. Emisyon tahminleri, farklı senaryolar altında CO, NO_x ve PM (Tier 1) ile CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ (Tier 2 ve Tier 3) kirlleticileri için yapılmıştır.

Atmosferik dağılım modellemesi, AERMOD modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş, elde edilen ortalama emisyon değerleri doğrusal bir kaynak üzerinden modellenerek 15 farklı kayıt günü için kirletici konsantrasyonları farklı yüksekliklerde analiz edilmiştir. Model tahminleri, gaz fazındaki kirleticiler için 0,5-1 m yükseklikte istasyon verileriyle, PM₁₀ konsantrasyonları ise yer seviyesine yakın (0,25-0,5 m) bölgelerde daha iyi uyum göstermiştir.

Çalışmada karşılaşılan en önemli zorluklardan biri, detaylı araç filosu verilerine erişimin sınırlı olmasıdır. Bu durum, COPERT gibi emisyon tahmin programlarının doğruluğunu etkileyebilmektedir. Gelecekteki araştırmalar, COPERT'in hesaplama yöntemlerinin iyileştirilmesine ve trafik planlamasının hava kalitesi üzerindeki etkilerinin daha detaylı analiz edilmesine odaklanabilir. Bu çalışma, AERMOD modelinin ve COPERT programının kentsel hava kalitesinin izlenmesi ve tahmini açısından uygulanabilirliğini değerlendirerek, gelecekteki araştırmalara rehberlik edebilir.

Anahtar Kelimeler: Araç kaynaklı kirleticiler, COPERT, emisyon senaryoları, AERMOD, atmosferik dağılım.

ABSTRACT

Calculation of Vehicle Emissions at Different Tiers, Their Modelling and Assesment Through Measurement Data

Nedime Gaye Nur BALKANLI

Department of Environmental Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Arslan SARAL

Co-supervisor: Prof. Dr. S. Levent KUZU

Road transport, particularly in large cities, is one of the major sources of air pollution. This study was conducted to predict vehicle emissions from air pollutants and model their atmospheric distribution along the Beşiktaş Boulevard in Istanbul. Emission predictions were made using the Tier 1 approach from the EMEP/EEA guidebook with the COPERT program, applying Tier 2 (based on Euro standards and fuel types) and Tier 3 (additional speed data to Tier 2) approaches. Traffic flow data were obtained from the Istanbul Metropolitan Municipality's Traffic Management Center's real-time camera footage during peak hours (17:00-18:00) over 15 different days, and speed data were determined based on the lowest values. Emission predictions were calculated for CO, NO_x, and PM (Tier 1) and CO, NO, NO₂, NO_x, and PM₁₀ (Tier 2 and Tier 3) pollutants under different scenarios.

In the dispersion modeling phase, the AERMOD model was used, and average emission values were modeled from a linear source to analyze pollutant concentrations at different heights for 15 different days. The model predictions showed a better fit with station data at 0.5-1 m height for gaseous pollutants, while

PM₁₀ concentrations were simulated to be higher in regions closer to the ground (0.25-0.5 m).

The most significant challenge encountered during the study was limited access to detailed vehicle fleet data, which can affect the accuracy of tools like COPERT. The study emphasizes the importance of real-time field measurements and detailed government vehicle inventory studies for validating the accuracy of road transport emissions. Future research may focus on a detailed analysis of COPERT's calculation methods and explore the impact of traffic planning on air quality. This study tests the applicability of tools like AERMOD and COPERT for monitoring and predicting urban air quality, which could guide future studies.

Keywords: Vehicle-related pollutants, COPERT, emission scenarios, AERMOD, atmospheric dispersion.

1.1 Literatür Özeti

Karayolu ulaşımı, sunduğu doğrudan erişim imkânı nedeniyle bireylerin en çok tercih ettiği ulaşım türü olmasına rağmen, ekonomik gelişmelerle artan seyahatler sonucu kentsel hava kirliliğinin önemli bir kaynağı haline gelmiştir. Motorlu taşıtlardan yayılan karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC), partikül maddeler (PM₁₀ ve PM_{2,5}) gibi kirleticiler, insan sağlığını olumsuz etkilemekte ve iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır [1].

Avrupa Çevre Ajansı (EEA) verileri, araç egzoz emisyonlarının toplam hava kirliliğine önemli oranda katkı sağladığını göstermektedir [2]. Bu sorunla mücadele etmek amacıyla, özellikle 1950'lerden itibaren Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa ülkelerinde çeşitli yasal düzenlemeler hayata geçirilmiştir. Kaliforniya'nın Motorlu Araç Kirliliği Kontrol Yasası ve ABD'nin Temiz Hava Yasası (CAA), emisyon standartlarının belirlenmesinde öncü adımlar olmuştur. Avrupa'da ise 1970'lerden itibaren kademeli olarak sıkılaştırılan Euro emisyon standartları, araç üreticilerini daha temiz teknolojiler geliştirmeye yöneltmiştir [3].

Araç emisyonlarının tahmin edilmesi ve hava kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yöntemleri, emisyon envanterlerinin oluşturulmasında sıklıkla kullanılmaktadır. EMEP/EEA kılavuzları, farklı karmaşıklık seviyelerinde (Tier 1, 2, 3) emisyon tahmin yöntemleri sunmaktadır [4].

COPERT programı, Avrupa'da karayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonları hesaplamak için kullanılan standart bir araçtır. Araç sayısı, hız, kat edilen mesafe gibi parametreleri kullanarak bölgesel ve ulusal ölçeklerde emisyon tahminleri yapmaktadır [5]. Türkiye'de de çeşitli araştırmacılar tarafından COPERT yazılımını

kullanarak farklı şehirlerde ve karayolu güzergahlarında emisyon analizleri yapılmıştır [6], [7], [8], [9], [10]. Bu çalışmalar, farklı araç türlerinin ve trafik koşullarının emisyon miktarlarına olan etkilerini ortaya koymuştur. Örneğin, İstanbul'da yapılan araştırmalar, trafik hızının artırılmasının ve köprülerdeki geçiş düzenlemelerinin hava kirliliğini azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuştur [9] [7].

Bunun yanı sıra, AERMOD modeli de hava kalitesinin değerlendirilmesi ve emisyon yayılımının tahmin edilmesi için sıklıkla kullanılmaktadır. EPA tarafından önerilen bu model, düzenleyici amaçlarla kullanılmakta olup, kirletici konsantrasyonlarını hesaplayarak hava kalitesi standartlarıyla karşılaştırmaktadır [11]. Türkiye'de Trabzon'da yapılan bir çalışmada, AERMOD kullanılarak trafik kaynaklı NO_x emisyonları modellenmiş ve ağır vasıta trafiğinin azaltılmasının hava kalitesine olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir [12].

Literatürde, AERMOD'un farklı arazi türlerinde ve atmosferik koşullarda uygulanabilirliği üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır [13], [14], [15]. Örneğin, Arjantin'de yapılan bir çalışmada modelin hava kalitesi izleme istasyonu verileriyle benzer sonuçlar verdiği gösterilmiştir [16]. Bununla birlikte, yüksek rakımlarda modelin performansının azaldığına dair bulgular da mevcuttur [17].

Genel olarak, kara yolu taşımacılığı kaynaklı emisyonların tahmin edilmesi ve azaltılması için geliştirilen modelleme yaklaşımları, hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik stratejilerin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. COPERT ve AERMOD gibi araçlar, politika yapıcılar ve araştırmacılar için önemli araçlar olup, hava kirliliğinin azaltılması yönünde çeşitli senaryoların değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışma, Türkiye'de karayolu ulaşımının neden olduğu hava kirliliği sorununa odaklanmaktadır. Temel amaç, COPERT programını kullanılarak farklı araç kategorileri ve emisyon standartları dikkate alınarak karayolu kaynaklı temel taşıt kaynaklı kirletici emisyonlarının (CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀) güncel miktarlarını tahmin etmek ve bu emisyonların İstanbul-Beşiktaş Barbaros Bulvarı'ndaki atmosferik dağılımını ve farklı yükseltilerdeki konsantrasyonlarını AERMOD hava

kalitesi modelleme yazılımı aracılığıyla ayrıntılı olarak incelemektir. Bu bağlamda, çalışmanın bir diğer önemli amacı, her iki aracın (COPERT ve AERMOD) Türkiye'nin coğrafi ve demografik yapısı ile ulaşım özelliklerine ne kadar uygun olduğunu değerlendirmek ve elde edilen modelleme sonuçlarını karşılaştırarak her bir modelin güçlü ve sınırlı yönlerini ortaya koymaktır. Bu analizler sayesinde, karayolu ulaşımının neden olduğu hava kirliliğinin boyutları daha iyi anlaşılacak ve Türkiye'ye özgü emisyon yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanabilecektir. Sonuç olarak, bu çalışma, bilimsel literatüre katkıda bulunmanın yanı sıra, yerel ve ulusal düzeydeki politika yapıcılara daha bilinçli kararlar alabilmeleri için gerekli bilgiyi sunmayı hedeflemektedir.

1.3 Hipotez

Çalışma iki farklı literatür boşluğunu doldurmayı hedeflemektedir:

- 1) COPERT ve Trafik Verisi Entegrasyonu: Gerçek zamanlı trafik sayım verilerinin COPERT programına entegre edilmesi, geleneksel yıllık ortalama trafik verilerinin kullanılmasına kıyasla daha hassas ve anlık trafik koşullarına duyarlı emisyon tahminleri sağlayacaktır.
- 2) AERMOD ile konsantrasyon tahmini: AERMOD modeli, İstanbul/Beşiktaş Barbaros Bulvarı'ndaki trafik kaynaklı hava kirleticilerinin dağılımını ve farklı yükseltilerdeki konsantrasyonlarını, karayolunu çizgisel bir kaynak olarak modelleyerek ve yerel meteorolojik verileri kullanarak tutarlı ve anlamlı bir şekilde tahmin edecektir.

2 ULAŞIM SEKTÖRÜ

2.1 Ulaşım Sektörüne Genel Bakış

Ulaşım sektörü, ülkelerin kamu ve mallarının kolayca hareketini sağlayarak toplum ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynar. Hava, kara ve deniz ulaşımı gibi farklı türler arasında karayolu taşımacılığı, üretimden son teslimine kadar güvenli bir hizmet sunmasıyla en pratik ve kullanışlı ulaşım seçeneklerinden bir haline gelmiştir. Günümüz toplumu antropojenik faaliyetler, enerji tüketimi ve kirlilik azaltma stratejileri arasında güçlü bir ilişki kurmuştur. Bir ülkenin gayri safi yurtiçi hasılası (GSYİH) artışı, daha fazla sanayi ve ekonomik kalkınma için ulaşım ihtiyacı doğurur ve dolayısıyla bu daha fazla yakıt tüketimine ve çevre kirliliği problemine yol açar. Kirlilik problemi, milyonlarca insanın yaşadığı ve seyahatlerinde karayolu, hava veya demiryolu ulaşımının tercih edildiği şehirlerde, bilhassa metropol şehirlerde daha ciddi hal alır [1].

2.2 Karayolu Taşımacılığı

Karayolu ulaşımı bireylerin bulundukları noktadan, istediği noktaya ulaşımına kolaylık sağladığı için en çok tercih ettikleri ulaşım şeklidir. Ekonomik gelişmeye paralel olarak iş seyahatlerinin de artmasıyla karayolu kullanımında artış gözlenmektedir. Ancak bu gelişmeler kentsel hava kirliliğinin artmasına yol açmaktadır [1].

2.2.1 Avrupa ve Türkiye’de Karayolu Taşımacılığı

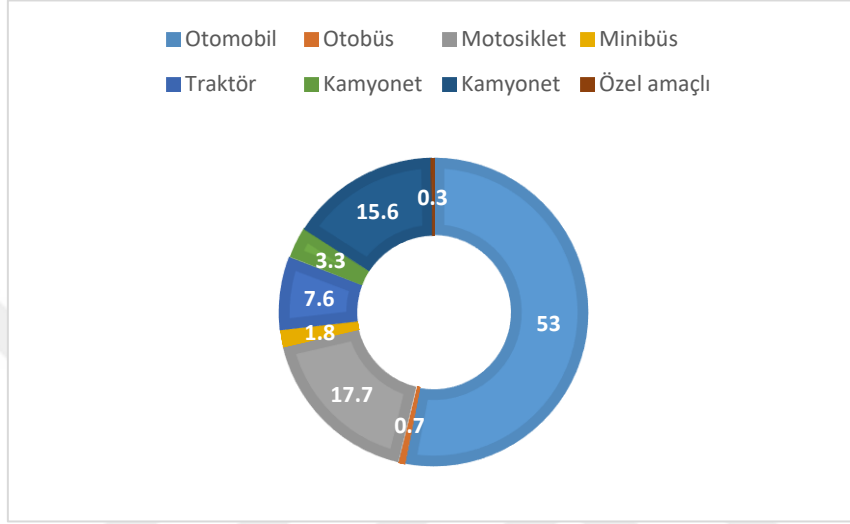
Küresel ekonominin hızla gelişmesi daha fazla enerji ihtiyacına yol açar. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlar olan petrol, kömür ve doğalgaz tarafından karşılanmaktadır. Dünya genelinde ham petrol en büyük birincil enerji tüketim kaynağı olarak kabul görülür. Benzin ve dizel gibi ham petrol türevi olan

yakıtlar, motorla çalışan araçlarda kullanılır. Ham petrol tüketimi ülkelerin ekonomik da Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde yapılan yeni araç kayıtlarında (Tablo 2.1’ de gösterilmiştir), benzinli, dizel ve alternatif yakıtlı araç tercihleri arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Benzinli araçlar arasında en yüksek payı %91,6 ile Kıbrıs elde etmiştir. Diğer taraftan, dizel yakıt kullanılan yeni araçlarda Yunanistan, %77,7 ile en yüksek paya sahip ülke olmuştur. Aday ülkeler arasında, Türkiye’de trafiğe kaydedilen araçların %74,6 gibi yüksek bir oranla benzinli olması dikkat çekmektedir. Diğer aday ülkelerde de kaydedilen araçların çoğunluğu benzin motorlu araçlardan oluşurken, Arnavutluk'ta ise dizel motorlu araçlar baskın bir konumdadır [18].

Tablo 2.1 2023 yılı motor yakıt türlerine göre araçlar [18]

Ülke	Toplam	Benzin	Dizel	Alternatif Yakıtlı
Belçika	484.639	336.741	50.855	97.043
Türkiye	945.768	704.254	165.855	78.659
Bulgaristan	37.476	-	-	-
Çekya	212.662	147.244	54.687	10.661
Danimarka	173.388	95.541	15.260	62.587
Almanya	2.844.609	1.601.700	703.839	539.070
Estonya	22.986	17.358	-	1.515
İrlanda	117.424	66.013	28.913	22.498
Yunanistan	134.465	19.785	104.526	10.154
İspanya	983.721	714.633	186.268	82.720
Fransa	1.817.346	1.247.756	202.813	366.777
Hırvatistan	43.666	21.040	-	13.607
İtalya	1.581.156	1.014.551	219.000	209.366
Kıbrıs	14.637	13.496	357.239	788,0
Letonya	18.451	12.702	443	2.020
Litvanya	26.886	20.520	3.729	2.215
Lüksemburg	49.155	27.804	3.684	11.082
Macaristan	103.256	79.969	10.713	6.584
Malta	7.464	5.218	16.703	1.522
Hollanda	369.791	249.608	724.000	116.115
Avusturya	239.150	130.321	4.068	47.642
Polonya	477.258	300.895	61.187	29.683
Portekiz	200.237	123.422	144.505	47.807
Romanya	144.608	91.118	23.010	33.036
Slovenya	48.455	36.290	20.455	4.810
Slovakya	86.812	-	7.355	-
Finlandiya	87.509	52.225	5.277	30.007

2023 yılı Aralık ayı sonu itibariyle Türkiye’de kayıtlara geçen araçların dağılımı dikkat çekici şekilde çeşitlilik göstermektedir (Şekil 2.1’de gösterilmiştir.). Bu verilere göre kayıtlı araçların en büyük çoğunluğunu %53 ile otomobiller oluştururken, motosikletler %17,7 ile ikinci sırada yerini almıştır. Daha düşük oranlarla kamyonlar %3,3, minibüsler %1,8, otobüsler %0,7 ve özel amaçlı taşıtlar %0,3 ile araç filosunun bir parçasını oluşturmuştur [19].



Şekil 2.1 Trafığe kaydedilen araçların dağılımı yüzdesi (%), Aralık 2023 [19]

2.3 Taşıt Kaynaklı Emisyonlar

Taşımacılık faaliyetleriyle yayılan kirleticiler, kentsel bölgelerdeki hava kirliliğine katkıda bulunur. Çünkü taşıtlarda hidrokarbon içerikli yakıtların yanması sonucu bir dizi kirletici ortaya çıkar. Bunlar arasında karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), yanmamış hidrokarbonlar (HC) - uçucu organik bileşikler (VOC) veya metan olmayan hidrokarbonlar (NMHC) olarak da bilinir ve <10 mikrometre (µm) (PM₁₀) ve <2,5 mikrometre (µm) (PM_{2,5}) boyutundaki partikül maddeler çevre ve insan sağlığı üzerinde önemli baskı oluşturan kirleticiler arasındadır [20]. Araç emisyonlarını büyük bir kısmı yakıt yanmasından kaynaklanan egzoz emisyonları oluşturur. Ancak egzoz emisyonları haricinde, egzoz dışı salınımlar, yakıt buharlaşmasından kaynaklı hidrokarbonlar (HC) ve lastik, fren ve yol aşınmasından kaynaklı birincil PM, araç emisyonlarına katkıda bulunur. Avrupa Çevre Ajansı (EEA) tarafından 2019 yılında yayımlanan ve 2021 yılında güncellenen gösterge verilerine göre, araç egzoz emisyonlarının ana kirleticilere katkısı şu şekilde belirtilmiştir: CO %18, HC %5,57, NO_x %28,12, PM₁₀ %2,88, PM_{2,5} %5,39 ve

kükürt oksitler (SO_x) %0,11. Bu göstergelerde egzoz dışı emisyonlara da yer verilmiştir. Egzoz dışı kaynaklardan ise HC emisyonlarının %2'si, PM_{10} emisyonlarının %4,8'i ve $PM_{2,5}$ emisyonlarının %4,5'ini oluşturduğundan bahsedilmiştir [2].

2.3.1 Egzoz Emisyonları

İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonları, benzin, dizel ve sıvılaştırılmış petrol gazı ve doğal gaz gibi yakıtların içerisindeki HC'lerin hava içerisinde bulunan oksijen (O_2) ve nitrojen (N_2) ile yüksek sıcaklıkta yanması sonucu meydana gelir. Yanma süreci sonunda yakıtın büyük bir kısmı oksijen ile birleşerek ana ürünler olarak karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) oluşturur. Bunun yanında yanma odasında bulunan bazı yanıcı olmayan bileşiklerin oksidasyonundan veya yakıt oksidasyonunun tamamlanmamasından kaynaklanan bir dizi yan ürünle oluşur. Eksik yakıt oksidasyonu sonucunda CO, PM ve HC gibi kirleticiler açığa çıkarken, yanıcı olmayan bileşiklerin oksidasyonunda, havadaki N_2 'den NO_x veya yakıt ve yağlayıcıdaki kükürtün (S) oksidasyonu ile kükürt oksitler (SO_x) üretilebilir. Bu süreç, yanma sürecinde ürünlerin yalnızca CO_2 ve H_2O ile sınırlı olmadığını göstermektedir. Ayrıca egzoz emisyonlarında motor parçalarının aşınmasından kaynaklanan maddeler, yanmamış yakıt ve yağlayıcılarda bulunabilir. Bu maddelerin birçoğu PM oluşturur ve ortam havasında kolayca yoğunlaşabilen düşük uçucu özelliğe sahiptirler. Diğer yandan bu emisyonların diğer önemli bir bileşeni ise yüksek sıcaklıkta yanma sürecinde havadaki N_2 ve O_2 'nin birleşmesiyle oluşan NO_x 'lerdir. Bu emisyonlar hava kirliliği ve sera gazları açısından ciddi bir risk teşkil eder [4], [21].

2.3.2 Aşınma Emisyonları

Lastik, fren ve yol yüzeyinin aşınması, yanma süreçlerine değil, mekanik aşınma süreçlerine dahildir. Bu aşınmalar sonucu kaynaklanan PM_{10} ve $PM_{2,5}$ emisyonları, genellikle fren uygulayarak aracın yavaşlatılması veya araç lastiklerinin yol yüzeyi ile etkileşimi sırasında ortaya çıkar. Her iki durumda yüzeyler arasındaki göreceli hareket ile kesme kuvvetinin etkisi parçacık, parçacık üretiminin temel mekanizmasını oluşturur. İkinci bir mekanizma olarak, temas sırasında oluşan yüksek sıcaklıklarda yüzeydeki malzemenin buharlaşmasını içerir [4].

2.3.2.1 Lastik Aşınması

Araç lastikleri, araç ve yolcu ağırlığını taşır, çekiş gücü ve direksiyon kontrolü sağlar ve yol yüzeyindeki pürüzleri emerek sürüş konforu sağlar. Lastiklerin içeriğinde genellikle karmaşık bir kauçuk karışımı bulunmaktadır ve ticari sebeplerden dolayı araç üretici firmalar lastiklerin tam bileşimini yayınlamamaktadırlar [4]. Fakat, Camatini vd. (2001) çalışmalarında binek araç lastikleri için %75 stiren bütadien kauçuk, %15 doğal kauçuk ve %10 polibütadien formülasyonunu ifade etmişlerdir. Lastiklerin istenen performansı sergilemesi ve yol koşullarına uyum sağlayabilmesi için bu karışıma organik katkı maddeleri ve metal de eklenir. Ayrıca kauçuğun daha sert ve dayanıklı hale gelmesi ve elastikiyetini koruması için çinko oksit de kullanılmaktadır [22]. Lastik sırtı aşınması, sırt ile yol arasındaki temasta oluşan sürtünme enerjisiyle yönlendirilen oldukça karmaşık bir fiziko-kimyasal süreçtir. Bu sebeple, lastik ve yol yüzeyi aşınma parçacıkları birbirleriyle bağlantılıdır. Lastik aşınma oranı; lastiğin özelliğine, konumuna, yaşına, yolun durumuna ve yaşına, sürüş tarzına, araç çekiş konfigürasyonuna ve hava durumu dahil birçok faktöre bağlıdır. Örneğin, sürüş tarzının aşınma oranı üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Sabit bir hızla sürülse dahi, yol yüzeyi ve lastik arasında mikro düzeyde sürekli bir kayma meydana gelir; bu, çekiş kuvvetinden sorumlu bir etkidir. Sürüş sırasında gerçekleşen hızlanma, frenleme ya da viraj alma gibi dinamikler arttıkça, lastik ve yol yüzeyi arasında oluşan daha büyük kuvvetlere karşı kayma gelişir ve bu durum hem yol yüzeyinin hem de lastiğin daha fazla aşınmasına neden olabilir. Genellikle, bir araba lastiğinin ömrü yaklaşık 50.000-60.000 kilometre (km) aralığındadır ve kullanım süreleri boyunca yaklaşık 1-1,5 kilogram (kg) ağırlık kaybederler [23]. Bu bağlamda düzenli ve sakin bir sürüş davranışı lastik ömrünü uzatırken, ani ve agresif araç kullanımı lastik ömrünü azaltır. Diğer yandan hava ve yol koşullarındaki değişiklikler de lastik ömrünü etkileyebilir. Islak koşullarda sürtünme azalır bu da aşınma oranını düşürebilir. Aynı şekilde yeni döşenmiş bir asfalt daha güvenli görülse de eski asfalt yüzeyine kıyasla sert yapısı daha fazla aşınmaya sebep olabilir [4].

2.3.2.2 Fren Aşınması

Günümüz araçlarında iki ana fren sistemi bulunmaktadır: disk frenler ve kampana frenler. Binek otomobiller, motosikletler ve hafif ticari araçların ön tekerleklerinde

disk frenler tercih edilirken, ağır vasıta araçlarda kampana frenler kullanılmaktadır. Fren balataları, yüksek sıcaklıkta kararlı dört ana bileşenden oluşur: lifler, bağlayıcılar, sürtünme düzenleyiciler ve dolgu maddeleri. Bir araçtaki frenlerin konumu, aşınma oranı üzerinde lastiklerden bile daha etkili bir faktördür [4]. Örneğin, binek otomobillerde ve motosikletlerde frenleme kuvveti çoğunlukla ön tekerleklere uygulanırken, arka frenler aracın dengesini korumak amacıyla kullanılır. Bu nedenle, ön akstaki fren balataları genellikle 30.000 km'de bir değiştirilirken, arka akstaki balatalar 50.000 km'de bir değiştirilir [24]. Aşınma oranları, frenleme mekanizmasının (elektrikli, pnömatik) türüne bağlı olarak değişiklik gösterir, bu da balataların ömrünü tahmin etmeyi zorlaştırır. Ayrıca, mekanik aşınma sonucu fren balatlarında gaz emisyonları meydana gelse de etkisi önemsiz olarak değerlendirilir [4].

2.3.2.3 Yol Yüzeyi Aşınması

Avrupa genelinde yaygın olarak asfalt ve beton bazlı yol yüzeyleri tercih edilmekte olup, farklı alanlarda blok döşemeler de kullanılmaktadır. Asfalt yüzeyler, mineral agrega, dolgu maddesi, kum ve bitümlü bağlayıcılardan oluşurken; beton yüzeyler iri agrega, çimento ve kumdan meydana gelir. Ancak, asfalt ve beton bileşenlerinin seçimi ile oranları ülkeler arasında değişiklik gösterebilmektedir [4].

Asfaltlanmış veya sertleşmiş yollara kıyasla asfaltlanmamış yolların daha yüksek miktarda PM ürettiği genel olarak kabul edilmektedir. Özellikle zemin çakılları, cüruf yollar ve ezilmiş molozlar yüksek seviyede toz oluşumuna yol açmaktadır [25], [26], [27]. Ayrıca, yol yüzeyinin aşınması nem seviyesine bağlı olarak artış göstermekte, ıslak yolların kuru yollara göre 2 ila 6 kat daha fazla aşınmaya neden olduğu belirtilmektedir. Yollara tuz uygulandıktan sonra yüzeyin daha uzun süre ıslak kalması da aşınma oranlarını artıran bir faktördür. Araç hızı, lastik basıncı ve hava sıcaklığı gibi faktörler de yol aşınmasını önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, sıcaklık azaldıkça lastiklerin elastikiyeti azalmakta, bu durum da yol yüzeyi aşınma oranlarının artmasına neden olmaktadır. Kış aylarında çivili lastiklerin yoğun kullanıldığı bölgelerde, yol yüzeyindeki aşınma ve yeniden süspansiyon kaynaklı PM konsantrasyonlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın, çivisiz lastiklerin kullanımı durumunda, çivili lastiklerin neden olduğu aşınma seviyelerine kıyasla daha düşük oranlar görülmektedir [4].

2.3.3 Buharlaşma Emisyonları

Kentsel bölgelerde araç emisyonları, atmosferik VOC'lerin başlıca kaynaklarından biri olarak yer seviyesindeki ozon (O_3) kirliliğine katkıda bulunur [28]. Benzinli araçlarda VOC'lerin buharlaşma emisyonlarının çoğu araçların yakıt tanklarından, enjeksiyon sistemlerinden ve yakıt hatlarından kaynaklanırken; dizel araçlarda ise daha ağır hidrokarbonların varlığı ve dizel yakıtın nispeten düşük buhar basıncı nedeniyle bu emisyonlar genellikle ihmal edilebilir düzeyde kabul edilir. Ayrıca, buharlaşma emisyonları araçların neredeyse tüm kullanım ömrü boyunca sürekli olarak meydana gelir. Bunun yanı sıra, benzinin buharlaşması yalnızca araç kaynaklı emisyonlarla sınırlı kalmayıp, yakıtın servis istasyonlarına taşınması ve araçlara yakıt dolumu sırasında da gerçekleşmektedir [28], [4].

2.4 Taşıt Kaynaklı Emisyonların Özellikleri ve Etkileri

Motorlu taşıtlarda, çevreye ve insan sağlığına zarar veren çeşitli kirleticiler yayılmaktadır. Arabalar, otobüsler, kamyonlar ve motosikletler CO, HC, NO_x , PM ve SO_2 gibi kirleticileri atmosfere salmaktadır. Ayrıca iklim değişikliğine katkıda bulunan CO_2 gibi sera gazları da salınmaktadır. Geçmişte kurşunlu benzin kullanımı sebebiyle bu araçlar aynı zamanda kentlerde önemli miktarda kurşun (Pb) emisyonuna da neden olmuşlardır [29]. Bu kirleticilerden kaynaklı olumsuz sağlık ve çevresel sonuçlar aşağıdaki bölümlerde bahsedilmiştir.

2.4.1 Karbon Monoksit

Karbon monoksit, fosil yakıtların yanması sonucu oluşan, havadan biraz daha yoğun, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Benzin, yağ, doğal gaz ve propan gibi karbon içeren bir malzemenin eksik yanması sonucunda, araçlardan yaygın olarak salınır. Motorlu taşıtlar, CO'nun atmosferdeki başlıca kaynaklarından biridir, ancak CO'nun çoğu benzinle çalışan hafif ticari araçlardan kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Zayıf bir sera gazı olan CO, troposferik ozon, metan ve CO_2 gibi diğer sera gazlarının konsantrasyonlarını etkiler. CO'nun atmosferde CO_2 'ye dönüşmesi genellikle 2 ila 5 ay sürmektedir. Yanma odasındaki türbölans, aşırı O_2 ile alev sıcaklığı CO oluşumunu etkiler. CO, solunduğunda oksijenin kalp, beyin ve diğer hayati organlara taşınmasını engelleyerek, organlara zarar verir. Bu durum, özellikle kronik hastalar ve yenidoğan bebekler için daha ciddi riskler oluşturur.

Ayrıca, CO, yol kenarlarında diğer maddelerle hızlı bir şekilde reaksiyona girmediğinden, trafik kaynaklı inert, birincil (doğrudan bir kaynak tarafından salınan) yanma emisyonlarının taşınması ve dağılımını incelemek için yararlı bir göstergedir [30], [31], [32], [33].

2.4.2 Azot Oksitler

Azot oksitler, özellikle araç emisyonlarından kaynaklanan önemli kirleticiler arasında yer alır ve başlıca NO ile NO₂'den oluşur. Yanma sırasında, atmosferik azotun oksitlenmesi ile bu gazlar üretilir. Bu emisyonların yaklaşık %90'ı, yüksek sıcaklıklarda azotun yanması ile araç motorunda üretilen NO formundadır. NO'nun oksidasyonu ile oluşan NO₂ kırmızı-kahve bir renge ve keskin kokuya sahiptir UV ışını altında fotokimyasal reaksiyonlarla duman üretir. Ayrıca, havadaki nemle reaksiyona girerek nitrik asit (HNO₃) aerosollerini yani asit sisi oluşturabilir. Troposferde HC ile reaksiyona girerek ozon (O₃) oluşturur. NO_x maruziyeti, akciğer tahrişine neden olabilir ve grip, zatürre gibi solunum yolu enfeksiyonlarına karşı vücudu savunmasız bırakabilir [32], [33].

2.4.3 Partikül Maddeler

Partikül maddeler motorlu taşıt kaynaklı en ciddi kirleticilerden biri olup, özellikle ince partiküller (PM_{2,5}), solunum yoluyla akciğerlere derinlemesine nüfus ederek insan sağlığı üzerinde ciddi tehdit oluştururlar. Fren aşınması, lastik aşınması ve yanma yoluyla motorlu taşıtlar önemli miktarda PM'e sebep olur ve yol yüzeyindeki tozları yeniden askıya alarak yol kenarlarındaki PM konsantrasyonlarının yükselmesine de katkıda bulunabilirler. Benzinle çalışan taşıtlar, dizel yakıtlı araçlara kıyasla daha düşük PM emisyonuna sahiptir. Benzinli araçlardan yayılan PM, yanmamış yağlama yağı ve kül oluşturan katkı maddelerinden kaynaklanırken, dizel motorlardan yayılan PM, yanma sırasında oluşan kurum, yoğunlaşmış ağır hidrokarbonlar ve sülfatlardan oluşur. Bu emisyonlar polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH) içerir. Ancak motorlarda emisyon kontrol önlemlerinin ilerlemesiyle dizel motorlardan kaynaklanan kurum emisyonları önemli ölçüde azaltılmıştır [32], [33].

2.4.4 Kükürt Dioksit

Kükürt dioksit, araç kaynaklı emisyonlar arasında yer alan ve genellikle kükürt içeren yakıtların, özellikle de dizel yakıtların yanmasıyla oluşan bir gazdır. SO₂,

renksiz, kararlı, yanıcı ve patlayıcı özellikler taşımayan bir gazdır. Motorlu taşıtlar SO_2 ve diğer kükürt içeren bileşikler yaymasına rağmen, genellikle ortam konsantrasyonlarına yalnızca küçük katkılarda bulunur. Bu gazın sağlık üzerindeki etkileri arasında solunum yollarında tahriş, astım hastalarında nefes darlığı, gözlerde yanma ve öksürük gibi kısa vadeli semptomlar bulunurken, uzun vadede kalp rahatsızlıklarına, diğer kardiyovasküler rahatsızlıklara ve bronşite neden olduğu bilinmektedir [32], [33].

2.5 Hava Kalitesi standartları

Hava kirliliği, insan sağlığı üzerinde ciddi bir tehdit oluşturan en önemli çevresel sorunlardan biridir. Hava kalitesini iyileştirme çabaları, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya katkı sağlayabilirken aynı zamanda emisyonların azaltılması da hava kalitesini iyileştirecektir. Önerilen limit değerlere ulaşma hedefiyle hareket eden ülkeler hem halk sağlığını koruyarak hem de iklim değişikliğini azaltarak önemli ilerlemeler kaydedebilecektir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Hava Kalitesi kılavuzları, yaygın hava kirlleticileri olan CO , NO_2 , PM , SO_2 , ve O_3 için limit değerleri ve ara hedefler önermektedir (Tablo 2.2’de gösterilmektedir) [34].

Tablo 2.2 WHO limit değerleri [34]

Kirletici	Süre	Limit Değerler $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	24 saat	4
NO₂	24 saat	25
	Yıllık	10
PM_{2,5}	24 saat	15
	Yıllık	5
PM₁₀	24 saat	45
	Yıllık	15
SO₂	24 saat	40
O₃	Zirve Mevsimi	60
	8 saat	100

Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY), 06 Haziran 2008 tarihinde, Resmi Gazete’de 26898 sayı ile yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliğin amacı; hava kirliliğinin insan sağlığı ve çevre üzerindeki olumsuz

etkilerini önlemek veya en aza indirmek için hava kalitesi hedeflerini belirlemektir. Tablo 2.3'te yönetmelik çerçevesinde tanımlanan kirletici değerleri yer almaktadır [35].

Tablo 2.3 HKDYY limit değerleri [35]

Kirletici	Süre	Limit Değerler $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Yıllık İzin Verilen Aşımalar
CO	8 saat	10.000	-
NO ₂	1 saat	200	18
	Yıllık	40	-
NO _x	Yıllık	30	-
PM ₁₀	24 saat	50	35
	Yıllık	40	-

2.6 Emisyon Standartlarının Gelişimi

1950'li yıllarda özellikle Los Angeles havzasında kendine özgü hava koşulları sebebiyle sis ciddi bir sağlık sorunu haline geldiğinde, bir grup bilim insanı bu durumun temel nedeninin sıcak iklim, coğrafi yapı ve artan nüfus olduğunu belirledi. Bu süreçte, Dr. A.H. Smit, otomobil egzozundan salınan NO_x ve HC'nin, güneş ışığının varlığında reaksiyona girerek sis oluşumunun temel bileşenleri olduğunu keşfetti. Bu tespitlerin ardından, Kaliforniya eyaleti araç emisyonlarını azaltmak için yasal düzenlemeler geliştirmeye başladı ve bu kapsamda 1959'da Kaliforniya'da Motorlu Araç Kirliliği Kontrol Yasası kabul edildi. Federal düzeyde ise, hava kirliliği sorunlarının boyutunu ve nedenlerini anlamak amacıyla kapsamlı araştırmalara dayalı olarak yasa geliştirme çalışmaları yürütüldü. 1955 yılında federal düzeyde kabul gören Hava Kirliliği Kontrol Yasası, hava kirliliği ile ilgili araştırmaların desteklenmesi amacıyla fon sağlanmasını mümkün kıldı [3], [36]. 1963 yılında, hava kirliliğini azaltmayı hedefleyen ilk federal Temiz Hava Yasası (CAA) kabul edildi. Birkaç yıl sonra 1966'da Kaliforniya Eyaleti, ilk otomobil emisyon standartlarını (yalnızca CO ve HC için) oluşturdu ve bu standartları düzenlemek amacıyla Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu'nu (CARB) kurdu. 1970 yılında Temiz Hava Yasası'na yapılan değişiklikler, hava kirliliğini kontrol altına almak amacıyla daha sıkı düzenlemeleri zorunlu kılarken, aynı yıl içinde Çevre Koruma Ajansı (EPA) kurularak, hava kirliliğiyle ilgili standart belirleme ve

uygulama görevini üstlendi. Bu gelişmeler, federal düzeyde hava kirliliğiyle mücadeleye yönelik daha sıkı ve disiplinli uygulama mekanizmalarını getirdi. Yapılan ilk büyük girişimlerden biri, katalitik teknolojinin gelişimi için önemli olan benzine kurşun eklenmesinin aşamalı olarak kaldırılmasıydı. Ayrıca CARB, 1971 yılında otomobillerden kaynaklanan NO_x için ülkenin ilk emisyon standardını kabul etti. Amerika Birleşik Devletleri (ABD), diğer eyaletler için ise 1968 yılında araç emisyon standartlarını formüle etti [3], [36].

Daha sonra, 1970'li yıllarda Avrupa ülkeleri, 1972'de Avustralya ve 1973'te Japonya, ülkelerinde egzoz emisyonlarını kontrol altına almak amacıyla kendi araç emisyon standartlarını belirlemeye başladılar. 1977 yılında yapılan Temiz Hava Yasası değişiklikleri, Ulusal Çevresel Hava Kalitesi Standartları (NAAQS) ile ilgili düzenlemelere yenilikler getirdi. ABD ve Avrupa'nın emisyon standartları, daha sonra birçok ülkenin NAAQS'i karşılamak amacıyla takip ettiği temel standartlar olarak kabul edildi [3].

1990 yılında Temiz Hava Yasası'na yapılan değişikliklerle 'Kapsam 1' (Tier 1) olarak adlandırılan ve CO, NO_x, PM ve HC gibi kirleticileri kapsayan standartlar tüm yeni araçlar için zorunlu hale getirildi. 2000 yılında, EPA, daha katı olan 'Kapsam 2' (Tier 2) emisyon standartlarını uygulamaya koydu ve 2014 yılında ise halen geçerli olan 'Kapsam 3' (Tier 3) standartları kabul edildi [3].

2.6.1 Avrupa (Euro) Emisyon Standartlarının Gelişimi

Avrupa Birliği'nin (AB) araçlardan kaynaklı emisyonlara ilişkin ilk mevzuatı 1970'e dayanmaktadır. AB eylemi hava kalitesi konusundaki artan endişelere ve emisyon standartlarını iyileştirmeyi amaçlayan üye devletlerin önlemlerinin benimsenmesine bir yanıt olsa da AB'nin bu konuda harekete geçmesinin asıl gerekçesi, çevresel hedeflerden çok, araç güvenliği ve yerel çevresel etkilerle ilgili üye devlet düzenlemelerinin ortak pazarı aksatmasını engellemek ve aralarındaki ticari ve teknik uyumu sağlamaktır. Bu doğrultuda, 1970 yılında AB'nin ilk altı üyesi tarafından kabul edilen 70/220/EC Direktifi, Almanya ve Fransa'da araç emisyonları konusunda yürürlüğe giren mevzuatlara bir yanıt olarak geliştirildi. Bu direktifle, üye ülkelerin CO ve HC emisyon standartlarını karşılayan araçlara tip onayı vermeyi veya bu araçların tescil edilmesini ya da kullanımına izin verilmesini reddetmesini engelledi. 1980'lerde emisyon standartlarının daha da geliştirilmesi

ve katalitik konvertörlerin zorunlu olarak takılması çağrıları, asit yağmurları ve hava kalitesi sorunlarıyla mücadele için öncelikle Almanya, Danimarka ve Hollanda'da gerçekleşti. 1984 yılında, iç pazarı bozabilecek riskleri önlemeyi amaçlayan standartların güçlendirilmesine yönelik bir komisyon teklifi sunuldu ancak 1987'de Tek Avrupa Yasası ile Nitelikli Çoğunluk Oylaması getirilene kadar ilerleme sağlanamadı. 1987 yılında kabul edilen bu uzlaşma, Almanya gibi büyük otomobil üretiminde yaygın olan ve AB pazarının lüks segmentine yönelik büyük araçlara uygulanmıştır. Küçük otomobiller için ikinci aşama emisyon azaltım standartları, üç yollu katalitik konvertörlerin zorunlu hale getirilmesini de içerecek takip mevzuatı 1989'da kabul edildi. Bu iş birliği, Avrupa Parlamentosu'nun yardımı ile mümkün oldu. Ardından 1992 yılında CO için 19 g/test, HC ve NO_x için 5 g/test olacak şekilde konsey daha katı standartları kabul etti. Ayrıca, yeni standartların uygulanması 1992 yılından itibaren tüm üye devletler için zorunlu hale getirildi. Tüm yeni model araçların 31 Temmuz 1992'den itibaren ABD'deki standartlara eşdeğer standartları karşılama gerektiren 91/441/EEC Direktifi kabul edildi. Sonraki yıllarda araç teknolojisi gereksinimlerinin maliyetleriyle ilgili endişelere yanıt olarak, yasal standartlarda yapılan iyileştirmeler daha temiz yakıtlara odaklandı. 1998 yılında komisyon Avrupa Oto Yağı Programını başlattı ve bu program kapsamında 98/69/EC sayılı Direktifi kabul etti. Bu direktif, benzin ve dizel yakıtların kalitesini iyileştirmeyi amaçladı ve soğuk çalıştırma sırasında emisyon limitlerini getirdi. Ayrıca, tüm pozitif ateşleme motorlarının on-board (yerleşik) teşhis sistemleri ile donatılmasını zorunlu kıldı. Emisyon kaynaklarıyla ilgili politikaların ve çevresel standartların entegrasyonu 2000 yılından itibaren Avrupa için Temiz Hava (CAFÉ) programı ile ilerledi. Başlangıçta farklı araç tipleri ve kirleticiler için parça parça geliştirilen Topluluk standartları, Avrupa Oto Yağı Programı çerçevesi altında giderek daha tutarlı bir şekilde geliştirildi. Ardından CAFÉ bildirisinin 2001 yılında yayınlandı ve 2002 yılında Altıncı Çevre Eylem Programı kabul edildi. Bu program temel politika alanlarında kapsamlı bir iyileştirme gündemi sunmak için tematik stratejilerin benimsenmesini vurguladı ve komisyonun 2005 yılında hava kirliliğine ilişkin tematik stratejisini kabul etmesine yol açtı. Bu standartlar, araçlardan kaynaklanan emisyonları daha da azaltmayı amaçladı ve çevresel hedeflere ulaşmak için önemli bir adım oldu. 2007 yılında eş-yasa koyucular tarafından kabul edilen ve yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan

otomobiller ve kamyonetler için Euro 5 ve 6 standartlarının geliştirilmesi için çalışmalar başladı [3].

2.6.2 Euro Emisyon Standartlarının Uygulanması

Karayolu taşıtlarının emisyonları, 1970'lerden itibaren Avrupa'da düzenleyici mevzuatlar tarafından denetlenmektedir. Bu mevzuatlar, giderek daha katı hale gelen gereklilikler ile araç üreticilerini motor teknolojilerini sürekli olarak yenilemeye ve farklı emisyon kontrol sistemleri geliştirmeye zorlamıştır. Bugün, modern araçların saldıdığı kirleticiler (CO, NO_x, HC) için emisyon seviyeleri, yirmi yıl önce üretilen araçlardan çok daha düşüktür. Egzoz emisyonlarını azaltmaya yönelik en önemli adımlardan biri, Euro standartlarının yürürlüğe girmesidir. Araçlar genellikle emisyon kontrol teknolojileri seviyelerine göre sınıflandırılmaktadır ve bu sınıflama, araçların uyduğu emisyon mevzuatına dayalı olarak yapılır. Tablo 2.4 ve Tablo 2.5'te araç sınıflarına, yıllara göre uygulanan emisyon standartları görülmektedir. Ayrıca, mevzuata uygun olarak, tablo da hafif ticari araçlar (LCV), ağır hizmet araçları (HDV) ve iki tekerlekli araçlar (L kategori) için farklı bir gösterim sistemi kullanılmaktadır. LCV ve L kategorisi araçları için arap rakamları (örneğin, Euro 1, Euro 2, vb.) kullanılırken, HDV'ler için roma rakamları (örneğin, Euro I, Euro II, vb.) kullanılmaktadır [4].

Tablo 2.4 Euro emisyon standartlarının uygulanma yılları (binek araçlar ve hafif ticari araçlar için) [4]

Araç Kategorisi	Yakıt	Euro Standardı	Başlangıç tarihi	Bitiş tarihi
Binek araçlar	Benzin	Euro 1	1992	1996
		Euro 2	1996	1999
		Euro 3	2000	2004
		Euro 4	2005	2009
		Euro 5	2010	2014
		Euro 6 a/b/c	2014	2017
		Euro 6 d-temp	2017	2020
		Euro 6 d	2020 ve sonrası	
	Dizel	Euro 1	1992	1996
		Euro 2	1996	1999
		Euro 3	2000	2004
		Euro 4	2005	2009
		Euro 5	2009	2014
		Euro 6 a/b/c	2014	2017
		Euro 6 d-temp	2017	2020
		Euro 6 d	2020 ve sonrası	
	LPG	Euro 1	1992	1996
		Euro 2	1996	1999
		Euro 3	2000	2004
		Euro 4	2005	2009
		Euro 5	2009	2014
		Euro 6 a/b/c	2014	2017
		Euro 6 d-temp	2017	2020
		Euro 6 d	2020 ve sonrası	
Hafif Ticari Araç	Benzin	Euro 1	1993	1997
		Euro 2	1997	2001
		Euro 3	2001	2006
		Euro 4	2006	2011
		Euro 5	2011	2015
		Euro 6 a/b/c	2015	2017
		Euro 6 d-temp	2018	2020
		Euro 6 d	2021 ve sonrası	

Tablo 2.5 Euro emisyon standartlarının uygulanma yılları (hafif ticari araçlar, ağır vasıtalar ve L kategori için) [4]

Araç Kategorisi	Yakıt	Euro Standardı	Başlangıç tarihi	Bitiş tarihi
Hafif Ticari Araç	Dizel	Euro 1	1993	1997
		Euro 2	1997	2001
		Euro 3	2001	2006
		Euro 4	2006	2011
		Euro 5	2011	2015
		Euro 6 a/b/c	2015	2017
		Euro 6 d-temp	2018	2020
		Euro 6 d	2021 ve sonrası	
Ağır Vasıta Araçlar	Dizel	Euro I	1992	1995
		Euro II	1996	2000
		Euro III	2000	2005
		Euro IV	2005	2008
		Euro V	2008	2013
		Euro VI A/B/C	2013	2019
		Euro VI D/E	2019 ve sonrası	
L Kategorisi	Moped ve Mini Araçlar	Euro 1	1999	2002
		Euro 2	2002	2013
		Euro 3	2013	2016
		Euro 4	2016	2020
		Euro 5	2020 ve sonrası	
	Motosikletler	Euro 1	1999	2003
		Euro 2	2003	2006
		Euro 3	2006	2013
		Euro 4	2016	2020
		Euro 5	2020 ve sonrası	

2.7 Emisyon Hesaplamaları

2008/50/EC Direktifi, önceki Avrupa Direktifleri ile uyumlu olarak, Üye Devletlerden hava kalitesi standartlarına en etkili ve zaman tasarruflu şekilde uymak amacıyla hava kalitesi planları geliştirmelerini talep etmektedir. Bu bağlamda, emisyon kaynaklarının güvenilir ve güncel bir şekilde tahmin edilmesi, etkili hava kalitesi planlarının oluşturulması ve ilgili azaltım önlemlerinin belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir [37].

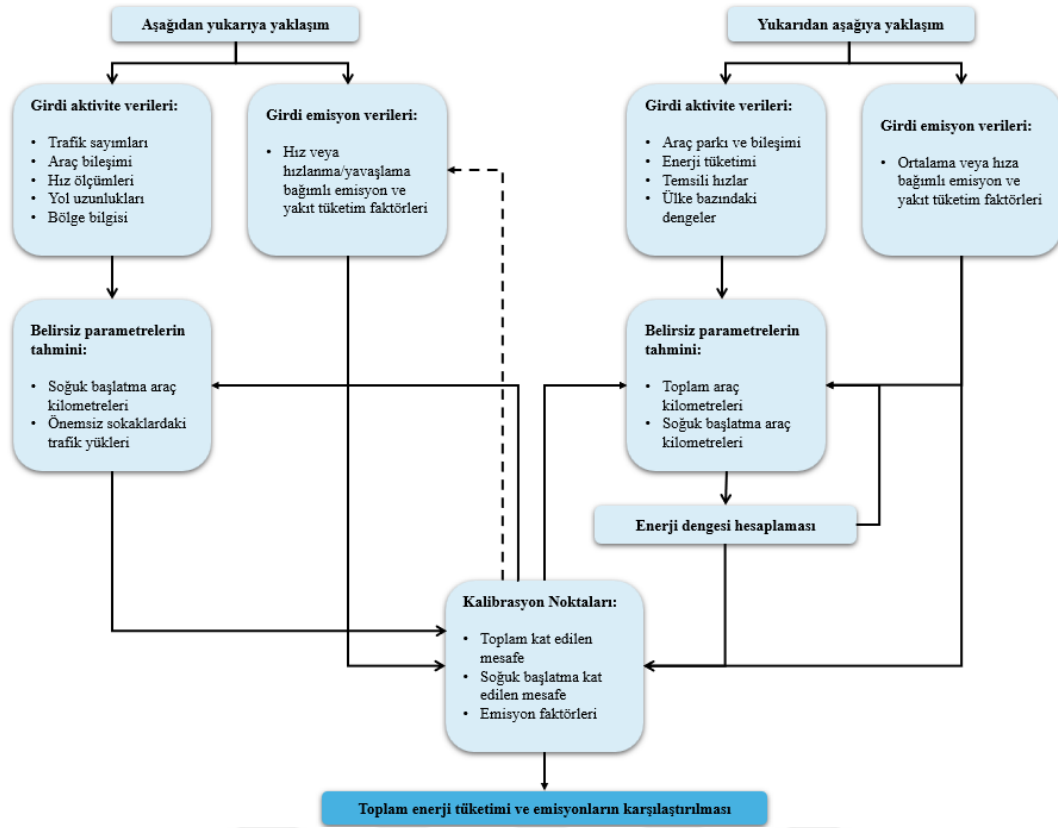
Araç emisyonlarının tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan iki yöntem, yukarıdan aşağıya (top-down) ve aşağıdan yukarıya (bottom-up) yaklaşımlarıdır. Emisyon envanterleri genellikle yukarıdan aşağıya yönetime dayanır ve geniş

bölgeler için homojen olarak mevcut olması gereken verilere ihtiyaç duyar. Karayolu taşımacılığı bağlamında, yakıt tüketimi yaygın olarak bölgesel emisyon tahminlerinde kullanılırken, yerleşik nüfus veya kayıtlı araç filosu gibi vekil değişkenler, daha küçük idari düzeylerde emisyon tahmini için kullanılmaktadır. Ancak, güvenilir ve doğru hava kalitesi tahminleri yapabilmek için mekansal ve zamansal olarak ayrıştırılmış emisyon envanterlerine ihtiyaç duyulmaktadır [4].

Özellikle kentsel sıcak noktadaki hava kirliliğinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, yalnızca yıllık ortalama veriler üzerinden yapılamaz. Çünkü bu bölgelerdeki emisyonların atmosferik konsantrasyonu hem emisyon oranlarının zamansal değişimine hem de meteorolojik faktörlere (örneğin sıcaklık, rüzgâr hızı ve yönü) bağlıdır. Ayrıca, hava kirleticilerinin konsantrasyonu, yalnızca ülke veya şehir genelindeki emisyonlardan değil, büyük ölçüde yerel kaynaklardan kaynaklanmaktadır. Trafik koşulları da günün farklı saatlerinde ve kentin farklı bölgelerinde değişiklik gösterdiğinden, mekânsal ve zamansal çözünürlüğü yüksek hava kirliliği değerlendirmeleri gerekmektedir [4].

Bu doğrultuda, yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yaklaşımlar arasında önemli farklar bulunmaktadır. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, nüfus, trafik yoğunluğu ve yol kullanımı gibi genel istatistiksel verileri kullanarak toplam araç faaliyetlerini tahmin eder. Ancak bu yöntemin, mekânsal ve zamansal parametreleri dikkate almaması nedeniyle emisyon tahminlerinin doğruluğunu azalttığı belirtilmektedir. Bu nedenle, yukarıdan aşağıya yöntem daha çok geniş ölçekli (makro-coğrafi) tahminler için uygundur. Buna karşılık, aşağıdan yukarıya yaklaşım, araç tipleri, emisyon faktörleri, yol ağı dağılımı ve araç hızları gibi daha ayrıntılı verileri kullanarak emisyonları hesaplar. Bu nedenle, özellikle kentsel alanlarda ve belirli trafik bölgelerinde yapılan çalışmalar için daha yüksek doğruluk sağlamaktadır [4].

Sonuç olarak, hava kalitesi değerlendirmelerinde araç emisyonlarının mekânsal ve zamansal çözünürlüğü büyük önem taşımaktadır. Yukarıdan aşağıya yaklaşım geniş ölçekli tahminler için tercih edilirken, aşağıdan yukarıya yöntem, daha detaylı verilerle çalışarak yerel düzeyde daha doğru sonuçlar sunmaktadır (Şekil 2.2) [4].



Şekil 2.2 Aşağıdan yukarı ve yukarıdan aşağı yaklaşımların entegrasyonu

2.7.1 EMFAC

EMFAC modeli, CARB tarafından geliştirilen ve karayolu araçlarından kaynaklanan emisyonları değerlendirmek için kullanılan birinci nesil bir araç egzoz emisyon modelidir. Kaliforniya’da kullanılmaktadır. HC, NO_x, CO, PM, CO₂, SO_x ve Pb gibi çeşitli kirleticiler için tahminler sağlar. Model hem egzoz hem de buharlaşma emisyonlarıyla ilgili emisyon süreçlerini ele alır. Binek araçlar, hafif ve ağır hizmet araçları, motosikletler, orta hizmet araçları, otobüsler gibi farklı araç kategorilerini kapsamaktadır. Benzin, dizel, doğal gaz ve elektrik gibi farklı yakıt türlerinden kaynaklanan emisyonları değerlendirir. Emisyon tahminlerini daha doğru hale getirmek için hız, bozulma oranı, sıcaklık ve bağıl nem gibi çevresel ve operasyonel faktörler göz önünde bulundurulur. EMFAC özellikle Kaliforniya eyaleti için geliştirilmiş olsa da bölgesel ölçekte trafik kaynaklı emisyon analizlerinde kullanılmaktadır. Bölgesel veya proje bazlı analizler yapılabilir. Zamansal ölçek olarak ise yıllık ve mevsimlik tahminler yapılmaktadır. Modelin en son sürümü EMFAC 2021’dir [38].

2.7.2 IVE

IVE modeli, gelişmekte olan ülkelerdeki taşıt emisyonlarını tahmin etmek amacıyla California-Riverside Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Gelişmekte olan ülkeler tarafından kullanılmaktadır. Bu model, yolcu otobüsleri, motosikletler, hafif ve ağır hizmet araçları gibi geniş bir taşıt yelpazesi için uygulanabilir. CO, NO_x, VOC, PM, SO₂, sera gazları ve toksik hava kirleticiler gibi önemli emisyonları tahmin eder. Dizel, benzin, doğal gaz gibi çeşitli yakıt türlerini ve Euro I-Euro V gibi emisyon kontrol teknolojilerini dikkate alarak emisyon hesaplamaları gerçekleştirir. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek için yakıt kalitesi, yol eğimi, taşıt yükü, hız düzenleri ve hava koşulları gibi faktörleri de değerlendirmeye alır. Modelin girdileri arasında araç karakteristik özellikleri, araç faaliyet verileri, yakıt kalitesi ve sürüş koşulları bulunur. Bu model, saatlik, günlük, haftalık veya aylık zaman dilimlerinde ulusal, bölgesel ve kentsel ölçeklerde uygulanabilir. Modelin en son sürümü IVE 2008'dir [39].

2.7.3 MOBILE ve MOVES

MOBILE modeli, ilk olarak 1970'lerin sonunda EPA tarafından MOBILE1 adıyla geliştirilmiş ve zamanla sürekli güncellenmiştir. EPA'nın uzun yıllar boyunca karayolu araçlarından kaynaklanan kirliliği tahmin etmek için onayladığı modeldi. Fakat 2004'ten sonra yürürlüğe giren hiçbir araç veya yakıt emisyon standardını hesaba katmazlar. Bu yüzden MOBILE serisindeki modeller, mevcut düzenleyici analizlerde kullanılmaya uygun değildir. 2004'te yayınlanan MOBILE6.2, bu serideki son versiyondur. MOBILE serisi yerini MOVES modeline bıraktı [40], [41].

EPA tarafından geliştirilen MOVES modeli, saatlik, günlük, haftalık veya aylık düzeyde ulusal, bölgesel ve yerel ölçeklerde analiz yapabilen ileri teknoloji bir emisyon modelleme sistemidir. Çeşitli ülkeler tarafından kullanılsa da uygulama alanı genellikle ABD'dir. Model, CO, NO_x, PM_{2,5}, PM₁₀, SO₂, THC, VOC, N₂O ve CH₄ gibi hava kirleticilerinin yanı sıra sera gazları ve toksik kirleticilerin emisyonlarını tahmin etmek için tasarlanmıştır. MOVES, benzin, dizel, doğal gaz, CNG, LPG ve elektrik gibi farklı enerji kaynaklarını kapsamaktadır. Girdi verileri arasında araç filosunun bileşimi, araç yaşı, trafik deseni ve yakıt parametreleri yer alır. Ayrıca, modelde hız dağılımı, yakıt yaşlanması, yol koşulları ve hava sıcaklığı

gibi faktörler düzeltme parametreleri olarak kullanılır. MOVES'un en son sürümü, 2022 yılında yayımlanan MOVES3.0.1'dir [40], [42]

2.7.4 CMEM

CMEM modeli, hafif hizmet araçlarının emisyonlarını tahmin etmek için geliştirilmiş bir modeldir. California Üniversitesi, Riverside tarafından geliştirilen bu model, araç ağırlığı, motor kapasitesi, maksimum güç, tork gibi fiziksel parametreler ile anlık sürüş paternini detaylı bir şekilde analiz ederek emisyon hesaplamalarını gerçekleştirir. Model, dizel ve benzinli araçların farklı sürüş modları (hızlanma, yavaşlanma, rölanti gibi) için CO, CO₂, HC, NO, PM gibi kirleticiler ve yakıt tüketiminin mikro ölçekli düzeydeki egzoz emisyonlarını hesaplar ayrıca bireysel araçlar ve filolar için egzoz emisyon faktörleri sağlar. Girdi verileri, sürüş paternleri ve araçların fiziksel özelliklerinden oluşmaktadır. Model, özellikle Kaliforniya bölgesinde uygulanabilirliği ile öne çıkmaktadır ve araç filoları üzerinde detaylı emisyon analizleri yapmaktadır. CMEM'in en son versiyonu , 2005 yılında yayımlanmıştır [43].

2.7.5 COPERT Programı

COPERT, Avrupa'da yol taşımacılığında kaynaklanan hava kirliliğini tahmin etmek için kullanılan AB'nin standart araç emisyon hesaplayıcı programıdır. Karayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonları ve enerji tüketimini hesaplamak için araç sayısı, hız, kat edilen mesafe ve ortam sıcaklığı gibi verileri kullanan bu program, belirli bir ülke veya bölge için bu hesaplamaları gerçekleştirir. Ayrıca, çok sayıda araştırma, teknoloji ve politika değerlendirme projesinin sonuçlarını bünyesinde barındırır. COPERT, uluslararası düzeyde kabul görmüş ve birçok Avrupa ülkesinde resmi emisyon verilerinin raporlanmasında kullanılan bir araçtır. Modelin temel amacı, uzmanlara emisyon envanterlerini derlemelerinde yardımcı olmaktır; ancak, kapsamı bununla sınırlı değildir. Program, ulusal, bölgesel ve yerel ölçekte yıllıkta günlük tahminlere kadar emisyon hesabı yapabilme yeteneğine sahiptir yıllık veya uzun dönemli olabilir (1990-2050 arası gibi). Bunun yanı sıra, politika yapımcılar ve araştırmacılar için her türlü politika değerlendirme çalışmasında ve çevresel analizlerde kullanılabilecek önemli bir araçtır. COPERT, Avrupa'da bulunan yeni araçların emisyon ve enerji tüketim

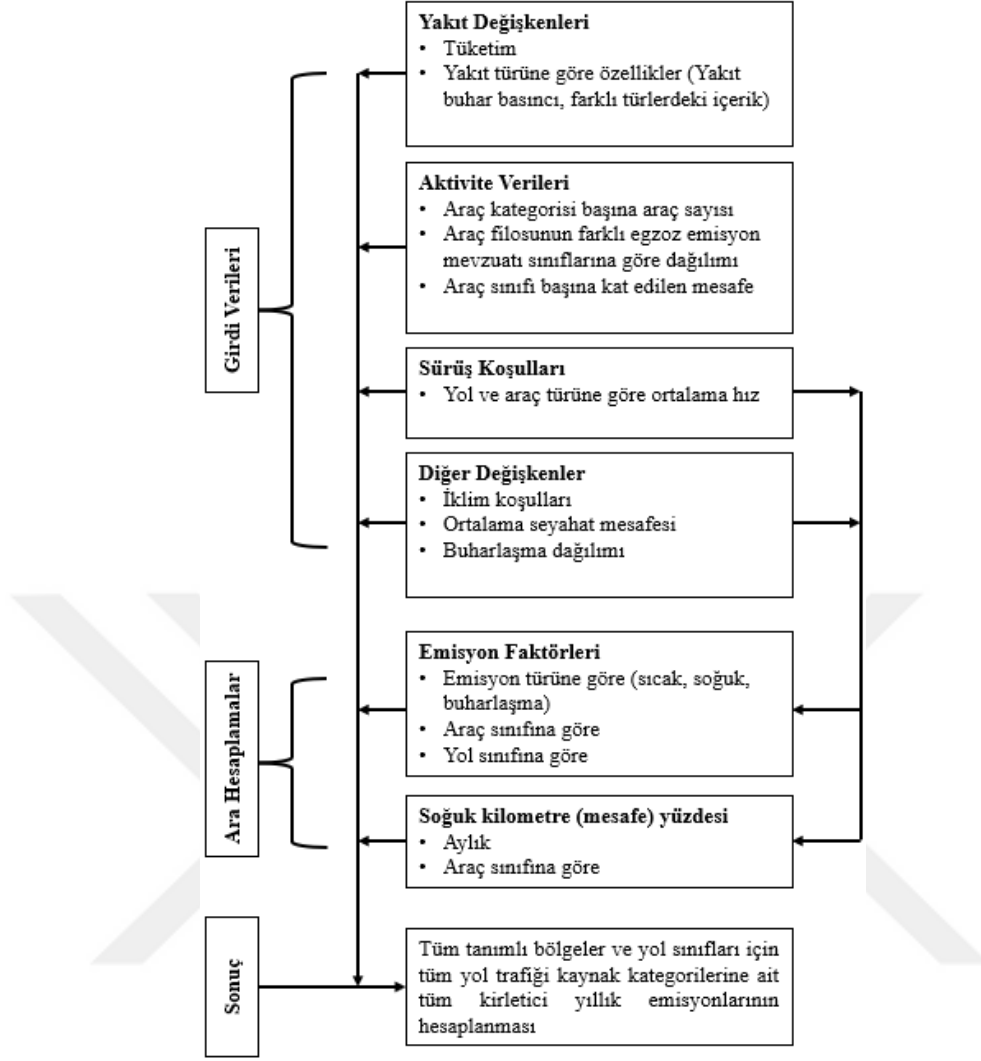
seviyeleri hakkında önemli bir referans kaynağı olmasının yanı sıra, mevcut olan eski araç teknolojilerini de göz önünde bulundurur [5], [44].

Programın geliştirilmesi, EEA tarafından Avrupa Hava Kirliliği ve İklim Değişikliği Azaltma Konu Merkezi'nin faaliyetleri kapsamında koordine edilmektedir. Modelin bilimsel gelişimi, Avrupa Komisyonu'nun Ortak Araştırma Merkezi tarafından yönetilmektedir. COPERT, EEA'ya üye olan ülkelerin (32 üye ülke) resmi karayolu taşımacılığı emisyon envanteri hazırlanması için geliştirilmiştir. COPERT'in ilk versiyonu COPERT 85 adıyla 1989 yılında geliştirilmiş olup, zamanla çeşitli güncellemelerle kendini yenilemiştir. Sırasıyla COPERT 90 (1993), COPERT II (1997), COPERT III (1999), COPERT 4 (2006) ve en son COPERT 5 (2016) sürümleri yayımlanmıştır [40]. Her bir versiyon, önceki modellerin üzerine eklemeler yaparak ve güncel emisyon faktörlerini dahil ederek daha gelişmiş ve kapsamlı hale getirilmiştir. Bununla birlikte bilimsel ve akademik uygulamalarda da kullanılabilir. COPERT metodolojisi, hava kirleticisi emisyonlarının hesaplanmasında Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı (EMEP)/EEA Hava Kirleticisi Emisyon Envanteri Kılavuzunun bir parçası olmakla birlikte sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında 2006 IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) Kılavuzları ile tutarlılık göstermektedir. Ulusal hava kirleticisi emisyon envanterlerinin oluşturulmasına yönelik teknik bir rehber niteliğinde olan EMEP/EEA Hava Kirleticisi Emisyon Envanteri Kılavuzu, UNECE Uzun Menzilli Sınır Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi (CLRTAP) ile AB Ulusal Emisyon Tavanları Direktifi çerçevesinde emisyon verilerinin raporlanmasını desteklemektedir. Bu kılavuz, uluslararası sözleşmeler, protokoller ve AB mevzuatının gerekliliklerine uygun olarak şeffaf ve standartlaştırılmış bir emisyon raporlama prosedürü sunar [5], [44].

2.7.5.1 COPERT Programının Yapısı ve Yaklaşımı

COPERT programı üç ana bölümden oluşur (Şekil 2.3):

- Girdi bölümü
- Emisyon faktörü bölümü (EMEP/EEA Emisyon Envanteri Kılavuzu ile uyumlu, Tier 1, Tier 2, Tier 3 yöntemlerine dayalı)
- Sonuçlar bölümü (hesaplanan emisyonlar)



Şekil 2.3 Temel metodolojinin uygulanmasına yönelik akım şeması

Program, yük kapasitesine, motor kapasitesine, Euro emisyon standardına, yakıt türüne göre 530 araç kategorisini (205, otomobil, 70 otobüs, 137 kamyon, 72 minibüs, 46 L kategori) içerir (Tablo 2.6).

Program için gerekli girdiler [45]:

- Araç adedi (stok)
- Kat edilen mesafe (ortalama aktivite)
- Yaşam boyu kümülatif aktivite
- Kentsel/kırsal/otobanlarda ortalama hız
- Kentsel/kırsal/otobanlarda kat edilen km payı

Tablo 2.6 COPERT araç profili

Araç Türü	Yakıt Türleri	Segmentler	Euro Standartları
Binek Araç	Benzin, benzin hibrit, benzin hibrit/elektrikli (phev), dizel phev, LPG, Sıkıştırılmış doğal gazlı çift yakıtlı sistem (CNG bifuel), akü elektrikli	Mini, orta, küçük, Büyük (SUV-Executive), 2 Zamanlı (iki zamanlı motorlu araçlar-2 strokes)	Konvansiyonelden Euro 7'ye
Hafif Ticari Araç	Dizel, benzin, akü elektrikli	N1-I, N1-II, N1-III	Konvansiyonelden Euro 7'ye
Ağır Hizmet Aracı	Dizel, dizel hibrit, CNG, akü elektrikli, biyodizel	Sert (rigid), körüklü (articulated)	Konvansiyonelden Euro VII'ye
Otobüsler	Dizel, dizel hibrit, CNG, akü elektrikli, biyodizel	Şehir içi otobüsler (midi, standart, articulated)	Konvansiyonelden Euro VII'ye
L Kategorisi	Dizel, benzin	4 zamanlı motosikletler, 2 zamanlı mopedler, 4 zamanlı mopedler, ATV'ler, mikro otomobiller	Konvansiyonelden Euro 5'e

Programda istenilen girdiler:

- Kamyon ve otobüsler için yük faktörü ve yol eğimi
- Kentsel/kırsal/otoyol sokaklarındaki buharlaşma yüzdesi (sadece emisyonların buharlaşma kısmı için)
- Depo ve buharlaştırıcı boyutu (yalnızca buharlaşma emisyonları için)
- Çevresel koşullar (minimum ve maksimum aylık ortalama sıcaklık (sadece emisyonların soğuk kısmı için), nem (klima (A/C) kullanımının etkisi için), yakıt buhar basıncı)
- Klima seçenekleri (klima kullanımı, klimalı araçlar, klima etkisi) Yakıt türü özellikleri (yakıttaki metal içeriği, hidrojen/karbon ve oksijen/karbon oranı, ağır metal içeriği, yoğunluk, yakıt enerji içeriği, biyoyakıt içeriği)
- Kullanım faktörü (PHEV araçları için)
- Seyahat özellikleri (uzunluk, süre)

COPERT programı kentsel, kırsal ve otoyollarda gerçekleşen trafik operasyonlarına dair ölçümlere dayanan için emisyon faktörleri (kilometre başına gram kirletici) içeren bir veri seti kullanır. Araçların hız bilgileri programın girişinde sağlandığında, bu hız temel alınarak ilgili emisyon belirlenir. Her yol

tipinde araç stoğu, kat edilen mesafe ve yaşam boyu kümülatif aktivite bilgileri girilerek toplam emisyonları hesaplar. Yol ve sürüş koşulları hakkında daha ayrıntılı bilgiler mevcutsa kullanıcı emisyonların hesaplanmasında kullanılacak kendi emisyon faktörlerini sağlayabilir. Buna örnek olarak, araç yaşını dikkate alarak NO_x, CO ve VOC emisyonlarının hesaplanmasında daha hassas ve doğru bir yöntem gerçekleştirir [45].

Program sonuçları, dört gruba ayrılabilen çeşitli kirleticiler için hesaplanan emisyonları içerir [45]:

Grup 1: Ayrıntılı bir metodolojinin mevcut olduğu, belirli emisyon faktörlerine dayanan ve farklı trafik koşullarını (kentsel/kırsal/otoyol) ve motor koşullarını kapsayan kirleticiler; CO, NO, NO₂, NO_x, PM, VOC, NMVOC, N₂O (nitroz oksit), NH₃ (amonyak), CH₄ (metan).

Grup 2: Yakıt tüketimine bağlı olarak tahmin edilen bu emisyonlar Grup 1'deki kirleticilerle (CO₂, SO₂, Pb, Hg, Cd, Cr, Cu, Se, As, Ni, Zn) aynı kalitededir.

Grup 3: Detaylı verileri bulunmaması nedeniyle, basitleştirilmiş metodolojinin uygulandığı kirleticiler; PAH'lar (polisiklik aromatik hidrokarbonlar), PCDD'ler (poliklorlu dibenzo-p-dioksinler), POP'lar (kalıcı organik kirleticiler), PCB'ler (poliklorlu bifeniller), PCD'ler (poliklorlu dioksinler), HCB (heksaklorobenzen).

Grup 4: Toplam NMVOC emisyonlarının bir kesri (fraksiyonu) olarak türetilen kirleticiler: aromatik bileşikler, alkanlar, aldehytler, alkenler, alkinler, ketonlar, sikloalkanlar.

2.7.5.2 COPERT ile Yapılan Çalışmalar

Karayolu taşımacılığında kaynaklanan emisyonlar, küresel ısınmaya katkıda bulunan ve kentsel hava kalitesini olumsuz etkileyen ciddi tehditler arasında yer almaktadır. Bu etkileri en aza indirmek ve zamanında müdahalelere olanak sağlayacak modeller geliştirmek için sürekli araştırmalar yürütülmektedir. Karayolu taşımacılığı sektöründen kaynaklanan kirletici emisyonların miktarını doğru bir şekilde belirlemek, sorunun çözümüne yönelik etkili politikaların oluşturulmasında ilk adım niteliğindedir [46].

Burón ve arkadaşları (2004), COPERT III programını kullanarak 1988-1999 yılları arasında İspanya'da karayolu ulaşımından kaynaklanan yerel emisyonlar (CO, NO_x, NMVOC, PM), küresel emisyonlar (CO₂ ve CH₄) ile yakıtla ilgili kirletici emisyonları (SO₂ ve Pb) tahmin etmişlerdir. Çalışmalarında, veri eksikliğini temel zorluklardan biri olarak vurgulamışlar ve araç sayısı ile sürüş koşulları için tahminler elde edebilmek adına ayrıntılı veri işleme ve modelleme yapılmasının gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Elde edilen sonuçlar, PM emisyonlarındaki artışın dizel araç sayısındaki hızlı büyüme ve ilk düzenlemelerin sınırlı etkisiyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Buna karşın, CH₄ emisyonlarının son yıllarda orta düzeyde sabit kaldığı, CO₂ emisyonlarının ise artan bir eğilim izlemeye devam ettiği tespit edilmiştir [47].

2004 yılında Türkiye'de karayolu ulaşımının küresel ve yerel hava kirletici emisyonlarına olan katkılarını hesaplamak amacıyla Soylu (2007), COPERT III programını kullanmıştır. Analizler sonucunda, binek araçların CO, HC ve Pb emisyonlarının ana kaynağı olduğu, ağır vasıta araçların ise PM, NO_x ve SO₂ emisyonlarından sorumlu olduğu tespit edilmiştir [48].

2007 yılında Deniz [7], İstanbul genelinde ve Boğaziçi Köprüsü ile Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nde motorlu taşıtlardan kaynaklanan hava kirletici emisyonların hesaplanması ve trafik düzenlemelerinin bu emisyonlar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla COPERT III programını kullanarak kapsamlı analizler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, özellikle trafik hızının artırılmasının ve köprülerdeki araç geçiş düzenlemelerinin, trafik kaynaklı hava kirleticilerin azaltılmasında önemli bir rol oynadığı vurgulanmıştır.

Özen ve Yaman (2013), 2000-2009 yılları arasında Türkiye'de karayolu yük taşımacılığından kaynaklanan emisyonları hesaplamak amacıyla COPERT4 programını kullanmıştır. Elde edilen veriler, 2000-2009 yılları arasındaki CO₂ emisyon değerlerinin aynı kaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, kullanılan yöntemin toplam emisyonları hesaplamada farklı kamyon türleri, emisyon standartları ve doluluk oranları gibi alt gruplar için ayrı ayrı belirleme imkanı sunmasının, çalışmanın en önemli katkılarından biri olduğu vurgulanmıştır [8].

Araç nüfusundaki hızlı artış nedeniyle, Çin'in Jing-Jin-Ji bölgesindeki hava kirliliği sorununa yönelik Du ve arkadaşları (2017), COPERT modelini kullanarak bölgesel

yakıt tüketimi ve emisyon seviyelerini tahmin etmiş ve altı farklı senaryo altında azaltım potansiyellerini incelemiştir. Çalışmalarında, araç kaydını sınırlamanın yakıt tüketimi ile birlikte CO₂, CO ve VOC emisyonlarını azaltmada en etkili yöntem olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, gelecekte yolcu araçlarının CO, VOC ve SO₂ emisyonlarının büyük kısmından sorumlu olacağını, buna karşılık NO_x ve PM_{2,5} emisyonlarının büyük çoğunluğunun dizel motorlu araçlar tarafından salınacağını ifade etmişlerdir [49].

Resetar ve arkadaşları (2017) Hırvatistan'daki binek araç filosunun yapısını 2007-2016 yılları arasında ayrıntılı bir şekilde analiz etmiş ve ve COPERT 5 yazılımında Tier 3 yaklaşımını kullanarak bu araçların emisyon faktörlerini ve salımlarını hesaplamışlardır. Çalışma NO_x, CO, PM, NH₃, VOC ve NMVOC gibi hava kirleticilerinin yanında sera gazı olan CO₂ ve yakıt tüketimi verilerini de içermektedir. Analziler sonucunda söz konusu dönemlerde binek araç filosu ve işletme faaliyetlerinin izlenmesinin, filodaki değişimlerin toplam emisyonlar üzerinde olumsuz bir etki yarattığını ortaya koymuştur [50].

Lejri ve arkadaşları (2018), kentsel ölçekte kirleticisi emisyonlarını ve yakıt tüketimini değerlendirmek için COPERT IV ve PHEM v11 emisyon modellerini incelemiştir. Paris'teki 3 km²'lik bir alanda, 6 dakikalık periyotlarla yol segmentlerinde gerçekleştirilen emisyon hesaplamalarından ortaya çıkan ağ ile yakıt tüketimi ve NO_x emisyonları karşılaştırılmıştır. Çalışmada COPERT'in ortalama hız tanımına duyarlılığı, programın emisyon fonksiyonlarının tıkanıklıkla ilgili araç dinamiklerini nasıl ele alabileceği incelenmiş ve emisyonlar PHEM modeliyle eşleştirilmiş ayrıntılı trafik çıktıları kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, COPERT'in ortalama hız tanımına oldukça duyarlı olduğunu ve PHEM modeli ile eşleştirilen trafik çıktılarının, trafik dinamiklerini daha doğru bir şekilde yakalanmasını sağlamış ancak performans göstergeleri açısından COPERT'e kıyasla daha düşük kalmıştır [51].

Wondifraw ve arkadaşları (2018), Etiyopya'nın başkenti Addis Ababa'daki karayolu taşımacılığında kaynaklanan toplam emisyonları 2005-2015 dönemi için tahmin etmeyi amaçlamış ve bu doğrultuda COPERT yazılımının Tier 2 yaklaşımını kullanmıştır. Çalışmada, araç envanterinin dağılımı, araçların yıllık kilometre seyahati ve emisyon kontrol teknolojileri gibi çeşitli girdi verilerinden yararlanılmıştır. Sonuçlar, belirtilen zaman diliminde Addis Ababa'da CO₂, NO_x,

CO, PM ve CH₄ emisyonlarının öne çıktığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, Addis Ababa'daki karayolu taşımacılığının hem şehir çevresi hem de iklim üzerinde önemli bir kirlilik kaynağı olduğunu göstermektedir [52].

Saharidis ve Konstantzos (2018), yük taşımacılığında kullanılan ağır hizmet araçlarının toplam AB emisyonlarının yaklaşık %6'sından sorumlu olduğunu belirtmiş ve emisyon hesaplama modellerinin liman içi kamyon operasyonlarından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının tahminindeki potansiyel kullanımlarını değerlendirmiştir. Çalışma, kirliliğin ana kaynağı olan yakıt yanmasından kaynaklanan emisyonlara odaklanmış ve CO₂, CH₄ ve N₂O gibi sera gazlarını incelemiştir. Bu kapsamda, emisyon hesaplama modellerinden 10 tanesi bir araya getirilmiş ve analiz edilmiştir. İnceleme sonucunda, liman içi operasyonlarda kullanım için COPERT ve MOVES modellerinin en uygun seçenekler olduğu belirtilmiştir. Ancak MOVES modelinin temel dezavantajı, ABD’de geliştirilmiş olması nedeniyle Avrupa araç filosuna tamamen uygun olmamasıdır. Öte yandan, COPERT modeli, Avrupa ağır hizmet araçları filosunun özelliklerine odaklanmakta ve EMEP/EEA hava kirletici emisyon envanteri kılavuzunun bir parçası olarak sürekli güncellenmekte ve desteklenmektedir. Bununla birlikte, COPERT modelinin de ABD araç filosuna uygulanmasının tamamen uygun olmadığı vurgulanmıştır [53].

Mutlu (2019) yaptığı çalışmada, nüfus ve ulaşım bakımından Türkiye'nin en yoğun şehirleri olan İstanbul, Bursa ve İzmir'i birbirine bağlayan Balıkesir ilinde bulunan 24 kavşakta araç sayımı gerçekleştirmiş ve trafik kaynaklı CO ile NO_x kirleticilerinin emisyon miktarlarını COPERT programı kullanarak hesaplamıştır. Çalışmasında, sıcak ve soğuk iklim koşullarını dikkate alarak, bir yıl içinde atmosfere yaklaşık 133 ton NO_x ve 682 ton CO salındığını tahmin etmiştir [9].

Dev ve arkadaşları (2019), İrlanda'da binek araçlardan kaynaklanan emisyonları tahmin etmek amacıyla COPERT v5.1 yazılımını ve Tier 3 yaklaşımını kullanarak CO₂, NO_x, N₂O, VOC, NMVOC, PM_{2.5} ve PM₁₀ kirleticilerinin emisyon seviyelerini hesaplamış ve farklı sıcaklık, ortalama hız, bağıl nem, sürüş tarzı oranları ile ortalama seyahat mesafelerini analiz etmişlerdir. Bu çalışma sonucunda, COPERT’in seyahat uzunluğu ve hızdaki değişimlere karşı en duyarlı parametreler olduğunu ortaya koymuşlardır [54].

Aksoy ve arkadaşları (2021), Türkiye'de yol trafiğinden kaynaklanan hava kirliliğinin sağlık etkilerini değerlendirmek ve hükümetin 2030 yılına kadar benimseyebileceği potansiyel politikaların sonuçlarını ortaya koymak amacıyla CO, CO₂, VOC, PM_{2,5}, PM₁₀, ve SO₂ kirleticilerinin emisyon seviyelerini COPERT yazılımı kullanarak hesaplamışlardır. Hesaplanan emisyonlar, konsantrasyonlara dönüştürülerek hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileri, maruz kalma-tepki fonksiyonları ile analiz edilmiştir. Çalışmaları sonucunda, oluşturdukları en iyimser senaryoyla 2020-2030 döneminde en fazla 19.396 erken ölüm ve 803.328 yıl yaşam kaybı önlenebileceğini tahmin etmişlerdir [10].

Zhang ve arkadaşları (2024), Lanzhou şehri Xuefu Yolu'ndaki ana hava kirletici emisyonlarını hesaplamak amacıyla çeşitli emisyon modellerini incelemiş ve bu modellerin prensiplerini, uygulama alanlarını ve eksikliklerini özetlemiştir. Çalışmanın uygulama kısmında, COPERT modeli kullanılarak çalışma günlerinde yayılan dört ana hava kirleticinin (NO₂, CO, PM_{2,5} ve PM₁₀) miktarları hesaplanmıştır. Yapılan analizler, motorlu taşıtların yalnızca %10'unu oluşturan hafif yük kamyonlarının toplam NO₂ ve PM emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, simülasyon sonuçları, COPERT modelinin orta ölçekli araştırmalar için güçlü bir destek sağladığını göstermiştir. Simüle edilen değerlerin ölçülen değerlerle uyumlu olması, modelin bu tür çalışmalarda kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini desteklemektedir [55].

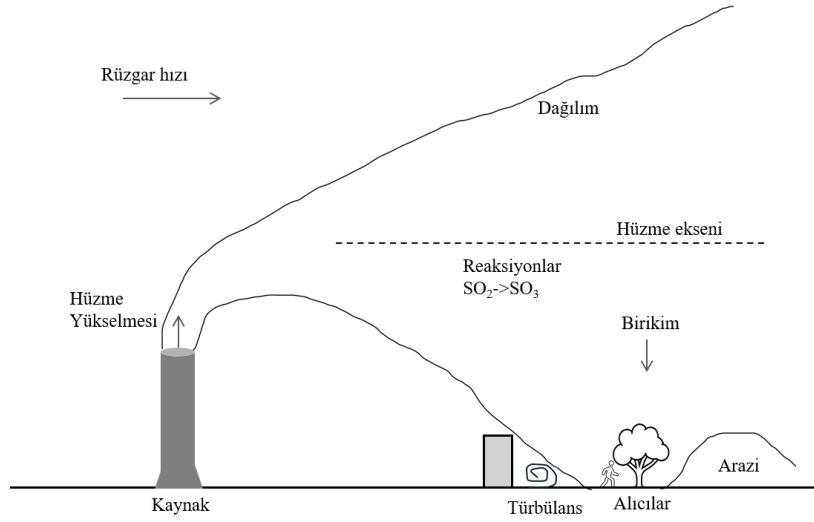
Kawsar ve arkadaşları (2024) Bangladeş'in kendine ait bir araç emisyon modeli olmaması nedeniyle, araç emisyon envanterleri geliştirmek istemiş ve bu amaçla COPERT v5.5 yazılımının uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bangladeş'te bulunan farklı araç sınıflarının yıllık CO₂ üretimini 2016-2020 yılları arasında hesaplamışlardır. Bu çalışmada ayrıca CO₂ ve diğer 12 büyük kirletici için (CO, CH₄, NO_x, PM_{2,5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, N₂O, NH₃, NO, VOC ve NMVOC) yıllık araç emisyon envanterleri geliştirilmiştir. Analizler sonucunda, otobüslerin, kamyonların ve motosikletlerin CO₂ emisyonuna önemli miktarda katkıda bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca COPERT v5.5'in Bangladeş için uygun bir emisyon modeli olabileceğini önermişlerdir [56].

Hava kalitesi modelleri, atmosferdeki emisyonların ve kirleticilerin dağılımını, kimyasal dönüşüm süreçlerini ve birikim mekanizmalarını simüle etmek için matematiksel ve sayısal yöntemler kullanır. Meteorolojik veriler, kaynak veriler (örneğin, emisyon oranları ve baca yüksekliği gibi) ve arazi yüzey topografyası verilerini kullanarak, doğrudan atmosfere salınan birincil kirleticiler ile atmosferdeki kimyasal tepkimeler sonucunda oluşan ikincil kirleticileri karakterize etmek için kritik bilgiler sağlar. Gelecekte hava kalitesi senaryolarının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için modellemeye ihtiyaç vardır. Hava kalitesini yönetmede önemli bir rol oynayan bu araçlar, hava kirliliği kontrolünden sorumlu kurumlar tarafından, hangi kaynakların ne tür bir etki yarattığını incelemek, zararlı hava kirleticilerini azaltmak için etkili stratejiler geliştirmek ve tavsiye edilen düzenleyici programların etkinliğini değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılır. Örneğin, izin verme süreçlerinde yeni bir kaynağın hava kalitesi standartlarını aşmayacağını doğrulamak veya ek kontrol gereksinimlerini belirlemek için kullanılabilir. Bunun yanı sıra, birden fazla kaynaktan kaynaklanan kirletici konsantrasyonlarını gelecekte tahmin etmek için de kullanılabilir. Hava kalitesi modellerinden elde edilen kirletici seviyesi tahminlerinin mümkün olan durumlarda, izleme istasyonlarından alınan gözlem verileriyle karşılaştırılması, model sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamada etkin bir rol oynar. Bu sayede, programın insan sağlığı ve çevre üzerindeki zararlı etkilerini azaltma konusundaki etkinliği önceden değerlendirilerek, gerekli düzenlemeler ve iyileştirmeler yapılabilir [57], [58]. Hava kalitesini değerlendirmede en yaygın olarak başvuru alan modeller şunlardır: Dağılım modellemesi, fotokimyasal modellemesi ve reseptör (alıcı) modellemesi [57].

Bir hava kirleticisinin bir popölasyona ulaştığında sahip olduğu konsantrasyon, bu kirleticinin atmosferdeki dağılım derecesiyle doğrudan ilişki içerisinde. Dağılım, bir bileşimin bir akışkan içinde (örneğin hava) içinde, moleküler düzeydeki rastgele hareketler sonucu yayılmasıdır. Hava dağılım modelleri, belirli bir kaynaktan yayılan bir kirleticinin atmosferdeki konsantrasyonunu veya birikiminin tahmin etmek amacı ile kullanılan araçlardır. Hava dağılım modellerinin kullanımı, çeşitli nedenlerle büyük önem taşımaktadır. Bu nedenlerden bazıları şunlardır:

- Hava kalitesini sürekli olarak ölçmek her zaman mümkün olmayabilir.
- Hava kirliliği tespit edildiğinde, dağılım modelleri kirlilik kaynağının belirlenmesine yardımcı olabilir.
- Yeni bir hava kirliliği kaynağı planlandığında, bu modeller kaynağın hava kalitesi üzerindeki potansiyel etkilerini tahmin edebilir.
- Mevcut bir kaynağın hava kirliliği sorunu oluşturması durumunda, dağılım modelleri sorunun çözümü için gerekli emisyon azaltımını belirlemede kullanılabilir.
- Ayrıca, hava dağılım modelleri kazara sızıntılar gibi acil durumlara müdahale planlaması için de etkili bir araçtır.

Hava kirliliği kaynaklarının neden olduğu sorunlar, hava dağılım modelleri kullanılarak değerlendirilebilir. Bu tür bir sorun, belirli bir lokasyonda kabul edilebilir sınırları aşan bir hava kirleticisinin veya birden fazla kirleticinin kombinasyonunun konsantrasyonu olarak tanımlanabilir. Örneğin bu modeller endüstriyel bir tesisin bacasında yayılan emisyonları ya da bir yol boyunca araçlarda yayılan emisyonların dağılımını modelleyebilir. Dağılım modellerinden elde edilen sonuçlar, yeni ya da mevcut bir kaynağın belirli noktalardaki kirletici seviyesine olan katkısını tahmin etmek için kullanılır. Bu tahminler daha sonra çevresel standartlara ve insan sağlığını korumaya yönelik hava kalitesi standartlarıyla (örneğin NAAQS) karşılaştırılabilir [59], [60].



Şekil 3.1 Hava kirliliği probleminin etkenleri

Şekil 3.1, hava kirliliği sorununu etkileyen temel unsurları göstermektedir. Atmosferdeki kirleticilerin dağılımı ve dönüşümü; emisyon kaynağı, arazi özellikleri, meteorolojik koşullar ile kirleticilerin fiziksel ve kimyasal özellikleri (örneğin, çözünürlük ve reaktivite) gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Kapsamlı modellerde bu faktörlerin tümü dikkate alınırken, daha basitleştirilmiş modeller yalnızca en kritik değişkenlere odaklanabilir [59].

Atmosfer, kaotik ve türbülanslı bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, kaynak özellikleri ve hava koşulları sabit olsa bile kirletici konsantrasyonları sürekli değişkenlik gösterir. Dahası, hava dağılımını etkileyen tüm faktörlerin tek bir modele dahil edilmesi mümkün değildir. Bir modelin başarılı kabul edilebilmesi için belirli kriterleri karşılaması gerekir [59]:

- Uzun bir zaman dilimi boyunca model tarafından tahmin edilen ortalama konsantrasyon, gerçek ortalama konsantrasyona yakın olmalıdır.
- Tahmin edilen saatlik ortalama konsantrasyonların çoğu, gerçek konsantrasyonların iki katı içinde olmalıdır.
- Farklı yerlerde ve zamanlardaki tahmin edilen konsantrasyonlar en düşükten en yükseğe sıralandığında, ölçülen konsantrasyonların sıralamasıyla benzer bir dağılım göstermelidir. Uzay ve zamandaki karşılık gelen noktaların tam olarak aynı sırada olması gerekmez.

3.1 Gauss Dağılım Modeli

Gauss dağılım modelleri, bir kirleticinin belirli bir noktadaki konsantrasyonunu emisyon oranı, meteorolojik koşullar ve kaynaktan uzaklık gibi faktörlere bağlı olarak tahmin eder. Uygulama kolaylığı ve geniş mesafelerde kullanılabilirliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilir. Model, kirleticinin rüzgâr yönünde ilerlerken hem yatay hem de dikey yönde yayıldığını ve bu yayılmanın atmosferdeki türbülans nedeniyle çan eğrisi (Gauss eğrisi) benzeri bir dağılım gösterdiğini varsayar.

Gauss modellerinde, rüzgârın yatay bir yönde (genellikle x eksenini) sabit hızla estiği kabul edilir ve kirleticinin taşınımında rüzgârın difüzyona kıyasla baskın olduğu varsayılır. Ayrıca, emisyon oranının zamanla değişmediği, kirleticinin kimyasal reaksiyonlara girmediği ve toplam kütlenin korunduğu öngörülür. Ancak, bu model düşük rüzgâr hızlarında ve kaynağa çok yakın mesafelerde (<100 m) konsantrasyonları olduğundan yüksek tahmin edebilir. Aynı zamanda, tüm rüzgâr yönü boyunca sıfırdan farklı konsantrasyonlar hesapladığı için uzun mesafelerde (>50 km) kullanıma uygun değildir [61], [62].

3.1.1 Çizgi Kaynaklar

Kirliliğin belirli bir noktadan değil, belirli bir hat boyunca sürekli olarak yayılması durumunda çizgi kaynak modelleri kullanılır. Yoğun trafiğe sahip bir otoban veya bir nehir ya da liman boyunca sıralanmış sanayi tesisleri, kirleticileri sürekli olarak yayan çizgi kaynaklara örnek olarak verilebilir. Bu tür kaynakların atmosferdeki dağılımını tahmin etmek için geliştirilen modeller, özellikle rüzgâr yönü emisyon çizgisine dik olduğunda, yer seviyesindeki kirletici konsantrasyonunu belirli matematiksel ifadelerle hesaplar (Denklem 3.1):

$$C(x, 0) = \frac{2q}{(2\pi)^{0.5}\sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Çizgi kaynaklarda birim mesafe başına emisyon gücü q genellikle g/s/m cinsinden ifade edilir. Burada, q birim uzunluk başına kaynak gücüdür ve σ_z düşey dağılım katsayısıdır. Örneğin, q g/s/m cinsinden ifade edilebilir. Yatay standart sapma σ_y bu denklemde yer almaz çünkü emisyonların farklı bölümlerinden gelen karışımların çapraz yayılımı kendini dengeler. Bu nedenle σ_y Denklem 3.1'de yer almaz çünkü konsantrasyon, belirli bir x-mesafesinde y-yönünde uniform olmalıdır.

Rüzgâr yönü çizgisel kaynağa dik olmadığında, denklemin $\sin(\phi)$ ile bölünmesini önerilir; burada ϕ rüzgâr yönü ile çizgisel kaynak arasındaki açıdır. Ancak bu düzeltme ϕ açısı 45 dereceden küçük olduğunda kullanılmamalıdır.

Gerçek dünyada çizgisel kaynaklar sonsuz uzunlukta değildir, bu nedenle uç noktaların etkisi de dikkate alınmalıdır. Sürekli emisyon yapan çizgisel kaynak makul bir uzunluğa sahip olduğunda, kaynağın iki ucunun neden olduğu kenar etkilerini dikkate almak gerekir. Bu kenar etkileri, kaynak uzunluğu arttıkça çapraz yayılım mesafelerine daha fazla uzandığından, kaynak uzunluğu arttıkça daha önemli hale gelir. Çizgisel kaynak rüzgar yönüne dik olduğunda, x-ekseni rüzgar yönünde ve numune alma noktasından geçen doğrultuda tanımlanır. Bu durumda, çizgisel kaynağın uçları çapraz yönde y_1 ve y_2 konumlarında bulunur; burada y_1 , y_2 'den küçüktür (Denklem 3.2):

$$C(x, 0, 0) = \frac{2q}{(2\pi)^{0,5}\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{(2\pi)^{0,5}} \exp(-5p^2) dp \quad (3.2)$$

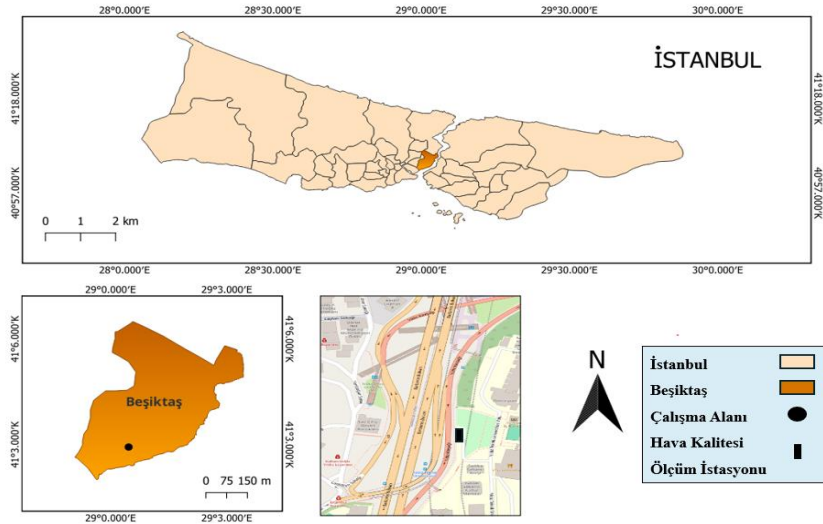
Burada, $p_1=y_1/\sigma_y$ ve $p_2=y_2/\sigma_y$ olarak ifade edilir [61], [62].

4

MATERYAL METOT

4.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmada incelenen yol ağı, İstanbul'un Avrupa yakasında yer alan Beşiktaş ilçesindeki Barbaros Bulvarı , Yıldız Teknik Üniversitesi Yıldız Kampüsü önünden geçen 680x33 metrelik bir yol güzergahını kapsamaktadır. Alan, kuzey-güney yönünde trafik akışına sahip iki ana yol ve iki bağlantı yolunu içermektedir (Şekil 4.1). Trafik aktivitesinin büyük bölümünü oluşturan ana yollar, Beşiktaş ilçesinden başlayarak Zincirlikuyu ilçesinde son bulmaktadır. Yolcu araçları trafik akışına hakim olup özellikle 17.00-18.00 saatleri arasında, akşam iş çıkışı saatlerinde belirgin bir yoğunluk artışı gözlemlenmektedir.



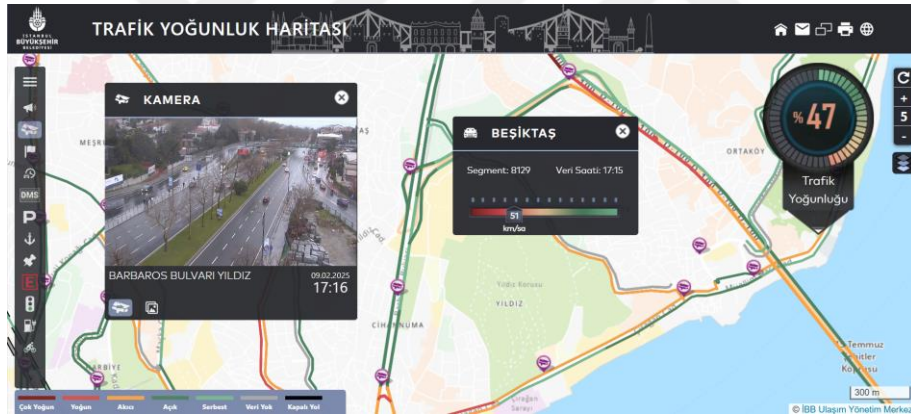
Şekil 4.1 Çalışma Alanı

Çalışma sahasının seçiminde, bölgedeki yüksek trafik hacmi ve buna bağlı olarak oluşan emisyonların önemli bir rolü bulunmaktadır. Ayrıca, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) tarafından işletilen bir hava kalitesi ölçüm istasyonu, kampüs içerisinde, çalışma alanının bitişiğinde yer almaktadır. 41,05 K, 29,00 D

koordinatlarında ve yerden 2 metre yükseklikte konumlanan bu istasyon, sıcaklık, basınç, rüzgar hızı ve yön gibi meteorolojik parametrelerle birlikte CO, NO, NO₂, SO₂, O₃ ve PM₁₀ gibi kirleticileri ölçmektedir. Hava kirleticileri farklı kaynaklardan kaynaklanabilse de, trafik emisyonlarını en iyi temsil eden CO, NO, NO₂ ve PM₁₀ parametreleri bu çalışmada analiz edilmek üzere seçilmiştir. Bu bağlamda, EPA, alıcıların (hava kalitesi ölçüm istasyonları gibi) yol kaynaklarına belirli mesafelerde yerleştirilmesini önermektedir.

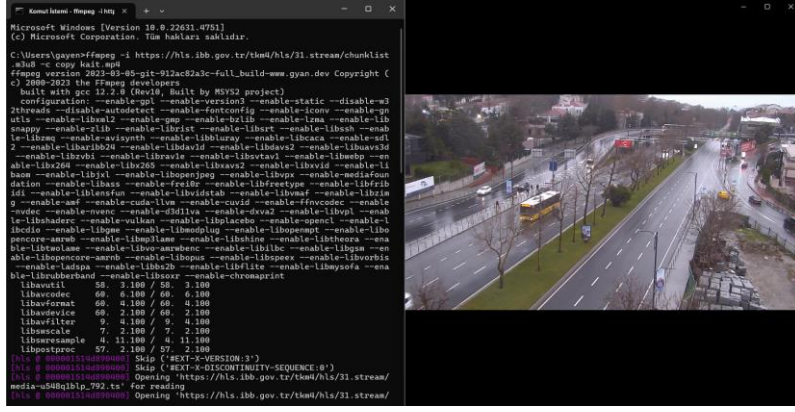
4.2 Taşıt Sayımı

Bu çalışmada, trafik akışı İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezi (uym) resmi web sitesinden, mobese kameraları aracılığıyla 17:00 ile 18:00 saatleri arasındaki yoğun saatlerde gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Sahada yer alan trafik ölçüm sistemleri tarafından UYM'ye iletilen anlık trafik yoğunluk verileri, Trafik Yoğunluk Haritası üzerinden elde edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 UYM trafik yoğunluğu haritası

Video kayıtları, çeşitli iletim protokollerini, medya kapsayıcı formatlarını ve video/ses kodlama standartlarını destekleyen açık kaynaklı bir yazılım olan FFmpeg programı kullanılarak yapılmıştır [63]. Kurulum için gerekli exe dosyaları, FFmpeg resmi web sitesinden temin edilmiştir. FFmpeg programı ile elde edilen video kaydı Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3 FFmpeg programı ile kayıt

UYM'den alınan hız verileri, en düşük hız değerleri esas alınarak seçilmiştir, çünkü bu yaklaşım daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Tablo 4.1'de verilen hız değerleri, 5-51 km/sa arasında değişmektedir.

Tablo 4.1 UYM'den elde edilen araç hızları

Tarih	UYM araç hızları (km/sa)	Tarih	UYM araç hızları (km/sa)	Tarih	UYM araç hızları (km/sa)
07.02.2024	16	23.03.2024	50	06.10.2024	51
13.02.2024	16	31.03.2024	50	09.12.2024	7
13.03.2024	15	01.04.2024	20	07.01.2025	9
14.03.2024	12	02.04.2024	9	08.01.2025	33
18.03.2024	5	16.04.2024	9	09.01.2025	11

FFmpeg programı kullanılarak, 15 farklı günde 17:00-18:00 saatleri arasında video kayıtları gerçekleştirilmiştir. Kayıtlar kapsamında, trafikteki araçlar dört kategoriye ayrılmıştır: otomobil, motosiklet, servis ve otobüs.

Video kayıtlarının analizinde, araç sayımları manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bir saatlik araç sayımları, İstanbul Lojistik Ana Planı'ndan (İSTLAP) alınan İstanbul'daki kayıtlı araçların dağılımına göre oranlanarak değerlendirilmiştir (Tablo 4.2) [64].

Tablo 4.2 İstanbul’da kayıtlı araçların sayısal dağılımı

Kategori	Yakıt	Segment	Euro Standardı	Araç sayısı
Otomobil	Benzin	Orta	Euro 5	1.773.961
Otomobil	Dizel	Orta	Euro 5	1.868.473
Otomobil	LPG	Orta	Euro 5	431.284
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-II	Euro 3	37.981
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-II	Euro 4	64.221
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-II	Euro 5	99.467
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-II	Euro 6	90.831
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-III	Euro 3	43.243
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-III	Euro 4	73.119
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-III	Euro 5	113.249
Hafif Ticari Araç	Dizel	N1-III	Euro 6	103.416
Ağır Vasıta	Dizel	14 - 20 ton	Euro 3	13.638
Ağır Vasıta	Dizel	14 - 20 ton	Euro 4	7.207
Ağır Vasıta	Dizel	14 - 20 ton	Euro 5	4.914
Ağır Vasıta	Dizel	14 - 20 ton	Euro 6	4.216
Ağır Vasıta	Dizel	>32 ton	Euro 3	4.496
Ağır Vasıta	Dizel	>32 ton	Euro 4	8.605
Ağır Vasıta	Dizel	>32 ton	Euro 5	12.194
Ağır Vasıta	Dizel	>32 ton	Euro 6	10.670

4.3 Emisyon Hesaplamaları

Emisyonlar farklı karmaşıklık seviyelerinde tahmin edilebilir. EMEP/EEA Hava Kirlenici Emisyon Envanteri Kılavuzu, IPCC Rehberleri’nde kullanılan yaklaşımı benimseyerek, yöntemlerin giderek artan karmaşıklıkta üç kademedeki sınıflandırılmasını öngörmektedir.

En temel seviye olan Tier 1 yöntemi, yalnızca varsayılan emisyon faktörlerini kullanarak yapılan basit bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde, araç türüne göre yakıt tüketimi (litre bazında) için uluslararası varsayılan parametreler kullanılır. Tier 1 genellikle, ilk aşama hesaplamalarda, yani kabaca bir ön değerlendirme yapmak amacıyla uygulanmaktadır.

Daha gelişmiş bir yaklaşım olan Tier 2 yöntemi, Tier 1’de kullanılan varsayılan emisyon faktörlerinin ülkeye özgü veya teknolojiye özel emisyon faktörleriyle

değiştirilmesini gerektirir. Ayrıca, Tier 1’de toplam olarak ele alınan aktivite verilerinin, farklı araç teknolojilerine göre ayrıştırılması da gerekebilir.

En ileri seviye olan Tier 3 yöntemi, egzoz emisyonlarını, faaliyet verilerini (örneğin, toplam araç kilometresi) ve kesin teknik verileri (örneğin, emisyon faktörleri) bir araya getirerek hesaplamaktadır. Bu yöntem, gelişmiş hesaplama teknikleri ve daha yüksek çözünürlüklü veriler kullanılarak en doğru tahminlerin elde edilmesini amaçlamaktadır.

Tier 1 yöntemi, yalnızca yakıt istatistiklerinden daha ayrıntılı verilerin bulunmadığı durumlarda tercih edilmelidir. Ancak, böyle bir veri eksikliği söz konusu olduğunda, ilgili ülkenin daha gelişmiş yöntemlerin, özellikle de Tier 3’ün uygulanabilmesi için gerekli ayrıntılı istatistikleri toplamak adına kapsamlı çalışmalar yürütmesi gerekmektedir [4].

4.3.1 Tier 1 Yaklaşımı

Tier 1 yaklaşımı, kolay erişilebilen istatistiksel verilere dayanan ve süreçlerin yoğunluğu (aktivite oranları) ile varsayılan emisyon faktörlerini kullanan bir yöntemdir. Egzoz emisyonlarının hesaplanmasında Tier 1 yaklaşımında Denklem 4.1 kullanılmaktadır:

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

Bu denklemde:

E_i = i kirleticisinin emisyonu (g)

$FC_{j,m}$ = m yakıtını kullanan j araç kategorisinin yakıt tüketimi (kg)

$EF_{i,j,m}$ = m yakıtı ve j araç kategorisi için i kirleticisine özgü yakıt tüketim bazlı emisyon faktörü (g/km)

Bu yaklaşımda dikkate alınan araç kategorileri binek araçlar, LCV, HDV ve L kategorisi araçlardır. Yakıt türleri ise dizel, benzin, LPG ve doğalgazdır. Ulusal istatistiklerde araç kategorilerine ilişkin ayrıntılar genellikle bulunmadığından, bu denklem yakıt tüketimi/satış istatistiklerinin araç kategorilerine göre ayrılmasını gerektirir. Çalışmada dikkate alınacak kirleticilere göre, Tier 1 hesaplamasında kullanılan emisyon faktörleri Tablo 4.3’te verilmiştir [4].

Tablo 4.3 Tier 1 emisyon faktörleri [4]

Kategori	Yakıt	CO		
		(g/kg yakıt)		
		Ortalama	Minimum	Maksimum
Binek Araçlar	Benzin	48,36	8,60	338,69
	Dizel	2,41	0,52	11,23
	LPG	58,22	14,56	139,93
LCV	Benzin	118,70	11,75	356,95
	Dizel	6,81	4,82	21,77
HDV	Dizel	6,10	2,79	13,80
	CNG (otobüs)	3,98	2,20	15,12
L kategori	Benzin	244,88	8,46	588,11
Kategori	Yakıt	NO _x		
		(g/kg yakıt)		
		Ortalama	Minimum	Maksimum
Binek Araçlar	Benzin	3,98	0,44	30,49
	Dizel	11,77	7,79	14,84
	LPG	5,48	0,90	41,45
LCV	Benzin	5,93	0,33	37,31
	Dizel	13,48	10,43	27,86
HDV	Dizel	25,95	10,48	47,22
	CNG (otobüs)	17,10	9,67	29,73
L kategori	Benzin	7,23	0,89	22,06
Kategori	Yakıt	PM		
		(g/kg yakıt)		
		Ortalama	Minimum	Maksimum
Binek Araçlar	Benzin	0,02	0,004	0,042
	Dizel	0,78	0,002	4,772
	LPG	0,03	0,012	0,042
LCV	Benzin	0,02	0,005	0,034
	Dizel	1,22	0,002	4,772
HDV	Dizel	0,55	0,015	2,448
	CNG (otobüs)	0,02	0,019	0,036
L kategori	Benzin	0,51	0,058	6,60

Bu çalışmada, Tier 1 yöntemiyle kirletici emisyon kütleleri hesaplanırken ortalama emisyon faktörleri kullanılmıştır. Tablo 4.4, farklı taşıt kategorilerinde kullanılan yakıt türlerine bağlı olarak yakıt tüketiminin g/km cinsinden dağılımını

göstermektedir. Bu tablonun amacı, taşıt türlerine göre yakıt tüketim miktarlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktır.

Tablo 4.4 Tier 1 yakıt tüketimi değerleri [4]

Kategori	Yakıt	Tipik Yakıt Tüketimi (g/km)
Binek Araçlar	Benzin	61,9
	Dizel	56,8
	LPG	58,1
	E85	79,1
	CNG	61,6
LCV	Benzin	72,5
	Dizel	79,0
HDV	Dizel	216,8
	CNG (otobüs)	405,5
L kategori	Benzin	27,7

4.3.2 Tier 2 Yaklaşımı

Tier 2 yaklaşımı, farklı araç kategorilerinin kullandığı yakıt türlerini ve ilgili emisyon standartlarını dikkate alarak daha detaylı bir hesaplama sunar. Bu yöntemde, araç sayısının yanı sıra her bir teknolojiye ait yıllık kat edilen mesafenin (veya teknoloji başına araç-km değerinin) belirlenmesi gerekir. Elde edilen araç-km verileri, Tier 2 emisyon faktörleriyle çarpılarak emisyon tahmini yapılır. Tier 2 yöntemleri, Tier 1'e benzer olmakla birlikte daha karmaşıktır ve belirsizlik seviyesini azaltarak temel emisyon kategorileri için daha güvenilir sonuçlar sağlar. Ayrıca, bu yöntem envanterin geliştirildiği ülkedeki süreç türleri ve spesifik koşullar göz önünde bulundurularak oluşturulan daha ayrıntılı emisyon faktörlerini kullanır [4].

Tier 2 yaklaşımı kapsamında egzoz emisyonlarının hesaplanmasında Denklem 4.2 kullanılmaktadır. Bu denklemde yer alan değişkenler aşağıda tanımlanmıştır:

$$E_{i,j} = \sum_k (N_{j,k} M_{j,k} x EF_{i,j,k}) \quad (4.2)$$

$M_{j,k}$ = j kategorisi ve k teknolojisine ait tüm araçların yıllık ortalama kat ettiği mesafe (km/araç)

$N_{j,k}$ = ülke araç filosunda j kategorisi ve k teknolojisine ait toplam araç sayısı

$EF_{i,j,k}$ = j kategorisi ve k teknolojisi için, kirletici i'ye özgü emisyon faktörü (g/araç-km)

Bu çalışmada ele alınan kirleticiler olan CO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ için, COPERT programında Tier 2 emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan teknolojiye ve yakıt türüne özgü emisyon faktörleri ve yakıt tüketimi değerleri Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.5 Tier 2 emisyon faktörleri (g/kg yakıt) [4]

Kategori	Yakıt	Segment	Euro Standart	CO	NO	NO ₂	NO _x	PM ₁₀
Binek araç	Benzin	Orta	Euro 5	0,797	0,050	0,002	0,052	0,030
	Dizel	Orta	Euro 5	0,038	0,338	0,225	0,563	0,030
	LPG	Orta	Euro 5	0,648	0,058	0,003	0,061	0,030
LCV	Dizel	N1-II	Euro3	0,449	0,760	0,253	1,013	0,113
			Euro 4	0,356	0,369	0,451	0,820	0,080
			Euro 5	0,000	0,770	0,514	1,284	0,043
			Euro 6 a/b/c	0,001	0,741	0,318	1,058	0,043
		N1-III	Euro3	0,449	0,760	0,253	1,013	0,113
			Euro 4	0,356	0,369	0,451	0,820	0,080
			Euro 5	0,000	0,770	0,514	1,284	0,043
			Euro 6 a/b/c	0,001	0,741	0,318	1,058	0,043
HDV	Dizel	Rijit 14-20 ton	Euro III	0,136	5,314	0,865	6,179	0,247
			Euro IV	1,638	3,522	0,573	4,095	0,124
			Euro V	0,849	4,171	0,463	4,635	0,127
			Euro VI A/B/C	1,382	0,561	0,062	0,623	0,096
		Rijit >32 ton	Euro III	1,200	7,776	1,266	9,042	0,323
			Euro IV	2,435	5,243	0,854	6,097	0,149
			Euro V	1,156	5,104	0,567	5,671	0,153
			Euro VI A/B/C	1,977	0,560	0,062	0,622	0,106
L kategori	Benzin	4-zamanlı 250-750 cm ³	Euro 5	0,205	0,015	0,001	0,016	0,012
	Dizel	Mikro otomobil	Euro 5	0,584	0,311	0,208	0,519	0,033

Tablo 4.6 Tier 2 yakıt tüketimi değerleri (g/km) [4]

Kategori	Yakıt	Segment	Euro Standart	Yakıt Tüketimi
Binek araç	Benzin	Orta	Euro 5	66,0
	Dizel	Orta	Euro 5	54,9
	LPG	Orta	Euro 5	54,8
LCV	Dizel	N1-II	Euro3	78,1
			Euro 4	78,1
			Euro 5	78,1
			Euro 6 a/b/c	79,1
		N1-III	Euro3	78,1
			Euro 4	78,1
			Euro 5	78,1
			Euro 6 a/b/c	79,1
HDV	Dizel	Rijit 14-20 ton	Euro III	218,0
			Euro IV	202,9
			Euro V	201,1
			Euro VI A/B/C	201,1
		Rijit >32 ton	Euro III	218,0
			Euro IV	202,9
			Euro V	201,1
			Euro VI A/B/C	201,1
L kategori	Benzin	4-zamanlı 250-750 cm ³	Euro 5	36,0
	Dizel	Mikro otomobil	Euro 5	29,1

4.3.3 Tier 3 Yaklaşımı

Tier 3 yaklaşımı, karayolu taşımacılığında kaynaklanan toplam egzoz emisyonlarını, motorun normal çalışma sıcaklığına ulaştığı durumdaki sıcak emisyonlar ile motorun ısınma sürecinde oluşan soğuk başlatma emisyonlarının toplamı olarak hesaplar. Tier 2'den daha ayrıntılı bir yaklaşım olarak tanımlanır. Sıcak ve soğuk çalışma aşamalarındaki emisyonlar arasında önemli farklılıklar bulunduğu için, bu iki sürecin ayrı değerlendirilmesi gereklidir. Özellikle, motorun ısınma sürecinde belirli kirleticilerin konsantrasyonları sıcak çalışma koşullarına göre çok daha yüksek olabilir. Toplam emisyonlar Denklem 4.3 ile hesaplanabilir:

$$E_{toplam} = E_{sıcak} + E_{soğuk\ başlangıç} \quad (4.3)$$

E_{toplam} = herhangi bir kirleticiye ait toplam emisyonlar (g)

$E_{sıcak}$ = stabil (sıcak) motor çalışma sürecinde oluşan emisyonlar (g)

$E_{soğuk\ başlangıç}$ = geçici termal motor çalışması (soğuk çalıştırma aşamasında) oluşan emisyonlar (g)

Araç emisyonları, motor çalışma koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. Farklı sürüş senaryoları, motor üzerinde farklı çalışma koşulları oluşturur ve dolayısıyla farklı emisyon seviyeleri ortaya çıkar. Bu sebeple, kentsel, kırsal ve otoyol sürüş koşulları birbirinden ayrılarak değerlendirilir.

Her sürüş senaryosu için farklı aktivite verileri ve emisyon faktörleri kullanılır. Soğuk başlangıç emisyonları ağırlıklı olarak kentsel sürüşlere atfedilir, kırsal sürüşlerde daha az etkili olur ve otoyol sürüşlerinde ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, sürüş koşulları dikkate alındığında, toplam emisyonlar aşağıdaki denklemle ifade edilebilir (Denklem 4.4):

$$E_{toplam} = E_{kentsel} + E_{kırsal} + E_{otoyol} \quad (4.4)$$

Burada, $E_{kentsel}$, $E_{kırsal}$, E_{otoyol} belirli sürüş durumlarına bağlı olarak her bir kirletici için toplam emisyon değerlerini (g) temsil etmektedir.

Tier 3 yaklaşımında, toplam emisyonlar her bir araç kategorisi için aktivite verilerinin uygun emisyon faktörleriyle çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Emisyon faktörleri, sürüş koşulları ve iklimsel şartlar gibi giriş verilerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Çalışma alanımızda akıcı trafik olması ve araçlar için herhangi bir park yeri olmaması sebebiyle soğuk başlangıç emisyonları dikkate alınmamıştır. Sıcak egzoz emisyonları, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu faktörler arasında her bir aracın kat ettiği mesafe, hızı (veya yol tipi), yaşı, motor hacmi ve ağırlığı yer almaktadır. Bu emisyonların tahmin edilmesinde temel formül, deneysel olarak elde edilen emisyon faktörleri ile belirli bir zaman dilimi içindeki veriler kullanılarak hesaplanmaktadır. Ay, yıl vb. zaman dilimleri bu uygulamaya bağlıdır. Sıcak egzoz emisyonların hesaplanması için kullanılacak formül Denklem 4.5'teki gibi ifade edilebilir :

$$E_{Sıcak;i,k,r} = N_k \chi M_{k,r} \chi e_{Sıcak;i,k,r} \quad (4.5)$$

Burada;

$E_{Sıcak;i,k,r}$ = ilgili dönemde k teknolojisine sahip araçların r tipi yollarda ürettikleri i kirleticisinin sıcak egzoz emisyonları (g)

N_k = ilgili dönemde k teknolojisine sahip araç sayısı (araç)

$M_{k,r}$ = r tipi yollarda, k teknolojisine sahip araçların km başına kat ettiği mesafe (km/araç)

$e_{sıcak,i,k,r}$ = k teknolojisine sahip araçların, r tipi yollarda çalıştığında i kirleticisi için geçerli emisyon faktörü (g/km)

Sıcak emisyon faktörleri, hız (V) ile doğrudan ilişkilidir ve genellikle g/km birimiyle ifade edilir. Bu faktörler, kullanılan yakıt türüne, araç sınıfına ve motor teknolojisine göre değişiklik göstermektedir. Aşağıda verilen genel denklem, tüm araç sınıfları ve kirleticiler için hız (V) bağımlı emisyon faktörlerini (EF) hesaplamak amacıyla kullanılabilir. Ayrıca, belirli durumlar için bir azaltma faktörü (RF) uygulanabilir (Denklem 4.6):

$$EF = \frac{\alpha x \beta x V^2 x V + \gamma + \delta / V}{\epsilon x V^2 x \zeta x V + \eta} x (1 - RF) \quad (4.6)$$

Burada, EF emisyon faktörünü, V hızını temsil etmektedir. Alfa (α), Beta (β), Gama (γ), Delta (δ), Epsilon (ϵ), Zeta (ζ) ve Eta (η) ise denklemin katsayılarıdır. Bu katsayılar, her bir araç kategorisi, yakıt tipi, emisyon türü ve bazen Euro emisyon standardına bağlı olarak farklılık gösterir. Katsayılar, deneysel veriler ve ölçümler doğrultusunda belirlenmekte olup, emisyon faktörlerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için gereklidir. Azaltma faktörü (RF), belirli emisyon azaltma teknolojilerinin (örn. filtreler, gelişmiş katalitik konvertörler vb.) etkisini hesaba katmak amacıyla kullanılır.

COPERT programında Tier 3 emisyonlarının hesaplanmasında kullanılan teknolojiye ve yakıt türüne özgü emisyon faktörleri ve yakıt tüketim değerleri Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de verilmiştir [4].

Tablo 4.7 Tier 3 emisyon faktörleri (g/kg yakıt) [4]

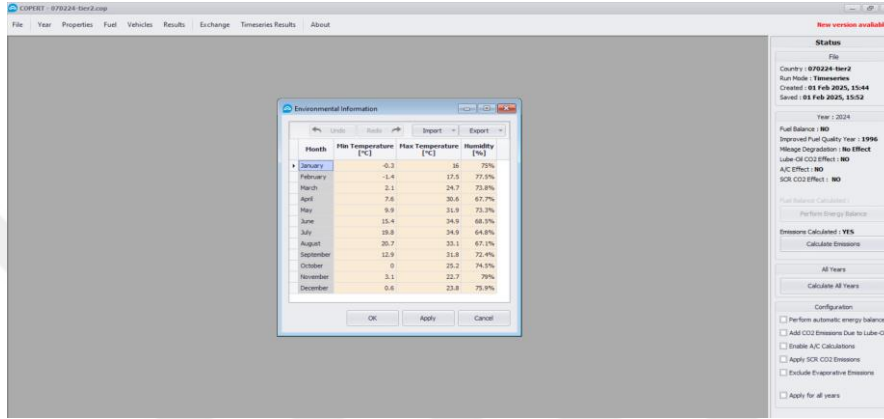
Kategori	Yakıt	Segment	Euro Standart	CO	NO	NO ₂	NO _x	PM ₁₀
Binek araç	Benzin	Orta	Euro 5	0,571	0,054	0,002	0,055	0,037
	Dizel	Orta	Euro 5	0,065	0,538	0,359	0,897	0,037
	LPG	Orta	Euro 5	0,457	0,071	0,004	0,075	0,038
LCV	Dizel	N1-II	Euro3	0,739	1,097	0,366	1,463	0,161
			Euro 4	0,586	0,533	0,651	1,184	0,109
			Euro 5	0,001	0,963	0,642	1,605	0,053
			Euro 6 a/b/c	0,001	0,921	0,395	1,316	0,053
		N1-III	Euro3	0,739	1,097	0,366	1,463	0,161
			Euro 4	0,586	0,533	0,651	1,184	0,109
			Euro 5	0,001	0,963	0,642	1,605	0,053
			Euro 6 a/b/c	0,001	0,921	0,395	1,316	0,053
HDV	Dizel	Rijit 14-20 ton	Euro III	3,729	10,505	1,71	12,215	0,483
			Euro IV	1,999	6,253	1,018	7,27	0,172
			Euro V	3,09	11,664	1,296	12,96	0,197
			Euro VI A/B/C	0,406	1,848	0,205	2,053	0,119
		Rijit >32 ton	Euro III	5,169	14,688	2,391	17,079	0,648
			Euro IV	2,62	9,012	1,467	10,479	0,213
			Euro V	4,235	15,886	1,765	17,651	0,251
			Euro VI A/B/C	0,483	1,562	0,174	1,736	0,133
L kategori	Benzin	4-zamanlı 250-750 cm ³	Euro 5	0,362	0,025	0,001	0,026	0,014
	Dizel	Mikro otomobil	Euro 5	0,584	0,311	0,208	0,519	0,035

Tablo 4.8 Tier 3 yakıt tüketimi değerleri (g/km) [4]

Kategori	Yakıt	Segment	Euro Standart	Yakıt Tüketimi
Binek araç	Benzin	Orta	Euro 5	66,0
	Dizel	Orta	Euro 5	73,1
	LPG	Orta	Euro 5	65,7
LCV	Dizel	N1-II	Euro3	107,0
			Euro 4	107,0
			Euro 5	103,3
			Euro 6 a/b/c	103,3
		N1-III	Euro3	107,0
			Euro 4	107,0
			Euro 5	103,3
			Euro 6 a/b/c	103,3
HDV	Dizel	Rijit 14-20 ton	Euro III	342,9
			Euro IV	301,8
			Euro V	311,1
			Euro VI A/B/C	309,8
		Rijit >32 ton	Euro III	342,9
			Euro IV	301,8
			Euro V	311,1
			Euro VI A/B/C	309,8
L kategori	Benzin	4-zamanlı 250-750 cm ³	Euro 5	36,0
	Dizel	Mikro otomobil	Euro 5	29,1

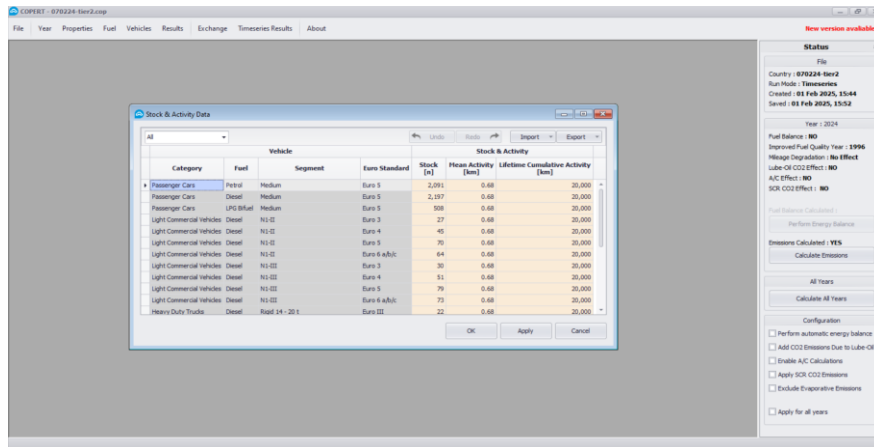
4.3.4 COPERT Yazılımının Uygulanması

Bu çalışmada, araç kaynaklı kirletici emisyonların Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımlarına göre hesaplanabilmesi için COPERT 5.7.3 yazılımı kullanılmıştır [5]. Programda ilgili metodolojinin seçilmesinin ardından, çalışma alanına ait aylık meteorolojik verilerin girilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen aylık minimum ve maksimum sıcaklıklar (°C) ile ortalama bağıl nem (%) verileri kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 COPERT veri girişi (sıcaklıklar ve bağıl nem)

Bir sonraki adımda, İstanbul'daki kayıtlı araçların dağılımına dayalı olarak belirlenen ve video kayıtlarıyla doğrulanan araç sayıları, programın stok-aktivite bölümüne girdi olarak eklenmiştir. Çalışma alanı 680 m olarak tanımlanmış ve ömür boyu kümülatif aktivite değeri 20.000 km olarak kabul edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 COPERT araç envanteri girişi

Tier 2 ve Tier 3 hesaplamalarında bu alanların doldurulması zorunludur. Ayrıca, Tier 3 yaklaşımında kullanıcı tarafından girilmesi gereken formlardan biri

"Dolaşım Aktivitesi" sekmesidir. Bu formda, her araç teknolojisinin sürüş modu başına kat ettiği ortalama hız ile kilometre yüzdesinin (%100 olacak şekilde) belirlenmesi gerekmektedir.

UYM yoğunluk haritasından elde edilen en düşük hız değerleri, "Hız" sekmesinde her bir araç için girilmiş olup, "Paylaşım" sekmesi ise her araç türünün farklı yol tiplerinde ne kadar hareket ettiğini yüzdesel olarak göstermektedir. Bu çalışmada, tüm araçların tamamen yoğun saatlerde çalıştığı varsayılmış ve %100 şehir içi yoğun trafik yüzdesi kabul edilmiştir.

Tier 3'te kullanıcı tarafından girilmesi gereken formlardan bir diğeri de sürüş koşullarıdır. Yük yüzdesi düzeltilmesi, ağır hizmet tipi araçlar ve otobüsler için aracın brüt ağırlık sınıfına ve sürüş moduna bağlı olarak uygulanır. Varsayılan olarak %50 kabul edilir ve COPERT'in temel emisyon faktörlerine karşılık gelir. Yük yüzdeleri 0 (tamamen boş) ile 100 (tamamen yüklü) arasında değişir ve sıcak emisyon faktörleri hesaplanırken dikkate alınır.

Ayrıca, kullanıcı bu formda ağır hizmet araçları ve otobüsler için yolun ortalama eğim sınıfını belirleyebilir. Seçilen araç kategorisine göre her sürüş modu için eğim değeri -%6 (yokuş aşağı) ile +%6 (yokuş yukarı) arasında tanımlanabilir. %0 eğim, temel emisyon faktörlerinde değişiklik yapılmayacağını gösterir. Yol eğim düzeltilmeleri yalnızca belirli hız aralıklarında geçerlidir ve sıcak emisyon faktörleri hesaplanırken uygulanır.

Sonuçlar, CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ kirleticilerinin kütle emisyonları ton cinsinden hesaplanmış ve Excel formatında dışa aktarılmıştır. Bu emisyonlar, sıcak emisyonlar için COPERT programı tarafından tahmin edilmiştir ve daha sonra yer seviyesi ile yüksek konsantrasyonların hesaplanabilmesi için AERMOD modeline girdi olarak kullanılmıştır.

4.3.5 AERMOD Modelinin Uygulanması

AERMOD, EPA tarafından önerilen ve genellikle düzenleyici amaçlarla kullanılan, kararlı durum hüzmeye dağılım modelidir. Kısa mesafelerde (<50 km yarıçap) etkili olup, farklı arazi türlerine başarıyla uygulanabilmektedir. Atmosferik ortamdaki herhangi bir kaynaktan salınan kirletici gazın davranışı, matematiksel olarak Gauss dağılım modeli ile ifade edilebilir.

Model, nokta, hacim, alan ve çizgi kaynakları olmak üzere çeşitli kaynak türlerini işleyebilme kapasitesine sahiptir. Çizgi kaynak türü (LINE), kullanıcılara dikdörtgen kaynaklar için geçerli olan alan (AREA) kaynak türüne alternatif olarak, çizginin başlangıç ve bitiş koordinatları ile genişliği aracılığıyla çizgi kaynaklarını tanımlama imkânı sunar. Bu kaynak türü, AREA kaynak türü ile aynı algoritmaları kullanmakta ve eşdeğer girdi parametreleri için benzer sonuçlar üretmektedir. Çizgi kaynak türü, emisyon oranını $g/m^2/sn$ biriminde kabul etmekte olup, model emisyonların çizgi kaynak boyunca homojen bir şekilde dağıldığını varsaymaktadır. AREA kaynak türünde olduğu gibi, çizgi kaynak türü de tanımlanan sınırlar içerisindeki alıcılarda kirletici konsantrasyonu tahminlerini hesaplamaktadır.

AERMOD modelinin uygulanması, Türkiye'nin hava kalitesi sorunlarının anlaşılması ve yönetilmesi süreçlerinde kritik bir öneme sahiptir. Hava Kirliliği Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği ile Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliği Kontrol Yönetmeliği gibi ulusal düzenlemelerde belirtilen hava kalitesi standartlarına uyumun sağlanmasına ve Türkiye'nin çevresel hedeflerine ulaşılmasına önemli katkılar sunmaktadır. Kirletici konsantrasyonlarını modelleyerek ve elde edilen sonuçları yasal sınır değerlerle karşılaştırarak, yetkili merciler projelerin ve sanayi tesislerinin kabul edilebilir çevresel sınırlar dahilinde faaliyet gösterip göstermediğini değerlendirebilmektedir. Özellikle ÇED Yönetmeliği ve Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği çerçevesinde AERMOD'un Türk mevzuatıyla uyumluluğu, ülkenin çevre koruma çabalarındaki vazgeçilmez rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

Çizgi kaynak türü, emisyon oranını $g/m^2/sn$ cinsinden almakta ve model, emisyonların çizgi kaynağı boyunca düzgün bir şekilde dağıldığını varsaymaktadır. AREA kaynak türlerinde olduğu gibi, çizgi kaynak türü de boyutlar içerisinde bulunan alıcılardaki konsantrasyonu tahminlerini içermektedir.

AERMOD'da bir çizgi kaynağı tanımlarken, aşağıdaki parametreler gereklidir (Tablo 4.9):

Tablo 4.9 Modelde çizgi kaynağının tanımlanması

SO LOCATION	SrcID Src typ Xs1 Ys1 Xs2 Ys2 Zs
SO SRCPARAM	SrcID Lnemis Relhgt Width (Szinit)

Model girdileri içerisinde Kaynak Kimliği (SrcID), hesaplama yapılan kaynağı tanımlamak için kullanılmaktadır. Kaynak türü (Src typ) parametresi ise, kaynağın tipini belirtir ve açık yol emisyonları söz konusu olduğunda LINE olarak tanımlanır. Hat kaynağının geometrisini tanımlamak için Xs1 Ys1 Xs2 Ys2 parametreleri kullanılır; bunlar hat kaynağının başlangıç ve bitiş noktalarının merkez koordinatlarını (X ve Y) ifade eder. Zs parametresi, kaynağın deniz seviyesinden yüksekliğini gösteren taban kotunu metre cinsinden (mPD) belirtmektedir. Emisyon özelliklerini tanımlayan parametrelerden Lnemis, emisyon oranını ifade ederken $g/m^2/sn$, Relhgt emisyonların salınım yüksekliğini tanımlar (m). Kaynağın fiziksel boyutlarını belirlemek için Genişlik parametresi, hat kaynağının genişliğini gösterirken, Szinit parametresi çizgi kaynağının başlangıçtaki dikey boyutunu ifade etmek için kullanılmaktadır.

AERMOD modeli, beş ana bölümden oluşur: kontrol, kaynak, alıcı, meteorolojik ve çıktı seçenekleri. Kontrol bölümünde, kirleticiler, hesaplama süresi, depozisyon ve arazi kullanımı gibi seçenekler tanımlanır. Kaynak bölümünde, kirletici kaynaklarının konum bilgileri, her bir kaynağa ait parametreler ve kaynakların nasıl gruplandırılacağına dair bilgiler yer alır. Alıcı bölümünde ise, kirleticilerin birikeceği ızgara sistemi tanımlanır. Meteoroloji bölümünde, AERMOD'un AERMET adlı meteorolojik ön işlemcisi kullanılarak model alanı için atmosferik koşullar sağlanır. Çıktı bölümünde ise, modelin üreteceği sonuçların formatı belirlenir.

Bu çalışmada, AERMOD hava kalitesi modelleme sistemi kullanılarak doğrusal bir kaynak (line source) için modelleme yapılmıştır. Modelleme sürecinde, emisyon kaynağı, reseptör konumları ve meteorolojik girdiler belirlenerek, kirleticilerin atmosferdeki dağılımı analiz edilmiştir. [11], [65].

Çalışmada, AERMOD model alanında kirleticiler sırasıyla CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ olarak seçilmiş ve reseptör yükseklikleri 0, 0,25, 0,50, 1,0, 1,5 ve 2 m olarak

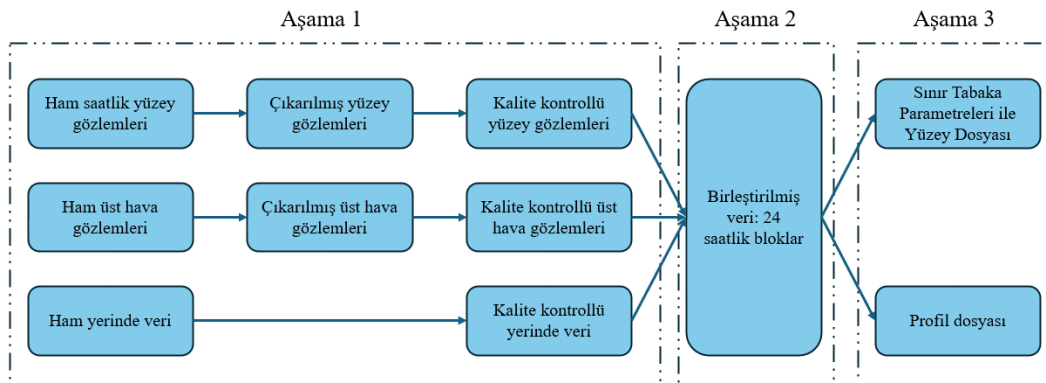
belirlenmiştir. Doğrusal kaynağının koordinatları tanımlanmış ve kaynağa ilişkin emisyon hızı, yükseklik gibi parametreler atanmıştır. Tanımlanan tüm kaynaklar, tek bir grup içinde değerlendirilmiştir.

Bu düzenlemeler, modelin doğruluğunu ve çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak amacıyla dikkatlice belirlenmiştir.

4.3.6 AERMET Ön İşlemcisi

AERMOD modeli, meteorolojik girdiler için AERMOD'un ön işlemcisi olan AERMET tarafından işlenen verilere ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda, yüzey meteoroloji verileri .sfc dosya formatında, profil meteoroloji verileri ise .pfl dosya formatında model için sağlanmaktadır. AERMET'in çalışabilmesi için yüzey özellikleri, bulut örtüsü, sabah saatlerinde yapılan yüksek hava sıcaklığı ölçümleri ile rüzgar hızı, rüzgar yönü ve sıcaklığın yüzeye yakın bir seviyede ölçülmesi gerekmektedir.

AERMOD'un veri akış süreci Şekil 4.6'da gösterilmiştir. İlk aşamada, ham yüzey ve üst atmosferin saatlik verileri kalite kontrolünden geçirilmekte ve karışım yüksekliği hesaplanmaktadır. İkinci aşamada, tüm veriler tek bir dosyada birleştirilerek düzenlenmektedir. Üçüncü aşamada ise arazi kullanım parametreleri olan yüzey pürüzlülüğü, albedo ve Bowen oranı tanımlanarak saatlik sınır tabaka değerleri belirlenmektedir. Son aşamada, farklı seviyelerdeki rüzgar hızı, rüzgar yönü, sıcaklık ve rüzgar bileşenlerinin standart sapmalarını içeren .pfl formatındaki profil dosyası ile yüzey meteorolojik verilerini içeren .sfc formatındaki dosya oluşturulmaktadır [65].



Şekil 4.6 AERMET veri akış süreci

Bu alışmada, AERMET n işlemcisi için gerekli yüzey meteoroloji verileri (sıcaklık, rüzgar hızı ve rüzgar yönü), 07 şubat 2024 ile 09 Ocak 2025 tarihleri arasında Beşiktaş istasyonundan temin edilmiştir. Arazi kullanım özellikleri ve mevsimsel değişkenler dikkate alınarak, albedo, Bowen oranı ve yüzey pürüzlülüğü (m) için farklı değerler belirlenmiştir. AERMET tarafından üretilen .sfc ve .pfl dosyaları, AERMOD modeline girdi olarak aktarılmıştır. Modelleme sürecinde, incelenen yol ağı "izgi kaynağı", hava kalitesi ölçüm istasyonu ise "alıcı noktası" olarak tanımlanmıştır.



5

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Araç Sayımı Sonuçları

Video kayıtlarının analizinde, araç sayımları manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Video kayıt tarihleri ve araç sayım sonuçları Tablo 5.1’de sunulmaktadır.

Tablo 5.1 Araç sayımı sonuçları

Video Kayıt Tarihi	Otomobil	Servis	Otobüs	Motosiklet	Toplam
07.02.2024	4796	439	106	357	5698
13.02.2024	4591	449	122	334	5496
13.03.2024	4529	306	155	312	5302
14.03.2024	4060	432	91	313	4896
18.03.2024	4393	271	116	336	5116
23.03.2024	4310	118	122	205	4755
31.03.2024	3328	106	165	315	3914
01.04.2024	4904	399	107	477	5887
02.04.2024	2878	306	78	209	3471
16.04.2024	4155	167	150	444	4916
06.10.2024	4685	116	137	763	5701
09.12.2024	3782	308	85	215	4390
07.01.2025	4260	392	113	495	5260
08.01.2025	4570	414	122	547	5653
09.01.2025	4151	412	98	399	5060

Otomobil sayıları

- En fazla otomobil 01.04.2024'te (4904) sayılmıştır.
- En düşük otomobil trafiği 02.04.2024'te (2878) görülmüştür.
- Genel olarak 4000 - 4800 aralığında değişen bir yoğunluk vardır, ancak bazı tarihlerde düşüş görülmektedir.

Servis araçları

- Servis sayıları genellikle 100-400 arasında değişmektedir.
- 23.03.2024 (118) ve 06.10.2024 (116) tarihlerinde servis kullanımı oldukça düşükken, 07.02.2024 (439) ve 07.01.2025 (392) tarihlerinde en yüksek seviyelerdedir.

Motosiklet sayıları

- En fazla motosiklet 06.10.2024'te (763) gözlemlenmiştir.
- 23.03.2024 (205) ve 02.04.2024 (209) gibi tarihlerde motosiklet trafiği oldukça düşüktür.

En yoğun trafik günleri 07.02.2024 ve 01.04.2024 tarihlerinde gözlemlenmiştir. Her iki günde de toplam araç sayısı 5800'e yaklaşmıştır. Buna karşılık, en düşük trafik günlerinden biri 02.04.2024 tarihinde kaydedilmiş olup, bu tarihte tüm araç kategorilerinde belirgin bir azalma görülmüştür.

Özellikle 06.10.2024 tarihinde motosiklet trafiği dikkate değer bir artış göstermiştir. Bu tarihte 763 motosiklet sayılmış olup, diğer günlere kıyasla belirgin bir fark gözlemlenmiştir.

Genel olarak, toplam araç sayısında ve araç türlerine göre dağılımda zaman içinde belirgin dalgalanmalar mevcuttur. Otomobiller, trafik yoğunluğunu belirleyen en baskın ulaşım modu olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, servis ve otobüs kullanımı belirli günlerde artış veya azalış göstererek alternatif ulaşım tercihlerine işaret etmektedir. Trafik hacmi tarihsel olarak özel günler, tatiller ve hava koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

5.2 Emisyon Sonuçları

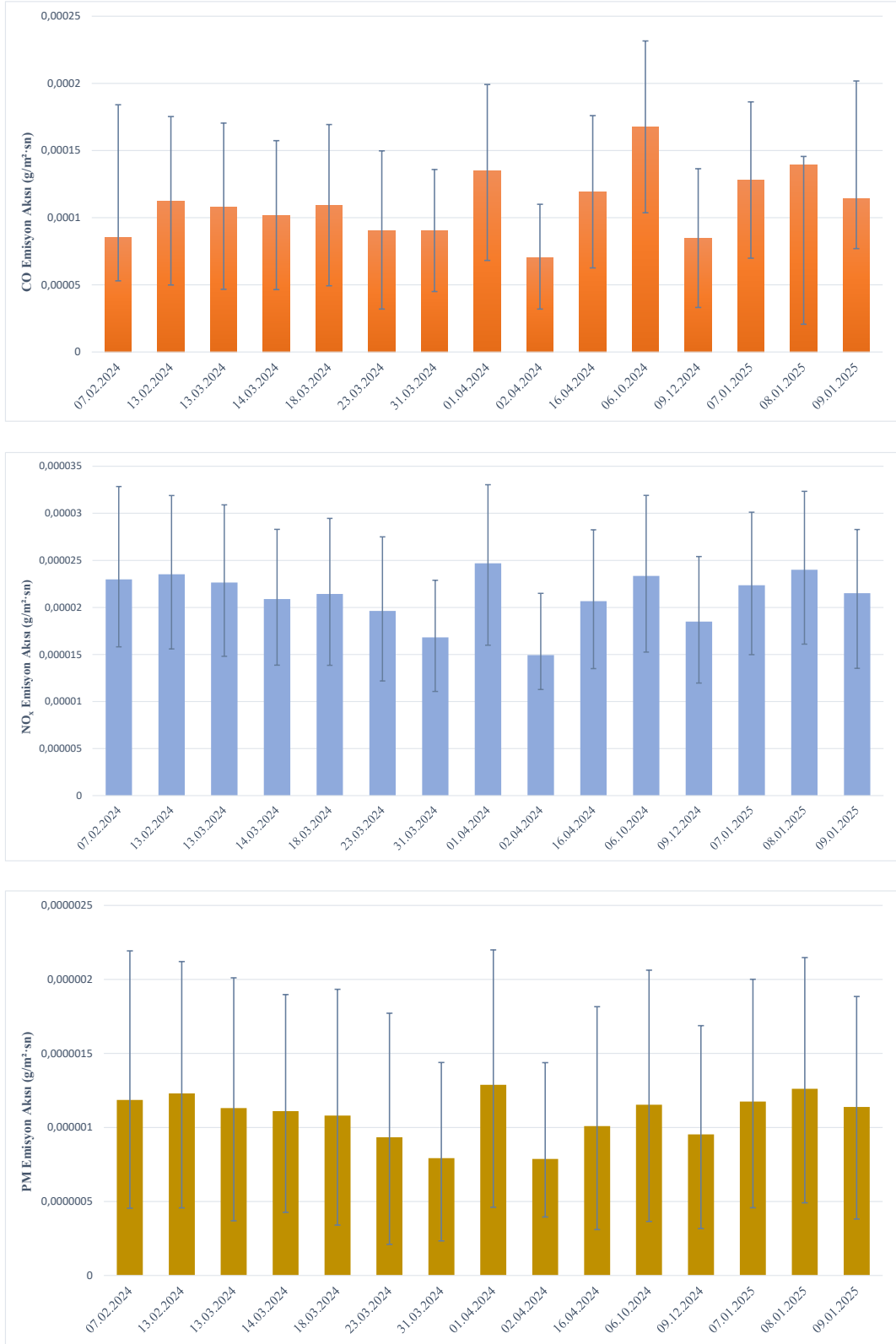
5.2.1 Tier 1 Yaklaşımı Sonuçları

Bu çalışmada, EMEP/EEA Hava Kirleticisi Emisyon Envanteri Kılavuzunda belirtilen Tier 1 yaklaşımı kullanılarak, farklı tarihlerdeki araç sayıları temelinde kirleticilerin emisyonları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, en iyi ve en kötü senaryoları içerecek şekilde sunulmuştur. Senaryolarda, binek araç sayısının en fazla olduğu dikkate alınarak bu araçlar için belirlenen emisyon faktörleri göz önünde bulundurulmuştur.

CO kirleticisine ait emisyon akısı Şekil 5.1’de değerleri sunulmuştur. En iyi senaryo için, yakıt türü olarak dizel (2,41 g/km yakıt) seçilmiş olup, hesaplanan emisyon akıları $2,07 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $1,04 \times 10^{-4}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda ise benzin (48,36 g/km yakıt), dizel ve LPG yakıt türleri arasındaki araç sayısı oranlarına göre hesaplanan CO emisyon akısı $7,03 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $1,68 \times 10^{-4}$ g/m²/sn arasında değişmekte olup, bu durum, emisyon seviyelerinin normal koşullar altında nasıl farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. En kötü senaryo için ise LPG (58,22 g/km) yakıt türüne dayalı hesaplanan emisyon akıları $1,10 \times 10^{-4}$ g/m²/sn ile $2,32 \times 10^{-4}$ g/m²/sn arasında değişerek maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.

NO_x kirleticisine ait emisyon akısı değerleri Şekil 5.1’de sunulmuştur. En iyi senaryo için benzin (3,98 g/km yakıt) yakıt türüne dayalı hesaplanan emisyon akıları $1,11 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $1,61 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda benzin, dizel ve LPG (5,48 g/km yakıt) yakıt türlerine dayalı olarak hesaplanan NO_x emisyon akısı $1,49 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $2,47 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmekte olup, bu durum da emisyon seviyelerinin normal koşullar altında nasıl farklılık gösterdiğini gözler önüne sermektedir. En kötü senaryo için dizel (11,77 g/km yakıt) yakıt türüne dayalı hesaplanan emisyon akıları ise $2,15 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $3,30 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişerek, maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.

PM kirleticisine ait emisyon akısı değerleri Şekil 5.1’de sunulmuştur. En iyi senaryo için benzin (0,02 g/km yakıt) yakıt türüne dayalı hesaplanan emisyon akıları $2,019 \times 10^{-7}$ g/m²/sn ile $4,91 \times 10^{-7}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda benzin, dizel ve LPG (0,03 g/km yakıt) yakıt türlerine dayalı olarak hesaplanan PM emisyon akısı $7,87 \times 10^{-7}$ g/m²/sn ile $1,28 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmekte olup, bu durum da emisyon seviyelerinin normal koşullar altında nasıl farklılık gösterdiğini gözler önüne sermektedir. En kötü senaryo için dizel (0,78 g/km yakıt) yakıt türüne dayalı hesaplanan emisyon akıları ise $1,44 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $2,19 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişerek, maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.



Şekil 5.1 Tier 1’de farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan CO, NO_x ve PM emisyonlarının (g/m²/sn) dağılımı

Grafikte gösterilen hata çubukları, her bir senaryoya ait belirsizlik aralıklarını ifade etmektedir. Bu belirsizlikler, ölçüm ve hesaplama süreçlerindeki olası hataların yanı sıra trafik hacmi ve çevresel koşullardaki değişkenliği de yansıtmaktadır.

07.02.2024:

07 Şubat'ta toplam araç sayısı, diğer tarihlere kıyasla en yüksek ikinci değere sahiptir. Bu tarihte özellikle otomobil ve genel araç sayılarının nispeten daha yüksek olması, CO emisyonları üzerinde doğrudan etkili olmuştur. CO kirleticisi açısından değerlendirildiğinde, en iyi ve en kötü senaryo arasında belirgin bir fark gözlemlenmiştir. En kötü senaryoda ($1,84 \times 10^{-4}$ g/m²/sn) hesaplanan emisyon değeri, en iyi senaryoya ($5,30 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) kıyasla yaklaşık dört kat daha yüksektir. Benzer şekilde, NO_x emisyonları açısından en kötü senaryonun ($3,28 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) en iyi senaryoya ($1,58 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) göre yaklaşık iki kat, PM emisyonlarının ise 5 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($2,19 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ve $4,57 \times 10^{-7}$ g/m²/sn). Bu bulgular, araç sayısındaki artışın emisyon seviyelerini doğrudan etkilediğini ve farklı senaryolar arasındaki değişimin kirleticili türlerine göre farklı oranlarda gerçekleştiğini göstermektedir.

13.02.2024:

13 Şubat'ta, CO emisyonları için en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yine oldukça büyüktür. Ortalama senaryo ($1,12 \times 10^{-4}$ g/m²/sn), en iyi senaryoya ($4,99 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) göre yaklaşık iki kat daha yüksek emisyon değeri göstermektedir. NO_x emisyonları için en kötü senaryo ($3,18 \times 10^{-5}$ g/m²/sn), en iyi ($1,55 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) senaryoya kıyasla iki kat daha yüksek iken, PM emisyonlarında bu fark yaklaşık dört buçuk katına çıkmaktadır. Araç sayısı bu tarihte ortalama seviyelerdedir.

13.03.2024:

Bu tarihte, CO emisyonları için en iyi ($4,66 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) ve en kötü ($1,7 \times 10^{-4}$ g/m²/sn) senaryolar arasındaki fark yaklaşık üç buçuk kattır. NO_x emisyonları için en kötü senaryo ($3,09 \times 10^{-5}$ g/m²/sn), en iyi ($1,48 \times 10^{-5}$ g/m²/sn) senaryoya kıyasla iki kat daha yüksek iken, PM emisyonlarında bu fark yaklaşık beş buçuk katına çıkmaktadır ($2,01 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ve $3,69 \times 10^{-7}$ g/m²/sn). Araç sayısı bu tarihte ortalama seviyelerdedir.

14.03.2024:

14 Mart'ta, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık üç buçuk kat olarak belirlenmiştir. NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık 4,5 kat olarak hesaplanmıştır.

18.03.2024:

Bu tarihte, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık üç buçuk kat olarak gözlemlenmiştir. NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık beş buçuk kat olarak belirlenmiştir.

23.03.2024:

23 Mart'ta, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık beş kat olarak hesaplanmıştır. NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık sekiz buçuk kat olarak tespit edilmiştir.

31.03.2024:

Bu tarihte, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık 3 kat olarak belirlenmiştir. NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık altı kat olarak hesaplanmıştır.

01.04.2024:

1 Nisan'da, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık üç kat olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ortalama senaryoda hesaplanan CO emisyon değeri, en iyi senaryoya kıyasla yaklaşık iki kat daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu tarih, hem ortalama senaryo değerinin en yüksek olduğu hem de hata çubuklarının en uzun olduğu gündür ve araç sayısının en fazla olduğu gündür. NO_x ve PM kirleticilerinin emisyon miktarı, en yüksektir ($2,47 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ve $1,28 \times 10^{-6}$ g/m²/sn) ve senaryolar arası belirsizlik de maksimum seviyededir.

02.04.2024:

2 Nisan tarihinde, CO, NO_x ve PM emisyonları ($7,03 \times 10^{-5}$ g/m²/sn, $1,49 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ve $7,87 \times 10^{-7}$ g/m²/sn), analiz edilen dönem içindeki en düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu tarihte, toplam araç sayısı da en düşük düzeyde kaydedilmiştir.

16.04.2024:

16 Nisan'da, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık 2,8 kattır. NO_x emisyonları için en iyi ve en kötü senaryo arasındaki fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık altı kat olarak hesaplanmıştır.

06.10.2024:

Bu tarih, CO emisyonları açısından hem ortalama senaryo değerinin en yüksek olduğu hem de hata çubuklarının en uzun olduğu gün olarak dikkat çekmektedir. CO emisyon miktarı, diğer günlere kıyasla belirgin şekilde yüksek olup $1,67 \times 10^{-4}$ g/m²/sn olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, senaryolar arasındaki belirsizlik de bu tarihte maksimum seviyeye ulaşmıştır. Özellikle motosiklet sayısının yüksek olduğu bugün de CO emisyonlarının en yüksek olduğu gözlemlenmiştir çünkü CO emisyon faktörü, motosikletlerde diğer araçlara kıyasla daha yüksektir (244,88 g/km yakıt).

07.01.2025:

Bu tarihte, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık üç kat olarak belirlenmiştir. NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık dört buçuk kat olarak hesaplanmıştır.

08.01.2025:

8 Ocak'ta, hata çubuklarının diğer günlere kıyasla daha kısa olmasına rağmen, CO, NO_x ve PM emisyonlarının ortalama senaryo değerleri ($1,4 \times 10^{-4}$ g/m²/sn, $2,4 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ve $1,26 \times 10^{-6}$ g/m²/sn) nispeten yüksek seviyelerde seyretmiştir. Bu tarihte, toplam araç sayısının görece yüksek olması, CO emisyonları üzerinde doğrudan etkili olmuştur.

09.01.2025:

Bu tarihte, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark yaklaşık iki buçuk kat olarak hesaplanmıştır. NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat, PM emisyonları için ise yaklaşık 4,9 kat olarak belirlenmiştir.

Genel olarak, emisyon seviyeleri araç sayısındaki değişimle doğrudan ilişkilidir ve farklı kirleticiler için senaryolar arasındaki farklar değişkenlik göstermektedir. CO emisyonları için en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark genellikle iki buçuk ile beş kat arasında değişirken, NO_x emisyonları için bu fark yaklaşık iki kat seviyesinde sabit kalmıştır. PM emisyonlarında ise dört buçuk ile sekiz buçuk kat arasında değişen daha büyük farklar gözlemlenmiştir. Özellikle araç yoğunluğunun yüksek olduğu günlerde, CO emisyonları belirgin şekilde artarken, senaryolar

arasındaki belirsizlik de maksimum seviyeye ulaşmıştır. Buna karşın, araç sayısının en düşük olduğu günlerde emisyon seviyeleri de minimum değerlere gerilemiştir. Bu bulgular, trafik yoğunluğunun hava kalitesi üzerindeki etkisini ve farklı senaryoların emisyon tahminlerindeki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

5.2.2 Tier 2 Yaklaşımı Sonuçları

COPERT programı kullanılarak, farklı tarihlerdeki araç sayıları, Euro standartları ve yakıt türleri dikkate alınarak kirlетici emisyonları Tier 2 yöntemine göre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, en iyi ve en kötü senaryoları kapsayacak şekilde sunulmuş olup, binek araç sayısının en fazla olduğu durum temel alınarak, bu araçlara ait emisyon faktörleri değerlendirilmiştir.

CO kirlетicisine ait emisyon akısı değerleri Şekil 5.2’de sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip dizel araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,0564 g/km yakıt olarak belirlenmiş olup, CO emisyon akısı $1,53 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $3,80 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, Euro 5 standardına sahip benzin (0,7965 g/km yakıt), dizel (0,0383 g/km yakıt) ve LPG (0,6481 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan CO emisyon akısı $5,64 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,22 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmekte olup, bu durum emisyon seviyelerinin normal koşullar altında farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip LPG’li araçlar için hesaplanan CO emisyon akısı $8,12 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,37 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmekte ve maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.

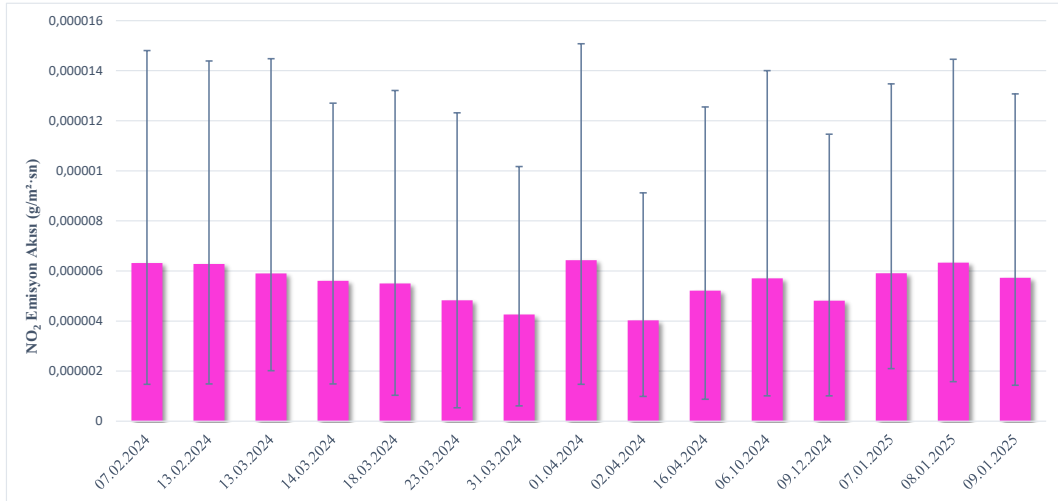
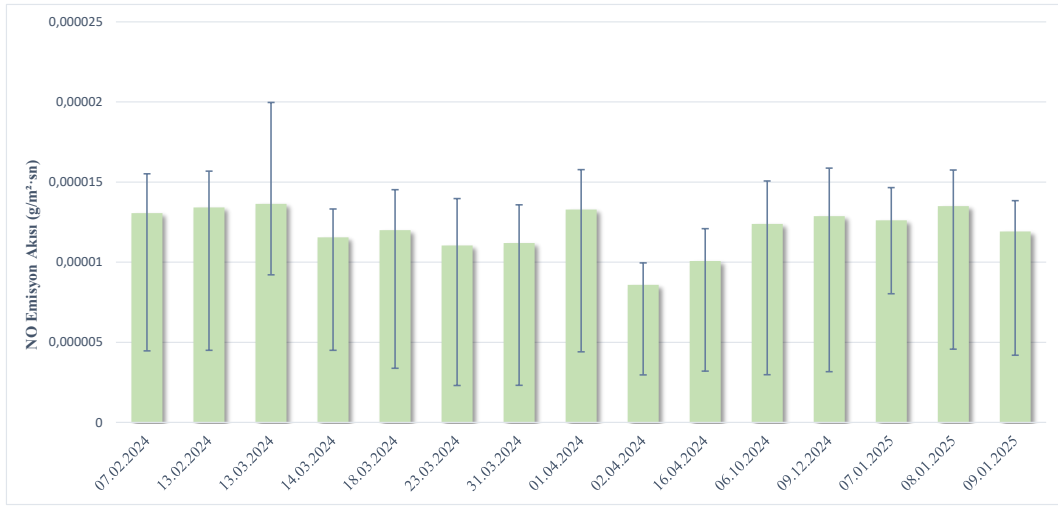
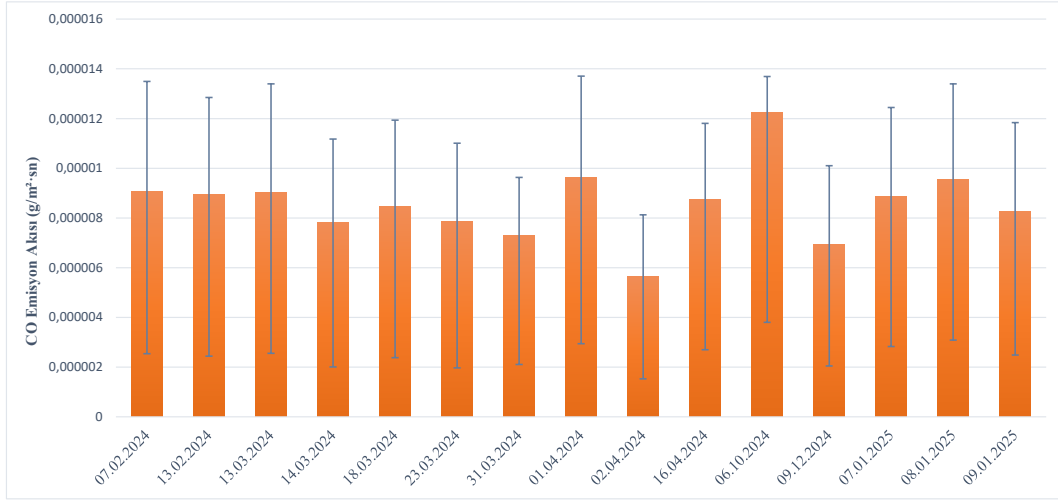
NO emisyon akısı değerleri de Şekil 5.2’de sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,0388 g/km yakıt olup, hesaplanan NO emisyon akısı $2,30 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $9,21 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, Euro 5 standardına sahip benzinli (0,0502 g/km yakıt), dizel (0,3378 g/km yakıt) ve LPG’li (0,0579 g/km yakıt) araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $1,36 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $8,58 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip dizel araçlar için hesaplanan emisyon akısı $9,95 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,99 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişerek, maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.

Benzer şekilde, NO₂, NO_x ve PM₁₀ emisyon akısı değerleri de Şekil 5.2’de sunulmuş olup farklı senaryolara göre detaylı olarak hesaplanmıştır.

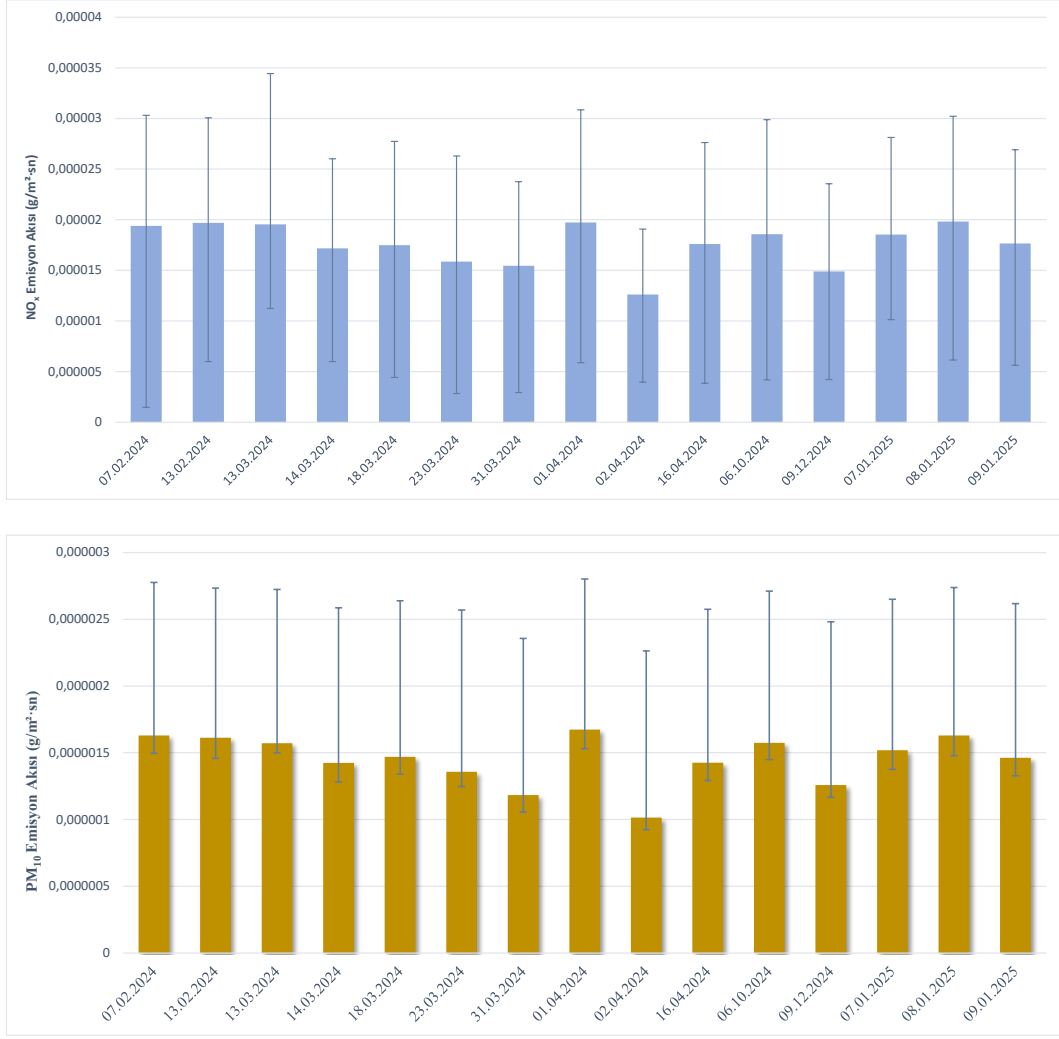
Şekil 5.2’de sunulan NO₂ emisyon akısı değerleri incelendiğinde, en iyi senaryoda benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörünün 0,0008 g/km yakıt olduğu ve emisyon akısının $5,36 \times 10^{-7}$ g/m²/sn ile $2,10 \times 10^{-6}$ g/m²/sn değiştiği görülmektedir. Ortalama senaryoda, benzin (0,0016 g/km yakıt), dizel (0,2252 g/km yakıt) ve LPG (0,0030 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $4,02 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $6,43 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise dizel araçlar için belirlenen emisyon faktörü 0,3533 g/km yakıt olup, hesaplanan emisyon akısı $9,12 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,50 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir.

NO_x kirleticisine ait emisyon akısı değerleri de Şekil 5.3’te sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,0396 g/km yakıt olup, emisyon akısı $1,47 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,12 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, benzin (0,0517 g/km yakıt), dizel (0,5630 g/km yakıt) ve LPG (0,061 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $1,26 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $1,98 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip dizel araçlar için belirlenen emisyon faktörü 0,6424 g/km yakıt olup, hesaplanan emisyon akısı $1,90 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $3,44 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir.

PM₁₀ kirleticisine ait emisyon akısı değerleri de Şekil 5.3’te sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,03 g/km yakıt olup, emisyon akısı $9,24 \times 10^{-7}$ g/m²/sn ile $1,53 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, benzin (0,0304 g/km yakıt), dizel (0,0296 g/km yakıt) ve LPG (0,0301 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $1,01 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,67 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip dizel araçlar için belirlenen emisyon faktörü 0,086 g/km yakıt olup, hesaplanan emisyon akısı $2,26 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $2,80 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişerek maksimum seviyeleri yansıtmaktadır.



Şekil 5.2 Tier 2’de farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan CO, NO ve NO₂ emisyonlarının (g/m²/sn) dağılımı



Şekil 5.3 Tier 2’de farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan NO_2 ve PM_{10} emisyonlarının ($\text{g/m}^2/\text{sn}$) dağılımı

01.04.2024:

Bu tarihte, CO ve NO_x emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasında yaklaşık beş kat fark gözlemlenirken, PM emisyonları açısından bu fark yaklaşık iki kat olarak belirlenmiştir. NO_x ’in bileşenlerinden NO ve NO_2 , sırasıyla %70 ve %30 oranında katkı sağlamaktadır. Aynı tarihte araç sayısı en yüksek seviyeye ulaşmış olup, bu durum CO ve NO_x emisyonlarının belirgin şekilde artmasına neden olmuştur. Öte yandan, PM_{10} emisyon seviyeleri nispeten daha düşük kalmıştır. NO, NO_2 , NO_x ve PM_{10} en yüksek dereceye sahip bileşenler olarak öne çıkmaktadır.

02.04.2024:

2 Nisan’da, CO, NO_x ve PM emisyonlarının analiz edilen dönem içerisindeki en düşük seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir. CO ve NO_x kirleticileri açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasında yaklaşık beş katlık bir fark bulunurken, PM için bu fark yaklaşık iki kat olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu tarihte araç sayısının en düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ seviyeleri bu gün boyunca düşük kalmıştır.

06.10.2024:

Bu tarih CO emisyonları açısından hem ortalama senaryo değerinin en yüksek olduğu gün olarak dikkat çekmektedir. CO emisyon miktarı, diğer günlere kıyasla belirgin şekilde yüksek olup $1,22 \times 10^{-5}$ g/m²/sn olarak hesaplanmıştır. Özellikle motosiklet sayısının yüksek olduğu bugün de CO emisyonlarının en yüksek olduğu gözlemlenmiştir çünkü CO emisyon faktörü, motosikletlerde (0,5844 g/km yakıt) diğer araçlara kıyasla daha yüksektir. NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ diğer günlere kıyasla yüksek dereceye sahip bileşenler olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmada EURO 4, 5 ve 6 emisyon standartlarına sahip araçlar dikkate alınmış ve farklı yakıt türleri ile emisyon faktörlerine göre değerlendirmeler yapılmıştır. Genel olarak, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasında yaklaşık 4 ila 5 katlık bir fark gözlemlenmiştir. NO_x bileşenleri incelendiğinde, NO yaklaşık %70, NO₂ ise yaklaşık %30 oranında katkıda bulunarak toplam NO_x seviyesini belirlemiştir. NO_x emisyonları için en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark 5 ila 9 kat arasında değişirken, PM₁₀ emisyonları açısından bu fark 1,5 ila 2 kat arasında kalmıştır.

Araç sayısının en yüksek seviyeye ulaştığı tarih 1 Nisan 2024 olmasına rağmen, motosiklet sayısının en fazla olduğu gün 6 Ekim 2024’tür. Bu durum, CO emisyonlarının en yüksek seviyeye 6 Nisan’da ulaşmasına neden olmuştur. Öte yandan, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ seviyeleri 1 Nisan’da en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Özellikle araç yoğunluğunun arttığı günlerde CO emisyonlarının belirgin şekilde yükseldiği ve senaryolar arasındaki belirsizliğin maksimum seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir. Buna karşın, araç sayısının en düşük olduğu günlerde emisyon seviyelerinin de minimum değerlere gerilediği gözlemlenmiştir.

Bu bulgular, trafik yoğunluğunun hava kalitesi üzerindeki etkisini ve farklı senaryoların emisyon tahminlerindeki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

5.2.3 Tier 3 Yaklaşımı Sonuçları

COPERT programı kullanılarak, farklı tarihlerdeki araç sayıları, Euro standartları yakıt türleri ve hız değerleri dikkate alınarak kirletici emisyonları Tier 3 yöntemine göre hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, en iyi ve en kötü senaryoları kapsayacak şekilde sunulmuş olup, binek araç sayısının en fazla olduğu durum temel alınarak, bu araçlara ait emisyon faktörleri değerlendirilmiştir.

CO kirleticisine ait emisyon akısı değerleri Şekil 5.4'te sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip dizel araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,0802 g/km yakıt olarak belirlenmiş olup, CO emisyon akısı $1,85 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $4,49 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, Euro 5 standardına sahip benzin (0,5714 g/km yakıt), dizel (0,0648 g/km yakıt) ve LPG (0,4574 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan CO emisyon akısı $6,42 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,18 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmekte olup, bu durum emisyon seviyelerinin normal koşullar altında farklılık gösterebileceğini ortaya koymaktadır. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip LPG'li (0,4574 g/km yakıt) araçlar için hesaplanan CO emisyon akısı $7,95 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,33 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmekte ve maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.

NO kirleticisine ait emisyon akısı değerleri de Şekil 5.4'te sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip benzinli araçlar için emisyon faktörü 0,0552 g/km yakıt olup, hesaplanan NO emisyon akısı $1,98 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,22 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, Euro 5 standardına sahip benzin (0,0537 g/km yakıt), dizel (0,5381 g/km yakıt) ve LPG (0,712 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $9,61 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $2,62 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip dizel (0,4157 g/km yakıt) araçlar için hesaplanan emisyon akısı $1,09 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $3,45 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişerek, maksimum emisyon seviyelerini yansıtmaktadır.

Şekil 5.4'te sunulan NO₂ emisyon akısı değerleri incelendiğinde, en iyi senaryoda benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörünün 0,0011 g/km yakıt olduğu ve emisyon akısının $4,86 \times 10^{-7}$ g/m²/sn ile $2,33 \times 10^{-6}$ g/m²/sn değiştiği görülmektedir. Ortalama senaryoda, benzin (0,0017 g/km yakıt), dizel (0,3587 g/km yakıt) ve LPG (0,0037 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı

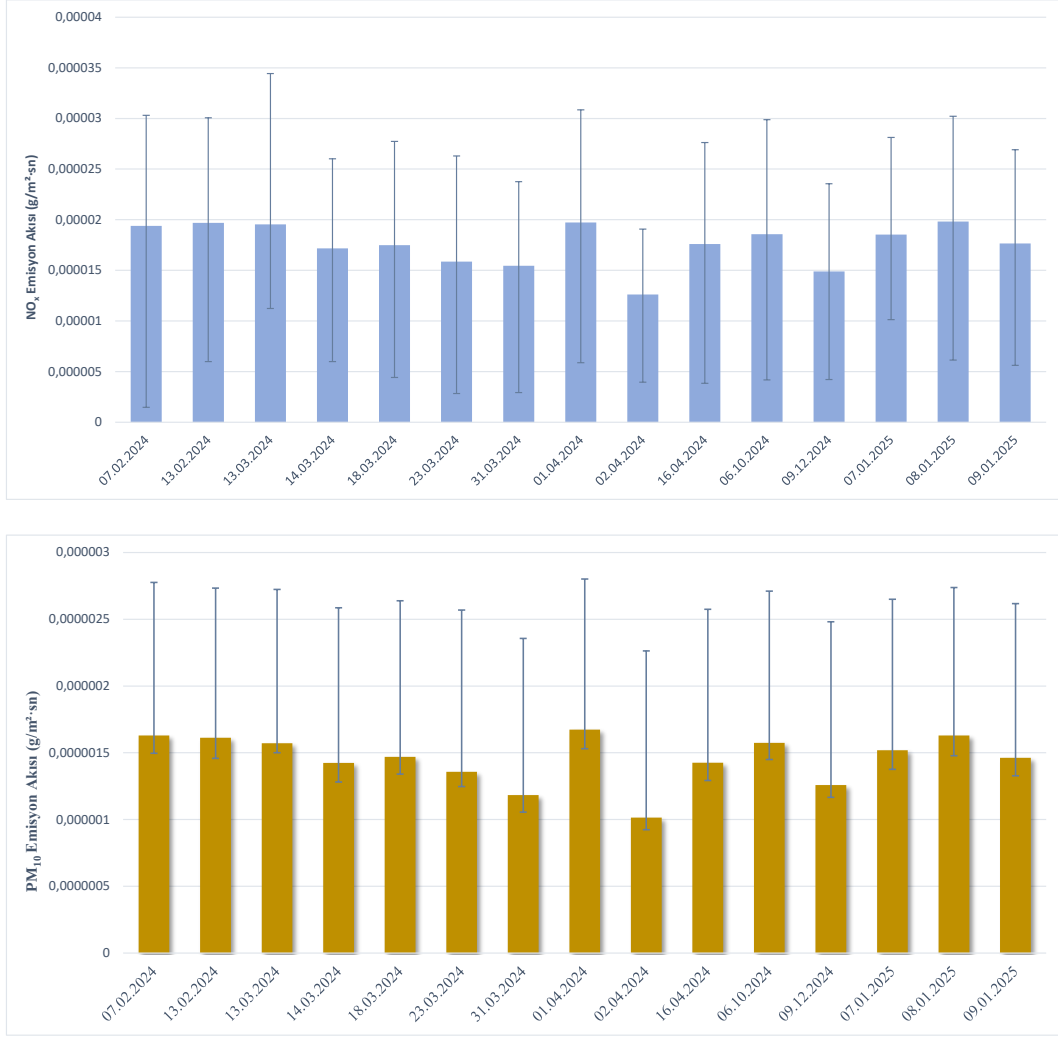
$3,79 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $9,71 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise dizel araçlar için belirlenen emisyon faktörü 0,5081 g/km yakıt olup, hesaplanan emisyon akısı $8,52 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $2,25 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir.

NO_x kirleticisine ait emisyon akısı değerleri de Şekil 5.5'te sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,0563 g/km yakıt olup, emisyon akısı $2,49 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $1,45 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, benzin (0,0554 g/km yakıt), dizel (0,8963 g/km yakıt) ve LPG (0,0749 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $1,34 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $3,59 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip dizel araçlar için belirlenen emisyon faktörü 0,9239 g/km yakıt olup, hesaplanan emisyon akısı $1,95 \times 10^{-5}$ g/m²/sn ile $5,69 \times 10^{-5}$ g/m²/sn arasında değişmektedir.

PM₁₀ kirleticisine ait emisyon akısı değerleri de Şekil 5.5'te sunulmuştur. En iyi senaryoda, Euro 6 standardına sahip benzinli araçlar için hesaplanan emisyon faktörü 0,0369 g/km yakıt olup, emisyon akısı $1,14 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $3,51 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. Ortalama senaryoda, benzin (0,0373 g/km yakıt), dizel (0,0366 g/km yakıt) ve LPG (0,0378 g/km yakıt) kullanan araçlara dayalı olarak hesaplanan emisyon akısı $1,27 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $2,07 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişmektedir. En kötü senaryoda ise Euro 4 standardına sahip dizel araçlar için belirlenen emisyon faktörü 0,0804 g/km yakıt olup, hesaplanan emisyon akısı $1,87 \times 10^{-6}$ g/m²/sn ile $3,54 \times 10^{-6}$ g/m²/sn arasında değişerek maksimum seviyeleri yansıtmaktadır.



Şekil 5.4 Tier 3’te farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan CO, NO ve NO₂ emisyonlarının (g/m²/sn) dağılımı



Şekil 5.5 Tier 3'te farklı senaryolara göre birim alan başına saniyede yayılan NO_2 ve PM_{10} emisyonlarının ($\text{g/m}^2\cdot\text{sn}$) dağılımı

18.03.2024:

Bu tarih, emisyonlar açısından en kritik günlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Her ne kadar araç sayısı (5116) en yüksek seviyede olmasa da, ortalama hızın 5 km/sa ile en düşük değere ulaşması, CO, NO, NO_2 ve NO_x emisyonlarının en yüksek seviyelere çıkmasına neden olmuştur. PM_{10} emisyonları açısından da en kötü senaryoda yüksek seviyeler gözlemlenmiştir. Özellikle CO emisyonlarında, en iyi senaryo dahi en yüksek değere ulaşırken, NO_x emisyonlarında en kötü senaryo en yüksek seviyeyi göstermektedir. Ortalama hızın aşırı düşük olması (5 km/sa), NO_x emisyonlarını en kötü senaryoda maksimum seviyeye taşımıştır. Benzer şekilde, düşük hız değerleri PM_{10} emisyonlarını da olumsuz yönde etkilemeye devam etmektedir. Bu sonuçlar, hızın emisyon seviyeleri üzerindeki kritik etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

31.03.2024:

31 Mart tarihi, düşük araç sayısı ve yüksek hız kombinasyonunun emisyonlar üzerindeki olumlu etkisinin en belirgin şekilde gözlemlendiği günlerden biri olmuştur. En yüksek ortalama hızın (50 km/sa) ve en düşük araç sayılarından birinin gözlemlendiği bu gün, CO emisyonlarını minimum seviyeye indirmiştir. Benzer şekilde, NO_x emisyonları tüm senaryolarda en düşük seviyelere gerilemiş, PM₁₀ emisyonlarında da benzer bir azalma görülmüştür. Her ne kadar bu tarihte ölçülen araç sayısı en düşük değer olmasa da, hızın etkisiyle CO, NO, NO₂ NO_x ve PM₁₀ emisyonlarının tüm senaryolarda en düşük seviyelere ulaştığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hız ve araç yoğunluğu arasındaki ilişkinin emisyon kontrolü açısından kritik önem taşıdığını göstermekte ve trafik yönetimi ile hız optimizasyonunun potansiyel etkisini vurgulamaktadır.

01.04.2024:

01.04.2024 tarihinde PM₁₀ emisyonları, diğer günlere kıyasla en yüksek seviyeye ulaşırken, CO ve NO_x emisyonları 02.04.2024'e (hızın 9 km/sa olduğu gün) göre daha düşük seviyelerde seyretmiştir. Bu durumun birkaç olası sebebi bulunmaktadır. 02.04.2024'te ortalama hızın 9 km/sa'ye kadar düşmesi, araçların dur-kalk trafiğinde daha fazla zaman geçirmesine ve motor verimliliğinin azalmasına neden olmuş olabilir. Bu da yanma verimini düşürerek CO ve NO_x emisyonlarının artmasına yol açmış olabilir. Buna karşın, 01.04.2024'te hızın biraz daha yüksek olması (20 km/sa), motor yanmasının daha verimli gerçekleşmesini sağlamış ve CO ile NO_x emisyonlarının nispeten düşük kalmasına katkıda bulunmuştur.

Öte yandan, PM₁₀ emisyonları yalnızca egzoz gazlarından değil, yol yüzeyi aşınması, lastik ve fren aşınması gibi mekanik kaynaklardan da önemli ölçüde etkilenmektedir. 01.04.2024'te araç sayısının en yüksek seviyeye ulaşması, yol yüzeyi ile temasın artmasına ve dolayısıyla lastik ve fren aşınmasına bağlı PM₁₀ salınımının yükselmesine neden olmuş olabilir. Bu bulgular, emisyon seviyelerinin yalnızca araç sayısına değil, aynı zamanda hız, trafik akışı ve mekanik aşınma faktörlerine de bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır.

02.04.2024:

2 Nisan tarihinde araç sayısı en düşük seviyede olmasına rağmen, ortalama hızın 9 km/sa gibi oldukça düşük bir seviyeye gerilemesi, beklenen en düşük emisyon seviyelerine ulaşılmasını engellemiştir. Hatta, 31.03.2024 tarihindeki araç sayısından daha düşük bir değere sahip olmasına rağmen, bu tarihte CO, NO_x ve PM₁₀ emisyonlarının daha yüksek seviyelerde seyrettiği görülmüştür. Bu durum, düşük hızın (9 km/sa) olumsuz etkisinin, düşük araç sayısının potansiyel faydasını tamamen ortadan kaldırdığını ve emisyon kontrolünde hızın belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır. CO emisyonlarında, en iyi ve orta senaryolar nispeten düşük seviyelerde kalırken, en kötü senaryoda yüksek emisyon değerleri devam etmiştir. Ortalama hızın aşırı düşüklüğü (9 km/sa), CO emisyonlarını yüksek tutarak, en düşük araç sayısına rağmen 31.03.2024 seviyelerinin üzerine çıkmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, NO_x emisyonlarında en kötü senaryo değerleri yüksek kalmaya devam etmiş, düşük hız (9 km/sa), NO_x emisyonlarının 31.03.2024'e kıyasla daha yüksek seviyelere ulaşmasına yol açmıştır. PM₁₀ emisyonlarında ise en kötü senaryo değerleri bir miktar azalma göstermiş olsa da düşük hızın (9 km/sa) etkisi nedeniyle PM₁₀ emisyon seviyeleri beklenenden yüksek seyretmiş ve 31.03.2024 seviyelerinin üzerinde kalmıştır.

Çalışmada EURO 4, 5 ve 6 emisyon standartlarına sahip araçlar dikkate alınmış, hız seviyeleri ve farklı yakıt türleri doğrultusunda emisyon faktörleri değerlendirilmiştir. Genel olarak, CO emisyonları açısından en iyi ve en kötü senaryolar arasında yaklaşık 3 ila 5 katlık bir fark gözlemlenmiştir. NO_x bileşenleri incelendiğinde, NO'nun yaklaşık %70, NO₂'nin ise %30 oranında katkıda bulunarak toplam NO_x seviyesini belirlediği tespit edilmiştir. NO_x emisyonları için en iyi ve en kötü senaryolar arasındaki fark 3 ila 9 kat arasında değişirken, PM₁₀ emisyonlarında bu fark 0,5 ila 2 kat arasında kalmıştır.

Özellikle düşük hız seviyelerinin emisyonlar üzerindeki olumsuz etkisi belirgin olarak gözlemlenmiştir. 18.03.2024 tarihinde, ortalama hızın en düşük seviyeye (5 km/sa) ulaşması, CO, NO, NO₂ ve NO_x emisyonlarının maksimum seviyelere çıkmasına neden olmuştur. Benzer şekilde, 02.04.2024'te hızın 9 km/sa'ye gerilemesi, araç sayısının düşük olmasına rağmen emisyonların beklenenden yüksek kalmasına yol açmıştır. Bu durum, düşük hızın motor verimliliğini azaltarak emisyonları artırdığını göstermektedir.

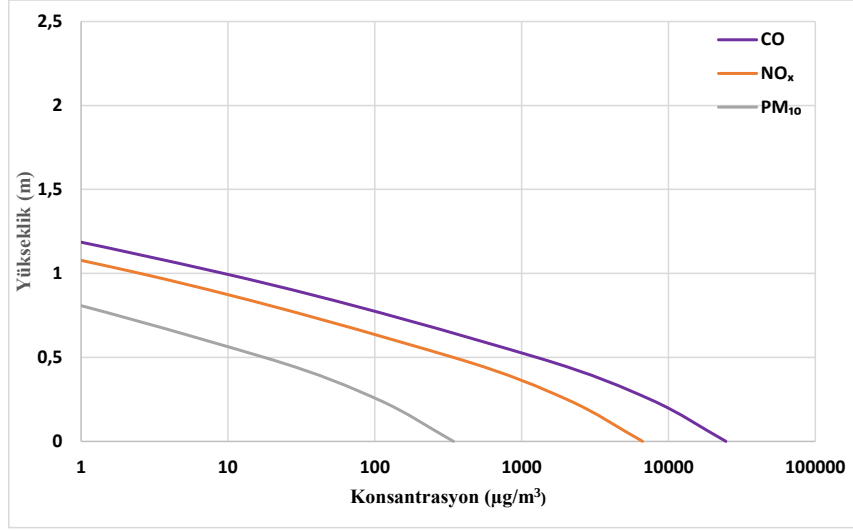
Buna karşılık, 31.03.2024 tarihi, en yüksek ortalama hızın (50 km/sa) ve düşük araç sayısının birleşimiyle emisyonların en düşük seviyelere indiği gün olmuştur. CO, NO_x ve PM₁₀ emisyonlarında tüm senaryolar için belirgin bir azalma kaydedilmiş, hız optimizasyonunun emisyon kontrolündeki kritik rolü ortaya konmuştur.

01.04.2024'te ise araç sayısının en yüksek seviyeye ulaşması ve hızın 20 km/sa olması, CO ve NO_x emisyonlarının 02.04.2024'e kıyasla daha düşük kalmasına, ancak PM₁₀ emisyonlarının maksimum seviyeye ulaşmasına neden olmuştur. Bu durum, partikül madde emisyonlarının yalnızca egzoz kaynaklı değil, aynı zamanda yol yüzeyi aşınması, lastik ve fren aşınması gibi mekanik faktörlerden de etkilendiğini göstermektedir.

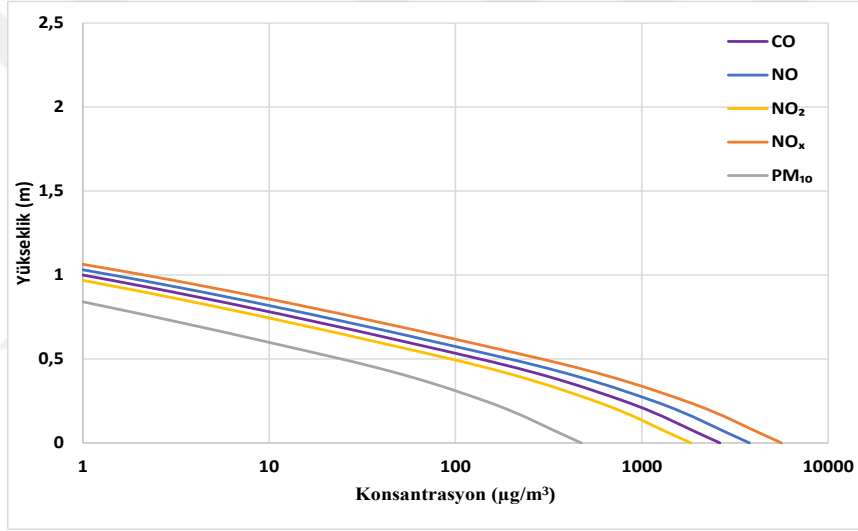
Sonuç olarak, elde edilen bulgular, emisyon seviyelerinin yalnızca araç sayısına değil, hız, trafik akışı ve mekanik aşınma gibi faktörlere de bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle düşük hız seviyeleri emisyonları artırırken, hız optimizasyonunun emisyon kontrolü açısından büyük bir potansiyel taşıdığı belirlenmiştir.

5.3 Dağılım Sonuçları

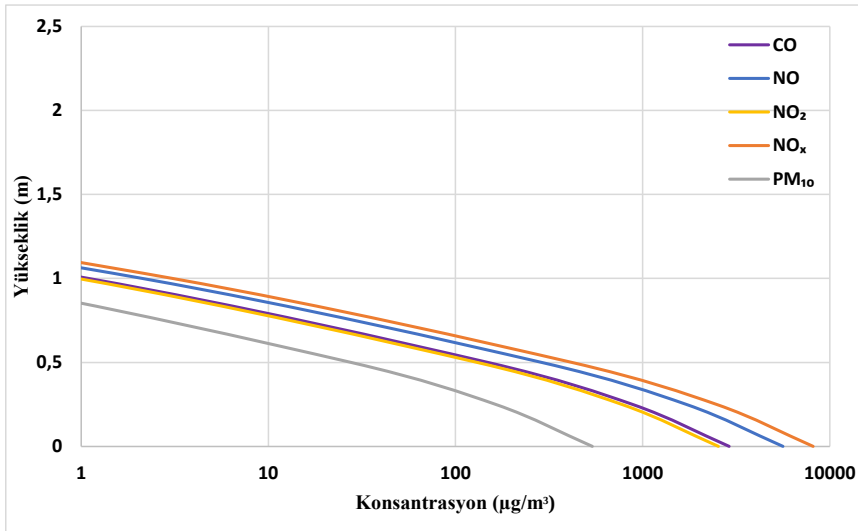
Bu çalışmada dağılım modeli olarak AERMOD kullanılmış ve doğrusal bir kaynak (line source) üzerinden modelleme gerçekleştirilmiştir. COPERT programından elde edilen üç farklı yaklaşıma ait ortalama emisyon değerleri, AERMOD modeline girdi olarak tanımlanmıştır. Model, 15 farklı kayıt günü için her bir kirleticiye ayrı ayrı uygulanmış ve farklı yüksekliklere bağlı konsantrasyonlar hesaplanmıştır. 07 Şubat 2024 tarihinde gerçekleştirilen ilk kayıtta, Tier 1 yaklaşımı için CO, NO_x ve PM; Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımları için ise CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ kirleticilerine ait modellenen konsantrasyon dağılımları Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 arasında verilmiştir. Modellemenin uygulandığı diğer günlere ait Tier yaklaşımlarına göre farklı yüksekliklerde hesaplanan kirletici konsantrasyonlarının dağılım grafikleri Ek A'da verilmiştir.



Şekil 5.6 Tier 1 yaklaşımı için farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımı



Şekil 5.7 Tier 2 yaklaşımı için farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımı



Şekil 5.8 Tier 3 yaklaşımı için farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımı

Tier 1 konsantrasyonuna ait grafikte CO, NO_x ve PM kirleticilerinin konsantrasyonlarının farklı yüksekliklere göre dağılımı verilmiştir. Genel olarak tüm kirleticiler için konsantrasyonun yükseklik arttıkça azaldığı açıkça görülmektedir. 2 m seviyesinde, tüm kirleticilerin konsantrasyonu neredeyse ihmal edilebilir düzeydedir.

Kirletici konsantrasyonlarının değişim aralığı:

- CO: Konsantrasyon, 0 metrede 24619,28 µg/m³ ile en yüksek değerine ulaşırken, 2 metrede <10⁻⁵ µg/m³'ten daha küçük bir değere düşmektedir. Bu, CO için oldukça geniş bir değişim aralığına işaret eder.
- NO_x: Konsantrasyon, 0 metrede 6646,925 µg/m³ ile en yüksek değerine ulaşırken, 2 metrede <10⁻⁵ µg/m³ 'ten daha küçük bir değere düşmektedir. CO'ya göre daha düşük bir başlangıç değerine sahip olsa da, NO_x'in değişim aralığı da önemlidir.
- PM: Konsantrasyon, 0 metrede 343,1424 µg/m³ ile en yüksek değerine ulaşırken, 2 metrede <10⁻⁵ µg/m³ 'ten daha küçük bir değere düşmektedir. PM'un başlangıç konsantrasyonu diğer kirleticilere göre daha düşüktür ve değişim aralığı da buna paralel olarak daha küçüktür.

Yükseklik etkisi:

Tier 1 konsantrasyonlarında, tüm kirleticilerin konsantrasyonları yükseklik arttıkça dramatik bir şekilde azalmaktadır.

- 0-0,25 m: Konsantrasyonlardaki en belirgin düşüş bu aralıkta yaşanmaktadır. CO konsantrasyonu yaklaşık olarak %69,5 oranında azalırken, NO_x yaklaşık %69,5 ve PM ise yaklaşık %69,6 oranında azalmaktadır. Bu, emisyon kaynağına en yakın seviyede kirleticilerin hızla dağıldığını ve seyreltiğini gösterir.
- 0,25-1,5 m: Yükseklik artmaya devam ettikçe konsantrasyonlardaki düşüş hızı yavaşlamaktadır. Ancak yine de 0,5 metreden 1 metreye, 1 metreden 1,5 metreye ve son olarak 1,5 metreden 2 metreye çıkıldıkça konsantrasyonlar azalmaya devam etmektedir.

- 2 m yükseklik: Tüm kirleticiler için 2 metre yükseklikteki konsantrasyon değerleri $10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'ten daha küçüktür. Bu, emisyonların etkisinin 2 metre ve üzerindeki yüksekliklerde oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir.

Tier 2 emisyon standartlarına göre yapılan modelleme sonuçları, CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ kirleticilerinin konsantrasyon dağılımları verilmiştir. Modelleme sonuçları, NO_x'in en yüksek konsantrasyona sahip kirletici olduğunu göstermektedir. Bunu sırasıyla NO, CO, NO₂ ve PM₁₀ takip etmektedir. Konsantrasyon değerleri reseptör yüksekliği arttıkça önemli ölçüde düşüş göstermektedir. 0 m'de NO_x konsantrasyonu en yüksek seviyede bulunurken, NO ikinci sırada yer almıştır. PM₁₀ ise tüm yüksekliklerde en düşük konsantrasyona sahip kirletici olmuştur. 0,25 m ile 1,0 m arasındaki yüksekliklerde CO, NO, NO_x ve PM₁₀ konsantrasyonları hızla azalırken, NO₂ daha yavaş bir azalma eğilimi göstermiştir. 1,5 m ve 2,0 m'de tüm kirleticilerin konsantrasyonları oldukça düşük seviyelere gerilemiştir. 2 m'de ise tüm kirleticilerin konsantrasyonları $<10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesine düşerek ihmal edilebilir düzeye inmiştir.

Tier 3 seviyesinde yapılan modelleme sonuçlarına göre, en yüksek konsantrasyona sahip kirletici NO_x olmuştur. Bunu sırasıyla NO, CO, NO₂ ve PM₁₀ takip etmektedir. Bu dağılım, Tier 2 sonuçları ile benzerlik gösterse de genel olarak kirletici konsantrasyonlarının Tier 2'ye kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Reseptör yüksekliklerine bağlı olarak konsantrasyon değişimleri incelendiğinde:

- 0 m'de NO_x en yüksek konsantrasyona ulaşarak $8157,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak hesaplanmıştır. NO $5617,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile ikinci sırada yer alırken, CO $5382,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ile üçüncü en yüksek konsantrasyona sahip olmuştur. NO₂'nin konsantrasyonu $2539,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak hesaplanırken, PM₁₀ en düşük değerle $538,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyesinde kalmıştır.
- 0,25 m ve 0,50 m yüksekliklerinde kirleticilerin konsantrasyonlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. NO_x ve NO en baskın kirleticiler olmaya devam ederken, CO bu kirleticileri takip etmiştir. NO₂'nin konsantrasyonu NO ve CO'ya kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır.

- 1 m yükseklikten itibaren tüm kirleticilerdeki konsantrasyon düşüş eğilimi devam etmiş, özellikle NO_x ve NO'nun hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.
- 1,5 m ve 2,0 m'de tüm kirleticilerin konsantrasyonları ihmal edilebilir seviyelere gerilemiş ve 2 m'de tüm kirleticiler için konsantrasyon <10⁻⁵ µg/m³ seviyesine inmiştir.

5.3.1 Model ve Ölçüm İstasyonu Verilerinin Karşılaştırılması

Tablo 5.2, CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ kirleticilerine ait istasyon ölçüm değerlerini ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan rüzgar hızı verilerini göstermektedir. Bu veriler, AERMOD kullanılarak farklı emisyon faktörleri ve modelleme yaklaşımlarıyla elde edilen Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

07 Şubat 2024 tarihine ait AERMOD hava dağılım modeli çıktıları, farklı yüksekliklerde tahmin edilen kirletici konsantrasyonlarını içermektedir. Bu sonuçlar, aynı gün içerisinde modelleme alanından 20 metre mesafede ve 2 metre yükseklikte gerçekleştirilen istasyon ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Elde edilen bulgular, modelin farklı yükseklik aralıklarında değişken bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Tablo 5.2 Kirleticilere ait istasyon ölçüm değerleri

Tarih	CO (µg/m ³)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
07.02.2024	576,5	105,3	93,4	254,9	65,6
13.02.2024	512,3	50,2	83,4	160,4	42,1
13.03.2024	540,5	77,4	87,8	206,4	42,2
14.03.2024	189,3	55,6	65,2	150,5	3,8
18.03.2024	490,9	72,8	85,7	197,3	45,7
23.03.2024	304,4	31,1	62,9	118,2	25,0
31.03.2024	383,2	56,1	77,0	189,0	38,0
01.04.2024	425,4	70,5	71,4	207,7	51,0
02.04.2024	390,4	89,9	87,5	255,9	53,6
16.04.2024	110,0	59,8	119,2	211,0	31,5
06.10.2024	44,6	54,4	84,5	167,9	33,2
09.12.2024	332,8	68,3	63,6	168,5	41,3
07.01.2025	176,1	72,5	69,3	180,6	41,6
08.01.2025	369,0	80,1	73,8	196,8	40,0
09.01.2025	151,9	114,2	70,4	245,6	9,9

Ölçüm istasyonu verilerine göre, CO konsantrasyonu $576,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak kaydedilmiştir. AERMOD modelleme sonuçları incelendiğinde, Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımları CO konsantrasyonunu 0,5-1 m yüksekliklerinde 2 metredeki tahminlere kıyasla istasyon ölçüm değerine daha yakın tahmin ettiği görülmüştür. Benzer şekilde, istasyon ölçümlerine göre NO konsantrasyonu $105,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak belirlenmiştir ancak Tier 1 yöntemi bu kirletici için herhangi bir tahminde bulunmamıştır. Buna karşın, Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımlarının model çıktıları, 0,5 m ve 1 m yüksekliklerinde istasyon ölçümlerine daha yakın değerler sunmuştur.

NO₂ konsantrasyonu istasyon ölçümlerinde $93,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ olarak kaydedilirken, Tier 1 yöntemi bu bileşiğe dair herhangi bir tahminde bulunmamıştır. Ancak, Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımlarının sonuçları incelendiğinde, model tahminlerinin 0,5-1 m yüksekliklerinde ölçüm değerlerine daha yakın olduğu belirlenmiştir. NO_x konsantrasyonlarında da benzer bir durum gözlemlenmiştir. Üç yaklaşımda 0,5 m ve 1 m yüksekliklerinde istasyon verilerine daha yakın sonuçlar sunmuştur. Genel olarak, gaz fazındaki kirleticiler için model tahminlerinin 0,5-1 m yüksekliklerinde istasyon verileri ile daha iyi uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak, PM₁₀ konsantrasyonu model tarafından 0,25-0,5 m yüksekliğinde 2 metredeki tahminlere göre daha yüksek değerlerle simüle edilmiştir. İstasyon ölçümlerinin 2 m yükseklikte gerçekleştirildiği göz önüne alındığında, bu farkın ortam havasının mikro ölçekli akışkan özelliklerine ve trafik kaynaklı girdaplara bağlı olabileceği düşünülmektedir.

Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde, Bahía Blanca (Arjantin) kent merkezinde AERMOD modelinin doğrulanmasına yönelik yapılan bir ön çalışmada, hava kalitesi izleme sistemlerinin eksikliği nedeniyle modelin güvenilirliği, 5 km uzaklıktaki bir hava kalitesi izleme istasyonu ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, modelin izleme istasyonu verileriyle benzer bir eğilim gösterdiğini ve kentsel hava kirliliği tahmininde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur [16].

Tezel ve arkadaşları [12], Trabzon şehir merkezinde trafik kaynaklı NO_x emisyonlarını modellemek ve maruziyet seviyelerini belirlemek için AERMOD'u kullanmıştır. Çalışmada, trafik emisyon envanteri oluşturularak NO_x, SO₂, CO, PM ve VOC konsantrasyonları hesaplanmış ve NO_x'in yol trafiğini en iyi temsil eden kirletici olduğu tespit edilmiştir. Modelleme sonuçları, hava kalitesi ölçüm

istasyonu verileriyle karşılaştırılarak istatistiksel analizler yapılmış ve ağır vasıta sayısının azaltılmasını içeren senaryoların, nüfusun NO_x maruziyetini azaltmada etkili olabileceği ortaya konmuştur.

Askariyeh ve arkadaşları [13], AERMOD'un yüzeye yakın (0,5 m) konsantrasyonları makul bir doğrulukla tahmin ettiğini, ancak modelin daha yüksek rakımlarda (3,5 m ve 9,5 m) performansının azaldığını belirtmiştir. Benzer şekilde, Nath ve Dhal çalışmasında AERMOD ve CALINE4 modelleri karşılaştırılmış ve AERMOD'un hem mobil hem de sabit emisyon kaynakları için uygun, çok yönlü bir model olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, atmosferik koşulların kirleticiler dağılımı üzerindeki etkisini belirlemek için meteorolojik verilerin gerekli olduğu vurgulanmıştır. Ancak modelin, kararlı durum varsayımlarına dayanması ve kimyasal dönüşümleri dikkate almaması, doğru tahminler yapabilmesi için hassas girdi verilerine ihtiyaç duyması gibi sınırlamalar taşıdığı belirtilmiştir [66].

Gibson ve arkadaşları [11], AERMOD kullanarak PM_{2,5}, NO_x ve SO₂ emisyonlarının atmosferik dağılımını modellemiş ve modelin kimyasal reaksiyonları hesaba katmadığını vurgulamıştır. Bu nedenle, gerçek atmosferde SO₂ ve NO₂'nin gaz-partikül dönüşümü nedeniyle azalırken PM_{2,5} konsantrasyonlarında bir artış gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Maskat'ta yapılan bir çalışmada [14], AERMOD kullanılarak trafik kaynaklı CO ve NO_x konsantrasyonları COPERT IV ve CMEM emisyon modelleri ile tahmin edilmiştir. Sonuçlar, modelin genel olarak kabul edilebilir tahminler sunduğunu ancak karmaşık arazi yapısını yeterince temsil edemediğini ortaya koymuştur. Çizgi kaynak modellemesinin kirleticilerin dikey dağılımını simüle edememesi nedeniyle, belirli noktalarda konsantrasyonların fazla veya eksik tahmin edildiği belirlenmiştir.

Deak ve arkadaşları [15], Bükreş'te yol trafiğinin hava kalitesi üzerindeki etkisini incelemiş ve yerel hava kirliliğinin yalnızca trafik yoğunluğuna değil, çevresel faktörlere de bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, Connors ve arkadaşları [17], AERMOD'un düşük rüzgâr hızına sahip kararlı atmosferik koşullarda, zemin seviyesi konsantrasyonlarını on kata kadar aşırı tahmin edebildiğini raporlamıştır.

Bu çalışmalar, AERMOD'un çeşitli hava kirliliği modelleme senaryolarında başarılı tahminler üretebildiğini, ancak arazi yapısı, meteorolojik koşullar ve

kimyasal dönüşümler gibi unsurların model performansı üzerinde önemli etkiler yarattığını göstermektedir.

Benzer şekilde, bu tez çalışmasının geliştirilmiş bir versiyonu olan Yavuz (2025) çalışmasında, YOLOv8-SORT algoritmasıyla trafik verileri analiz edilmiş, COPERT v5.7 ile hesaplanan emisyonlar HAD modeline girdi olarak tanımlanmıştır. Gerçek zamanlı trafik ve meteorolojik verilerle CO ve NO_x konsantrasyonları sırasıyla %82 ve %60 R² ile tahmin edilmiştir. Bu çalışma, HAD ve makine öğrenmesi temelli yaklaşımların, taşıt kaynaklı kirlilik modellemesinde yüksek çözünürlüklü ve başarılı tahminler sunduğunu göstermektedir [67].

5.3.2 Yükseklik Etkisinin Tier'e Yansıması

Bu bölümde istasyon ölçüm değerleri ile Tier 3 yaklaşımı kullanılarak hesaplanan konsantrasyonlar karşılaştırılmış ve Tier 3'ün ölçümlere en yakın olduğu yükseklik belirlenmiştir. Daha sonra aynı tarih ve yükseklik için Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımları çalıştırılarak, tüm model sonuçları ölçüm istasyonu verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Böylece, her Tier seviyesinin model doğruluğu aynı koşullar altında karşılaştırılmıştır (Ek B' de verilmiştir.). Tier 3 yaklaşımı referans alınarak Tier 1 ve Tier 2 modellerinin tahmin performansları değerlendirilmiştir. Tier 3 yaklaşımının bulunmadığı durumlarda diğer Tier yaklaşımlarının ne derece güvenilir sonuçlar verdiği incelenmiştir.

Tier 3 modelinin referans olarak seçilmesinin temel nedeni, en yüksek çözünürlükte ve en gerçekçi girdilerle hesaplama yapmasıdır. Gerçek zamanlı trafik, araç filosu, yol tipi ve meteorolojik veriler gibi birçok parametreyi içermesi, Tier 3'ün ölçüm verilerine en yakın ve güvenilir sonuçlar üretmesini sağlar.

Trafik yoğunluğu, yüksek emisyon miktarı ve sürekli ölçüm yapılmasına rağmen bazı durumlarda ölçüm verilerinde sapmalar (deviasyonlar) gözlemlenmiştir. Bu sapmaların nedeni başlangıçta açık değildir; ancak fiziksel süreci üç boyutlu olarak değerlendirdiğimizde bu sapmaların nedenleri daha anlaşılır hâle gelmiştir. Bir önceki bölümde gösterildiği üzere, yükseklik arttıkça model çıktılarının tutarlılığı azalmaktadır. Hüzme (plume) merkez hattının doğrusal bir şekilde ilerlememesi nedeniyle, modelleme sırasında yüzey ile alıcı nokta arasındaki 2 metrelik mesafenin esas alınmasının doğru sonuçlar üretmediği anlaşılmıştır. Bu bölümde, Tier 3 yaklaşımı baz alınarak yüksekliğe göre elde edilen konsantrasyon dağılımları

üzerinden, hüzme bulutunun merkezinin kaç metre uzaklıkta ölçüm istasyonundaki gerçek konsantrasyona ulaştığı değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda yürütülen çalışmada, CO kirleticisi için 0,40 m, NO için 0,65 m, NO₂ için 0,54 m, NO_x için 0,57 m ve PM₁₀ için 0,44 m yüksekliklerinde model çıktıları ölçüm istasyonu değerleriyle yüksek uyum göstermiştir. Bu yükseklikler özellikler araç kaynaklı emisyonların temel bileşeni olan CO kirleticisi için önemlidir. Zira CO, büyük ölçüde doğrudan araç kaynaklıdır; oysa NO, NO₂ ve PM gibi diğer kirleticiler hem araç emisyonlarından hem de arka plan (background) konsantrasyonlardan etkilenmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda, hüzme yapısının daha doğru analiz edilebilmesi amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemleriyle hüzmenin izlenmesi ve hüzme merkezi ile ölçüm başlığı arasındaki mesafenin detaylı şekilde değerlendirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada örnek olarak 7 Şubat 2024 tarihine ait ölçüm istasyonu verileri ve modelleme sonuçları detaylı şekilde incelenmiştir. Bu tarih, modelleme yaklaşımlarının performanslarını karşılaştırmak için temsili bir örnek teşkil etmektedir.

7 Şubat 2024

CO: 0,31 metre yükseklikte ölçüm istasyonu değeri 576,5 µg/m³ olarak kaydedilirken, Tier 3 modeli 596,7 µg/m³ değeriyle oldukça yakın sonuç vermiştir. Tier 2 modeli ise 539,2 µg/m³ ile %6,5 oranında düşük tahmin yapmıştır. Buna karşın Tier 1 modeli 5066,3 µg/m³ gibi ölçüm değerinin yaklaşık 9 katı olan aşırı yüksek bir sonuç vermiştir. Bu durum Tier 1 yaklaşımının CO emisyonlarını aşırı tahmin yaptığını göstermektedir. Bu farkın nedeni, Tier 1 modelinin daha genel varsayımlar içermesi ve yerel trafik, meteoroloji gibi koşulları yeterince yansıtamamasıdır.

NO: 0,61 metre yükseklikte, Tier 3 yaklaşımı 114,8 µg/m³ ile ölçüm değeri olan 105,3 µg/m³'e yakın sonuç vermiştir. Tier 2 ise 77,2 µg/m³ ile yaklaşık %27 daha düşük tahmin yapmıştır. Bu, Tier 2 modelinin NO konsantrasyonlarını sistematik olarak düşük tahmin ettiğine işaret etmektedir.

NO₂: 0,54 metre yükseklikte, Tier 3'ün 94,2 µg/m³'lük tahmini ölçüm değerine (93,4 µg/m³) çok yakın bulunmuştur. Tier 2 modeli ise 67,9 µg/m³ ile %27'lik bir sapma ile düşük tahmin göstermektedir.

NO_x: 0,56 metre yükseklikte, Tier 3 256,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ile ölçüm (254,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ile uyumludur. Tier 2 ve Tier 1 modelleri sırasıyla %31 ve %18 oranında düşük tahminler yapmıştır. Bu veriler Tier 3'ün NO_x bileşenlerini daha başarılı tahmin ettiğini ortaya koymaktadır.

PM: 0,38 metre yükseklikte Tier 3, ölçüme yakın (68,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ve 65,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Tier 2 ise %8,8 oranında düşük tahmin (59,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Tier 1 ise daha düşük (43,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) tahminlerde bulunmuştur.

7 Şubat örneği dışında analiz edilen diğer tarihlerde de benzer eğilimler gözlenmiştir. Tier 3 yaklaşımı, farklı kirleticiler ve farklı yüksekliklerde ölçüm istasyonu verilerine en yakın tahminleri sağlayarak modelleme doğruluğunda üstündür. Tier 1 yaklaşımı genel olarak kirletici konsantrasyonlarını aşırı tahmin etme eğilimindedir; bu durum özellikle CO gibi kirleticilerde belirginleşmiştir. Tier 2 yaklaşımı ise genellikle ölçüm değerlerinin altında kalan düşük tahminler vermekte, özellikle azot oksitler ve partikül maddede daha belirgin sapmalar göstermektedir.

Bu doğrultuda, hava kalitesi çalışmalarında detaylı ve yerel koşullara uygun analizler için Tier 3 modelinin tercih edilmesi önerilmektedir. Tier 1 ve Tier 2 modelleri, geniş ölçekli ön değerlendirmeler için kullanılabilir ancak yerel doğruluk ve hassasiyet gerektiren durumlarda sınırlamalar taşımaktadır.

5.3.3 HKDDY Değerleri ile Model Sonuçları Karşılaştırılması

Bu çalışmada Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımları kapsamında 1 saatlik ortalamalarla elde edilen CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ konsantrasyonları, Türkiye'de yürürlükte olan Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği (HKDYY) limit değerleri ile karşılaştırılmıştır. Her bir kirletici için aşım durumu aşağıda özetlenmiştir:

CO: HKDYY'de CO için yalnızca 8 saatlik ortalama limit değeri tanımlanmış olup bu sınır 10 mg/m^3 (10,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) olarak belirlenmiştir. Her ne kadar saatlik bazda resmi bir eşik değeri bulunmasa da, modelden elde edilen 1 saatlik CO konsantrasyonlarının tümü bu sınırın oldukça altında kalmıştır. Bu nedenle CO açısından herhangi bir aşım durumu söz konusu değildir.

NO: HKDYY kapsamında NO için doğrudan bir sınır değeri bulunmamaktadır. Bu nedenle NO'ya ilişkin model çıktıları için herhangi bir aşım değerlendirmesi yapılmamıştır.

NO₂: HKDYY'de NO₂ için belirlenmiş 1 saatlik limit değeri 200 µg/m³'tür. Modelleme sonuçlarına göre elde edilen Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 kapsamındaki NO₂ konsantrasyonlarının tamamı bu limitin altında kalmıştır. Dolayısıyla NO₂ açısından da herhangi bir sınır değerini aştığı duruma rastlanmamıştır.

NO_x: NO_x için HKDYY'de yalnızca yıllık ortalama limit değeri tanımlanmıştır ve bu değeri ekosistem ve bitki örtüsü etkileri göz önüne alınarak 30 µg/m³ olarak belirlenmiştir. Modelleme sonuçlarına göre 1 saatlik ortalamalar, bu değerin kat kat üzerindedir (örneğin bazı durumlarda 250 µg/m³'ün üzerinde). Bu durum, kısa vadeli etkiler açısından net bir kıyaslama yapılamasa da, uzun vadeli yük ve potansiyel ekosistem baskısı açısından dikkate değeri bir aşım potansiyeline işaret etmektedir.

PM₁₀: PM₁₀ için HKDYY'de 1 saatlik ortalama limit değeri bulunmamaktadır. Ancak referans olarak kabul edilen 24 saatlik ortalama limit değeri 50 µg/m³'tür. Model çıktılarındaki bazı saatlik PM₁₀ değerleri bu eşiği aşmakta olup (örneğin 55.4 µg/m³), bu durum potansiyel günlük ortalama aşimleri konusunda dikkat çekicidir. Ancak bu aşım saatlik ölçümlere dayandığı için, yönetmelik açısından doğrudan ihlal sayılmamaktadır.

6 SONUÇ

Bu çalışma, İstanbul-Beşiktaş Bulvarı'ndaki araç kaynaklı hava kirletici emisyonlarını hesaplamak için Tier 1, Tier 2 ve Tier 3 yaklaşımları uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan trafik akışı verileri, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Yönetim Merkezi'nin gerçek zamanlı kamera kayıtlarından yoğun saatler (17:00-18:00) arasında 15 farklı kayıt günü için elde edilmiştir. Hız verileri, daha gerçekçi bir değerlendirme sunması amacıyla en düşük değerler esas alınarak belirlenmiştir. Trafikteki araçlar otomobil, motosiklet, servis ve otobüs olmak üzere dört ana kategoriye ayrılmıştır. Emisyon tahminleri, en iyi, ortalama ve en kötü senaryoları içerecek şekilde gerçekleştirilmiştir. EMEP/EEA Hava Kirletici Emisyon Envanteri Kılavuzu'nda tanımlanan Tier 1 yaklaşımında, farklı tarihlerdeki araç sayıları temel alınarak CO, NO_x ve PM emisyonları hesaplanmıştır. Tier 2 yaklaşımı, COPERT programı kullanılarak Euro standartları ve yakıt türleri gibi ek parametreleri de içerecek şekilde uygulanmış ve CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ emisyonlarının hesaplanmasına olanak sağlamıştır. Tier 3 yaklaşımında da COPERT programı kullanılmış olup, Tier 2'ye ek olarak hız değerleri de emisyon hesaplamalarına dahil edilmiştir. Bu kapsamda, aynı kirleticiler için benzer senaryolar üzerinden sonuçlar elde edilmiş ve binek araçlar özelinde emisyon faktörleri incelenmiştir.

Çalışmanın dağılım modeli aşamasında AERMOD modeli kullanılmış, elde edilen ortalama emisyon değerleri bir çizgi kaynak üzerinden modellenmiştir. 15 farklı kayıt günü esas alınarak her bir kirleticiye ait konsantrasyon değerleri hesaplanmış ve farklı yüksekliklere göre analiz edilmiştir. Model tahminleri, gaz fazındaki kirleticiler için 0,5-1 m yükseklik aralığında istasyon verileri ile daha iyi uyum göstermiştir. Ancak, PM₁₀ konsantrasyonları 0,25-0,5 m yüksekliğinde, 2 metre seviyesine kıyasla daha yüksek değerler ile simüle edilmiştir. Bunun sonucunda, yüksekliğe bağlı olarak model çıktılarında anlamlı farklılıklar gözlemlenmiş ve 2

m yüksekliğin çoğu durumda uygun bir karşılaştırma düzeyi sunmadığı anlaşılmıştır.

Model doğrulama çalışmaları kapsamında, Tier 3 yaklaşımı referans alınarak farklı tarihlerdeki CO, NO, NO₂, NO_x ve PM₁₀ konsantrasyonları değerlendirilmiş; bu yaklaşım ölçüm verileri ile en iyi sonucu veren yükseklikler belirlenmiştir. Ölçüm verilerine en yakın model ıktılarının CO için 0,40 m, NO için 0,65 m, NO₂ için 0,54 m, NO_x için 0,57 m ve PM₁₀ için 0,44 m yüksekliklerinde elde edildiği belirlenmiştir. Modelde kirletici hüzmelinin ölçüm başlığıyla örtüşmesini sağlamak amacıyla, gelecekte yapılacak çalışmalarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizleri ile hüzmanın izlenmesi ve alıcı noktanın doğru belirlenmesi önerilmektedir. Ayrıca, Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımlarının Tier 3'e göre belirli sapmalar gösterdiği göz önünde bulundurularak, detaylı filo verisinin bulunmadığı durumlarda bu modellerin dikkatli kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Bu alışma sürecinde karşılaşılan en önemli zorluklardan biri, bulvardan geçen farklı araç tiplerine ait güncel ortalama hız, yıllık kilometre, yakıt tipi dağılımı ve araç teknolojisi tipi dağılımı gibi detaylı verilere erişimin sınırlı olmasıdır. COPERT gibi emisyon hesaplama araçlarının daha doğru sonuçlar verebilmesi için, hükümet tarafından mevcut araç filosuna ilişkin detaylı bir envanter çalışması yapılması önem arz etmektedir. Bu nedenle, yetkililerin hava kirliliği ölçüm cihazlarına yatırım yapmaları önerilmektedir. Gelecekteki alışmalar, COPERT'in hesaplama yöntemleri ve denklemlerine ilişkin daha detaylı analizleri içerebilir. Bu analizler, modelin sınırlamalarını belirleyerek potansiyel iyileştirmelere yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Ayrıca, trafik ağı planlaması ve sinyal zamanlaması gibi faktörlerin hava kalitesi üzerindeki etkisini daha ayrıntılı inceleyen çalışmaların yapılması önemlidir. Bu alışma, trafik planlaması ve hava kalitesi modellemesi için bir temel oluşturarak, gelecekteki çalışmalara rehberlik edebilir. Kentsel hava kalitesinin izlenmesi ve tahmin edilmesi konusunda AERMOD ve COPERT gibi araçların uygulanabilirliğinin test edilmesi, hava kirliliği ile mücadelede kritik bir adım olarak değerlendirilmektir.

KAYNAKÇA

- [1] M. Babu and K. A. G.Subramanian, Alternative transportation fuels: utilisation in combustion engines, CRC Press, 2013.
- [2] EEA, "Transport emissions of air pollutants," European Environment Agency, 18 11 2021. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-8>. [Accessed 23 12 2024].
- [3] European Parliament: European Parliamentary Research Service, "Comparative study on the differences between the EU and US legislation on emissions in the automotive sector," European Union, 2016.
- [4] EEA, "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023," European Environment Agency, 2023.
- [5] EMISIA SA, "COPERT: Computer programme to calculate emissions from road transport,," EEA, [Online]. Available: <https://copert.emisia.com/>. [Accessed 24 12 2024].
- [6] S. Soylu, "Estimation of Turkish road transport emissions," *Journal of Environmental Science*, vol. 15, no. 3, pp. 123-135, 2007.
- [7] O. Deniz, *İstanbul Boğaz Köprüleri'nde taşıtların yarattığı kirliliğin Copert III Ve Mobile 6 modelleri ile hesaplanması*, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [8] M. Özen and H. T. Yaman, "Türkiye'de şehirlerarası yük trafiği CO2 emisyonlarının tahmini," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 17, no. 3, pp. 56-64, 2013.
- [9] A. Mutlu, "Balıkesir şehir merkezinde trafik kaynaklı hava kirliliği seviyelerinin analizi," *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 1, pp. 152-168, 2019.
- [10] S. A. Aksoy, A. Kiziltan, M. Kiziltan, M. A. Köksal, Ö. F. Ş. E. Tekeli and G. Güllü, "Mortality and morbidity costs of road traffic-based air pollution in Turkey," *Journal of Transport & Health*, vol. 22, no. 101142, 2021.
- [11] M. D. Gibson, S. Kundu and M. Satish, "Dispersion model evaluation of PM2.5, NOx and SO2 from point and major line sources in Nova Scotia,

- Canada using AERMOD Gaussian plume air dispersion model," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 4, no. 2, pp. 157-167, 2013.
- [12] M. N. Tezel, D. Sari, N. Ozkurt and S. S. Keskin, "Application of reduction scenarios on traffic related NO_x emissions in Trabzon, Turkey," in *18th World Clean Air Congress, 23-27 September 2019, İstanbul*, 2019.
- [13] M. H. Askariyeh, S. H. Kota, S. Vallamsundar, J. Zietsman and Q. Ying, "AERMOD for near-road pollutant dispersion: Evaluation of model performance with different emission source representations and low wind options," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 57, pp. 392-402, 2017.
- [14] P. Amoatey, H. Omidvarborna, M. Baawain and A. Al-Mamun, "Evaluation of vehicular pollution levels using line source model for hot spots in Muscat, Oman," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, p. 31184–31201, 2020.
- [15] G. Deak, M. Raischi, L. Lumînăroiu, E. Holban, G. Tudor, N. Raischi and N. M. Ibrahim, "Study of the influence of road traffic emissions on air quality in sensitive areas of the Bucharest city, using Breeze Aermod software," in *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023.
- [16] Y. Grassi and M. Díaz, "Initial validation regarding the use of AERMOD to model air pollutant dispersion in medium-sized Latin American city streets," in *Trends in Sustainable Smart Cities and Territories*, 2023.
- [17] J. A. Connors, R. J. Paine and A. S. Hanna, "AERMOD low wind speed issues: Review of new model release," *Air and Waste Management Association-Guideline on Air Quality Models 2013: The Path Forward*, vol. 1, pp. 213-244, 2013.
- [18] European Union, "Passenger cars in the EU: A 6.7% increase in EU-registered passenger cars since 2018," Eurostat, 12 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU#A_6.7.25_increase_in_EU-registered_passenger_cars_since_2018. [Accessed 23 12 2024].
- [19] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), "Motorlu kara taşıtları, Aralık 2023," TÜİK Veri Portalı, 12 2023. [Online]. Available: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Ta%C5%9F%C4%B1tlar%C4%B1-Aral%C4%B1k-2023-49432&dil=1#:~:text=T%C3%BCrkiye'de%202023%20y%C4%B1l%C4%B1%20sonu,ya%C5%9F%2014%2C5%20olarak%20hesapland%C4%B1>. [Accessed 23 12 2024].
- [20] M. Kousoulidou, L. Ntziachristos, G. Mellios and Z. Samaras, "Road-transport emission projections to 2020 in European urban environments," *Atmospheric Environment*, vol. 42 , no. 32, pp. 7465-7475, 2008.

- [21] Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA), "Exhaust emissions from road transport," UK-AIR: Air Information Resource, 2021.
- [22] M. Camatini, G. F. Crosta, T. Dolukhanyan, C. Sung, G. Giuliani, G. M. Corbetta and C. Regazzoni, "Microcharacterization and identification of tire debris in heterogeneous laboratory and environmental specimens," *Materials characterization*, vol. 46, no. 4, pp. 271-283, 2001.
- [23] UK Environment Agency, "Tyres in the environment," Environment Agency, Rio House, Waterside Drive Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD, ISBN 1-873-16075-5, 1998.
- [24] M. Kolioussis and C. Pouftis, "Calculation of tyre mass loss and total waste material from road transport," Laboratory of Applied Thermodynamics, Thessaloniki, Greece, 2000.
- [25] L. Warner, R. Sokhi, L. Luhana and P. Boulter, "Non-exhaust particle emissions from road transport: A literature review," Unpublished Report, Paris, 2000.
- [26] J. Gillies, J. Watson, C. Rogers, D. DuBois, J. Chow, R. Langston and J. Sweet, "Long-term efficiencies of dust suppressants to reduce PM10 emissions from unpaved roads," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 49, no. 1, pp. 3-16, 1999.
- [27] J. A. Gillies, V. Etyemezian, H. Kuhns, D. Nikolic and D. A. & Gillette, "Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions," *Atmospheric Environment*, vol. 39, no. 13, pp. 2341-2347, 2005.
- [28] J. Li, Y. Ge, W. X. and M. Zhang, "Evaporative emission characteristics of high-mileage gasoline vehicles," *Environmental Pollution*, vol. 303, no. 119127, 2022.
- [29] A. Adeyanju Anthony, "Effects of vehicular emissions on human health," *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 6, no. 6, 2018.
- [30] R. Baldauf, N. Watkins, D. Heist, C. Bailey, P. Rowley and R. Shores, "Near-road air quality monitoring: factors affecting network design and interpretation of data," *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 2, pp. 1-9, 2009.
- [31] S. Bhandarkar, "Vehicular pollution, their effect on human health and mitigation measures," *Veh. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 33-40, 2013.
- [32] M. S. Alam and A. Khan, "The impact study of vehicular pollution on environment," *International Journal for Science and Advance Research in Technology*, vol. 6, no. 12, pp. 30-37, 2020.

- [33] UCAR Center for Science Education, "Carbon monoxide," UCAR, 2017. [Online]. Available: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/carbon-monoxide>. [Accessed 23 12 2024].
- [34] World Health Organization, "WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," World Health Organization, 2021.
- [35] Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği," Resmi Gazete, 26898, Ankara, 2008.
- [36] S. Singh, M. J. Kulshrestha, N. Rani, K. Kumar, C. Sharma and D. K. Aswal, "An overview of vehicular emission standards," *Mapan*, vol. 38, no. 1, pp. 241-263, 2023.
- [37] L. Pallavidino, R. Prandi, M. Costa, A. Nanni, A. Bertello, E. Bracco and F. Pavone, "Top-down vs. bottom-up approach in delineating traffic role in air quality scenarios.," in *In 14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Model for Regulatory Purposes*, 2011.
- [38] C. Li, T. Ma, G. Karavalakis, K. C. Johnson and T. D. Durbin, "Evaluation of on-board sensor-based NO_x emissions from the heavy-duty vehicles in an inspection and Maintenance program," *Emission Control Science and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 12-24, 2023.
- [39] H. Liu, K. He, J. M. Lents, Q. Wang and S. Tolvet, "Characteristics of diesel truck emission in China based on portable emissions measurement systems," *Environmental science & technology*, vol. 43, no. 24, pp. 9507-9511, 2009.
- [40] D. V. Kapadia and N. D. Jariwala, "Comparative study for Identification of appropriate vehicle emission model," in *Noise and Air Pollution: Monitoring and modelling*, 2017.
- [41] United States Environmental Protection Agency, "Description and history of the MOBILE highway vehicle emission factor model," U.S. EPA, 6 5 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/moves/description-and-history-mobile-highway-vehicle-emission-factor-model>. [Accessed 24 12 24].
- [42] United States Environmental Protection Agency, "Latest Version of MOtor Vehicle Emission Simulator (MOVES)," U.S. EPA, 19 12 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves#background>. [Accessed 23 12 2024].
- [43] G. Scora and M. Barth, "Comprehensive modal emissions model (CMEM), version 3.01: User guide (Technical Report No. 1070)," Centre for Environmental Research and Technology, University of California, Riverside, 2006.

- [44] European Commission Joint Research Centre, "COPERT: Computer programme to calculate emissions from road transport, overview," [Online]. Available: <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-copert/>. [Accessed 24 12 2024].
- [45] EMISIA SA., "COPERT: Computer programme to calculate emissions from road transport.," [Online]. Available: <https://copert.emisia.com/>. [Accessed 24 12 2024].
- [46] H. C. Ong, T. M. I. Mahlia and H. H. Masjuki, "A review on emissions and mitigation strategies for road transport in Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8, pp. 3516-3522, 2011.
- [47] J. M. Burón, J. M. López, F. Aparicio, M. Á. Martín and A. García, "Estimation of road transportation emissions in Spain from 1988 to 1999 using COPERT III program," *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 5, pp. 715-724, 2004.
- [48] S. Soylu, "Estimation of Turkish road transport emissions," *Journal of Environmental Science*, vol. 15, no. 3, pp. 123-135, 2007.
- [49] H. Du, D. Liu, F. M. S. Southworth and F. Qiu, "Pathways for energy conservation and emissions mitigation in road transport up to 2030: A case study of the Jing-Jin-Ji area, China," *Journal of Cleaner Production*, vol. 162, pp. 882-893, 2017.
- [50] M. Resetar, G. Pejic and Z. Lulic, "Road transport emissions of passenger cars in the republic of Croatia," in *In Digital proceedings of the 8th European Combustion Meeting*, Varşova, 2017.
- [51] D. Lejri, A. Can, N. Schiper and L. Leclercq, "Accounting for traffic speed dynamics when calculating COPERT and PHEM pollutant emissions at the urban scale," *Transportation research part D: Transport and Environment*, vol. 63, pp. 588-603, 2018.
- [52] B. A. Wondifraw, D. G. Lemma and E. T. Aschalwe, *Estimation of exhaust emission from road transport using COPERT software: The case of Addis Ababa, Ethiopia.*, 2018.
- [53] G. K. Saharidis and G. E. Konstantzos, "Critical overview of emission calculation models in order to evaluate their potential use in estimation of Greenhouse Gas emissions from in port truck operations," *Journal of Cleaner Production*, vol. 185, pp. 1024-1031, 2018.
- [54] S. Dey, B. Caulfield and B. Ghosh, "Modelling uncertainty of vehicular emissions inventory: A case study of Ireland," *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, pp. 1115-1126, 2019.

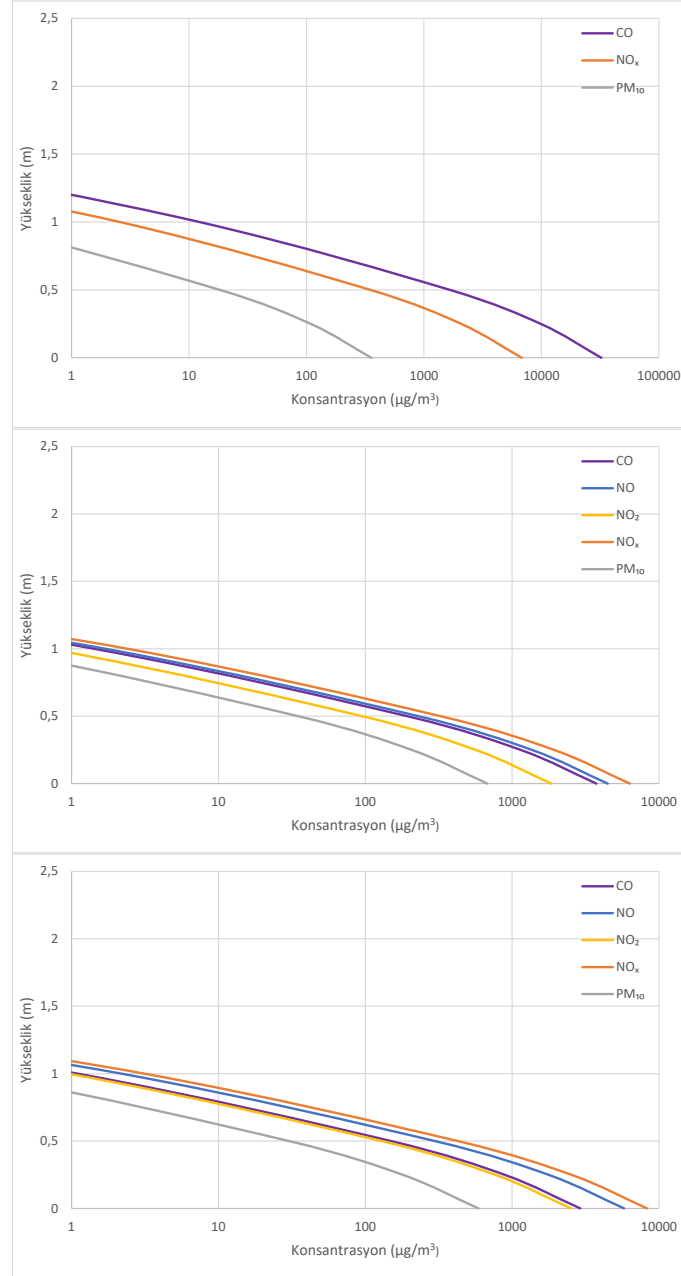
- [55] Z. Qiyang, W. Hualan, N. I. E. Ting and L. I. Ruohan, "Analysis of the impact of road traffic emission on surrounding environment: a case study of Xuefu Road in Anning District, Lanzhou City," *Journal of Environmental Engineering Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 1225-1231, 2024.
- [56] S. Kawsar, S. Biswas, M. Noor and M. S. Mamun, "Investigating the applicability of COPERT 5.5 emission software in Bangladesh and developing countrywide vehicular emission inventories," *Environmental Science: Atmospheres*, vol. 4, no. 1, pp. 57-72, 2024.
- [57] U.S. Environmental Protection Agency, "Air Quality Models," U.S. EPA, 20 05 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-models>. [Accessed 29 12 2024].
- [58] Queensland Government, "Air quality modelling," Queensland Government, 18 06 2024. [Online]. Available: <https://www.qld.gov.au/environment/management/monitoring/air/air-monitoring/modelling>. [Accessed 29 12 2024].
- [59] A. De Visscher, Air dispersion modeling: foundations and applications, Amerika Birleşik Devletleri: John Wiley & Sons., 2013.
- [60] UKCH, "Air pollution modelling," UK Center for Ecology & Hydrology, [Online]. Available: <https://www.apis.ac.uk/air-pollution-modelling>. [Accessed 31 12 2024].
- [61] K. Wark and C. F. Warner, Air pollution: its origin and control, New York: Addison Wesley Longman, 1981.
- [62] H. Snoun, M. Krichen and H. Chérif, "A comprehensive review of Gaussian atmospheric dispersion models: current usage and future perspectives," *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, vol. 8, no. 1, pp. 219-242, 2023.
- [63] X. Lei, J. X. and C. Wang, "Design and implementation of a real-time video stream analysis system based on FFMPEG," in *2013 Fourth World Congress on Software Engineering*, 2013.
- [64] İBB, "İstanbul lojistik ana planı çalışması," İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2017. [Online]. Available: <https://bimtas.istanbul/projelerimiz/istanbul-lojistik-ana-plani-calismasi>. [Accessed 02 09 2025].
- [65] EEA, "AERMOD, technical note for modelling vehicular emissions using," [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.epd.gov.hk/epd/sites/default/files/epd/english/environmentinhk/air/guide_ref/files/Technical_Note_for_Modelling_Vehicular_Emissions_Using_AERMOD_TNAM_01_2401.pdf. [Accessed 02 04 2025].

- [66] A. Nath and G. C. Dhal, "CALINE4 and AERMOD modelling for roadway vehicle-related air pollution: a recent review in India," *Recent Advanced Studies in Environmental Sustainability and Climate Change*, pp. 1-11, 2024.
- [67] E. Yavuz, *Makine Öğrenmesi Kullanımı ile Taşıt Kaynaklı Emisyonların Modellenmesi*, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2025.

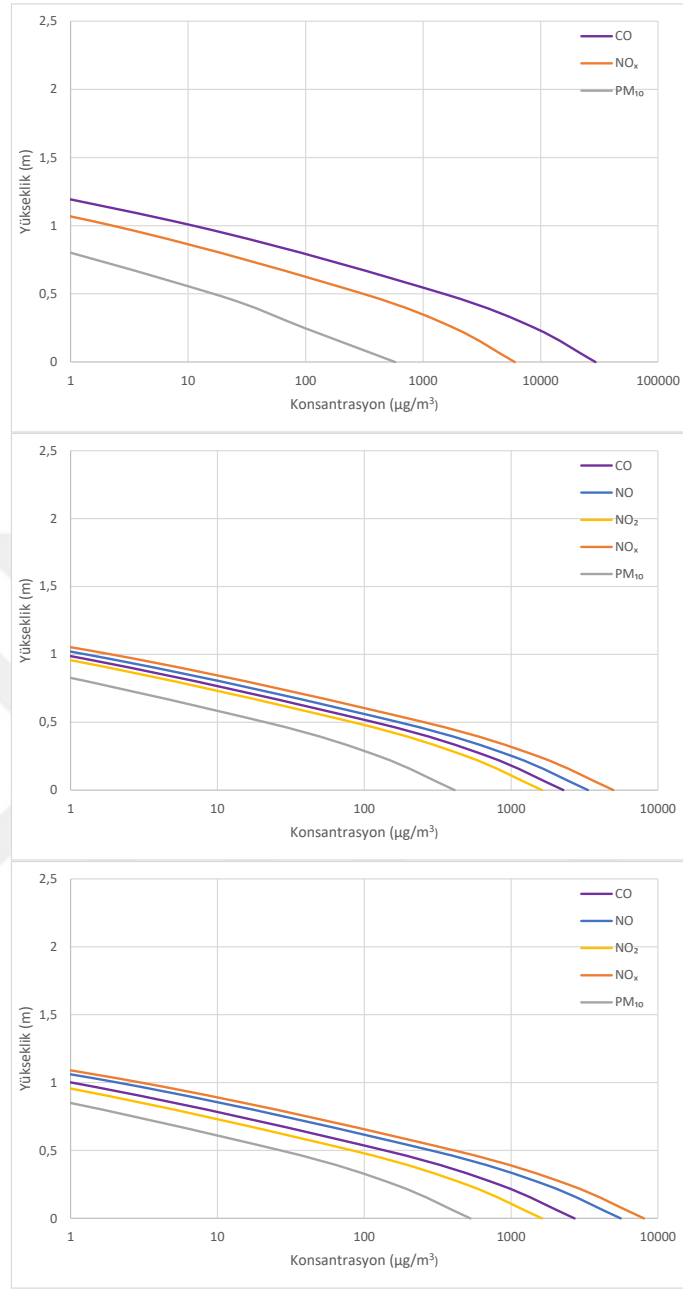


A

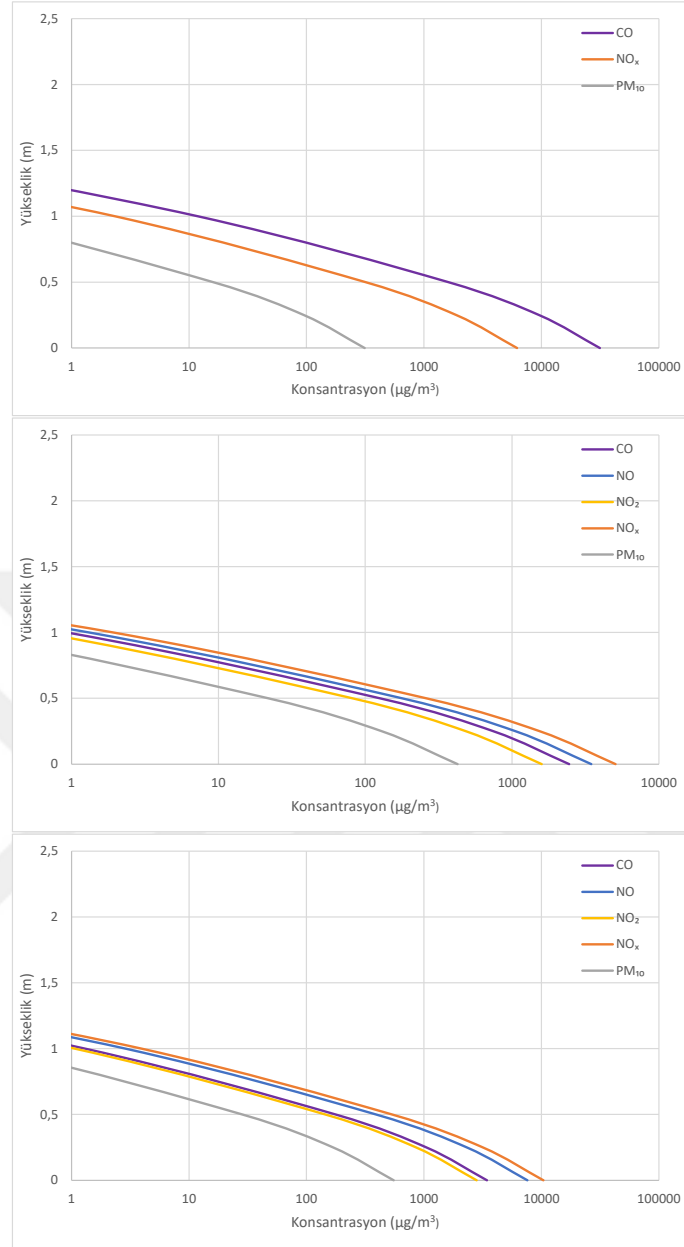
MODEL SONUÇLARI



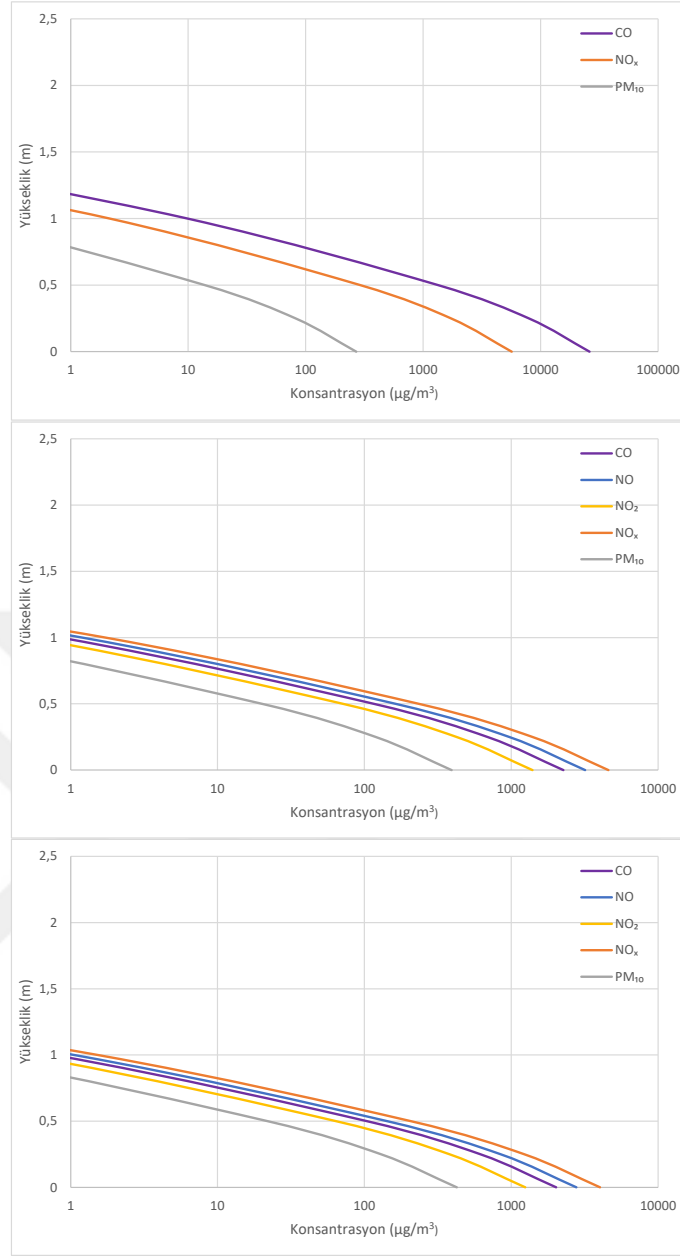
Şekil A.1 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (13.03.2024)



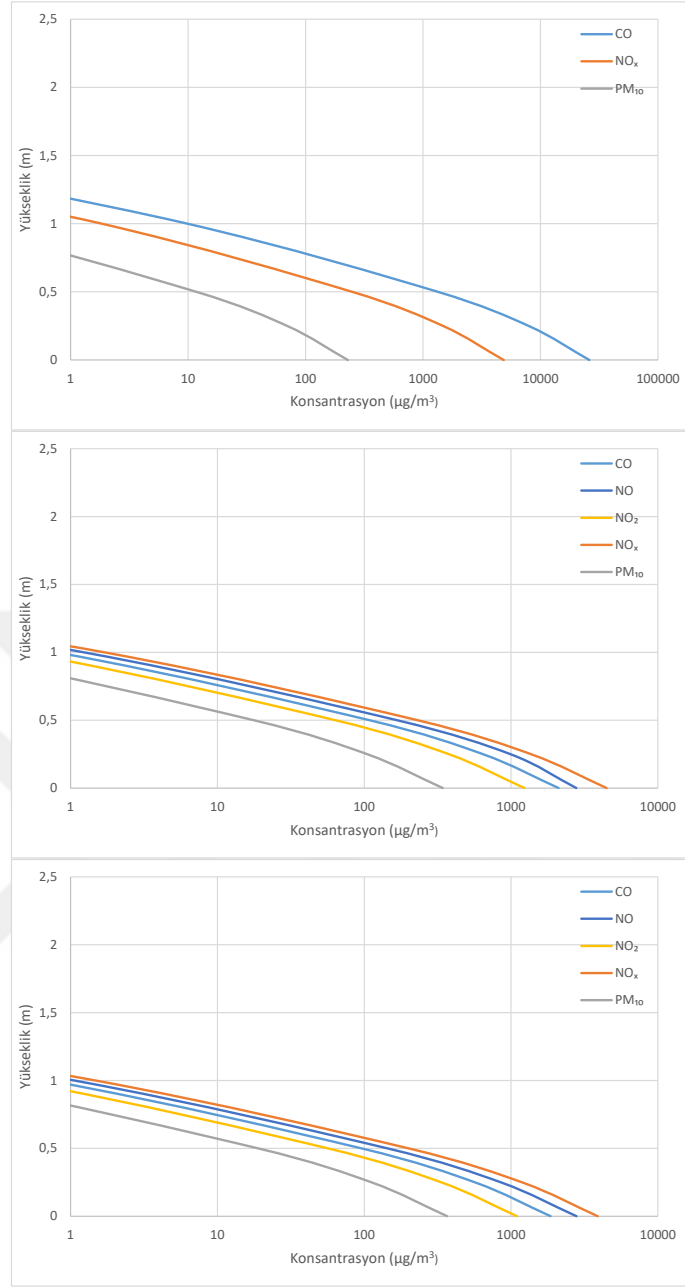
Şekil A.2 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları
(14.03.2024)



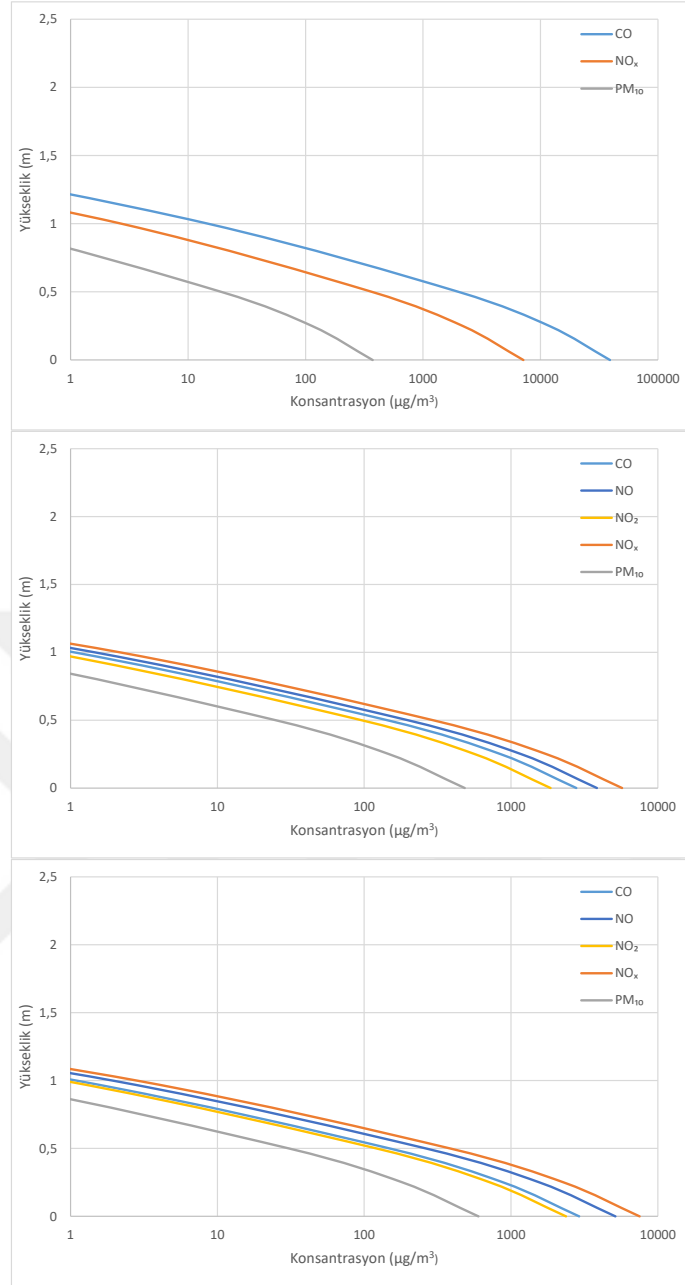
Şekil A.3 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları
(18.03.2024)



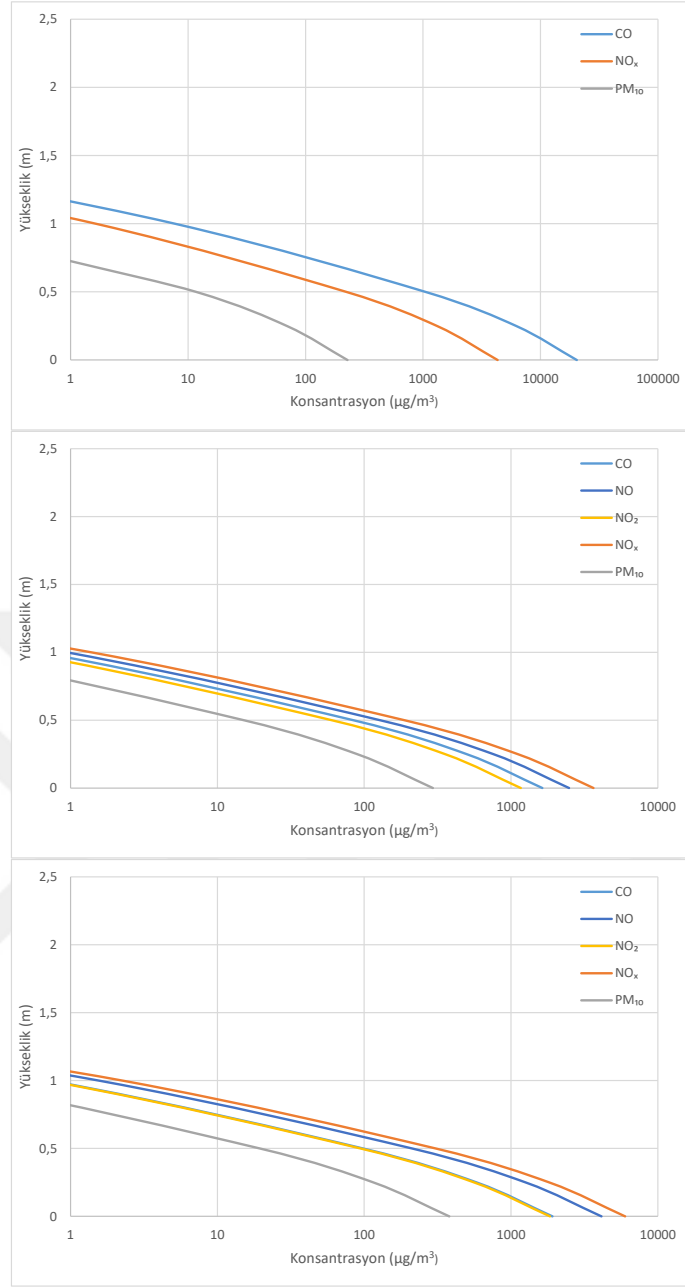
Şekil A.4 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları
(23.03.2024)



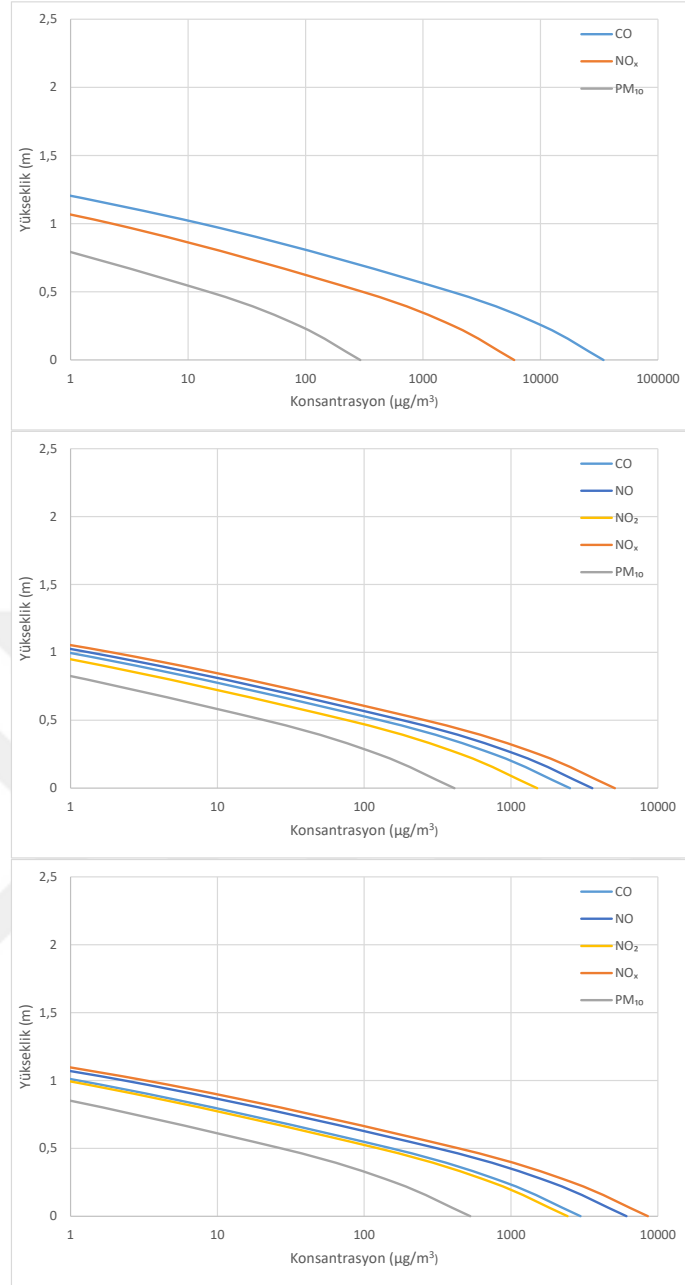
Şekil A.5 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları
(31.03.2024)



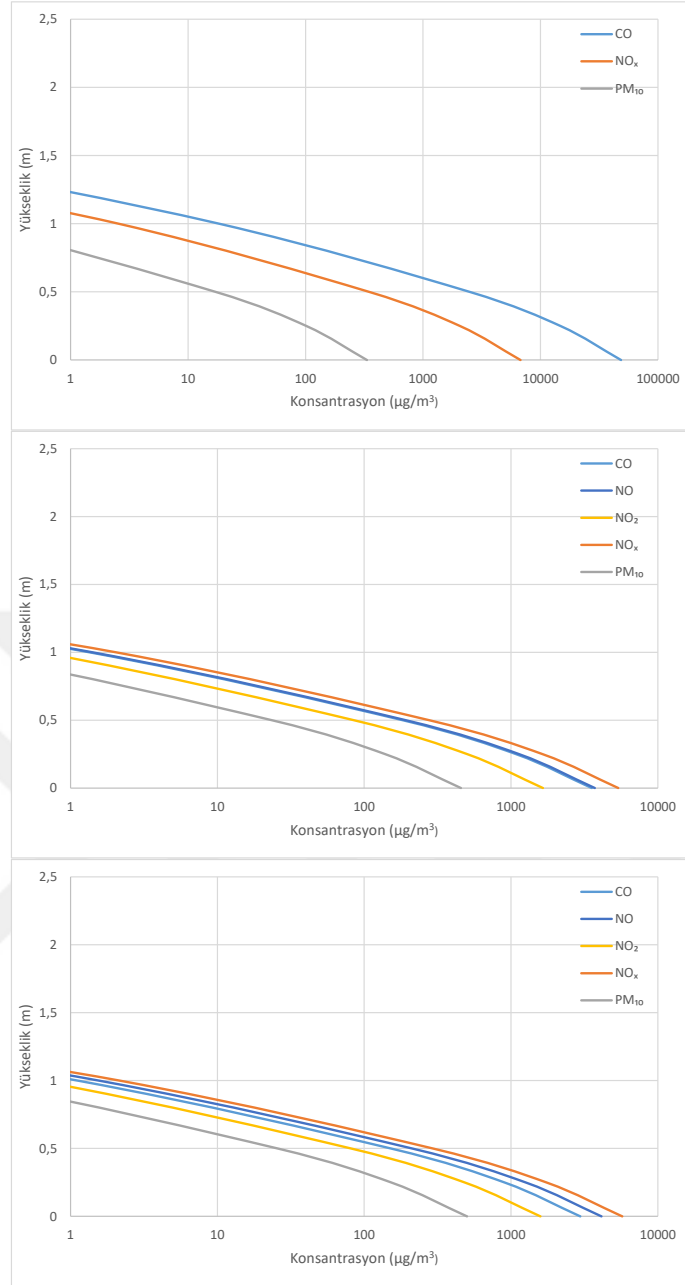
Şekil A.6 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (01.04.2024)



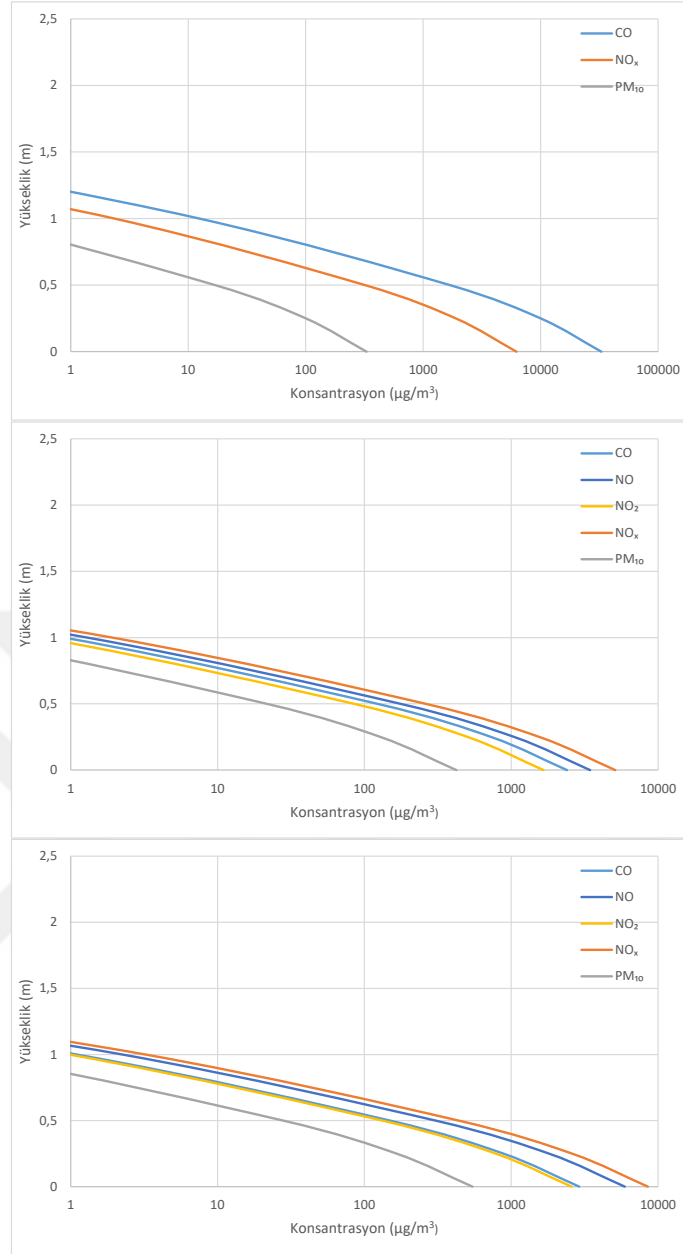
Şekil A.7 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (02.04.2024)



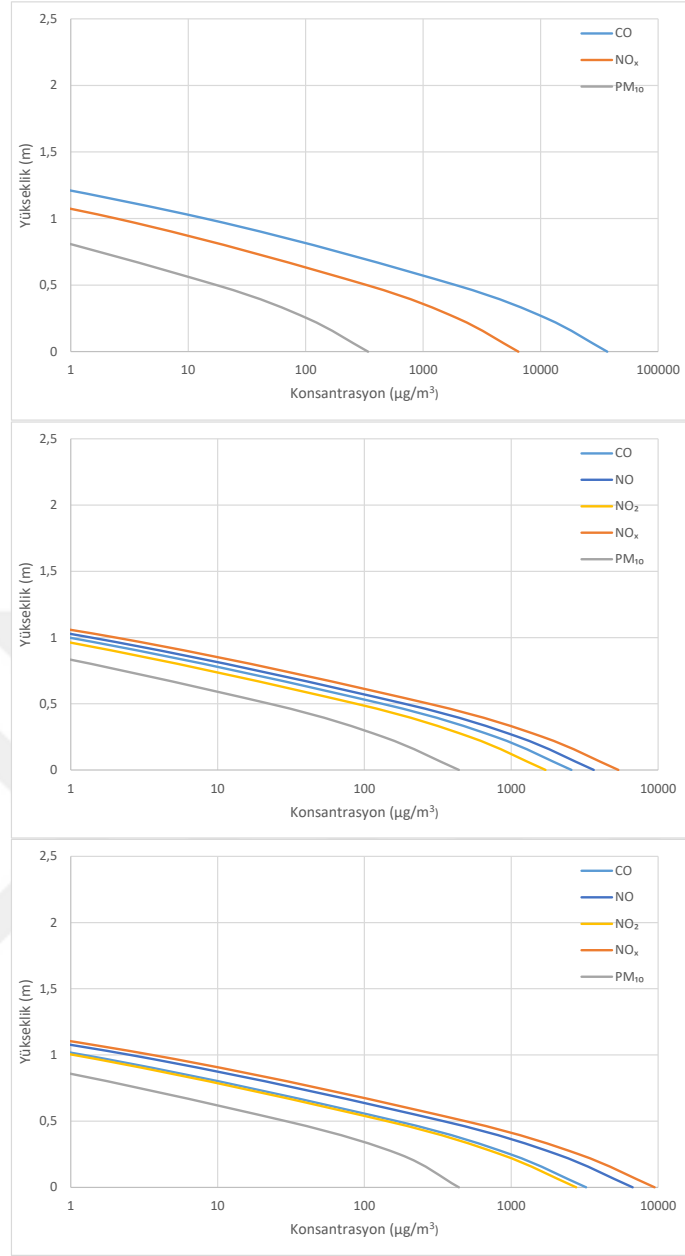
Şekil A.8 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları
(02.04.2024)



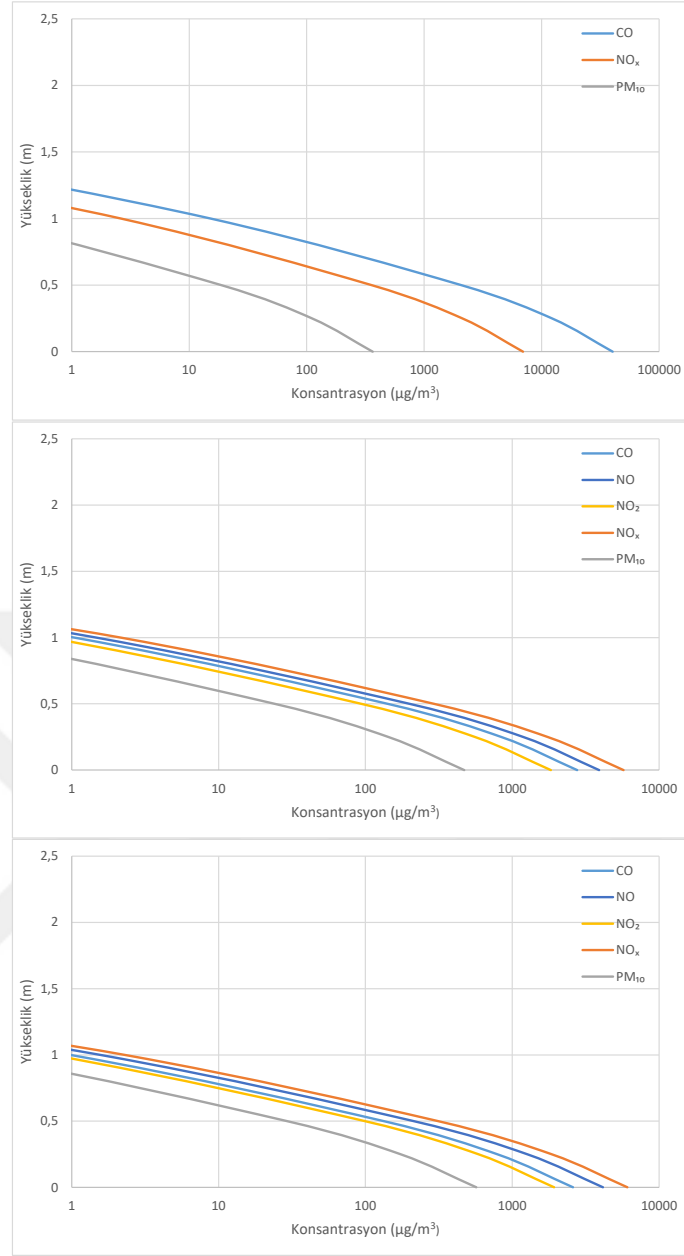
Şekil A.9 Tierlere ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları
(06.10.2024)



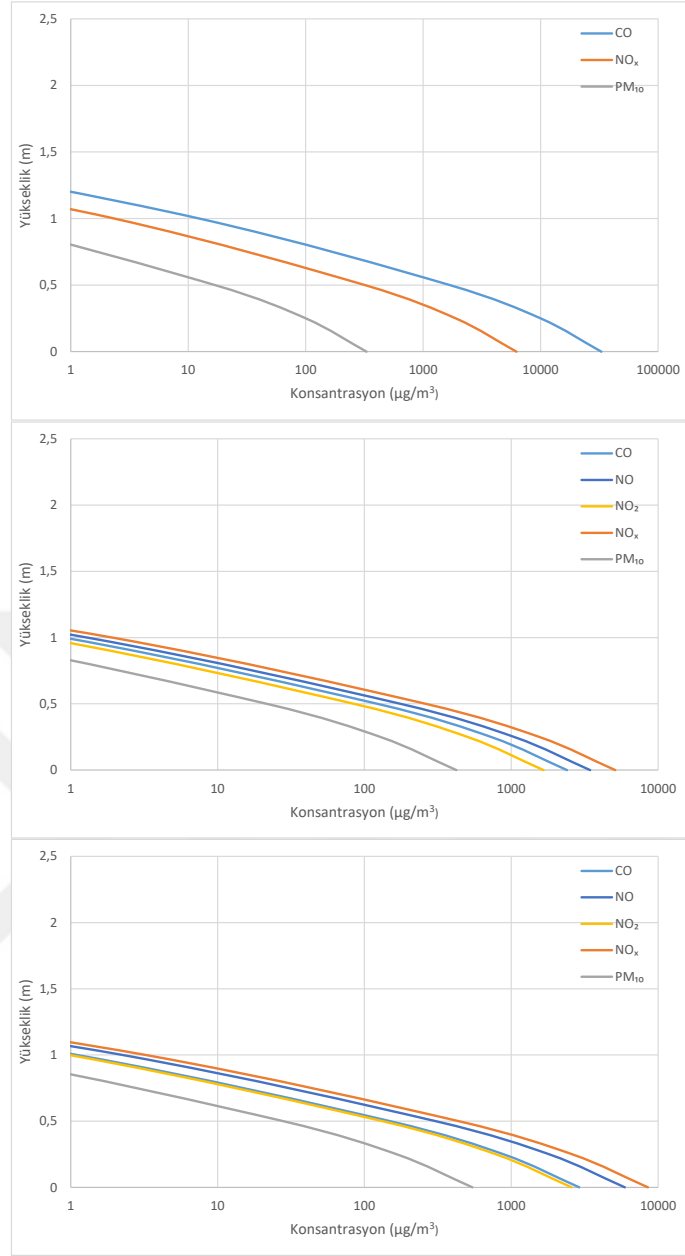
Şekil A.10 Tier 1, 2 ve 3 ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (09.12.2024)



Şekil A.11 Tier 1, 2 ve 3 ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (07.01.2025)



Şekil A.12 Tier 1, 2 ve 3 ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (08.01.2025)



Şekil A.13 Tier 1, 2 ve 3 ait farklı yüksekliklerdeki konsantrasyon dağılımları (09.01.2025)

B

PERFORMANS ANALİZLERİ

Tablo B.1 Model performansı analizi (Tiers-Ölçüm)

Tarih	Kirleticiler	Yükseklik (m)	Tier 1 (µg/m ₃)	Tier 2 (µg/m ₃)	Tier 3 (µg/m ₃)	Ölçüm İstasyonu (µg/m ₃)	Tier 1 Fark %	Tier 2 Fark %	Tier 3 Fark %
7.02.2024	CO	0,31	5066,3	539,2	596,7	576,5	778,8	6,5	-3,5
	NO	0,61	-	77,2	114,8	105,3	-	26,7	-9,1
	NO ₂	0,54	-	67,9	94,2	93,4	-	27,3	-0,9
	NO _x	0,56	208,8	176,1	256,3	254,9	-18,1	30,9	-0,5
	PM ₁₀	0,38	43,5	59,8	68,3	65,6	-33,6	8,8	-4,1
13.02.2024	CO	0,33	5831,7	465,7	523,7	512,3	1038,3	9,1	-2,2
	NO	0,69	-	38,4	57,3	50,2	-	23,5	-14,1
	NO ₂	0,55	-	62,0	85,7	83,4	-	25,6	-2,8
	NO _x	0,61	139,1	116,5	169,7	160,4	-13,3	27,4	-5,8
	PM ₁₀	0,45	27,0	35,3	44,6	42,1	-36,0	16,1	-5,9
13.03.2024	CO	0,33	5617,3	468,6	546,6	540,5	939,3	13,3	-1,1
	NO	0,66	-	51,5	81,8	77,4	-	33,4	-5,7
	NO ₂	0,54	-	63,3	91,4	87,8	-	27,9	-4,1
	NO _x	0,59	159,4	137,5	212,3	206,4	-22,8	33,4	-2,9
	PM ₁₀	0,45	24,8	34,4	43,9	42,2	-41,3	18,4	-3,9
14.03.2024	CO	0,46	2060,9	159,2	190,1	189,3	988,7	15,9	-0,4
	NO	0,68	-	36,3	60,7	55,6	-	34,7	-9,2
	NO ₂	0,58	-	43,0	65,2	65,2	-	34,0	0,0
	NO _x	0,62	113,1	92,9	150,6	150,5	-24,9	38,3	-0,1
	PM ₁₀	0,72	2,4	3,1	3,9	3,8	-37,4	19,5	-3,2
18.03.2024	CO	0,36	4601,5	357,8	501,7	490,9	837,4	27,1	-2,2
	NO	0,69	-	34,3	75,1	72,8	-	52,9	-3,1
	NO ₂	0,56	-	50,0	88,3	85,7	-	41,7	-3,0
	NO _x	0,61	126,8	103,5	212,6	197,3	-35,7	47,6	-7,8
	PM ₁₀	0,43	27,5	37,4	48,7	45,7	-39,8	18,1	-6,6
23.03.2024	CO	0,35	4091,3	355,8	316,8	304,4	1244,1	-16,9	-4,1
	NO	0,67	-	34,0	33,1	31,1	-	-9,4	-6,4
	NO ₂	0,50	-	71,8	64,0	62,9	-	-14,1	-1,8
	NO _x	0,56	178,3	144,2	126,5	118,2	50,9	-22,0	-7,0
	PM ₁₀	0,47	17,6	25,5	27,7	25,0	-29,8	-2,1	-10,7
31.03.2024	CO	0,30	5734,9	464,0	409,0	382,2	1400,5	-21,4	-7,0
	NO	0,61	-	66,2	57,1	56,1	-	-18,0	-1,7
	NO ₂	0,46	-	86,6	77,1	77,0	-	-12,5	-0,1
	NO _x	0,50	249,7	229,6	199,6	189,0	32,1	-21,5	-5,6
	PM ₁₀	0,40	25,2	37,6	40,4	38,0	-33,7	1,0	-6,4

Tablo B.1 Model performansı analizi (Tiers-Ölçüm) (devamı)

Tarih	Kirleticiler	Yükseklik (m)	Tier 1 (µg/m ₃)	Tier 2 (µg/m ₃)	Tier 3 (µg/m ₃)	Ölçüm İstasyonu (µg/m ₃)	Tier 1 Fark %	Tier 2 Fark %	Tier 3 Fark %
1.04.2024	CO	0,35	6113,7	436,2	455,8	425,4	1337,2	-2,5	-7,1
	NO	0,65	-	55,0	73,5	70,5	-	22,0	-4,3
	NO ₂	0,56	-	58,5	74,5	71,4	-	18,1	-4,3
	NO _x	0,58	189,4	151,3	199,2	207,7	-8,8	27,2	4,1
	PM ₁₀	0,43	32,8	42,6	52,9	51,0	-35,6	16,4	-3,6
2.04.2024	CO	0,31	4187,6	336,1	394,2	390,4	972,6	13,9	-1,0
	NO	0,60	-	55,4	92,3	89,9	-	38,4	-2,7
	NO ₂	0,50	-	59,8	94,6	87,5	-	31,7	-8,1
	NO _x	0,52	188,9	159,4	261,4	255,9	-26,2	37,7	-2,1
	PM ₁₀	0,36	33,3	42,9	55,4	53,6	-37,9	19,9	-3,4
16.04.2024	CO	0,53	1386,7	101,7	119,7	110,0	1160,7	7,5	-8,8
	NO	0,69	-	28,8	60,5	59,8	-	51,8	-1,2
	NO ₂	0,50	-	77,4	124,6	119,2	-	35,1	-4,5
	NO _x	0,58	158,1	135,0	226,6	211,0	-25,1	36,0	-7,4
	PM ₁₀	0,48	17,6	24,8	31,7	31,5	-44,3	21,3	-0,6
6.10.2024	CO	0,63	758,7	60,7	45,4	44,6	1601,1	-36,1	-1,7
	NO	0,64	-	56,1	58,7	54,4	-	-3,1	-7,9
	NO ₂	0,49	-	91,8	88,2	84,5	-	-8,6	-4,4
	NO _x	0,56	212,2	168,8	179,7	167,9	26,4	-0,5	-7,0
	PM ₁₀	0,46	23,4	32,0	35,2	33,2	-29,5	3,8	-6,1
9.12.2024	CO	0,37	3325,1	272,8	353,8	332,8	899,1	18,0	-6,3
	NO	0,66	-	48,6	74,4	68,3	-	28,8	-8,9
	NO ₂	0,57	-	40,2	68,0	63,6	-	36,8	-7,0
	NO _x	0,60	119,4	96,1	179,6	168,5	-29,1	43,0	-6,6
	PM ₁₀	0,42	26,2	34,5	45,0	41,3	-36,7	16,4	-8,9
7.01.2025	CO	0,49	2053,9	142,7	179,9	176,1	1066,3	19,0	-2,2
	NO	0,68	-	39,6	72,8	72,5	-	45,4	-0,4
	NO ₂	0,58	-	45,4	73,4	69,3	-	34,6	-6,0
	NO _x	0,61	132,2	109,6	193,7	180,6	-26,8	39,3	-7,3
	PM ₁₀	0,45	25,8	33,3	43,0	41,6	-38,1	20,0	-3,3
8.01.2025	CO	0,36	5880,1	404,1	378,6	369,0	1493,5	-9,5	-2,6
	NO	0,61	-	79,8	84,8	80,1	-	0,4	-5,8
	NO ₂	0,53	-	73,8	77,6	73,8	-	0,0	-5,2
	NO _x	0,55	237,2	195,9	207,4	196,8	20,5	0,5	-5,4
	PM ₁₀	0,45	27,6	35,7	43,1	40,0	-30,9	10,8	-7,8
9.01.2025	CO	0,49	1830,21	133,13	161,55	151,9	1104,9	12,4	-6,4
	NO	0,61	-	70,5	121,5	114,2	-	38,3	-6,3
	NO ₂	0,57	-	47,9	74,4	70,4	-	32,0	-5,7
	NO _x	0,57	179,7	147,4	245,9	245,6	-26,9	40,0	-0,1
	PM ₁₀	0,62	6,2	7,9	10,2	9,9	-37,8	20,1	-2,7

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. N. G. N. Balkanlı, E. Yavuz, A. Saral, S. L. Kuzu, “Comparative analysis of tier approaches for vehicle emission estimation,” *3rd International Graduate Research Symposium (IGRS'24)*, İstanbul, Türkiye, 8 - 10 Mayıs 2024, ss.229-230, (2024).

Projeler

1. Taşıt kaynaklı emisyonların modellenmesinde derin öğrenme ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanarak yüksek çözünürlüklü hava kirliliği modellemesinin geliştirilmesi, 122Y267 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi.