

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



TRAFİK KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİNİN İNCELENMESİ:
VİLNİUS, LİTVANYA ÖRNEĞİ

MOHAMMAD ARIF GHAZNAVI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Atilla MUTLU (Tez Danışmanı)**
 Dr. Öğr. Üyesi Aşkın BİRGÜL
 Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Uzuner

BALIKESİR, OCAK - 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan **“Trafik Kaynaklı Hava Kirliliğın İncelenmesi: Vilnius, Litvanya Örneğı”** başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değışiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mohammad Arif GHAZNAVI

ÖZET

**TRAFİK KAYNAKLI HAVA KİRLİLİĞİNİN İNCELENMESİ: VILNIUS,
LİTVANYA ÖRNEĞİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MOHAMMAD ARIF GHAZNAVİ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ATILLA MUTLU)**

BALIKESİR, OCAK - 2025

Hava kirliliği, dünya çapında toplumların sağlığını ve refahını olumsuz etkileyen yaygın bir çevre sorunudur. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), dünya nüfusunun yaklaşık %90'ının yüksek düzeyde kirletici içeren hava soluduğunu ve dış mekan hava kirliliğinin yılda tahmini 4,2 milyon erken ölüme neden olduğunu tahmin etmektedir. Hava kirliliğinin başlıca kaynakları arasında sanayi, tarım, konut ısıtması ve ulaşım yer almaktadır. Önemli kirleticiler arasında partikül madde (PM), azot oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO₂), karbon monoksit (CO) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) bulunmaktadır. Özellikle PM_{2,5}, solunum ve kardiyovasküler sistemlere derinlemesine nüfuz ederek ciddi sağlık sonuçlarına yol açtığı için özel bir endişe kaynağıdır.

Bu çalışma, Litvanya'nın başkenti Vilnius'un kentleşme ve artan trafik hacmi bağlamında karşılaştığı hava kalitesi sorunlarını ele almaktadır. Vilnius'un kentsel gelişiminin detaylı bir tarihçesi sunulmakta, mevcut hava kalitesi girişimleri değerlendirilmektedir ve şehirdeki hava kirliliği yönetimine ilişkin belirli zorluklar tespit edilmektedir. Araştırma, yoğun trafik bölgelerinde NO_x, CO ve PM konsantrasyonlarını ölçmekte, trafik hacmi ile kirletici seviyeleri arasındaki ilişkiyi analiz etmekte ve mevcut trafik yönetimi politikalarının etkinliğini değerlendirmektedir. Paris, Londra ve Berlin gibi diğer şehirlerle karşılaştırma yapılarak başarılı stratejiler vurgulanmakta ve hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik öneriler sunulmaktadır.

Çalışmanın bulguları, trafikten kaynaklanan hava kirliliği konusunda yerel ve küresel anlayışa katkıda bulunmayı amaçlamakta olup, kentsel hava kalitesinin iyileştirilmesi için etkili politika müdahaleleri ve teknolojik yenilikler hakkında değerli bilgiler sunmaktadır. Bu araştırma, hızlı kentleşen kentsel ortamlarda sürdürülebilir hava kalitesi yönetimi için teknolojik ilerlemeler, politika önlemleri ve halkın katılımını birleştiren çok yönlü bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Hava kirliliği, PM_{2,5}, kentsel hava kalitesi, trafik emisyonları, NO_x, CO, Vilnius

ABSTRACT

INVESTIGATION OF TRAFFIC-CAUSED AIR POLLUTION: THE CASE OF VILNIUS, LITHUANIA

MSC THESIS

MOHAMMAD ARIF GHAZNAVI

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ATILLA MUTLU)

BALIKESİR, JANUARY - 2025

Air pollution is a pervasive environmental issue affecting the health and well-being of populations worldwide. The World Health Organization (WHO) estimates that high levels of pollutants expose approximately 90% of the global population, leading to an estimated 4,2 million premature deaths annually due to outdoor air pollution. The primary sources of air pollution include emissions from industry, agriculture, residential heating, and transportation, with key pollutants being particulate matter (PM), nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO), and volatile organic compounds (VOCs). Among these, PM_{2,5} is particularly concerning due to its ability to penetrate deep into the respiratory and cardiovascular systems, leading to severe health consequences.

This study explores the air quality challenges faced by Vilnius, Lithuania, in the context of its urban development and increasing traffic volumes. It provides a detailed historical overview of Vilnius's urban growth, assesses the current air quality initiatives, and identifies specific challenges related to managing air pollution in the city. The research includes the measurement of NO_x, CO, and PM concentrations in high-traffic areas, analyzes the relationship between traffic volume and pollutant levels, and evaluates the effectiveness of existing traffic management policies. By comparing Vilnius with other cities such as Paris, London, and Berlin, the study highlights successful strategies and provides recommendations for improving air quality through enhanced traffic management practices.

The findings aim to contribute to local and global understanding of traffic-related air pollution, offering valuable insights into effective policy interventions and technological innovations for urban air quality improvement. This research underscores the importance of a multi-faceted approach that combines technological advancements, policy measures, and public engagement to achieve sustainable air quality management in rapidly developing urban environments.

KEYWORDS: Air pollution, PM_{2,5}, urban air quality, traffic emissions, NO_x, CO, Vilnius

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ixx
1. GİRİŞ	1
1.1 Hava Kirliliği Farkındalığının ve Küresel Politikaların Taihsel Gelişimi	1
1.2 Vilnius'un Özel Bağlamı	2
1.2.1 Vilnius'un Kentsel Gelişiminin ve Trafik Artışının Ayrıntılı Tarihi	2
1.2.2 Vilnius'ta Geçmiş ve Güncel Hava Kalitesi Girişimleri	3
1.2.3 Zaman İçinde Kentsel Büyütme ve Trafik Modelleri	4
1.2.4 Vilnius'ta Araç Sahipliği ve Trafik Hacminin Artışı	8
1.2.5 Vilnius'ta Hava Kalitesi İzleme İstasyonları	9
1.3 Diğer Şehirlerden Örnekler	11
1.4 Sorun Açıklaması	12
1.4.1 Vilnius'un Hava Kirliliğini Yönetme Konusunda Karşılaştığı Özel Zorluklar	12
1.4.2 Benzer Şehirlerle Karşılaştırmalar	13
1.4.3 Vilnius'un Durumunun Benzersizliği	14
1.5 Hedefler	14
1.6 Araştırma Soruları	15
1.7 Kapsam ve Sınırlamalar	16
1.7.1 Kapsam	16
1.7.2 Sınırlamalar	17
1.7.3 Potansiyel Önyargılar ve Azaltma Stratejileri	17
1.8 Çalışmanın Önemi	18
1.8.1 Yerel ve Küresel Bilgiye Katkı	18
1.8.1.1 Yerel Katkılar	19
1.8.1.2 Küresel Katkılar	19
1.8.2 Politika ve Halk Sağlığı üzerindeki Potansiyel Uzun Vadeli Etkiler	19
1.8.2.1 Politika Etkileri	19
1.8.2.2 Halk Sağlık Etkileri	20
1.8.2.3 Ekonomik Etkiler	20
1.8.2.4 Çevresel Etkiler	21
2. LİTERATÜR TARAMASI	22
2.1 Giriş	22
2.2 Erken Dönem Çalışmaları (1990'lar - 2000'lerin Başları)	23
2.3 2000'lerin Ortası Çalışmaları (2000-2010)	24
2.4 Son Dönem Çalışmaları (2010'lar - Günümüz)	26
2.5 Metodolojik Gelişmeler ve İlerlemeler	28
2.5.1 Emisyon Envanterleri	28
2.5.2 Atmosferik Yayılma Modelleri	29
2.5.3 Kimyasal Taşıma Modelleri (CTM)	29

2.5.4 İzleme Ağları ve Gerçek Zamanlı Veri Toplama	30
2.6 Teorik Çerçeveler	30
2.6.1 Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC)	31
2.6.2 Sağlık Etki Değerlendirmeleri (HIA)	31
2.6.3 Entegre Değerlendirme Modelleri (IAM).....	32
2.6.4 Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlaması (SUMP)	33
2.7 Vilnius ve Benzer Bölgeler Üzerine Yapılan Çalışmalar	33
2.7.1 Vilnius'ta Kentsel Büyüme ve Trafığa Bağlı Kirlilik	34
2.7.2 Toplu Taşımanın Modernizasyonu	34
2.7.3 Düşük Emisyon Bölgeleri ve Hava Kalitesi Yönetimi	34
2.7.4 Vilnius'ta Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlaması	35
2.8 Orta Ölçekli Şehirlerin Karşılaştırmalı Çalışmaları	35
2.9 Literatürdeki Boşluklar ve Araştırma Fırsatları.....	36
2.9.1 Vilnius İçin Uzun Süreli Verilerin Eksikliği	36
2.9.2 Halk Sağlığı ve Hava Kalitesi Verilerinin Entegrasyonu	37
2.9.3 Çok Modlu Yaklaşımların Eksikliği.....	37
2.9.4 Ekonomik ve Sosyal Etkiler Üzerine Araştırma Eksikliği	38
2.9.5 Gelecek Araştırmalar İçin Fırsatlar	38
2.10 Sonuç	39
3. METODOLOJİ.....	41
3.1 Çalışma Alanı	41
3.1.1 Vilnius'a Genel Bakış	41
3.1.1.1 Coğrafi Bağlam.....	41
3.1.1.2 Vilnius'un Demografik Yapısı	42
3.1.1.3 Coğrafya ve Topografya.....	42
3.1.1.4 İklim.....	42
3.1.1.5 Sıcaklık İnversiyonları.....	42
3.1.1.6 Kentsel Isı Adası Etkisi	43
3.1.1.7 Yeşil Alanların Rolü	43
3.2 Veri Toplama	43
3.2.1 İzleme Noktaları	44
3.2.1.1 Gediminas Caddesi	44
3.2.1.2 Konstitucijos Caddesi	45
3.2.1.3 İstasyon Caddesi	46
3.2.1.4 Ukmerges Caddesi	47
3.2.1.5 Zirmunai Köprüsü	48
3.2.2 İzlenen Kirleticiler	49
3.2.2.1 Azot Oksitler (NOx)	49
3.2.2.2 Karbonmonoksit (CO)	50
3.2.2.3 Partikül Madde (PM)	50
3.4 Veri Analizi	50
3.4.1 Tanımlayıcı İstatistikler	50
3.4.2 Korelasyon Analizi	51
3.4.3 Karşılaştırmalı Analiz.....	51
4. SONUÇLAR	52
4.1 Kirleticilerin Tanımlayıcı İstatistikleri	52
4.2 Kirlilik Seviyelerinin Değişimi	52
4.3 Korelasyon Analizi	54
4.4 Yoğun ve Yoğun Olmayan Saatlerdeki Ortalama Kirleticili Konsantrasyonları	56
4.6 Trafik Hacmi ile Kirleticili Konsantrasyonları Arasındaki Değişim	56

4.7 Hafta İçi ve Hafta Sonu Karşılaştırması	57
4.8 Kirlenici Konsantrasyon Seviyeleri.....	59
4.9 Sonuçların zeti	60
5. TARTIşMA.....	61
5.1 Bulguların Yorumlanması	61
5.2 Yoğun Trafik ve Kirlenici Konsantrasyonları	61
5.3 Trafik Hacmi ve Kirlilik Arasındaki Korelasyon	62
5.4 Hafta İçi ve Hafta Sonu Kirlilik Seviyeleri	63
5.5 Kirlilik ve Sağlık zerindeki Etkiler.....	63
5.6 Bulguların nceki çalışmalarla Karşılaştırılması	63
5.7 Politikalar ve çözüm nerileri.....	64
5.8 Gelecekteki alıřmalar için neriler	66
5.9 Sonuç	66
6. KAYNAKLAR.....	69
ZGEMİř	76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Vilnius Kalesi ve Katedral gibi önemli simge yapılar ve eski şehrin düzeni	5
Şekil 1.2: Yeni yerleşim alanlarını, sanayi bölgelerini ve ilk toplu taşıma ağı.....	6
Şekil 1.3: Geniş bulvarlar, apartman blokları, sanayi bölgeleri ve genişletilmiş toplu taşıma ağı	7
Şekil 1.4: Vilnius'taki en son gelişmeleri ve önemli trafik sıkışıklık noktaları	8
Şekil 1.5: Vilnius'ta Araç Sahipliği ve Trafik Hacmindeki Artış (1990-2020).	9
Şekil 1.6: Vilnius'taki hava kalitesi izleme istasyonlarının konumları.	10
Şekil 3.1: Vilnius'un Coğrafi Konumu.	41
Şekil 3.2: Gediminas Caddesi konumu	45
Şekil 3.3: Konstitucijos Caddesi konumu	46
Şekil 3.4: İstasyon Caddesi konumu.	47
Şekil 3.5: Ukmerges Caddesi konumu.	48
Şekil 3.6: Zirmunai Köprüsü konumu.....	49
Şekil 4.1: Kirleticilerin seviye değişim grafikleri.	53
Şekil 4.2: Trafik Hacmi ile Kirleticiler Arasındaki İlişki.	54
Şekil 4.3: Trafik Hacmi ile Kirleticiler Konsantrasyonları Arasındaki Değişim grafikleri. ...	57
Şekil 4.4: Hafta içi ve hafta sonu kirleticilerin karşılaştırması.	58

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Numune Alma Programı	44
Tablo 4.1: Kirleticilerin tanımlayıcı istatistikleri	52
Tablo 4.2: Yoğun ve Yoğun Olmayan Saatlerdeki Ortalama Kirletici Konsantrasyonları.	56
Tablo 4.3: Ortalama Kirletici Konsantrasyonları (Mart - Temmuz 2023)	59



KISALTMALAR LİSTESİ

PM	: Partikül Madde
NO_x	: Azot Oksitler
SO₂	: Kükürt Dioksit
CO	: Karbon Monoksit
VOC	: Uçucu Organik Bileşikler
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
UNECE	: Birleşmiş Milletler Avrupa Ekonomik Komisyonu
CLRTAP	: Uzun Menzilli Sınırlar Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi
LEZ	: Düşük Emisyon Bölgesi
BRT	: Hızlı Otobüs Transit Sistemi
KOAH	: kronik obstrüktif akciğer hastalığı
EPA	: Çevre Koruma Ajansı
TRAP	: Trafik Kaynaklı Hava Kirliliği
CTM	: Kimyasal Taşıma Modelleri
EV	: Elektrikli Araçlar
GIS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
SUMP	: Sürdürülebilir Kentsel Mobilite Planları
EKS	: Çevresel Kuznets Eğrisi
IAM	: Entegre Değerlendirme Modelleri

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Vilnius şehrindeki hava kirliliği ve trafik hacmi arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ele alınan konunun önemi, yalnızca Vilnius için değil, artan kentleşme ve trafik yoğunluğu ile mücadele eden diğer şehirler için de geçerlidir.

Tezimin hazırlanması sürecinde yol gösterici bilgi ve destekleriyle bana rehberlik eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Atilla Mutlu'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Bununla birlikte, bu süreçte beni maddi ve manevi olarak destekleyen, motivasyonumu her zaman yüksek tutmamı sağlayan aileme ve arkadaşlarıma da sonsuz minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Bu çalışma, şehirlerde sürdürülebilir trafik yönetimi ve hava kalitesinin iyileştirilmesi adına küçük de olsa bir katkı sunma amacı taşımaktadır. İleride bu alanda yapılacak daha kapsamlı çalışmalara ışık tutması dileğiyle.

Balıkesir, 2025

Mohammad Arif Ghaznavi

1. GİRİŞ

Hava kirliliği dünya çapında toplumların sağlığını ve refahını etkileyen yaygın bir çevre sorunudur. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), küresel olarak insanların yaklaşık %90'ının yüksek düzeyde kirlenmiş içeren hava soluduğunu tahmin etmektedir. Tek başına dış mekan hava kirliliği, başta kalp hastalığı, felç, kronik obstrüktif akciğer hastalığı (KOAH), akciğer kanseri ve çocuklarda akut solunum yolu enfeksiyonları nedeniyle yılda tahmini 4,2 milyon erken ölümden sorumludur (WHO, 2018).

Hava kirliliği, sanayi, tarım, konut ısıtması ve ulaşım gibi çeşitli kaynaklardan kaynaklanan emisyonların karmaşık bir karışımından kaynaklanmaktadır. Önemli kirlenmeler arasında partikül madde (PM), nitrojen oksitler (NO_x), kükürt dioksit (SO_2), karbon monoksit (CO) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) yer alır. Partikül madde, özellikle $\text{PM}_{2,5}$ (çapı 2,5 mikrometreden küçük partiküller), bu ince partiküllerin solunum ve kardiyovasküler sistemlere nüfuz ederek ciddi sağlık sonuçlarına yol açabilmesi nedeniyle en önemli sağlık risklerini oluşturmaktadır (WHO, 2018).

- Küresel Hastalık Yüklü çalışması, ortam hava kirliliğinin dünya çapında ölüm oranlarında beşinci önde gelen risk faktörü olduğunu tahmin etmektedir (Health Effects Institute, 2017).
- Gelişmekte olan ülkelerdeki şehirler, hava kirliliğinin en ağır yükünü taşımaktadır; düzeyler genellikle WHO yönergelerini beş kattan fazla aşmaktadır (WHO, 2018).
- Hava kirliliğinden kaynaklanan erken ölümlerin ve hastalıkların ekonomik maliyetinin yıllık 5 trilyon dolar olduğu tahmin edilmektedir (World Bank, 2016).

1.1 Hava Kirliliği Farkındalığının ve Küresel Politikaların Tarihsel Gelişimi

Erken Farkındalık ve Sanayi Devrimi: 18. ve 19. yüzyıllardaki sanayi devrimi, kömür kullanımının yaygınlaşması nedeniyle hava kirliliğinde önemli bir artışa işaret etmiştir. Londra gibi şehirler, 1952'deki Büyük Duman'da tasvir edilen ve binlerce kişinin ölümüne neden olan şiddetli dumanla karşılaşmıştır. Bu olay bir dönüm noktası olarak ve Birleşik Krallık'ta hava kirliliğine yönelik ilk yasal tedbirlerden biri olan 1956 Temiz Hava Yasası'nın ortaya çıkmasına yol açmıştır (Brimblecombe, 2006; Greater London Authority, 2012).

İkinci Dünya Savaşı sonrası, dünya çapında hızlı sanayileşme ve kentleşme görülmüştür ve hava kirliliği sorunları daha da kötüleşmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1970 tarihli Temiz Hava Yasası, Çevre Koruma Ajansı'nı (EPA) kurmuş ve halk sağlığını korumak için hava kalitesi standartlarını belirlemiştir. Üye devletler için bağlayıcı hava kalitesi hedefleri belirleyen Avrupa Birliği'ndeki Hava Kalitesi Direktifi de dahil olmak üzere diğer ülkelerde de benzer mevzuat izlenmiştir (European Environment Agency, 2019; U.S. Environmental Protection Agency, 2020).

Son yıllarda, hava kirliliğinin küresel doğası ve bunun iklim değişikliğiyle bağlantısı giderek daha fazla açıklanmaktadır. 2015 Paris Anlaşması, çoğu aynı zamanda hava kirletici olan sera gazı emisyonlarını azaltmak için ülkelerin birlikte çalışması gerektiğini vurgulamıştır. Yenilenebilir enerjinin, elektrikli araçların ve yeşil şehir planlamasının yükselişi, hava kirliliğini azaltmaya yönelik küresel değişimin bir parçasıdır (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018; United Nations, 2015).

Gerçek zamanlı hava kalitesinin izlenmesi, düşük emisyon bölgeleri ve yeşil altyapı gibi yenilikler dünya çapındaki şehirler tarafından benimsenmektedir. Uzun Menzilli Sınırlar Ötesi Hava Kirliliği Sözleşmesi (UNECE/CLRTAP) gibi anlaşmalarda görüldüğü gibi, sınırışan hava kirliliği sorunlarının üstesinden gelmek için sınır ötesi işbirliğine de giderek artan bir vurgu olmuştur (UNECE, 2016).

Bu bölüm, küresel bağlamda, çeşitli şehirlerden vaka çalışmalarını ve hava kirliliği farkındalığının ve politikalarının tarihsel gelişimini inceleyerek, hava kirliliğini ele almanın karmaşıklığını ve aciliyetini vurgulamaktadır. Bu çalışmanın sonraki bölümlerinde Vilnius'a ilişkin belirli zorlukların ve stratejilerin anlaşılmasına zemin hazırlamaktadır.

1.2 Vilnius'un Özel Bağlamı

1.2.1 Vilnius'un Kentsel Gelişiminin ve Trafik Artışının Ayrıntılı Tarihi

Litvanya'nın başkenti Vilnius, 14. yüzyıldaki kuruluşundan bu yana önemli dönüşümlerden geçmiştir. Vilnia ve Neris Nehirlerinin birleştiği noktada bulunan stratejik konumu, siyasi, kültürel ve ekonomik bir merkez olarak erken gelişimine katkıda bulunmuştur. Yüzyıllar boyunca Vilnius, bir ortaçağ kentinden dinamik bir kentsel evrimi yansıtan modern bir metropol haline gelmiştir (Briedis, 2009).

Orta Çağ ve Rönesans Dönemleri: Orta çağ döneminde Vilnius, Litvanya Büyük Dükalığı'nın idari ve dini kurumlarının etrafında yoğunlaşan yoğun bir kentsel çekirdeğe sahip müstahkem bir şehir olarak gelişmiştir. Şehrin düzeni, ortaçağ kentsel tasarımına özgü dar sokaklar ve birbirine yakın inşa edilmiş yapılarla karakterize edilmiştir. Rönesans dönemi, yeni mahallelerin kurulması ve önemli mimari yapıların inşa edilmesiyle şehrin genişlemesine tanık olmuştur (Venclova,1996).

19. yüzyıl bir sanayileşme ve kentsel genişleme dönemin simgesi olmuştur. Vilnius, Rus İmparatorluğu'nun bir parçası olmuş ve büyümesi demiryolları ve endüstriyel tesislerin inşasından etkilenmiştir. Bu dönemde yeni yerleşim alanları gelişmiş ve atlı tramvaylar gibi toplu taşıma sistemleri tanıtılmıştır (Venclova,1996).

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Vilnius, Sovyetler Birliği'ne dahil edilmiştir. Bu dönemde şehrin kentsel gelişimi, büyük ölçekli sanayileşme ve geniş konut komplekslerinin inşası ile karakterize edilmiştir. Sovyet döneminde merkezi kentsel planlamanın uygulanmasına tanık olunmuş ve bu da geniş bulvarların, apartman bloklarının ve sanayi bölgelerinin yaratılmasına yol açmıştır. Trafik artışı, büyük karayollarının ve otobüsler ve trolleybüsler de dahil olmak üzere toplu taşıma ağlarının inşası yoluyla yönetilmiştir (Cunningham, 2004). 1990 yılında bağımsızlığını kazandığından bu yana, Vilnius hızlı bir kentleşme ve ekonomik büyüme yaşamıştır. Piyasa ekonomisine geçiş, altyapı ve gayrimenkul alanlarında yeni yatırımları teşvik etmiştir. Kentin nüfusu artmış, bu da araç sahipliğinde ve trafik hacimlerinde artışa yol açmıştır. Vilnius'taki modern kentsel gelişim, iş bölgelerinin, yerleşim bölgelerinin ve ticari merkezlerin inşasını içermektedir ve bu da özellikle şehir merkezinde ve ana arterlerde trafik sıkışıklığının artmasına katkıda bulunmaktadır (Briedis, 2009).

1.2.2 Vilnius'ta Geçmiş ve Güncel Hava Kalitesi Girişimleri

20. yüzyılın sonlarında çevre bilinci arttıkça Vilnius, hava kirliliğine yönelik önlemler uygulamaya başlamıştır. İlk çabalar endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan emisyonların azaltılmasına ve ısınma için daha temiz enerji kaynaklarına geçişe odaklanmıştır (Briedis, 2009).

2000'li yılların başı, hava kalitesi yönetimine yönelik daha yapılandırılmış bir yaklaşımın işareti olmuştur. Vilnius, endüstriler ve araçlar için emisyon sınırlarının belirlenmesini de

içeren, hava kalitesine ilişkin çeşitli Avrupa Birliği direktiflerini kabul etmiştir. Şehir ayrıca kirlenici seviyelerini takip etmek için çeşitli izleme istasyonları kurarak hava kalitesi izleme ağını geliştirmeye başlamıştır (Briedis, 2009; Venclova, 2016).

Son yıllarda Vilnius, hava kalitesini iyileştirmek için çeşitli girişimler başlatmıştır:

- Toplu Taşımacılığın Teşvik Edilmesi: Şehir, elektrikli otobüslerin kullanıma sunulması ve yeni otobüs ve trolleybüs güzergahlarının geliştirilmesi de dahil olmak üzere toplu taşıma sistemini genişletme ve modernleştirmeye yatırım yapmıştır (Vilnius Municipality, 2017).
- Bisiklet Altyapısı: Bisikletin alternatif bir ulaşım aracı olarak yaygınlaştırılması için çaba sarf edilmektedir. Buna, özel bisiklet şeritlerinin inşası ve bisiklet paylaşım programları da dahildir (Venclova, 2016).
- Düşük Emisyon Bölgeleri (LEZ'ler): Vilnius, yalnızca belirli emisyon standartlarını karşılayan araçlara izin verilen düşük emisyon bölgelerinin uygulanmasını düşünmüştür. Bu girişim şehir merkezinde trafiğe bağlı emisyonların azaltılmasını amaçlamaktadır (European Commission, 2021).
- Yeşil Kentsel Planlama: Şehir, hava kalitesini artırmak ve kent sakinlerine rekreasyon alanları sağlamak amacıyla yeşil alanları ve kent ormanlarını planlamasına dahil etmiştir (Venclova & Kreuger, 2021).

1.2.3 Zaman İçinde Kentsel Büyüme ve Trafik Modelleri

Aşağıda Vilnius'un zaman içindeki kentsel büyümesini ve trafik modellerini gösteren haritaların ve diyagramların kavramsal açıklamaları bulunmaktadır. Bu görsel araçlar şehrin peyzajındaki ve trafik dinamiklerindeki değişimlerin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

(Şekil 1.1), ortaçağ ve Rönesans dönemi Vilnius'u göstermektedir; surlarla çevrili şehir duvarları, merkezi katedral ve muhtemelen Neris ve Vilnia nehirlerini temsil eden çevredeki nehirler sergilenmiştir. Tasvir edilen katedral Vilnius Katedrali olup, önemli bir dini ve kültürel yapıdır. Şehir surları ve köprüler, özellikle Töton Şövalyeleri'ne karşı, ortaçağ döneminde şehrin stratejik savunmalarını vurgulamaktadır. Vilnius, Polonya-Litvanya Birliği içerisinde büyük bir şehir haline geldikçe, Rönesans dönemi mimarisini ve şehir düzenini etkilemiş; bu durum, 1579 yılında Vilnius Üniversitesi'nin kurulması ve Gotik ve Rönesans tarzı binaların inşasıyla kendini göstermiştir (Baranauskas, 2000).



Şekil 1.1: Vilnius Kalesi ve Katedral gibi önemli simge yapılar ve eski şehrin düzeni (Baranauskas, 2000).

Vilnius'un 19. yüzyıl sonları ve 20. yüzyıl başları arasındaki sanayi dönemini ait görsel Şekil 1.2'de verilmiştir. Ön planda görülen tren istasyonu ve demiryolu, şehrin bu dönemde sanayileşme ve ulaşım altyapısına verdiği önemi vurgulamaktadır. Arkadaki fabrika bacaları, sanayinin yükselişini ve şehrin modernleşme sürecini simgelerken, elektrikli trolleybüsler ve modern binalar Vilnius'un kentsel gelişiminin hızlandığını gösterir. Şehir, bu dönemde yeni mahalleler, köprüler ve sanayi yapıları ile büyümüş ve geleneksel yapıdan, sanayiye dayalı bir kentsel merkeze dönüşmüştür (Cepaitiene, 2011). Neris Nehri şehrin ortasından akmaya devam ederken, şehirdeki bu gelişmeler Vilnius'un sanayileşme ile birlikte modern bir Avrupa şehri haline geldiğini göstermektedir.



Şekil 1.2: Yeni yerleşim alanlarını, sanayi bölgelerini ve ilk toplu taşıma ağı (Cepaitiene, 2011).

Vilnius'un Sovyet rejimi sonrası dönemine ait bir kent planını Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Sol tarafta belirgin bir şekilde yer alan Neris Nehri, şehrin coğrafi bir mihenk taşı olarak dikkat çekmektedir. Haritada, yerleşim, yeşil alanlar ve sanayi bölgeleri gibi alanların bir arada olduğu görülmektedir, bu da şehrin savaş sonrası kentsel planlama ilkelerini yansıtır. Haritanın alt kısmında, geniş caddeler ve büyük konut bloklarının yanı sıra parklar dikkat çekmektedir. Bu, tipik Sovyet şehir planlaması ile örtüşmektedir; geniş caddeler, büyük toplu yaşam alanları ve işlevsel kamu tesislerine vurgu yapılmıştır. Toplu taşıma hatları, şehrin modern gelişiminde kamu altyapısının rolünü göstermektedir (Cepaitiene, 2011). Birçok yeşil alanın bulunması ise Vilnius'un yaşanabilir ve çevre dostu bir kent yaratma hedefini yansıtmaktadır.



Şekil 1.3: Geniş bulvarlar, apartman blokları, sanayi bölgeleri ve genişletilmiş toplu taşıma ağı (Cepaitiene, 2011).

Litvanya'nın modern Vilnius şehri Şekil 1.4'te gösterilmektedir; şehrin içinden geçen Neris Nehri, kentsel manzaranın merkezi bir unsuru olarak belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır. Tarihi ve modern binalar arasındaki kontrast barizdir; önde yer alan eski yapılar ve arka plandaki yeni yüksek binalar gözlemlenmektedir. Nehir kenarları ağaçlar ve yürüyüş yolları ile kaplıdır, bu da şehrin, kentsel gelişim sırasında yeşil alanları koruma taahhüdünü vurgulamaktadır. Önde görülen köprü gibi yapılar, şehrin farklı bölgelerini birbirine bağlayarak hem araç hem de yaya trafiğine olanak tanımaktadır (Cunningham, 2004).



Şekil 1.4: Vilnius'taki en son gelişmeleri ve önemli trafik sıkışıklık noktaları (<https://www.euroresidentes.com/euroresiuk/european-cities/vilnius-lithuania/>).

Trafik sıkışıklığı bağlamında, modern Vilnius'un bu görüntüsü, şehrin büyümeye devam ederken karşılaştığı ana zorluklardan biri olarak vurgulamaktadır. Neris Nehri boyunca uzanan yollar, özellikle büyüyen kentsel alanlarda yaygın bir sorun olan araç trafiğini göstermektedir. Vilnius, yeni yüksek binaların ve artan ticari ve konut alanlarının inşa edilmesiyle modernleştikçe, özellikle yoğun saatlerde trafik sıkışıklığı seviyeleri artmıştır (Vilnius Municipality, 2023).

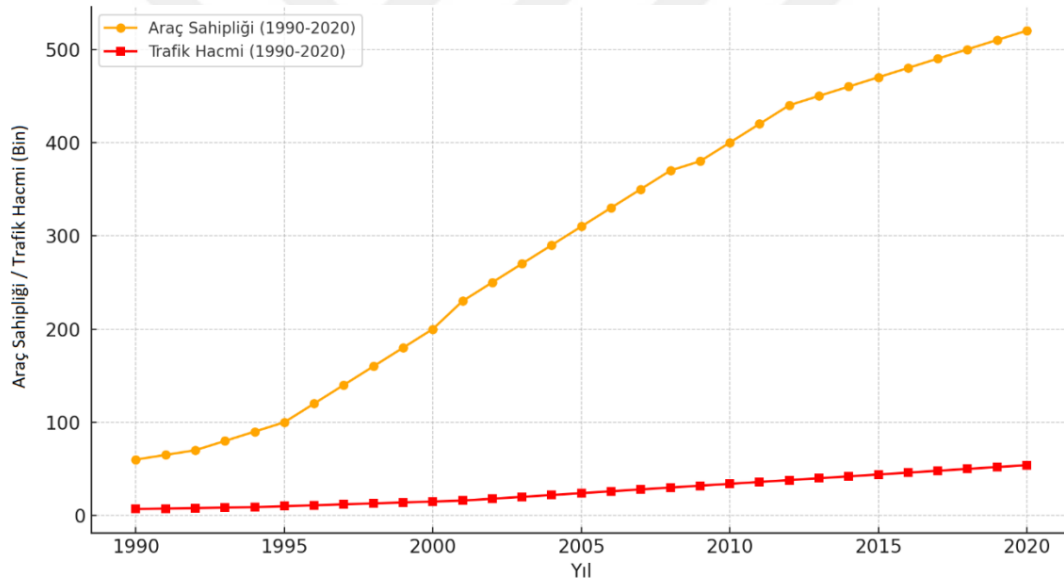
Modern iş bölgeleri, yerleşim bölgeleri ve ticaret merkezleri de dahil olmak üzere Vilnius'taki en son gelişmeleri gösteriyor aynı zamanda önemli trafik sıkışıklık noktalarını ve ana yolları da vurguluyor.

1.2.4 Vilnius'ta Araç Sahipliği ve Trafik Hacminin Artışı

1990-2020 yılları arasında Vilnius'taki araç sahipliği ve trafik hacmindeki değişim Şekil 1.5'de sunulmuştur. Araç sahipliği, 1990'da yaklaşık 60.000 seviyesindeyken, 2020 yılına gelindiğinde 500.000'i aşmıştır. Bu keskin artış, Vilnius'taki ekonomik gelişim ve banliyöleşme ile doğru orantılıdır (Statistics Lithuania, 2022). Trafik hacmi de daha yavaş

bir hızla artmasına rağmen, bu dönemdeki trafik yoğunluğu şehir içi yolları ve altyapıyı önemli ölçüde zorlamıştır.

Artan araç sahipliği ve trafik hacmi, trafik kaynaklı hava kirliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmuştur. Yollardaki daha fazla araç, özellikle yoğun saatlerde, azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO) ve partikül madde (PM) gibi zararlı emisyonların artmasına neden olmuştur (European Environment Agency, 2021). Bu kirlilik, hem şehirdeki hava kalitesini hem de halk sağlığını olumsuz etkilemektedir. Son yıllarda Vilnius'ta, bu sorunlarla mücadele etmek için düşük emisyon bölgeleri ve toplu taşıma altyapısını geliştirmeye yönelik adımlar atılmıştır (European Commission, 2020).



Şekil 1.5: Vilnius'ta Araç Sahipliği ve Trafik Hacmindeki Artış (1990-2020)

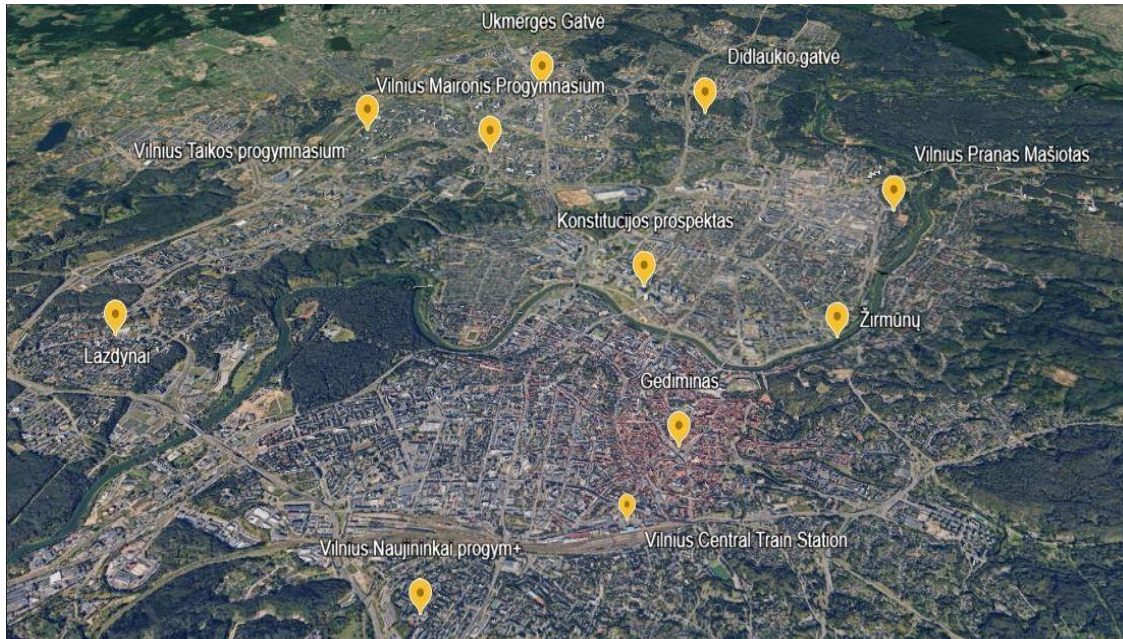
(Lithuanian Transport and Communications Statistics, 2020).

1.2.5 Vilnius'ta Hava Kalitesi İzleme İstasyonları

Vilnius'ta hava kalitesi izleme, şehrin artan trafik hacmi, sanayi faaliyetleri ve kentleşme nedeniyle kritik bir öneme sahiptir. Şehirdeki hava kalitesi izleme ağı, Litvanya Çevre Koruma Ajansı tarafından yönetilmektedir ve NO_x , CO, $\text{PM}_{2.5}$ ve PM_{10} gibi ana kirleticileri izler (Environmental Protection Agency of Lithuania, 2021). Şekil 1.6'da Vilnius'taki hava kalitesi izleme istasyonlarının konumlarını göstermektedir. Bu istasyonlar, kentsel ve banliyö bölgelerini kapsayacak şekilde stratejik olarak yerleştirilmiştir. Amaç, kirlilik seviyelerini ölçmek ve

ulusal ile AB hava kalitesi standartlarına uyumu sağlamaktır (European Environment Agency, 2021).

- Senamiestis (Eski Şehir): Şehir merkezinde yer alır ve özellikle yoğun saatlerde trafik ile ilgili kirliliği izler. Bu istasyon, araç emisyonlarının bu yoğun nüfuslu ve yoğun trafiğe sahip bölgede hava kalitesini nasıl etkilediğine dair kritik veriler sağlar.
- Žvėrynas: Yoğun nüfuslu bir yerleşim bölgesinde yer alır ve hem trafik hem de konut ısıntısından kaynaklanan emisyonları izler.
- Fabijoniškės: Banliyöde yer alan bu istasyon, konut ısıntısından ve yakındaki trafikten kaynaklanan kirleticileri izler.
- Naujamiestis: Sanayi ve ticaret bölgelerinin yakınında bulunur. Fabrika emisyonları ve yoğun trafik sıkışıklığını izler.
- Šeškinė: Karışık yerleşim ve ticaret bölgesinde bulunan bu istasyon, yerel işletmeler ve yakındaki yolların neden olduğu kirliliği izler.
- Antakalnis: Daha doğal ve yerleşim alanlarına yakın bir yerde bulunan bu istasyon, banliyö faaliyetlerinden kaynaklanan kirliliği ölçer ve daha kentsel istasyonlarla karşılaştırma sağlar (Lithuanian Ministry of Environment, 2022).



Şekil 1.6: Vilnius'taki hava kalitesi izleme istasyonlarının konumları.

Vilnius'taki hava kalitesi izleme istasyonlarının konumu, şehirdeki farklı bölgelerde kirletici seviyelerinin nasıl değiştiğini değerlendirmek açısından büyük öneme sahiptir. Bu istasyonlardan elde edilen veriler:

- Hava Kalitesi Eğilimlerini İzleme: Zaman içinde hava kalitesindeki uzun vadeli değişiklikleri izleyerek, kirliliği azaltmaya yönelik kentsel politikaların etkinliği değerlendirilebilir (European Environment Agency, 2021).
- Kirliliği Azaltmaya Yönelik Stratejiler Geliştirme: Veriler, düşük emisyon bölgeleri kurulması, toplu taşımacılığın iyileştirilmesi ve alternatif ulaşım yöntemlerinin teşvik edilmesi gibi kararları destekler (European Commission, 2020).
- Kamu Farkındalığı ve Gerçek Zamanlı Veri: İzleme istasyonları, hava kalitesi hakkında gerçek zamanlı veri sağlayarak, halkın dışarıdaki aktiviteleri ve seyahatlerini daha bilinçli bir şekilde planlamasına yardımcı olur (Environmental Protection Agency of Lithuania, 2021).

1.3 Diğer Şehirlerden Örnekler

Delhi dünyanın en kirli şehirlerinden biridir. Kirliliğin ana kaynakları arasında araç emisyonları, endüstriyel faaliyetler, inşaat tozu ve biyokütle yakılması yer almaktadır. Kış aylarında komşu eyaletlerde tarımsal anız yakılması nedeniyle hava kalitesi daha da bozulmaktadır. Kirlilikle mücadele çabaları arasında araç sayısını azaltmak, kirletici endüstrileri kapatmak ve toplu taşıma altyapısını geliştirmek için Tek-Çift trafik kuralının getirilmesi yer almaktadır. Bu önlemlere rağmen Delhi, özellikle PM_{2,5} ve PM₁₀ olmak üzere yüksek kirlilik seviyeleriyle mücadele etmeye devam edmektedir (Guttikunda & Goel, 2013; Lal vd., 2017).

Pekin, tarihsel olarak kömür yanması ve araç emisyonlarından kaynaklanan ciddi hava kirliliği sorunlarıyla mücadele etmiştir. Bu durum, özellikle ısıtma ihtiyaçlarının arttığı kış aylarında daha da belirginleşmiştir. Çin hükümeti, bu sorunu çözmek için kapsamlı önlemler alarak kömürden doğalgaza geçiş, araçlar ve endüstriler için katı emisyon standartlarının uygulanması ve elektrikli araçların teşvik edilmesi gibi politikalar uygulamaya koymuştur. Bu girişimler, hava kalitesinde belirgin iyileşmelere yol açmış olsa da, özellikle kış mevsiminde artan enerji talebi ve ısınma ihtiyacı nedeniyle hala zorluklar devam etmektedir (Wang vd., 2017; Hao vd., 2018; Chen vd., 2020).

Bununla birlikte, Pekin'de alınan önlemler, diğer büyük şehirler için örnek teşkil etmekte ve hava kirliliğiyle mücadelede politika ve teknoloji kombinasyonunun önemini vurgulamaktadır. Özellikle PM_{2,5} kirliliğinin azaltılmasına yönelik politikalar, halk sağlığı ve ekonomik faydalar açısından dikkat çekici sonuçlar doğurmuştur (Liu vd., 2015; Zhang vd., 2012). Ancak, bu süreçte sürdürülebilirlik ve ekonomik maliyetlerin dengelenmesi, uzun vadeli başarı için kritik bir öneme sahiptir.

Los Angeles, otomobillere olan bağımlılığı ve kirletici maddeleri hapseden benzersiz topografya nedeniyle uzun süredir duman ve yüksek ozon seviyeleriyle mücadele etmektedir. Şehir, katı araç emisyon standartları, elektrikli ve hibrit araçların teşvik edilmesi ve toplu taşımanın kapsamlı şekilde geliştirilmesi dahil olmak üzere çeşitli önlemleri uygulamaya koymuştur. Bu çabalar kirli havayı önemli ölçüde azaltmış ve hava kalitesini iyileştirerek Los Angeles'ı benzer sorunlarla uğraşan diğer şehirler için bir model haline getirmiştir (South Coast Air Quality Management District, 2016; Winer vd., 2018)

1.4 Sorun Açıklaması

1.4.1 Vilnius'un Hava Kirliliğini Yönetme Konusunda Karşılaştığı Özel Zorluklar

Birçok şehir merkezi gibi Vilnius da hava kirliliğini yönetme konusunda zorluklarla karşı karşıyadır. Hava kalitesini iyileştirmeyi amaçlayan çeşitli girişim ve politikalara rağmen, çeşitli faktörler yüksek kirlilik seviyelerinin devam etmesine neden olmaktadır. Bu zorluklar çok yönlüdür; hızlı kentleşme, artan nüfus, trafik sıkışıklığı, endüstriyel faaliyetler ve iklim koşullarını içermektedir (Briedis, 2009; Venclova, 2016).

Hızlı kentleşme süreci ve trafik sıkışıklığı Vilnius'taki hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biri araç emisyonlarıdır. Kentin hızlı kentleşmesi, özel araç sayısının artmasına neden olmuş, bu da özellikle yoğun saatlerde ciddi trafik sıkışıklığına neden olmuştur. Gediminas Bulvarı ve Konstitucijos Bulvarı gibi ana caddelerde sık sık trafik sıkışıklığı yaşanıyor ve bu da nitrojen oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır. Son gelişmelere rağmen, özel araçlara olan bağımlılık, nispeten sınırlı toplu taşıma seçenekleriyle birleşmektedir (Vilnius Municipality, 2020).

Endüstriyel faaliyetler Vilnius'un ekonomik büyümesi ve kentsel yayılması da hava kirliliğini artırmıştır. Yeni konut ve ticari alanların gelişimi, toz ve diğer kirleticilerin oluşmasına neden olan inşaat faaliyetlerinin artmasına yol açmıştır. Endüstriyel faaliyetler,

diğer bazı şehirlerdeki kadar baskın olmasa da özellikle daha küçük üretim birimlerinden ve yerel sanayi bölgelerinden kaynaklanan genel kirlilik düzeylerinde hala rol oynamaktadır (European Environment Agency, 2019).

İklimsel ve coğrafi faktörler Vilnius'un coğrafi ve iklim koşulları hava kalitesi yönetimini daha da karmaşık hale getirmektedir. Bir vadide yer alan ve nemli karasal iklimin hakim olduğu şehir, kış aylarında sıklıkla sıcaklık değişimleriyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu dönüşümler kirleticileri yere yakın tutarak hava kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Ek olarak, soğuk kışlar ısıtma kullanımını artırarak yerleşim alanlarından kaynaklanan emisyonların artmasına katkıda bulunmaktadır (Vilnius Municipality, 2020).

1.4.2 Benzer Şehirlerle Karşılaştırmalar

Stockholm, özellikle trafik emisyonlarından kaynaklanan hava kirliliğini yönetme konusunda benzer zorluklarla karşı karşıyadır. Bununla birlikte, Stockholm başarılı trafik sıkışıklığı fiyatlandırması uygulamıştır ve otobüs, tramvay ve feribotları içeren geniş bir toplu taşıma ağına sahiptir. Bu önlemler trafik sıkışıklığını önemli ölçüde azaltmış ve şehir merkezindeki hava kalitesini iyileştirmiştir (Lee & Green, 2019). Buna karşılık, Vilnius'un toplu taşıma altyapısı gelişmekle birlikte hâlâ geride kalmakta ve bu da özel araçlara olan bağımlılığın azaltılmasını daha da zorlaştırmaktadır.

Vilnius gibi Varşova da hem trafik hem de endüstriyel kaynaklardan kaynaklanan ciddi hava kirliliğiyle karşı karşıyadır. Her iki şehir de kış aylarında kirliliği artıran benzer iklim koşullarını paylaşmaktadır. Ancak Varşova, düşük emisyon bölgelerinin uygulanması ve elektrikli araçların teşvik edilmesi konusunda daha agresif davranmıştır. Bu girişimler, Vilnius'un şu anda araştırdığı ancak henüz tam olarak uygulamaya koymadığı bir strateji olan kirlilik seviyelerinin azaltılmasında umut verici sonuçlar vermiştir (Kuklinska vd., 2015).

Kopenhag, bir dizi politika aracılığıyla hava kirliliğiyle başarıyla mücadele eden başka bir şehir. Şehir, geniş bisiklet yollarında bisiklet kullanımını teşvik etmekte ve sıkı araç emisyon standartlarına sahiptir. Kopenhag'ın yeşil kentsel planlamayı entegre etme ve alternatif ulaşım modlarını teşvik etme yaklaşımı, hava kalitesinde önemli iyileşmelere yol açmıştır (Pucher & Buehler, 2008). Vilnius, bisiklet altyapısını geliştirmeye yönelik süregelen

çabalarıyla Kopenhag'ı sürdürülebilir kentsel gelişim ve hava kalitesi yönetimi için örnek model olarak görebilmektedir.

1.4.3 Vilnius'un Durumunun Benzersizliği

Vilnius, diğer şehirlerle ortak zorlukları paylaşırsa da, kendi özgül bağlamı, benzersiz engeller ortaya koymaktadır. Bağımsızlık sonrası hızlı kentleşme, tarihi kentsel yerleşim düzeni ve modern ekonomik gelişme ile birleştiğinde, hava kalitesi yönetimi için karmaşık bir ortam yaratmaktadır. Şehrin vadideki coğrafi konumu, kirliliğin dağılmasını daha da zorlaştırarak, iyi hava kalitesini sağlama ve sürdürme sürecini zorlaştırmaktadır (Briedis, 2009). Ayrıca, geçiş sürecindeki bir ekonominin sosyo-ekonomik dinamikleri, katı çevresel düzenlemelerin uygulanmasını ve yürürlüğe konulmasını daha da karmaşık hale getirmektedir (Venclova, 2016).

Vilnius'un hızlı kentleşmesi, artan trafik hacimlerine, endüstriyel faaliyetlere ve enerji tüketimine katkıda bulunmuştur (Vilnius Municipality, 2020). Şehrin orta çağlardan kalma sokak düzeni, yol altyapısını verimli bir şekilde modernize etme kapasitesini sınırlamaktadır. Şehrin vadide bulunması, özellikle sıcaklık terselmesi dönemlerinde, kirleticilerin doğal dağılımını zorlaştırarak kirleticilerin hapsolmasına ve daha yüksek kirlilik seviyelerine neden olmaktadır (European Environment Agency, 2019). Ayrıca, bir geçiş sürecindeki ekonomi olarak Vilnius, ekonomik büyüme ile çevre düzenlemelerinin uygulanması arasında denge kurma zorluğuyla karşı karşıyadır; daha katı politikalar ekonomik sektörleri ve düşük gelirli nüfusu etkileyebilmektedir (Lee & Green, 2019).

Bu zorlukların üstesinden gelmek, teknolojik yenilikleri, politika müdahalelerini ve halkın katılımını birleştiren çok yönlü bir yaklaşımı gerektirir. Vilnius, benzer şehirlerin deneyimlerinden ders alarak ve stratejilerini kendi benzersiz bağlamına uyarlayarak, hava kalitesini iyileştirmek ve sakinlerinin yaşam kalitesini artırmak için etkili çözümler geliştirebilmektedir (Pucher & Buehler, 2008).

1.5 Hedefler

Bu araştırma, Vilnius'ta trafiğe bağlı hava kirliliği sorununu kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Modern şehirler için hava kirliliği hem çevresel hem de halk sağlığı açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır (WHO, 2018). Vilnius, artan araç sayısı ve trafiğin yoğun olduğu alanlarda giderek kötüleşen hava kalitesi ile karşı karşıyadır (Vilnius

Municipality, 2020). Bu araştırma, şehrin trafiğe bağlı kirletici seviyelerini ölçerek ve mevcut trafik yönetimi politikalarının etkinliğini değerlendirerek, daha sürdürülebilir ve etkili çözümler sunmayı hedeflemektedir.

Araştırma, hava kalitesi yönetimi açısından kapsamlı bir analiz sunarak şehir yönetimine somut veriler ve politika önerileri sağlayacaktır. Hem araçlardan kaynaklanan kirleticilerin ölçülmesi hem de bu kirleticiler ile trafik yoğunluğu arasındaki ilişkilerin incelenmesi, şehirdeki kirliliğin kaynaklarının daha iyi anlaşılmasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, mevcut trafik yönetimi politikalarının gözden geçirilmesi, bu politikaların etkinliğinin ne ölçüde olduğunu gösterecek ve gelecekte daha etkili çözümler geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Araştırma, yalnızca kirliliğin mevcut durumunu ortaya koymakla kalmayacak, aynı zamanda Vilnius'ta hava kalitesini iyileştirmek için uygulanabilir ve sürdürülebilir stratejiler sunmayı da hedeflemektedir. Böylece, Vilnius gibi şehirlerin karşı karşıya olduğu hava kirliliği sorunlarına yenilikçi yaklaşımlar geliştirmek, halk sağlığını korumak ve şehirde daha sağlıklı bir yaşam alanı oluşturmak mümkün olacaktır.

Bu araştırmanın amaçları şunlardır:

- Vilnius'un trafiğin yoğun olduğu bölgelerde önemli hava kirletici maddelerin (NO_x, CO, PM) konsantrasyonlarının belirlenmesi.
- Trafik hacmi ile kirletici seviyeleri arasındaki ilişkiyi analiz edilmesi.
- Hava kirliliğinin azaltılmasında mevcut trafik yönetimi politikalarının etkinliğini değerlendirilmesi.
- Gelişmiş trafik yönetimi stratejileri aracılığıyla hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik öneriler sunulması.

1.6 Araştırma Soruları

Bu çalışma, Vilnius'ta trafiğe bağlı hava kirliliği ile ilgili kritik soruları yanıtlamayı hedeflemektedir. Şehirlerdeki hava kirliliği, büyük ölçüde trafik yoğunluğu ve buna bağlı olarak araçlardan yayılan kirleticilerden kaynaklanmaktadır (European Environment Agency, 2019). Bu nedenle, trafiğin yoğun olduğu alanlarda kirletici seviyelerini ölçmek ve bu seviyelerin trafik hacmi ile olan ilişkisini incelemek, şehir yönetimi ve çevre politikalarının geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Vilnius, artan trafik hacmi ile birlikte hava kalitesinde önemli düşüşler yaşayan bir şehir olarak, hava kirliliğini azaltmaya yönelik etkili stratejilere ihtiyaç duymaktadır (WHO, 2018).

Araştırma soruları, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde hava kalitesinin mevcut durumunu anlamaya yönelik sorulardan başlayarak, trafik hacmi ile kirlilik seviyeleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymayı amaçlar. Son olarak, mevcut trafik yönetimi politikalarının etkinliği incelenecek ve bu politikaların daha sürdürülebilir bir şekilde nasıl geliştirilebileceği üzerine önerilerde bulunulacaktır. Bu sorulara verilecek yanıtlar, şehirdeki hava kalitesinin iyileştirilmesi ve halk sağlığının korunması açısından önemli bir rehber niteliği taşıyacaktır.

Bu çalışma aşağıdaki araştırma sorularına cevap vermeyi amaçlamaktadır:

- Vilnius şehrinde trafiğin yoğun olduğu bölgelerde ortalama NO_x , CO ve PM seviyeleri nelerdir?
- Trafik hacmi bu kirleticilerin konsantrasyonunu nasıl etkiler?
- Şu anda yürürlükte olan en etkili trafik yönetimi politikaları nelerdir ve bunlar nasıl geliştirilebilir?

1.7 Kapsam ve Sınırlamalar

1.7.1 Kapsam

Bu çalışma Vilnius'ta trafiğe bağlı hava kirliliğine odaklanıyor ve özellikle trafiğin yoğun olduğu bölgelerde nitrojen oksit (NO_x), karbon monoksit (CO) ve partikül madde (PM) konsantrasyonlarını incelemektedir. Araştırma, bu kirletici düzeylerini trafik hacmiyle ilişkilendirmeyi, mevcut trafik yönetimi politikalarının etkinliğini değerlendirmeyi ve hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik öneriler sunmayı amaçlamaktadır. Veri toplama dönemi, hava kirliliği seviyelerindeki mevsimsel değişiklikleri yakalamak için hem sıcak hem de soğuk mevsimleri kapsayan Mart'tan Temmuz'a kadar olan beş ayı kapsamaktadır.

Çalışmanın kapsamı şunları içerir:

- Vilnius'ta trafiğin yoğun olduğu alanların belirlenmesi ve izlenmesi.
- Hava kalitesi verilerinin (NO_x , CO, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}) toplanması ve analiz edilmesi.
- Trafik hacmi sayımlarının yapılması ve bunların kirletici düzeylerle ilişkisinin analiz edilmesi.
- Mevcut trafik yönetimi politikalarının gözden geçirilmesi ve bunların etkinliğinin değerlendirilmesi.
- Hava kalitesinin iyileştirilmesi için kanıta dayalı öneriler önermek.

1.7.2 Sınırlamalar

Kapsamlı yaklaşımına rağmen, bu çalışmanın kabul edilmesi gereken bazı sınırlamaları vardır:

Veri toplama dönemi, beş aylık süre boyunca mevsimsel değişimlerin tamamını, özellikle de en soğuk kış ayları gibi zorlu hava koşullarını kapsayamamaktadır. Bu, bulguların yılın diğer bölümlerine genellenebilirliğini etkileyebilmektedir. Gelecek çalışmalarda, izleme periyodunun tüm mevsimsel değişiklikleri kapsayacak şekilde tam bir yıla uzatılması düşünülmelidir.

Coğrafi kapsam çalışması ile Vilnius'taki, tüm şehrin hava kalitesi durumunu temsil etmeyebilecek trafiğin yoğun olduğu belirli bölgelere odaklanmaktadır. Seçilen sahalar, kirliliğin önemli sıcak noktalarının göstergesi olsa da farklı mahalleler ve kenar mahalleler arasındaki kirlilik seviyelerindeki değişkenliği yakalayamayabilirlerdir.

Sabit izleme istasyonları ile sabit hava kalitesi izleme istasyonlarının kullanılması sabit konumlardaki kirlileti seviyelerine ilişkin değerli veriler sağlar ancak farklı yüksekliklerdeki ve mikro ortamlardaki (örneğin binaların içi, yeşil alanların yakınında) kirlilikteki değişiklikleri gözden kaçırabilmektedir. Mobil izleme veya çeşitli konumlardaki ek sabit birimler daha kapsamlı bir senaryo sağlayabilmektedir.

1.7.3 Potansiyel Önyargılar ve Azaltma Stratejileri

Yer seçimi önyargısı ile trafiğin yoğun olduğu alanlardaki izleme sahalarının seçimi bu konumların daha yüksek kirlilik seviyelerine sahip olması beklendiğinden önyargıya neden olabilir. Bunu hafifletmek için, çeşitli trafik yoğunluklarını ve kentsel ortamları yansıtan alanların temsili bir seçimini sağlamak amacıyla bir ön araştırma yapılmıştır.

Zamansal önyargı ile veri toplamanın zamanlamasında beklenmedik olaylardan (örneğin inşaat, yol kazaları) kaynaklanan kısa vadeli kirlilik artışlarını yakalayamayabilir. Sürekli izleme ve gerçek zamanlı veri kaydının dahil edilmesi bu önyargının en aza indirilmesine yardımcı olur. Günün ve haftanın farklı zamanlarında yapılan anlık kontroller ve rastgele örnekleme de verilere sağlamlık katmıştır.

Ölçüm önyargısı ile ekipman kalibrasyonu ve bakım sorunları nedeniyle hava kalitesi ölçümlerindeki olası yanlışlıklar, önyargıya neden olabilir. Bu sorunu çözmek için tüm izleme ekipmanları standart protokollere uygun olarak düzenli kalibrasyon ve bakım kontrollerine tabi tutulacaktır. Yüksek hassasiyetli cihazların kullanılması ve birden fazla kaynaktan gelen verilerin çapraz referanslanması veri doğruluğunu sağlar.

Gözlemci önyargısı ile trafik hacmi sayımlarında ve niteliksel veri toplamada (örn. anketler, röportajlar) insan hatası gözlemci önyargısına yol açabilir. Veri toplayıcıların kapsamlı bir şekilde eğitilmesi ve mümkün olan durumlarda otomatik trafik sayma sistemlerinin kullanılması bu riski azaltabilir. Nitel verilerin niceliksel bulgularla üçgenlenmesi çalışmanın güvenilirliğini daha da artırmaktadır.

Veri analizi önyargısı ile veri analizindeki modellerin gereğinden fazla ayarlanması veya sonuçların seçici olarak raporlanması gibi önyargılar çalışmanın sonuçlarını etkileyebilir. Bunu azaltmak için şeffaf ve tekrarlanabilir analitik yöntemler kullanılacaktır. Objektifliği ve titizliği sağlamak için analitik prosedürlerin ve bulguların meslektaş incelemesi aranacaktır.

Bu sınırlamaları ve olası önyargıları tanıyıp ele alarak çalışma, Vilnius'taki trafik ile ilişkili hava kirliliğine ilişkin güvenilir ve geçerli bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır. Bulgular, hedeflenen ve etkili hava kalitesi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

1.8 Çalışmanın Önemi

1.8.1 Yerel ve Küresel Bilgiye Katkı

Bu çalışma, trafikten kaynaklanan hava kirliliği ve yönetimi konusunda hem yerel hem de küresel anlayışa önemli katkılar sağlamaya hazırlanmaktadır. Vilnius'a odaklanan araştırma, hızlı ekonomik ve demografik değişimlerin yaşandığı belirli bir kentsel bağlamı ele almaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, bu değişikliklerin hava kalitesini ve halk sağlığını nasıl etkilediğine dair değerli bilgiler sunarak dünya çapındaki benzer şehirlere uyarlanabilecek bir model sunacaktır.

1.8.1.1 Yerel Katkılar

- Kirlilik kaynaklarının daha iyi anlaşılması: Çalışma, özellikle trafik emisyonları olmak üzere Vilnius'taki hava kirliliğinin temel kaynaklarını belirleyecektir. Bu yerleştirilmiş veriler, şehir planlamacıları ve politika yapıcıların hedefe yönelik müdahaleler tasarlaması açısından çok önemlidir.
- Politika değerlendirmesi ve öneriler: Çalışma, mevcut trafik yönetimi politikalarının etkinliğini değerlendirerek hava kalitesinin iyileştirilmesine yönelik kanıta dayalı öneriler sunacaktır. Bu bilgiler mevcut politikaların iyileştirilmesine yardımcı olabilir ve Vilnius'un benzersiz bağlamına göre uyarlanmış yeni girişimlerin geliştirilmesine bilgi sağlayabilir.
- Halkın farkındalığı ve katılımı: Araştırmanın bulgularının yaygınlaştırılması, hava kirliliğinin kaynakları ve sağlık üzerindeki etkileri konusunda halkın farkındalığını artırabilir. Bu araştırma yoluyla toplumun katılımının sağlanması, hava kalitesi girişimlerine daha fazla kamu desteği sağlayabilir.

1.8.1.2 Küresel Katkılar

- Karşılaştırmalı analiz: Çalışmanın metodolojisi ve bulguları diğer şehirlerdeki benzer araştırmalarla karşılaştırılabilir ve kentsel hava kirliliği dinamiklerinin daha geniş bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunabilir. Bu karşılaştırmalı analiz, şehirler arasında bilgi paylaşımını teşvik ederek en iyi uygulamaları ve ortak zorlukları vurgulayabilir.
- Benzer şehirler için model: Vilnius, hızlı kentleşme ve artan araç kullanımı yaşayan birçok orta ölçekli şehirle aynı özellikleri paylaşmakta. Çalışma, benzer sorunlarla karşı karşıya olan diğer şehirlere uygulanabilir içgörüler ve stratejiler sağlayan bir örnek olay modeli olarak hizmet edebilir.
- Bilimsel literatüre katkı: Trafikten kaynaklanan hava kirliliğinin detaylı analizi ve yönetim stratejilerinin değerlendirilmesi, kentsel hava kalitesine ilişkin bilimsel literatüre katkı sağlayacaktır. Bu araştırma gelecekteki çalışmalara bilgi verebilir ve hava kirliliğini azaltmaya yönelik küresel çabalara rehberlik edebilir.

1.8.2 Politika ve Halk Sağlığı Üzerindeki Potansiyel Uzun Vadeli Etkiler

1.8.2.1 Politika Etkileri

- Bilgiye dayalı karar verme: Çalışmanın bulguları, politika yapıcılara trafikten kaynaklanan hava kirliliğinin kaynakları ve seviyeleri hakkında sağlam veriler

sağlayarak daha bilinçli karar almayı mümkün kılacak. Kanıta dayalı politikaların hava kirliliğinin temel nedenlerini ele almada daha etkili olması muhtemeldir.

- Kapsamlı stratejilerin geliştirilmesi: Çalışma, başarılı müdahaleleri ve iyileştirilmesi gereken alanları vurgulayarak kapsamlı hava kalitesi yönetimi stratejilerinin geliştirilmesini destekleyecektir. Bu stratejiler düzenleyici önlemlerin, altyapı yatırımlarının ve halkın katılımı girişimlerinin bir karışımını içerebilir.
- Uluslararası işbirliği: Şehirler hava kirliliğiyle mücadeleyle yönelik bilgi ve stratejileri paylaştıkça, bu çalışmadan elde edilen bilgiler uluslararası işbirliğini geliştirebilir. Bu, koordineli çabalara ve daha etkili küresel politikalara yol açabilir.

1.8.2.2 Halk Sağlığı Etkileri

- Sağlık risklerinin Azaltılması: Çalışmanın tavsiyelerinin uygulanması, hava kirliliği seviyelerinde önemli azalmalara yol açabilir, böylece solunum ve kalp-damar hastalıkları gibi kirlilikle ilişkili sağlık sorunlarının görülme sıklığı da azalabilir. Bu, genel halk sağlığını iyileştirebilir ve sağlık bakım maliyetlerini azaltabilir.
- Yaşam kalitesinin artırılması: Daha temiz hava, yaşam beklentisinin artması, işe ve okula devamsızlığın azalması ve açık hava eğlence fırsatlarının artması gibi faydalarla daha iyi bir yaşam kalitesine katkıda bulunur.
- Halk sağlığı farkındalığı: Çalışma, hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkileri konusunda farkındalığı artırabilir, bireyleri toplu taşıma, bisiklete binme veya yürüme gibi emisyonları azaltan davranışlar benimsemeye teşvik edebilir. Halk sağlığı kampanyaları, toplumu eğitmek ve daha sağlıklı yaşam tarzlarını teşvik etmek için çalışmanın bulgularını kullanabilir.

1.8.2.3 Ekonomik Etkiler

- Maliyet tasarrufu: Hava kirliliğinin azaltılması, kirliliğe bağlı hastalıkların tedavisiyle ilişkili sağlık bakım maliyetlerinin düşürülmesi ve hastalık nedeniyle iş gücü verimliliğindeki kayıpların azaltılması yoluyla önemli ekonomik tasarruflara yol açabilir.
- Sürdürülebilir kentsel gelişim: Temiz hava, yatırımları ve turizmi çekerek sürdürülebilir kentsel gelişime ve ekonomik büyümeye katkıda bulunabilir. İşletmelerin sağlıklı bir çevreye sahip şehirlere yatırım yapma olasılığı daha yüksektir, bu da istihdam yaratılmasına ve ekonomik istikrara yol açar.

1.8.2.4 Çevresel etkiler

- İklim değişikliğinin azaltılması: Siyah karbon gibi birçok hava kirletici de iklim değişikliğine katkıda bulunur. Çalışmanın önerileri, bu kirleticileri azaltarak iklim değişikliğinin azaltılmasına ve çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesine yardımcı olabilir.
- Biyoçeşitliliğin korunması: Pek çok bitki ve hayvan hava kirliliğine duyarlı olduğundan, hava kalitesinin iyileştirilmesi kentsel biyolojik çeşitliliğe fayda sağlayabilir. Yeşil alanların artırılması ve kirliliğin azaltılması kentsel ortamlarda daha sağlıklı ekosistemler yaratabilir.

Özetle, bu çalışmanın önemi, Vilnius'ta hava kalitesi ve halk sağlığında önemli iyileştirmeler sağlama potansiyeline sahip olmasıdır. Yerel ve küresel bilgiye yaptığı katkılar, politika, halk sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel uzun vadeli etkilerle birleştiğinde, trafikten kaynaklanan hava kirliliğini kapsamlı ve kanıta dayalı stratejilerle ele almanın önemini vurgulamaktadır.

2. Literatür Taraması

2.1 Giriş

Trafik Kaynaklı Hava Kirliliği (TRAP), dünya genelinde kentsel alanları etkileyen en önemli çevre sorunlarından biridir. Araç emisyonları, azot oksitler (NO_x), partikül maddeler (PM), karbon monoksit (CO) ve uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi kirleticileri atmosfere salarak çevreye zarar verir ve solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar gibi halk sağlığı sorunlarına yol açmaktadır (Brunekreef & Holgate, 2002). Bu kirleticilerin kentsel hava kirliliğine olan önemli katkısı, özellikle de araç trafiğinin yoğun olduğu büyük metropol bölgelerinde geniş çapta araştırılmıştır, (Brunekreef & Holgate, 2002; Pope & Dockery, 2006).

Avrupa şehirlerinde, yoğun nüfus ve tarihi kentsel yapıların hava kalitesi sorunlarını daha da arttırdığı yerlerde, trafik emisyonları çevre politikalarının ana odak noktası haline gelmiştir. Düşük emisyon bölgeleri (LEZ) ve diğer düzenleyici önlemler, bu sorunu hafifletmek için birçok şehirde uygulanmıştır (Fischer vd., 2015). Benzer şekilde, Pekin ve Delhi gibi şehirler, araç emisyonlarını azaltmak amacıyla daha sıkı emisyon standartlarını ve toplu taşıma iyileştirmelerini incelemiştir (Guttikunda & Goel, 2013; Wang vd., 2017). Litvanya'nın başkenti Vilnius, trafiğe bağlı hava kirliliği çalışmalarında kendine özgü bir durumu temsil etmektedir. Londra veya Berlin kadar büyük veya sanayileşmiş olmasa da, Vilnius artan kentleşme, araç sayısındaki artış ve gelişmekte olan ulaşım altyapısı nedeniyle kendi zorluklarıyla karşı karşıyadır. Ancak Vilnius'un hava kalitesine yönelik özel araştırmalar sınırlıdır. Briedis (2009) ve Venclova (2016) gibi çalışmalar, şehirde trafiğe bağlı hava kirliliğini azaltmaya yönelik çözüm olarak daha iyi trafik yönetimi, modern toplu taşıma ve bisiklet altyapısına olan ihtiyacı vurgulamaktadır.

Bu literatür taraması, trafiğe bağlı hava kirliliği üzerine yapılan araştırmaların kapsamlı bir incelemesini sağlamayı amaçlamaktadır. Bulguları, geniş bir kronolojik bağlam içinde ele alırken, Vilnius örneğine vurgu yapmaktadır. Bu incelemede, 1990'lı yıllardan günümüze kadar yapılan temel çalışmalar, gelişen metodolojiler, politika müdahaleleri ve bu konunun anlaşılmasını şekillendiren teorik çerçeveler incelenecektir. Mevcut literatürü gözden geçirerek, özellikle Vilnius gibi orta ölçekli şehirlerle ilgili boşluklar belirlenmeye ve gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmaya çalışılacaktır.

2.2 Erken Dönem Çalışmaları (1990'lar - 2000'lerin Başları)

TRAP üzerine yapılan en erken çalışmalar 1990'larda ortaya çıkmıştır. Bu dönem, küresel çevre bilincinin arttığı ve kentsel kirliliğin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerine dair endişelerin büyüdüğü bir dönem olmuştur. Bu dönemdeki araştırmalar, araç emisyonları ile solunum ve kardiyovasküler hastalıklar gibi halk sağlığı sorunları arasındaki güçlü bağlantıları ortaya koymaya başlamıştır (Brunekreef & Holgate, 2002). Bu temel çalışmalar, araçların yaydığı ana kirleticileri anlamak için zemin hazırlamıştır.

Brunekreef ve Holgate (2002), özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlarda hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde inceleyen ilk araştırmacılardan biridirler. Araştırmaları, NO_x ve PM 'nin solunum ve kardiyovasküler sağlık üzerindeki etkilerine odaklanmış ve trafik emisyonlarının bu süreçteki önemli rolünü vurgulamıştır. Bu çalışma, trafiğe bağlı hava kirliliğinin sadece bir çevre sorunu değil, aynı zamanda halk sağlığını da ciddi şekilde etkileyen bir sorun olduğunu ortaya koymuştur.

Aynı dönemde, Pope ve Dockery (2006), Harvard Altı Şehir Çalışması'nın kohort verilerini kullanarak ince partikül maddelere ($\text{PM}_{2.5}$) uzun süreli maruz kalmanın sağlık üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu araştırma, $\text{PM}_{2.5}$ 'in, çoğunlukla araçlar tarafından yayılan bu kirleticilerin, artan ölüm oranlarıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma, özellikle ABD ve Avrupa'da araç emisyon standartlarının sıkılaştırılmasına yönelik hava kalitesi düzenlemelerinin şekillenmesinde kritik bir rol oynamıştır.

Bu dönemde hava kalitesi izleme teknikleri de gelişmiştir. Emisyon envanterlerinin tanıtımı, araştırmacıların araçlar dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan yayılan kirleticilerin miktarını belirlemelerini sağlamıştır. İlk envanterler, araç tipleri, yakıt tüketimi ve emisyon faktörleri gibi verileri toplayarak kirletici miktarını tahmin etmiştir. Avrupa'da, Laden ve ark. (2006), bu tür envanterleri büyük kentsel alanlarda uygulayarak araç emisyonlarının hava kirliliğine nasıl katkıda bulunduğunu incelemiştir.

Aynı zamanda, hava kirleticilerine ait atmosferik dağılım modelleri de geliştirilmiştir. Bu modeller, kirleticilerin rüzgar modelleri ve topoğrafya gibi faktörler göz önünde bulundurularak kentsel alanlarda nasıl yayıldığını simüle etmiştir. Seinfeld ve Pandis (1998), bu alanda öncü çalışmalar yaparak, hava kalitesi çalışmalarında standart araçlar haline gelen modeller geliştirmiştir.

Bu dönemde ABD ve Avrupa'daki şehirler, kirlenici seviyelerini izlemek için izleme istasyonları kurmaya başlamıştır. Dockery ve ark. (1994), bu ağların özellikle trafik yoğunluğu ve emisyonlarla ilişkili olarak hava kalitesindeki dalgalanmaları izlemek için nasıl kullanılabileceğini göstermiştir. 1990'ların sonuna kadar, birçok şehir, NO_x, CO ve PM gibi kirlenitçileri izlemek için kapsamlı ağlar kurmuştur ve bu veriler, politika yapıcılarının trafik ve çevre düzenlemeleri geliştirmelerine olanak tanımıştır.

2000'lerin başında, Avrupa şehirleri hava kirliliğini azaltmaya yönelik trafik yönetimi politikalarının uygulanmasını araştırmaya başlamıştır. Örneğin, Londra'da trafik emisyonlarının düşen hava kalitesiyle ilişkilendirildiğini gösteren geniş bir araştırma birikimine yanıt olarak, tıkanıklık fiyatlandırması uygulaması başlatılmıştır (Beevers & Carslaw, 2005). Bu erken dönem politika müdahaleleri, şehirlerin trafikle ilgili sağlık risklerini hafifletmeye çalıştığı sonraki yıllarda daha katı önlemler için zemin hazırlamıştır. Vilnius için bu dönemde yapılan çalışmalar, daha büyük metropol alanlarına kıyasla sınırlı olmuştur. Ancak, kentsel gelişimin artmasıyla birlikte 2000'lerin başlarında hava kalitesini değerlendirme çalışmaları başlamıştır. Vilnius, hava kalitesi izleme istasyonlarını devreye sokmaya başlamıştır, ancak veri toplama, diğer Avrupa başkentlerine kıyasla hâlâ emekleme aşamasındaymış (Briedis, 2009; Venclova, 2016). Sınırlı araştırmalara rağmen, bu erken dönem çalışmalar, özellikle araç trafiğinden kaynaklanan kirlilik sorunlarına dair şehrin karşılaştığı artan zorluklar hakkında ilk içgörülerini sağlamıştır.

2.3 2000'lerin Ortası Çalışmaları (2000-2010)

2000'lerin ortası, kentsel alanların büyümeye devam etmesi ve şehirlerin giderek daha ciddi hava kalitesi sorunlarıyla karşı karşıya kalmasıyla, trafiğe bağlı hava kirliliği araştırmalarında kritik bir dönem olmuştur. Bu dönemdeki çalışmalar, sadece kirliliğin boyutlarını anlamakla kalmayıp, aynı zamanda özellikle hızla gelişen şehirlerde kirliliği hafifletmeye yönelik stratejiler geliştirmeye de odaklanmıştır (Pucher & Buehler, 2008). Gelişmiş izleme teknikleri ve modelleme sistemleri, bu çalışmalarda trafiğin kentsel hava kalitesi üzerindeki etkilerini nicel olarak ölçmede merkezi bir rol oynamıştır.

Bu dönemde Guttikunda ve Goel (2013) tarafından Delhi'de yürütülen bir çalışmada, araç emisyonlarının Delhi'deki PM_{2,5} seviyelerinin %40'ından fazlasından neden olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmacılar, emisyon envanterleri ve atmosferik yayılma modellerini kullanarak trafiğin hava kirliliğine olan katkısını ölçmüş ve bu konuda hafifletici stratejiler

önermişlerdir. Çalışmanın sonuçları, daha sıkı araç emisyon standartlarına ve toplu taşıma sistemlerinin iyileştirilmesine duyulan ihtiyacı vurgulamıştır.

Avrupa şehirleri, aynı dönemde trafiğe bağlı emisyonları kontrol altına almak için çeşitli politika müdahalelerini keşfetmeye başlamıştır. Beevers ve Carslaw (2005), Londra'da "tıklanıklık fiyatlandırması" (congestion pricing) uygulamasını araştırmıştır. Tıklanıklık fiyatlandırması, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde yolculuk talebini azaltmak amacıyla sürücülerden bir ücret alınması anlamına gelir ve bu yöntem, büyük şehirlerde trafik hacmini ve buna bağlı emisyonları kontrol altına almak için uygulanan yenilikçi bir politika mekanizmasıdır (Börjesson vd., 2012).

Bu, Avrupa şehirlerinde trafik hacimlerini azaltmaya yönelik ilk büyük politika müdahalelerinden biri olmuştur. Sonuçlar, tıklanıklık fiyatlandırmasının şehir merkezinde NO_x ve PM konsantrasyonlarında önemli bir azalmaya yol açtığını göstermiştir (Beevers ve Carslaw, 2005). Bu politikanın başarısı, Stockholm (Eliasson ve Mattsson, 2006) ve Milano (Rotaris ve diğerleri, 2010) gibi diğer şehirlerin de trafiği yönetmek ve hava kirliliğini azaltmak için benzer tıklanıklık yönetimi şemalarını keşfetmesine ilham vermiştir.

ABD'de, Güney Sahil Hava Kalitesi Yönetim Bölgesi (South Coast Air Quality Management District) (2006), Los Angeles'ta trafiğe bağlı kirlilik üzerine kapsamlı bir çalışma yürütmüştür. Bu araştırma, emisyon envanterleri ve atmosferik yayılma modellerini kullanarak ulusal Temiz Hava Yasası (Clean Air Act) ve araç emisyon standartları gibi düzenleyici önlemlerin etkinliğini değerlendirmiştir. Çalışma, bu politikaların zaman içinde NO_x ve ozon seviyelerinde belirgin bir düşüşe yol açtığını ortaya koymuştur. Ancak, çalışmada hava kalitesinin iyileşmesine rağmen, araçlara olan bağımlılığın devam etmesi nedeniyle trafiğin hâlâ önemli bir kirlilik kaynağı olduğu vurgulanmıştır.

2000'lerin ortasında, kimyasal taşıma modelleri (CTM) geliştirilmiştir. Bu modeller, atmosferde meydana gelen kimyasal reaksiyonları ve bu reaksiyonların kirleticilerin dağılımı üzerindeki etkisini anlamak için kullanılmıştır. Özellikle, ikincil kirleticilerin, ozon ve partikül maddelerin oluşumu gibi süreçler bu modellerle daha iyi anlaşılmıştır. Seinfeld ve Pandis (2006), bu alanda öncü çalışmalara imza atarak atmosfer kimyası ve kirlilik oluşum süreçlerinin modellenmesinde önemli gelişmeler sağlamışlardır.

Aynı dönemde, Berlin ve Amsterdam gibi şehirler, LEZ uygulamaya başlamış ve belirli emisyon standartlarını karşılamayan araçların şehir merkezlerine girişini sınırlandırmıştır. Ellison ve ark. (2013), Berlin'deki LEZ'nin etkinliğini değerlendiren bir çalışma yürütmüştür ve PM₁₀ ve NO_x konsantrasyonlarında önemli azalmalar kaydedilmiştir. Bu erken LEZ politikaları, diğer Avrupa şehirlerinde trafik ile ilgili emisyonları kontrol altına almak için bir model haline gelmiştir. Bu bölgelerin etkinliği üzerine yapılan araştırmalar, kirlilik seviyelerini azalttığını, ancak ekonomik etkileri ve halkın bu bölgelere uyum sağlaması gibi zorlukları da beraberinde getirdiğini göstermiştir.

Vilnius, daha büyük Avrupa başkentlerine kıyasla bu tür politikalara nispeten daha geç adapte olmuştur. Ancak, 2000'lerin sonlarına doğru, şehirde artan araç sahipliği ile birlikte hava kalitesi üzerindeki trafik etkilerine ilişkin endişeler de artmıştır. Briedis (2009) tarafından yürütülen araştırma, Vilnius'ta trafik yönetimi ve toplu taşıma altyapısının iyileştirilmesi gereğini vurgulamıştır. Bu çalışma, araç emisyonlarının artan seviyeleri ile başa çıkabilmek için diğer Avrupa şehirlerinin örnek alınması gerektiğini öne sürmüştür.

2.4 Son Dönem Çalışmaları (2010'lar - Günümüz)

Yakın zaman dilimi olarak 2010 yılı ve sonrası hem trafiğe bağlı hava kirliliğinin anlaşılması hem de yönetilmesi açısından önemli gelişmelere sahne olmuştur (Ellison vd., 2013). Bu dönemde birçok şehir, araç emisyonlarını azaltmaya yönelik çeşitli politika müdahaleleri ve teknolojik yenilikler uygulamaya başlamıştır (South Coast Air Quality Management District, 2006). Aynı zamanda, araştırmacılar, hava kirliliği seviyelerini izlemek ve analiz etmek için daha sofistike yöntemler geliştirmişlerdir (Snyder vd., 2013). Son yıllarda yapılan çalışmalar, bu politikaların etkinliğini değerlendirmeye, yeni stratejiler keşfetmeye ve COVID-19 pandemisinin trafik emisyonları üzerindeki etkisini incelemeye odaklanmıştır (Zangari vd., 2022).

Bu dönemin en önemli gelişmelerinden biri, büyük Avrupa şehirlerinde LEZ'nin uygulanması olmuştur. Fischer ve ark. (2015) gibi çalışmalar, Berlin ve Londra gibi şehirlerde LEZ'lerin etkinliğini değerlendirmiş ve bu politikaların, yüksek emisyonlu araçların şehir merkezlerine girişini sınırlandırarak NO_x ve PM konsantrasyonlarında önemli azalmalar sağladığını göstermiştir. Bu çalışmalar, LEZ'lerin halk sağlığı üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koysa da, araştırmacılar ayrıca bu politikaların ekonomik etkilerini

de incelemiştir, özellikle işletmelerin ve lojistik sektörünün karşılaştığı maliyet artışlarına dikkat çekilmiştir.

COVID-19 pandemisi, araç trafiğinin azalması nedeniyle hava kalitesinde geçici olarak önemli iyileşmelere neden olmuştur. Zangari ve ark. (2022), pandemi sırasında küresel hava kalitesi verilerini analiz etti ve dünyanın dört bir yanındaki büyük şehirlerde NO_x ve PM seviyelerinde belirgin düşüşler olduğunu ortaya koymuştur. Bu "doğal deney", trafik yoğunluğunun azaltılmasının hava kalitesinde nasıl anında iyileşmelere yol açabileceğine dair benzersiz öngörüler sunmuştur. Ancak çalışma, trafik seviyeleri normale döndüğünde bu iyileşmelerin sürdürülebilir olup olmayacağına dair soruları da gündeme getirmiştir.

Aynı zamanda, elektrikli araçlar (EV), trafikle ilgili emisyonları azaltma stratejilerinde önemli bir tema haline gelmiştir. Figenbaum ve Kolbenstvedt (2016), Norveç'te EV benimseme sürecini analiz etmiş ve vergi muafiyetleri, ücretsiz otopark ve otobüs şeritlerine erişim gibi devlet teşviklerinin elektrikli araç kullanımını teşvik ettiğini ortaya koymuşlardır. Araştırmaları, EV'lerin kentsel alanlarda NO_x ve CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını ve bu teknolojilerin daha geniş kapsamlı stratejilerin bir parçası olduğunu göstermiştir. Azzolina ve ark. (2023), Oslo, Paris ve Londra gibi büyük Avrupa şehirlerinde EV benimsemesinin hava kalitesi üzerindeki etkisini inceleyerek, EV'lerin pazar payı arttıkça hava kalitesinde daha fazla iyileşmeler olduğunu bulmuştur.

Bu politika müdahalelerine paralel olarak, gerçek zamanlı izleme teknolojilerinin geliştirilmesi, kentsel ortamlarda hava kalitesini izleme ve analiz etme yeteneğini büyük ölçüde artırmıştır. Snyder ve ark. (2013), kirletici konsantrasyonlarını gerçek zamanlı olarak izleyebilen düşük maliyetli sensörlerin geliştirilmesini belgeledi. Bu sensörler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) ve veri analitiğindeki ilerlemelerle birleştirildiğinde, araştırmacıların kirlilik seviyelerini daha doğru bir şekilde izlemelerine ve politika müdahalelerinin anında etkilerini değerlendirmelerine olanak tanımıştır.

Son yıllarda, Vilnius gibi orta büyüklükteki şehirler de bu tür daha agresif politikalar benimsemeye başlamıştır. Venclova (2016) ve Briedis (2015) tarafından yapılan çalışmalar, Vilnius'ta toplu taşıma ve bisiklet altyapısının emisyonları azaltmadaki rolünü araştırmıştır. Vilnius, otobüs ve trolleybüs filolarını modernize etmiş, elektrikli otobüsleri devreye sokmuş ve bisiklet yollarını genişletmiştir. Bu girişimler, hâlâ erken aşamalarında olmasına rağmen,

şehrin özel araçlara bağımlılığını azaltmak ve hava kalitesini iyileştirmek için atılan önemli adımları temsil etmektedir.

Vilnius'taki son araştırmalar, sürdürülebilir kentsel mobilite planlarının (SUMP) hava kalitesi üzerindeki etkisini inceleyen benzer çabaları yansıtmaktadır. Martinez & ark. (2022), Vilnius dahil olmak üzere Avrupa başkentlerinde SUMP uygulamalarını karşılaştırarak, bisiklet altyapısına, toplu taşımaya ve yaya bölgelerine yapılan yatırımların emisyonların azalmasına nasıl katkıda bulunduğunu göstermiştir. Bu çalışma, orta büyüklükteki şehirler için uyarlanmış stratejilerin önemini pekiştirmektedir.

2.5 Metodolojik Gelişmeler ve İlerlemeler

TRAP çalışmalarında, son yıllarda kullanılan metodolojilerde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu gelişmeler, araştırmacılara araç emisyonlarını daha doğru bir şekilde izleme, modelleme ve bu emisyonların kentsel hava kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirme konusunda daha gelişmiş araçlar sağlamıştır. 2010'lar, yeni teknolojilerin tanıtıldığı, mevcut yöntemlerin rafine edildiği ve veri odaklı yaklaşımların çevre araştırmalarında giderek daha fazla kullanıldığı bir dönem olmuştur (Snyder vd., 2013; Wang vd., 2021).

2.5.1 Emisyon Envanterleri

Hava kirliliği araştırmalarında en yaygın kullanılan araçlardan biri, çeşitli kaynaklardan, özellikle araçlardan yayılan kirleticiler emisyonlarının sistematik bir şekilde toplanmasını sağlayan emisyon envanterleri olmuştur. Erken emisyon envanterleri, kirleticilerin atmosfere yayılma miktarını tahmin etmek için araç tipleri, yakıt tüketimi ve emisyon faktörleri gibi verileri toplamaya odaklanmıştır. Bu envanterler, şehirlerdeki trafiğe bağlı kirliliğin boyutunu anlamak ve kilit emisyon kaynaklarını belirlemek açısından kritik öneme sahiptir (Guttikunda & Goel, 2013; Wang vd., 2021).

2000'lerin ortasında, kapsamlı emisyon envanterlerinin geliştirilmesi, hava kirliliği çalışmalarının doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Örneğin, Avrupa İzleme ve Değerlendirme Programı, Avrupa genelinde emisyon verilerinin toplanmasında önemli bir rol oynamıştır (European Environment Agency, 2019). Guttikunda ve Goel (2013), Delhi'de emisyon envanterlerini kullanarak farklı araç türlerinin partikül madde (PM_{2,5}) seviyelerine katkısını nicel olarak ölçmüşlerdir. Daha yakın zamanda Wang & ark. (2021), emisyon

envanterlerini gerçek zamanlı trafik verileri ve uydu gözlemleri ile entegre ederek, kentsel alanlardaki araç emisyonlarının daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

2.5.2 Atmosferik Dağılım Modelleri

Trafiğe bağlı hava kirliliği araştırmalarında önemli bir diğer araç atmosferik dağılım (yayılma) modelidir. Bu model, kirleticilerin atmosfere nasıl yayıldığını, taşındığını ve kimyasal olarak nasıl dönüştüğünü simüle eder. Bu modeller, kirleticilerin bir şehirde nasıl yayıldığını tahmin etmek için rüzgar modelleri, sıcaklık ve topoğrafya gibi çeşitli faktörleri dikkate almaktadır. Seinfeld ve Pandis (2006), bu alanda öncü çalışmalar yaparak, kentsel hava kalitesi araştırmalarında standart araçlar haline gelen modeller geliştirmiştir.

2010'larda, atmosferik yayılma modelleri daha da gelişerek, trafik sensörlerinden ve uydu gözlemlerinden elde edilen gerçek zamanlı verileri içermeye başlamıştır. Snyder & ark. (2013), kentsel ortamlarda gerçek zamanlı kirlilik verilerini toplamak için düşük maliyetli sensörlerin kullanımını göstermiştir. Bu veriler, yayılma modellerine eklenerek kirlilik noktalarının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak tanımıştır. Kim & ark. (2019), bu modelleri Seul'de uygulayarak, farklı nüfus yoğunluğu ve yol yapılarına sahip alanlarda trafiğe bağlı kirleticilerin nasıl yayıldığını göstermiştir. Gerçek zamanlı veri ve modellemenin birleşimi, araştırmacılara hava kalitesi seviyelerini daha doğru bir şekilde tahmin etme ve politika müdahalelerinin etkinliğini değerlendirme imkanı tanımıştır.

2.5.3 Kimyasal Taşıma Modelleri (CTM)

CTM, hava kirliliği araştırmalarında, özellikle ikincil kirleticilerin (örneğin ozon ve ikincil organik aerosol) oluşumunu anlamada önemli bir gelişme sağlamıştır. Bu modeller, kirleticilerin atmosferde geçirdiği kimyasal reaksiyonları izleyerek, araç emisyonlarının zararlı kirleticilerin oluşumuna nasıl katkıda bulunduğunu anlamaya yardımcı olmuştur. Seinfeld ve Pandis (2006), bu modellerin geliştirilmesinde etkili olmuş ve bu modeller, politika yapıcıların kentsel hava kirliliğini azaltma çabalarında kritik araçlar haline gelmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, araç emisyonlarının hava kalitesi üzerindeki uzun vadeli etkilerini değerlendirmek için kimyasal taşıma modellerini kullanmıştır. Wang & ark. (2021), Beijing'de ikincil kirleticilerin oluşumunu analiz etmek için CTM'leri kullanarak, yaz aylarında yüksek ozon seviyelerine araç emisyonlarının önemli bir katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu modellerden elde edilen bulgular, birçok şehirde daha sıkı araç

emisyon standartlarının uygulanmasına ve daha temiz yakıtların teşvik edilmesine yönelik politika çalışmalarına destek sağlamıştır.

2.5.4 İzleme Ağları ve Gerçek Zamanlı Veri Toplama

Kapsamlı hava kalitesi izleme ağlarının kurulması, trafiğe bağlı kirlilik çalışmalarında önemli bir gelişme olmuştur. Dünyanın dört bir yanındaki şehirler, kirletici seviyelerini gerçek zamanlı olarak ölçmek için izleme istasyonları kurmuştur (Snyder vd., 2013). Bu veriler, emisyon envanterleri ve atmosferik yayılma modelleri tarafından yapılan tahminlerin doğrulanmasında kritik rol oynamaktadır.

Son yıllarda, düşük maliyetli, taşınabilir sensörlerin kullanımı, kirlilik seviyelerini belirli alanlarda gerçek zamanlı olarak izleme konusunda bir kaymaya neden olmuştur. Bu sensörler, araçlar, dronlar veya cadde seviyesinde konuşlandırılarak, belirli alanlardaki kirlilik seviyelerini daha ayrıntılı bir şekilde izleme imkanı sunar (Zangari vd., 2022). Düşük maliyetli sensörlerin kentsel ortamlarda hava kirliliği izleme konusunda nasıl avantajlar sunduğunu vurgulamıştır.

2.6 Teorik Çerçevesler

TRAP çalışmaları, yalnızca gelişmiş izleme ve modelleme tekniklerinin geliştirilmesini değil, aynı zamanda araştırma ve politika geliştirmeyi yönlendiren teorik çerçevelerin uygulanmasını da içerir. Bu çerçeveler, ekonomik büyüme, kentleşme ve çevresel bozulma arasındaki karmaşık ilişkileri bağlamsallaştırmaya yardımcı olmaktadır. TRAP'ın incelenmesinde, kentsel gelişim, kirlilik seviyeleri ve halk sağlığı sonuçları arasındaki etkileşimi analiz etmek için yaygın olarak kullanılan birkaç önemli teorik model ve çerçeve vardır (Brunekreef & Holgate, 2002; Pope & Dockery, 2006). Bu çerçeveler genellikle çevre ekonomisi, kentsel planlama ve halk sağlığından kavramları bir araya getirir ve TRAP'ın çok yönlü sorunlarını ve çevre ile halk sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerini incelemek için kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır.

2.6.1 Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC)

Çevresel kirlilik çalışmalarında en çok uygulanan teorik modellerden biri, Çevresel Kuznets Eğrisi (EKC)'dir. Bu hipotez, ekonomik büyümenin erken aşamalarında kirlilik seviyelerinin arttığını, ancak ekonomiler olgunlaştıkça temiz teknolojiler ve daha sıkı çevre düzenlemeleri benimsenerek kirlilik seviyelerinin azaldığını öne sürmektedir (Grossman & Krueger, 1995). EKC, ekonomik büyüme ile çevresel bozulma arasındaki ilişkiyi ters U şeklinde bir eğri ile açıklar.

TRAP bağlamında, EKC, şehirlerin başlangıçta sanayileşme ve araç sahipliğinin artmasıyla birlikte artan araç emisyonlarına maruz kaldığını, ancak zamanla şehirlerin daha katı düzenlemeleri benimseyerek kirlilik seviyelerini azalttığını açıklamak için kullanılmıştır. De Bruyn & ark. (1998), Avrupa şehirlerinde EKC çerçevesini uygulayarak, araçlardan kaynaklanan kirlilik seviyelerinin ekonomik büyümeyle birlikte başlangıçta arttığını, ancak daha sonra temiz teknolojilerin ve düzenleyici önlemlerin benimsenmesiyle azaldığını göstermiştir.

Hızla gelişen şehirlerde, özellikle Pekin ve Delhi gibi bölgelerde yapılan araştırmalar, trafiğe bağlı emisyonlar bağlamında EKC'yi incelemiştir. Wang & ark. (2017), Pekin'deki politika müdahaleleri ve temiz yakıtlara geçiş sürecini EKC çerçevesinde analiz etmişlerdir. Çalışmanın bulguları, ekonomik büyümenin başlangıçta kirliliğin artmasına yol açtığını, ancak zamanla daha sıkı emisyon standartları ve temiz teknolojilerin uygulanmasıyla kirlilik seviyelerinin azaldığını göstermiştir.

Ancak, EKC'nin eleştirmenleri, her şehrin bu eğriyi takip etmediğini belirtmektedir. Bazı durumlarda, ekonomik büyüme çevresel bozulmanın devam etmesine yol açabilmektedir, özellikle de politika ve altyapı sürdürülebilirliği önceliklendirmiyorsa. (Stern, 2004), EKC'nin evrensel olarak uygulanamayacağını savunur, özellikle ekonomik büyümenin çevresel koruma üzerindeki önceliği olan şehirlerde. Bu eleştiri, Vilnius gibi şehirler için özellikle geçerlidir, burada kentleşme hâlâ gelişmekte olup, hava kalitesindeki iyileşmelerin ekonomik büyüme ile denge kurulması gerekmektedir.

2.6.2 Sağlık Etki Değerlendirmeleri (HIA)

TRAP araştırmalarında kullanılan bir diğer önemli çerçeve, politika, proje ve programların potansiyel sağlık etkilerini değerlendirmeye odaklanan Sağlık Etki Değerlendirmesi

(HIA)'dır. HIA yöntemi, özellikle yüksek düzeyde araç trafiğine sahip kentsel alanlarda, trafiğe bağlı hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için oldukça kullanışlıdır. Bu değerlendirmeler, toplu taşıma altyapısındaki değişiklikler veya düşük emisyon bölgelerinin uygulanması gibi müdahalelerin potansiyel sağlık yararlarını veya risklerini sistematik olarak tahmin etmeye olanak tanımaktadır (WHO, 2014; Künzli vd., 2000).

NO_x ve PM emisyonlarının halk sağlığı üzerindeki risklerini değerlendirmek için bir meta-analiz yaparak, trafiğe bağlı kirleticilere uzun süreli maruz kalmanın solunum ve kardiyovasküler hastalık risklerini önemli ölçüde artırdığını bulmuştur (Hoek vd., (2013). Benzer şekilde, Roma'da hava kirliliğinin sağlık üzerindeki etkilerini değerlendiren bir HIA kullanarak, trafiğe bağlı kirliliğin azaltılmasının ölüm oranlarında önemli bir azalmaya yol açabileceğini ortaya koymuştur (Cesaroni vd., (2014).

Vilnius'ta, HIA'ların uygulanması nispeten sınırlı olmuştur, ancak kentsel planlamada bu tür değerlendirmelerin öneminin giderek daha fazla farkına varılmaktadır. Venclova (2016), Vilnius'un bisiklet altyapısı üzerine yaptığı araştırmada, araç trafiğinin azaltılmasının potansiyel halk sağlığı faydalarını vurgulamıştır. Bu bağlamda, HIA'nın, gelecekteki ulaşım ve kentsel hareketlilik projelerini değerlendirmek için faydalı bir araç olabileceği öne sürülmüştür.

2.6.3 Entegre Değerlendirme Modelleri (IAM)

Entegre Değerlendirme Modelleri (IAM'ler), politika müdahalelerinin etkilerini değerlendirmek için çevresel, ekonomik ve sosyal faktörleri bir araya getiren çok disiplinli bir yaklaşım sunarak, çevre araştırmalarında giderek daha popüler hale gelmiştir. IAM'ler, özellikle trafiğe bağlı hava kirliliğini azaltmaya yönelik politikaların uzun vadeli etkilerini keşfetmek için oldukça kullanışlıdır, çünkü araştırmacıların çeşitli senaryoları simüle etmelerine ve farklı müdahalelerin sonuçlarını tahmin etmelerine olanak tanımaktadır (Weyant, 2017; Pye et al, 2008).

Fischer ve ark. (2015), Berlin ve Utrecht dahil olmak üzere Avrupa şehirlerinde LEZ etkisini değerlendirmek için IAM'leri kullanmışlardır. Çalışmaları, IAM'lerin kirlilik seviyelerindeki azalmaları ve buna bağlı olarak halk sağlığındaki iyileşmeleri modelleyebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde, Wang ve ark. (2017), Pekin'de kömürden doğal gaz geçişin ve

daha sıkı araç emisyon standartlarının etkilerini modellemişlerdir. Bulguları, daha agresif emisyon azaltma politikalarının uygulanması için destek sağlamıştır.

Vilnius örneğinde, IAM'ler, ulaşım ile ilgili politikaların hava kalitesi ve halk sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerini değerlendirmek isteyen politika yapımcılar için önemli bir araç olabilir. Şehir, toplu taşımaya ve bisiklet altyapısına yatırım yaparken, IAM'ler, trafik emisyonlarını azaltmada en etkili stratejilerin belirlenmesine yardımcı olabilmektedir (Venclova, 2016).

2.6.4 Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlaması (SUMP)

Bir diğer ilgili çerçeve ise kentsel ulaşım sistemlerinin çevresel etkilerini azaltmayı amaçlayan politikaların geliştirilmesinde Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlaması (SUMP)'dır. SUMP, özel araç kullanımını azaltırken toplu taşıma, yürüyüş ve bisiklet gibi daha sürdürülebilir ulaşım modlarını teşvik etmeye odaklanır (European Commission, 2013).

Martinez ve ark. (2022), Vilnius'un da dahil olduğu Avrupa şehirlerinde SUMP'ın uygulanmasını inceleyerek, bisiklet altyapısı ve toplu taşıma sistemlerine yapılan yatırımların trafiğe bağlı emisyonların azalmasına nasıl katkıda bulunduğunu göstermiştir. Çalışma, hava kalitesi hedeflerinin kentsel planlama ve ulaşım politikalarına entegre edilmesinin uzun vadeli sürdürülebilirlik için önemini vurgulamaktadır. Vilnius, SUMP çerçevesini toplu taşıma ve bisiklet altyapısının geliştirilmesinde kullanmış olup, bu çerçeve, şehrin araç trafiğini azaltma ve hava kalitesini iyileştirme hedeflerine ulaşmasına yardımcı olmaktadır.

2.7 Vilnius ve Benzer Bölgeler Üzerine Yapılan Çalışmalar

TRAP üzerine yapılan araştırmaların büyük kısmı, Londra, Pekin ve Los Angeles gibi daha büyük metropol alanlarına odaklanmıştır. Ancak, orta büyüklükteki şehirler olan Vilnius gibi bölgeler giderek daha fazla çalışmalara konu olmaya başlamıştır. Vilnius'un karşılaştığı zorluklar, büyük şehirlerdeki kadar karmaşık olmayabilir, ancak şehirdeki trafik yönetimi ve hava kalitesini koruma sorunları, kendi özgün çevresel ve kentsel dinamikleri içinde ele alınmaktadır (Vilnius Municipality, 2020).

2.7.1 Vilnius'ta Kentsel Büyüme ve Trafığe Bağlı Kirlilik

Vilnius, Litvanya'nın başkenti olarak son on yıllarda hızla kentleşmiş, bu durum araç sahipliğinde artışa ve trafiğe bağlı kirlilikte yükselişe yol açmıştır. Şehrin nüfusu arttıkça ve kentsel yayılma genişledikçe, trafik yönetimi ve hava kalitesinin korunması için daha etkili çözümler gerekmeğe başlamıştır. Briedis (2009), Vilnius'ta kentsel gelişimin hava kalitesi üzerindeki etkisini inceleyen ilk çalışmalardan biri olmuştur. Araştırması, trafik emisyonlarının özellikle şehir merkezi ve ana yol güzergahlarında hava kalitesinin kötüleşmesine neden olduğunu ortaya koymuştur.

Briedis'in bulgularını takiben, Venclova (2016), Vilnius'ta bisiklet altyapısının trafiğe bağlı emisyonları azaltmadaki rolüne odaklanan daha ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu araştırma, şehrin alternatif ulaşım modlarını (örneğin bisiklet kullanımı ve toplu taşıma) teşvik etme çabalarını vurgulamış, aynı zamanda Vilnius'un özel araçlara olan bağımlılığının sürdüğünü ve bunun NO_x ve PM emisyonlarının yüksek seviyelere çıkmasına neden olduğunu belirtmiştir.

2.7.2 Toplu Taşımanın Modernizasyonu

Vilnius'ta trafiğe bağlı hava kirliliğini azaltmak için izlenen önemli stratejilerden biri, şehrin toplu taşıma sisteminin modernizasyonu olmuştur. Briedis (2015), Vilnius'un otobüs ve trolleybüs filolarının modernize edilmesi üzerine bir çalışma yapmış, elektrikli otobüslerin devreye alınması ve otobüs güzergahlarının genişletilmesinin, araç emisyonlarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Ancak, bu iyileştirmelerin faydalarının, bazı kesimlerin hâlâ eski ve daha az verimli araçları kullanması nedeniyle sınırlı kaldığı belirtilmiştir.

Kavaliauskas ve Stasys (2017), Vilnius'un düşük emisyonlu toplu taşıma girişimlerinin etkinliğini inceleyerek, temiz teknolojilerin benimsenmesini teşvik etmede politika desteğinin önemini vurgulamıştır. Çalışmaları, elektrikli otobüslerin şehir merkezindeki emisyonları azalttığını, ancak banliyö bölgelerinin hâlâ yüksek trafik kaynaklı kirlilik seviyeleriyle mücadele ettiğini göstermiştir.

2.7.3 Düşük Emisyon Bölgeleri ve Hava Kalitesi Yönetimi

Son yıllarda Vilnius, trafiğe bağlı emisyonları azaltmak için LEZ uygulamasını gözden geçirmektedir. Henüz Vilnius'ta LEZ'ler tam olarak hayata geçirilmemiş olsa da, bu bölgelerin potansiyel faydaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Venclova (2019), Vilnius'ta LEZ'lerin uygulanabilirliğini inceleyen bir fizibilite çalışması yapmış ve trafik kalıplarını,

araç emisyonlarını ve ekonomik etkileri analiz etmiştir. Çalışma, LEZ'lerin şehir merkezinde NO_x ve PM seviyelerini önemli ölçüde azaltabileceğini, ancak toplu taşımayı ve bisiklet altyapısını iyileştirmek gibi tamamlayıcı önlemlere ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır.

Varşova ve Prag gibi benzer kentleşme modellerine sahip şehirlerden elde edilen karşılaştırmalı bulgular, Vilnius için değerli içgörüler sağlamaktadır. Varşova'da, Kuklinska ve ark. (2015), LEZ'lerin ve trafik yönetimi politikalarının etkinliğini araştırarak, bu önlemlerin trafikle ilgili kirliliği azalttığını, ancak bu durumun güçlü bir şekilde uygulama ve temiz araçlar için teşviklerle desteklendiği zaman daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Prag'da, Scasny ve ark. (2018), trafik kısıtlamaları ve toplu taşımaya yapılan yatırımların hava kirliliği seviyelerini düşürmede etkili olduğunu, ancak sosyoekonomik faktörlerin halkın daha temiz ulaşım seçeneklerini benimseme düzeyini etkilediğini bulmuştur.

2.7.4 Vilnius'ta Sürdürülebilir Kentsel Hareketlilik Planlaması

Toplu taşımanın modernizasyonuna ek olarak, Vilnius, çevresel kaygıları kentsel planlamaya entegre etmenin önemini vurgulayan SUMP çerçevesini benimsemiştir. Martinez ve ark. (2022), Vilnius'un SUMP uygulamasını diğer Avrupa başkentleriyle, örneğin Stockholm ve Helsinki ile karşılaştırmış, Vilnius'un toplu taşıma altyapısının iyileştirilmesi ve bisiklet kullanımının teşvik edilmesi yönündeki çalışmalara büyük önem verdiğini bulmuştur. Çalışma ayrıca özel araç kullanımına bağımlılığın devam ettiği zorlukların altını çizmiş ve uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için daha fazla altyapı yatırımı yapılması gerektiğini vurgulamıştır.

Benzer şekilde, Venclova ve Kreuger (2021), Vilnius'ta SUMP'ın hava kalitesi üzerindeki etkisini incelemiş ve bisiklet ve yaya altyapısının iyileştirildiği bölgelerde trafiğe bağlı emisyonların daha fazla azaldığını bulmuştur. Araştırma, Vilnius'un şehir merkezindeki emisyonları azaltma konusunda ilerleme kaydetmesine rağmen, banliyö bölgelerinin trafik sıkışıklığı ve hava kirliliği sorunlarıyla başa çıkmakta zorlandığını da ortaya koymuştur.

2.8 Orta Ölçekli Şehirlerin Karşılaştırmalı Çalışmaları

Vilnius'un durumunu değerlendirirken, şehrin hava kalitesi yönetim çabalarını benzer zorluklarla karşılaşan diğer orta ölçekli Avrupa şehirleri ile karşılaştırmak faydalıdır. Kuklinska ve ark. (2015), Varşova'da hava kalitesi yönetimini incelemiş ve şehrin trafiğe

bağlı emisyonları azaltmada ilerleme kaydetmesine rağmen, uygulama ve kamu bilinci ile ilgili sorunların daha fazla gelişmenin önündeki önemli engeller olduğunu belirtmiştir. Çalışma ayrıca trafik kirliliğini azaltmada toplu taşıma ve bisiklet altyapısının önemini vurgulamıştır.

Benzer şekilde, Scasny ve ark. (2018), Prag'da hava kalitesindeki iyileşmeleri incelemiş ve kentsel hareketlilik planlaması ile toplu taşımaya yapılan yatırımların rolüne odaklanmıştır. Çalışma, Prag'ın elektrikli otobüsler ve tramvaylara yaptığı yatırımların emisyonları azalttığını, ancak şehrin daha sürdürülebilir ulaşım seçeneklerini teşvik etmek için bisiklet ağını daha da geliştirmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmalar, Vilnius'un trafiğe bağlı hava kirliliğini azaltma stratejilerini geliştirirken değerli karşılaştırmalı bilgiler sunmaktadır.

2.9 Literatürdeki Boşluklar ve Araştırma Fırsatları

TRAP üzerine yapılan araştırmalar giderek artmasına rağmen, özellikle Vilnius gibi orta büyüklükteki şehirler bağlamında çeşitli boşluklar mevcuttur. Daha büyük şehirler (Londra, Berlin, Pekin gibi) kapsamlı şekilde araştırılmışken, orta büyüklükteki şehirlerin karşılaştığı özgün zorluklar ve bu zorluklarla nasıl başa çıktıkları hakkında daha az bilgi mevcuttur. Bu bölümde, mevcut literatürdeki temel boşluklar belirlenmiş ve gelecekte yapılacak araştırmalar için potansiyel alanlar vurgulanmıştır.

2.9.1 Vilnius İçin Uzun Süreli Verilerin Eksikliği

Vilnius üzerine yapılan hava kalitesi araştırmalarında karşılaşılan en büyük boşluklardan biri, politika müdahalelerinin uzun vadeli etkilerini takip eden uzun süreli çalışmaların eksikliğidir. Mevcut çalışmalar, belirli bir zamandaki hava kirliliği seviyelerini inceleyen kesitsel çalışmalara odaklanmıştır (örneğin, Briedis, 2009; Venclova, 2016), ancak politika müdahalelerine ve trafik yönetimi stratejilerine yanıt olarak hava kalitesindeki değişiklikleri izleyen uzun vadeli çalışmalar sınırlıdır. Uzun süreli veriler, toplu taşıma modernizasyonu, LEZ ve bisiklet altyapısı gibi müdahalelerin etkinliğini değerlendirmek açısından gereklidir. Ayrıca, mevcut çalışmaların çoğu şehir merkezine odaklanmış, Vilnius'un banliyö ve çevre bölgelerinde ise daha az araştırma yapılmıştır. Kavaliauskas ve Stasys (2017) tarafından yapılan bir araştırmada, toplu taşımanın iyileştirilmesinin şehir merkezinde faydalar sağladığı, ancak banliyö bölgelerinin araç emisyonlarını azaltmada hâlâ zorluklar yaşadığı belirtilmiştir. Gelecekteki araştırmalar, bu dış bölgelerdeki hava kalitesi sorunlarını

incelemeli ve kentsel yayılmanın trafiğe bağlı kirlilik üzerindeki etkilerini değerlendirmelidir.

2.9.2 Halk Sağlığı ve Hava Kalitesi Verilerinin Entegrasyonu

Birçok çalışma, trafiğe bağlı hava kirliliğinin teknik ve çevresel yönlerine odaklanmış olsa da, halk sağlığı verilerinin hava kalitesi verileriyle entegre edildiği daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Hoek ve ark. (2013) ve Cesaroni ve ark. (2014), NO_x ve PM gibi kirlleticilere uzun süreli maruz kalmanın halk sağlığı üzerindeki ciddi risklerini ortaya koymuştur. Ancak, Vilnius gibi şehirlerde trafiğe bağlı kirliliğin halk sağlığı üzerindeki spesifik etkilerini inceleyen çalışmalar sınırlıdır.

HIA, toplu taşıma iyileştirmeleri veya düşük emisyonlu araçların benimsenmesi gibi kirlilik azaltıcı stratejilerin halk sağlığı üzerindeki uzun vadeli faydalarını ölçmek için değerli araçlar olabilmektedir (Cesaroni vd., 2014). Hava kalitesi izleme verilerinin halk sağlığı verileriyle entegre edilmesi, trafiğe bağlı kirliliği azaltmanın sağlık üzerindeki faydalarını sayısal olarak ifade etmede ve politika müdahalelerini güçlendirmede önemlidir (Hoek vd., 2013).

2.9.3 Çok Modlu Yaklaşımların Eksikliği

Bir diğer literatür boşluğu, trafiğe bağlı kirliliği azaltmaya yönelik çok modlu yaklaşımlar konusundaki sınırlı odaklanmadır. Çalışmalar, toplu taşıma veya bisiklet altyapısı gibi tekil çözümleri incelemiş olsa da (örneğin, Venclova, 2016), bu stratejilerin entegre edilerek bütünsel bir kentsel hareketlilik planına nasıl dönüştürülebileceğine dair araştırmalar sınırlıdır. Örneğin, toplu taşıma, bisiklet, yürüme ve elektrikli araç altyapısının, Vilnius'ta sürdürülebilir bir ulaşım ekosistemi oluşturmak için nasıl entegre edilebileceği üzerine daha fazla çalışma yapılmalıdır.

Martinez ve ark. (2022) tarafından yapılan bir çalışma, toplu taşımanın bisiklet ve yaya altyapısıyla entegre edildiği çok modlu yaklaşımların Stockholm ve Helsinki gibi şehirlerde başarı sağladığını vurgulamıştır. Ancak, bu yaklaşımların Vilnius gibi orta büyüklükteki şehirlere nasıl uyarlanabileceğine dair sınırlı bilgi mevcuttur; bu nedenle, altyapı geliştirme ve finansman zorluklarının farklı olduğu bu şehirlerde daha fazla araştırma yapılması gereklidir.

2.9.4 Ekonomik ve Sosyal Etkiler Üzerine Araştırma Eksikliği

Trafiğe bağlı hava kirliliğinin çevresel ve sağlık üzerindeki etkileri iyi belgelenmiş olsa da, Vilnius'taki hava kalitesi politikalarının ekonomik ve sosyal etkileri üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır. LEZ veya tıkanıklık fiyatlandırması gibi politikaların uygulanması, özellikle araç taşımacılığına bağımlı olan işletmeler için önemli ekonomik sonuçlar doğurabilir. Venclova (2019), Vilnius'ta LEZ'lerin ekonomik etkilerini araştırmış, ancak daha fazla araştırma, emisyonları azaltmaya yönelik politikaların farklı sosyoekonomik gruplar üzerindeki etkilerini değerlendirmelidir.

Varşova ve Prag gibi şehirlerde yapılan araştırmalar, hava kalitesi politikalarının düşük gelirli sakinleri orantısız şekilde etkilediğini ortaya koymuştur, bu sakinler genellikle daha eski ve daha verimsiz araçlara bağımlıdır. Benzer çalışmaların Vilnius'ta yapılması, hava kalitesi iyileştirmelerinin belirli nüfus gruplarına orantısız yük getirmemesi için gereklidir. Örneğin, elektrikli araçlar için sübvansiyonlar veya uygun fiyatlı toplu taşıma seçeneklerine yapılan yatırımlar gibi çözümler araştırılabilir.

2.9.5 Gelecek Araştırmalar İçin Fırsatlar

Bu değerlendirmeler göz önüne alındığında, Vilnius ve benzer şehirlerde trafiğe bağlı hava kirliliği üzerine yapılan araştırmaların genişletilmesi için çeşitli fırsatlar bulunmaktadır:

1. Uzun Süreli Çalışmalar: Gelecek araştırmalar, politika müdahalelerine ve altyapı geliştirmelerine yanıt olarak hava kalitesindeki değişiklikleri izlemek için uzun süreli veri toplamaya odaklanmalıdır. Gerçek zamanlı hava kalitesi izleme ağlarının kullanımı, şehrin farklı bölgelerindeki kirlilik seviyeleri hakkında sürekli veri sağlayabilir.
2. Halk Sağlığı Değerlendirmelerinin Entegrasyonu: Hava kalitesi verileriyle entegre edilmiş halk sağlığı değerlendirmeleri, trafiğe bağlı kirliliğin uzun vadeli sağlık etkilerini incelemeye yönelik daha fazla çalışma yapılmalıdır. HIA gibi araçlar, trafiğe bağlı kirlilikten kaynaklanan sağlık maliyetlerini değerlendirmek için kullanılabilir.
3. Çok Modlu Ulaşım Çözümleri: Toplu taşıma, bisiklet ve yürüyüş gibi farklı ulaşım modlarının entegre edilerek kentsel hareketlilik planlarına nasıl dahil edilebileceği üzerine daha fazla araştırma yapılmalıdır. Bu çalışmalar, orta büyüklükteki şehirler için uygulanabilir çözümler sunabilir.

4. Sosyal ve Ekonomik Etkiler: Gelecekteki çalışmalar, hava kalitesi politikalarının sosyal ve ekonomik etkilerini, özellikle düşük gelirli gruplar üzerindeki etkilerini araştırmalıdır. Daha adil çözümler geliştirmek için, daha temiz ulaşım seçeneklerinin teşvik edilmesine yönelik destek mekanizmaları araştırılmalıdır.

2.10 Sonuç

TRAP üzerine yapılan araştırmalar, son birkaç on yılda önemli ölçüde artmıştır. Bu artış, araç emisyonlarının kentsel hava kalitesi ve halk sağlığı üzerindeki zararlı etkilerinin giderek daha fazla fark edilmesine bağlı olarak gerçekleşmiştir (Hoek vd., 2013). Bu derleme, trafiğe bağlı hava kirliliği araştırmalarının evrimini, 1990'ların başlarından günümüze kadar incelemekte ve bu bulguları daha geniş bir kronolojik bağlamda ele almaktadır.

Anahtar çalışmalar, kentsel hareketlilik politikalarının (örneğin düşük emisyon bölgeleri, toplu taşımanın modernizasyonu, bisiklet ve yaya altyapısının teşviki) trafiğe bağlı emisyonları önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir (Pucher & Buehler, 2008). Ancak, bu müdahalelerin etkinliği, uygulanma bağlamına göre farklılık göstermektedir. Londra, Berlin ve Pekin gibi büyük şehirler, araştırmaların birincil odak noktası olmuşken, Vilnius gibi orta büyüklükteki şehirler ise nispeten daha az çalışılmıştır (Wang vd., 2017).

Vilnius özelinde, bu derleme, şehrin trafik ile ilgili hava kirliliği yönetimi zorluklarına ilişkin giderek artan bir araştırma gövdesini ortaya koymaktadır. Briedis (2009) ve Venclova (2016) gibi erken dönem çalışmalar, şehrin özel araçlara olan bağımlılığını azaltmanın ve toplu taşıma ile bisiklet altyapısının iyileştirilmesinin önemini vurgulamıştır. Vilnius'un elektrikli otobüslerle toplu taşıma filosunu modernize etme ve bisiklet yollarını genişletme çabaları, trafiğe bağlı emisyonları azaltmak için atılan önemli adımlardır. Ancak, bu önlemlerin uzun vadeli etkinliğini değerlendiren daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Vilnius Municipality, 2020).

Literatürde belirlenen sorunlar, özellikle uzun süreli veri toplama eksikliği, halk sağlığı değerlendirmeleri ile hava kalitesi verilerinin entegrasyonu ve çok modlu ulaşım stratejilerinin incelenmesi gibi alanlarda yer almaktadır (Fischer vd., 2015). Ayrıca, trafiğe bağlı hava kirliliği üzerine yapılan çalışmaların, sosyal ve ekonomik etkilerini daha fazla incelemesi gerekmektedir. Düşük emisyon bölgeleri ve tıkanıklık fiyatlandırması gibi politikalar, hava kalitesini iyileştirirken, bu politikaların sosyal ve ekonomik etkileri de

dikkate alınmalıdır. Özellikle düşük gelirli sakinler ve küçük işletmeler, bu politikaların getireceği mali yüklerden orantısız şekilde etkilenebilir. Daha adil çözümler geliştirmek için, örneğin elektrikli araçlara yönelik teşvikler veya uygun fiyatlı toplu taşıma seçenekleri gibi destekleyici politikaların araştırılması gerekmektedir (Cesaroni vd., 2014).

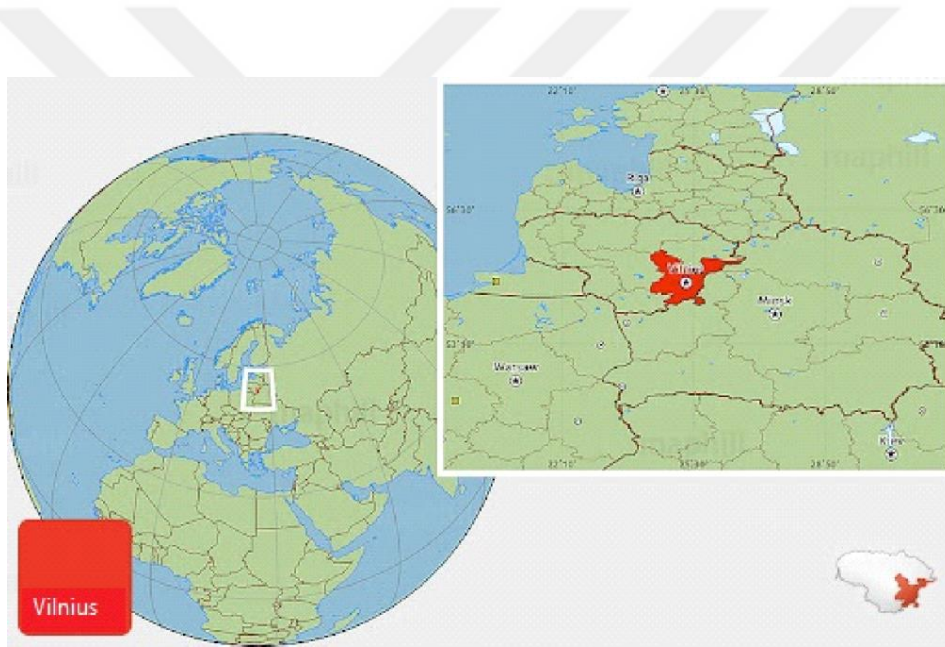
Sonuç olarak, şehirlerde trafiğe bağlı hava kirliliğinin anlaşılması ve azaltılmasına yönelik önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak, Vilnius gibi şehirler için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu şehirlerde uzun vadeli kentsel hareketlilik politikalarının benimsenmesi, gerçek zamanlı hava kalitesi izleme sistemleri ve halk sağlığı değerlendirmeleri ile desteklenmelidir (Snyder vd., 2013). Gelecekteki araştırmalar, bu derlemede belirlenen boşlukları doldurmaya odaklanmalı ve özellikle uzun süreli veri toplama, çok modlu ulaşım stratejileri ve halk sağlığı değerlendirmeleri gibi alanlarda yeni bilgiler sunmalıdır.

3. METODOLOJİ

3.1 Çalışma Alanı

3.1.1 Vilnius'a Genel Bakış

Vilnius, Litvanya'nın güneydoğu bölgesinde yer alan ve yaklaşık 580.000 kişilik nüfusuyla ülkenin başkenti ve en büyük şehridir. 401 km² bir alanı kaplayan Vilnius, Baltık bölgesindeki önemli kültürel, ekonomik ve politik merkezlerden biri olarak dikkat çeker. Şehir, çeşitli mimari tarzları barındıran tarihi dokusu, canlı sosyal yaşamı ve ekonomik dinamizmiyle tanınmaktadır. Vilnius'un başlıca ekonomik sektörleri arasında hizmetler, bilgi teknolojisi, üretim, eğitim ve turizm yer almaktadır (Statistics Lithuania, 2022).



Şekil 3.1: Vilnius'un coğrafi konumu (<http://www.maphill.com/lithuania/vilnius/location-maps/physical-map/>).

3.1.1.1 Coğrafi Bağlam

Vilnius, Vilnia ve Neris nehirlerinin birleştiği noktada, dağlık ve ormanlık bir coğrafyada kurulmuştur. Şehrin bu doğal yapısı, çevresinde bulunan geniş parklar, doğa rezervleri ve yeşil alanlarla birleşerek kentteki hava kalitesini doğrudan etkilemektedir. Dağlık araziler, özellikle vadilerde kirletici maddelerin sıkışmasına neden olabilir ve bu da hava kirliliği düzeylerinde bölgesel farklılıklara yol açabilir. Ancak, Vilnius'un geniş yeşil alanları ve doğal nehir akışları, hava sirkülasyonunu teşvik ederek bu kirleticilerin dağılmasına katkıda bulunur (European Environment Agency, 2021). Bu, hava kalitesini iyileştirici bir faktör olarak önem taşımaktadır.

3.1.1.2 Vilnius'un Demografik Yapısı

Vilnius'un yaklaşık 580.000 kişilik nüfusu, şehirdeki nüfus yoğunluğunu kilometrekare başına 1.446 kişi olarak ortaya koymaktadır. Yaş dağılımı bakımından nüfusun %15'i 0-14 yaş aralığındaki çocuklardan, %66'sı 15-64 yaş aralığındaki yetişkinlerden ve %19'u ise 65 yaş ve üzeri bireylerden oluşmaktadır (Statistics Lithuania, 2022). Şehir, özellikle bilgi teknolojisi, hizmet ve üretim gibi dinamik sektörlerde yüksek istihdam oranlarına sahip olup, bölgenin ekonomik kalkınmasında önemli bir rol oynamaktadır.

3.1.1.3 Coğrafya ve Topografya

Vilnius'un engebeli arazi yapısı, şehrin hava kalitesini etkileyen faktörlerden biridir. Özellikle dağlık alanların varlığı, atmosferdeki hava kirleticilerin vadilerde birikmesine neden olabilir. Bu durum, şehrin daha alçak kesimlerinde kirleticilerin daha yoğun bir şekilde birikmesine ve yerel hava kalitesinin düşmesine yol açabilir. Öte yandan, şehirdeki nehirlerin ve geniş yeşil alanların varlığı, hava akışını destekler ve kirletici maddelerin doğal bir şekilde dağılmasını sağlar (European Environment Agency, 2021). Özellikle Vilnius'un parkları ve doğa rezervleri, hem hava kirliliğinin azaltılmasına yardımcı olan doğal bariyerler oluşturur hem de şehirdeki genel yaşam kalitesini artırır.

3.1.1.4 İklim

Vilnius, dört mevsimin belirgin olarak yaşandığı nemli karasal bir iklime sahiptir. Kış ayları soğuk ve karlı geçerken, yazlar ılımandan sıcağa değişen bir hava durumu ile karakterize edilir. İlkbahar ve sonbahar mevsimleri ise geçiş dönemleri olarak değişken hava koşullarına sahiptir (World Weather Information Service, 2023). Kış aylarında, özellikle ısınma için kullanılan katı yakıtlar nedeniyle PM_{2,5}, PM₁₀ ve SO₂ gibi kirleticilerin miktarında artış gözlemlenir. Sıcaklık inversiyonları, bu kirleticilerin yüzeye yakın kalarak hava kalitesini düşürmesine neden olur. Yaz aylarında ise artan sıcaklık ve trafik yoğunluğu, ozon ve azot oksit (NO_x) seviyelerini yükseltir. Bu mevsimsel değişiklikler, Vilnius'un hava kalitesinde dalgalanmalara yol açmaktadır (Environmental Protection Agency of Lithuania, 2021).

3.1.1.5 Sıcaklık İnversiyonları

Sıcaklık inversiyonu, Vilnius'ta kış aylarında sıklıkla görülen bir olaydır. Normal şartlarda yükselen sıcak hava tabakası, soğuk havanın üstünde yer alır; ancak inversiyon sırasında sıcak hava yere daha yakın olan soğuk havayı hapsederek kirleticilerin yüzeye yakın

birikmesine yol açar. Bu durum, şehirde hava kalitesinin ciddi şekilde düşmesine ve sağlık açısından risklerin artmasına neden olmaktadır (Air Quality in Vilnius, 2022).

3.1.1.6 Kentsel Isı Adası Etkisi

Kentsel alanlar, çevrelerindeki kırsal bölgelere göre daha yüksek sıcaklıklara maruz kalırlar. Vilnius'ta da bu durum, "kentsel ısı adası etkisi" olarak adlandırılan olaya yol açmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklar, ozon gibi ikincil kirleticilerin oluşumunu artırarak mevcut kirleticilerin etkilerini şiddetlendirebilir. Bununla birlikte, Vilnius'un geniş yeşil alanları, kentsel ısı adası etkisini hafifletebilecek doğal bir tampon görevi görmektedir (European Environment Agency, 2021).

3.1.1.7 Yeşil Alanların Rolü

Vilnius, geniş yeşil alanları ve parklarıyla hava kirliliğini azaltmada kritik bir role sahiptir. Bitki örtüsü, kirleticileri emerek kirliliği doğal yollardan azaltmaya yardımcı olur. Aynı zamanda yeşil alanlar, şehrin farklı bölgeleri arasında hava akışını sağlayarak kirleticilerin daha etkin bir şekilde dağılmasına olanak tanır. Bu alanlar, hava kirliliğine karşı önemli bir savunma mekanizması olarak şehir içinde stratejik bir öneme sahiptir (Lithuanian Ministry of Environment, 2022).

3.2 Veri Toplama

Hava kirleticisi konsantrasyonlarına ilişkin veriler, Vilnius'un trafiğin yoğun olduğu bölgelere stratejik olarak yerleştirilmiş sabit hava kalitesi izleme istasyonları kullanılarak toplanmıştır. Ölçülen kirleticiler NO_x, CO ve PM'yi içerir. İzleme istasyonları, doğru ve güvenilir veri toplamayı sağlamak için yüksek hassasiyetli cihazlarla donatılmıştır.

Kirleticisi seviyelerindeki günlük değişimleri analiz etmek için trafiğin yoğun olduğu saatlerde (sabah 7-9 ve akşam 4-6) ve yoğun olmayan saatlerde (11:00-13:00) nokta ölçümler alınmıştır. Bu noktasal ölçümler, gün boyunca kirleticisi konsantrasyonlarındaki değişikliklerin anlık görüntüsünü sağlamıştır.

Tablo 3.1: Numune Alma Programı.

Zaman dilimi	Tanım	Sıklık
Sürekli	Saatlik ortalamalar	7/24 izleme
Yoğun zamanlar	07:00-09:00, 16:00-18:00	Günde iki kez
Yoğun Olmayan Saatler	11.00-13.00	Günlük

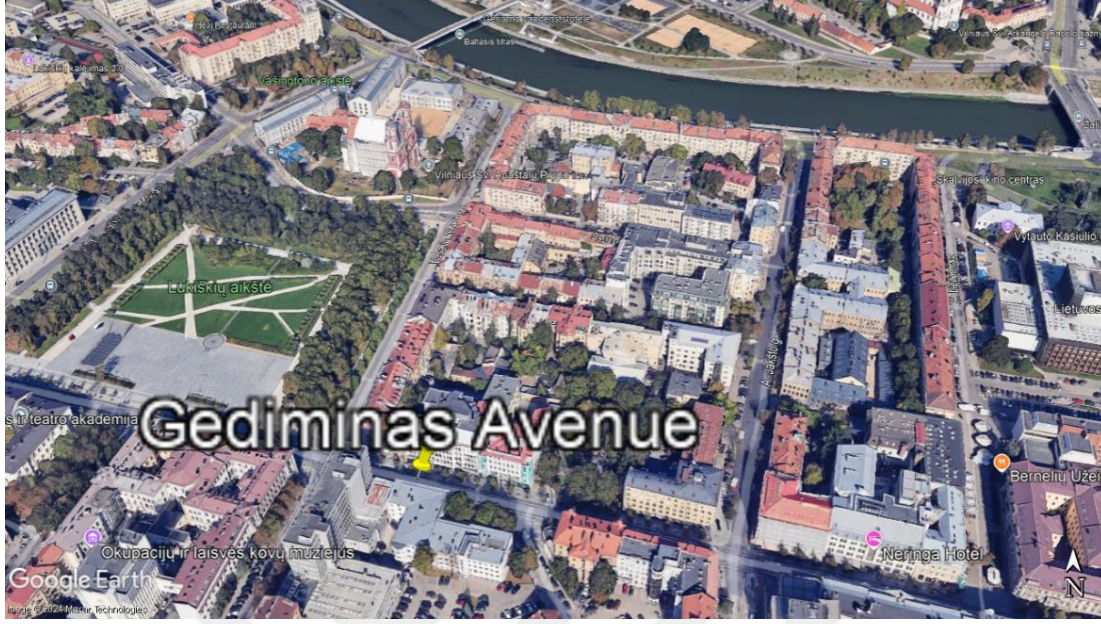
3.2.1 İzleme Noktaları

İzleme sahalarının seçimi, trafik sıkışıklığına yatkın ve yüksek kirletici seviyeleri olan yüksek trafikli alanları belirleyen bir ön araştırmaya dayanmıştır. Seçilen alanlar arasında ana yollar, kavşaklar ve toplu taşıma merkezlerine yakın alanlar yer almaktadır.

3.2.1.1 Gediminas Caddesi

Gediminas Caddesi, Vilnius'un en önemli caddelerinden biridir ve kentin ticari, idari ve kültürel merkezi olarak hizmet vermektedir. İki yönlü bir caddedir ve her iki yönde de araç trafiğine izin verir. Bu caddede iki şeritli trafik akışı mevcuttur. Katedral Meydanı'ndan Seimas Sarayı'na (Litvanya Parlamentosu) kadar uzanan bu cadde, hükümet binaları, müzeler, restoranlar ve mağazalarla çevrilidir.

Gediminas Caddesi, özellikle yoğun saatlerde yüksek bir araç ve yaya trafiğine sahiptir. Caddenin bazı bölümleri yayalara açıktır, ancak çoğu bölümde araç trafiğine izin verilir, bu da sık sık trafik sıkışıklığına yol açar. Bu cadde, yoğun yapılaşmış ve yoğun trafiğe sahip bölgelerde trafiğin hava kalitesi üzerindeki etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir (Darguzis & Juodzentis, 2020).



Şekil 3.2: Gediminas Caddesi konumu.

Bu caddenin yüksek trafik yoğunluğu ve binaların hava kirleticileri hapsedebileceği bir ortamda bulunması, bu bölgenin emisyonlar açısından sıcak bir nokta haline gelmesine neden olmaktadır. Buradaki hava kalitesinin incelenmesi, kent merkezinde araç emisyonlarının sağlık ve çevre üzerindeki etkilerini belirlemek açısından önemlidir. Özellikle NO_2 ve PM_{10} gibi kirleticilerin burada yüksek olma olasılığı bulunmaktadır.

3.2.1.2 Konstitucijos Caddesi

Konstitucijos Caddesi, Neris Nehri'nin kuzey kıyısında yer alır ve Vilnius'taki modern iş merkezlerinin bir parçasıdır. Cadde boyunca birçok yüksek katlı ofis binası, banka ve ticaret merkezi bulunur ve bu bölge, Vilnius'un hızlı kentleşmesinin bir simgesi haline gelmiştir. Bu alan, özellikle iş saatlerinde yoğun araç trafiğiyle karakterizedir. Şehir merkezi ile kuzey bölgeleri birbirine bağlayan bir ana yol olarak Konstitucijos Caddesi, özellikle işe gidip gelenler tarafından yoğun olarak kullanılmaktadır. İki yönlü trafik akışına sahiptir ve dört şerit (iki gidiş, iki dönüş) olarak düzenlenmiştir. Yapılan araştırmalar, bu caddenin trafik yoğunluğunun kentsel hava kalitesi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Bunevicius & Kazlauskas, 2019).



Şekil 3.3: Konstitucijos Caddesi konumu.

Yoğun trafik ve yüksek binaların bulunduğu bu cadde, NO_x ve PM_{10} seviyelerinin yüksek olduğu bir bölgedir ve bu da kötü hava kalitesine katkıda bulunur. Yüksek katlı binalar hava sirkülasyonunu sınırlayabilir ve kirlilik etkilerini artırabilir. Buradaki hava kalitesinin ölçülmesi, modern kentsel bölgelerin çevresel etkilerini anlamak için önemlidir.

3.2.1.3 İstasyon Caddesi

İstasyon Caddesi, Vilnius'un ana ulaşım ve toplu taşıma merkezi olan tren istasyonunun bulunduğu bölgeye hizmet veren bir caddedir. Bu cadde, otobüsler ve arabalar gibi farklı ulaşım araçları için bir geçiş noktası olup, Vilnius'un ulaşım ağı içerisinde kilit bir role sahiptir. Çift yönlü ve iki şeritli olan İstasyon Caddesi, tren istasyonu çevresindeki toplu taşıma araçlarının yoğun kullanımı ve taksi durakları nedeniyle sıkışıklıklara ev sahipliği yapmaktadır. İki şeritli yapısı, araç trafiğinin birikmesine ve hava kirliliğinin artmasına neden olabilir. Yapılan çalışmalar, bu bölgedeki trafik yoğunluğunun, özellikle toplu taşıma ve taksi kullanımı nedeniyle hava kalitesi üzerinde olumsuz bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır (Juknevičius & Povilaitis, 2021).



Şekil 3.4: İstasyon Caddesi konumu.

İstasyon Caddesi, motorlu taşıtların yoğun kullanımından kaynaklanan emisyonlar nedeniyle NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ ve CO gibi kirleticilerin yüksek seviyelerde olmasına neden olabilir. Özellikle toplu taşıma araçlarının yoğunluğu ve iki şeritli yapısı, hava kirliliğinin daha fazla birikmesine sebep olur. Bu caddenin izlenmesi, trafik kaynaklı kirleticilerin tren istasyonu çevresinde nasıl birikim gösterdiğini anlamak açısından önemlidir.

3.2.1.4 Ukmerges Caddesi

Ukmerges Caddesi, Vilnius'un şehir merkezinden kuzeybatıya doğru uzanan ana yollarından biridir. Şehri çevredeki banliyölere ve kırsal alanlara bağlayan bu cadde, önemli bir ulaşım güzergâhıdır. Dört şeritli ve çift yönlü olan Ukmerges Caddesi, özellikle banliyölerden merkeze doğru sabah saatlerinde, akşam saatlerinde ise şehri terk eden araçlar nedeniyle yoğun bir trafikle karakterizedir. Trafik sıkışıklıkları, dört şeritli yapısına rağmen sıkça yaşanmakta ve bu durum, hem yolculuk sürelerini uzatmakta hem de hava kalitesini olumsuz etkilemektedir. Yapılan araştırmalar, bu caddenin trafik dinamiklerinin hava kirliliği üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Kazlauskas & Petratis, 2020).



Şekil 3.5: Ukmerges Caddesi konumu.

Ukmerges Caddesi'ndeki yüksek trafik hacmi ve trafik sıkışıklığı sırasında araçların beklemesi, emisyon seviyelerinin yükselmesine neden olur. Bu cadde, banliyö trafiğinin kentsel hava kalitesine nasıl katkıda bulunduğunu anlamak açısından önemli bir alan sağlar. Dizel araçlardan kaynaklanan NO_x ve partikül madde gibi kirleticiler, burada yüksek seviyelerde olabilir.

3.2.1.5 Zirmunai Köprüsü

Zirmūnai Köprüsü, Vilnius'un merkezi ile şehrin en büyük yerleşim bölgelerinden biri olan Žirmūnai semtini birbirine bağlar. Neris Nehri üzerinde yer alan köprü, şehir merkezine gidiş geliş yapanlar için önemli bir ulaşım noktasıdır. İki şeritli olan ve çift yönlü trafik akışına sahip köprü, özellikle sabah ve akşam saatlerinde yoğun bir trafiğe sahiptir. Bu yoğunluk, araç geçişlerinin yavaşlamasına ve sık sık trafik sıkışıklığına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar, Zirmūnai Köprüsü üzerindeki trafiğin çevresel etkilerini ve kentsel mobilitte üzerindeki önemini açıkça ortaya koymaktadır (Povilaitis & Juknevičius, 2021).

3.2.2.2 Karbonmonoksit (CO)

Karbonmonoksit (CO), genellikle motorlu taşıtlardan kaynaklanan fosil yakıtların eksik yanması sonucu oluşur. CO, insan sağlığı üzerinde ciddi etkilere sahiptir; kandaki oksijen taşıma kapasitesini azaltarak solunum yolu ve kalp hastalıklarını tetikleyebilir. Trafik sıkışıklığı olan bölgelerde CO seviyeleri yüksektir ve uzun süre maruz kalındığında merkezi sinir sistemi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir (WHO, 2021).

3.2.2.3 Partikül Madde (PM)

Partikül Madde (PM), atmosferde asılı kalan küçük parçacıklardan oluşur ve sağlık üzerinde önemli riskler oluşturur. Bu çalışmada hem PM_{2,5} hem de PM₁₀ partikülleri izlenmiştir:

- PM_{2,5} (Partikül Madde 2,5): 2,5 mikrometreden küçük partikülleri ifade eder. Bu boyuttaki partiküller, akciğerlerin derinlerine kadar ulaşabilir ve kalp hastalıkları, akciğer kanseri gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir (Laden vd., 2006). Özellikle motorlu taşıtlar ve endüstriyel emisyonlar, PM_{2,5} seviyelerinin artmasına neden olur.
- PM₁₀ (Partikül Madde 10): 10 mikrometreden küçük olan bu partiküller, solunum yollarında birikerek astım ve bronşit gibi hastalıklara neden olabilir. PM₁₀, yol tozu, inşaat faaliyetleri ve lastik aşınması gibi kaynaklardan gelir (Dockery & Pope, 1994).

3.4 Veri Analizi

Toplanan veriler, trafik hacmi ile hava kirleticilerinin seviyeleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için çeşitli istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Bu analizler, hava kirliliğine sebep olan başlıca faktörleri anlamak ve kirletici seviyelerinin trafik yoğunluğuyla nasıl bir bağlantı gösterdiğini belirlemek için kullanılmıştır. Analizler şu başlıklardan oluşmaktadır:

3.4.1 Tanımlayıcı İstatistikler

Her bir kirletici (NO_x, CO, PM_{2,5} ve PM₁₀) için ortalama, medyan, standart sapma ve aralık değerleri hesaplanmıştır. Bu tanımlayıcı istatistikler, her bir kirleticinin veri setindeki dağılımı hakkında genel bir fikir vermiştir. Özellikle ortalama ve medyan değerler, kirletici seviyelerinin tipik eğilimlerini ortaya koyarken, standart sapma ve aralık değerleri ise kirletici seviyelerindeki değişkenliği yansıtmaktadır (Field, 2018). Bu analiz, veri setindeki merkezi eğilimleri ve varyansları daha iyi anlamaya olanak tanımıştır.

3.4.2 Korelasyon Analizi

Veri seti, trafik hacmi ile kirletici seviyeleri arasındaki ilişkinin gücünü ve yönünü ölçmek için Pearson korelasyon katsayısı yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Pearson korelasyonu, trafik yoğunluğunun artmasıyla birlikte NO_x, CO ve partikül maddelerin seviyelerinin nasıl etkilendiğini göstermiştir. Korelasyon katsayıları, trafik hacmi ile kirleticilerin pozitif yönlü bir ilişki içinde olduğunu ortaya koymuştur, bu da yüksek trafik yoğunluğunun hava kirliliğini artırdığına işaret eder (Cohen, 1988). Trafik yoğunluğu arttıkça NO_x ve PM seviyelerinin yükselmesi, şehir içindeki trafiğin hava kalitesi üzerindeki etkilerini doğrulamıştır.

3.4.3 Karşılaştırmalı Analiz

Bu çalışmada karşılaştırmalı analiz, trafik hacmi ve lokasyon bazlı kirlilik seviyeleri olmak üzere iki ana eksenle gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, Vilnius'taki farklı bölgelerdeki hava kirliliği seviyelerinin, trafik yoğunluğuna bağlı olarak nasıl değiştiğini ve hafta içi-hafta sonu ile yoğun-düşük trafik saatleri arasındaki farkları incelemeyi amaçlamaktadır. Karşılaştırmalı analizde, verilerin toplandığı farklı zaman dilimlerinde ve lokasyonlarda kirleticilerin (NO_x, CO, PM_{2,5} ve PM₁₀) trafik yoğunluğuna olan duyarlılığı değerlendirilmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu bölüm, Vilnius'ta Mart ile Temmuz 2023 tarihleri arasında gerçekleştirilen hava kirliliği analizinin sonuçlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. Veriler, NO_x, CO, PM_{2,5}, ve PM₁₀ kirleticilerinin farklı trafik yoğunluklarına sahip bölgelerdeki konsantrasyonlarını kapsamaktadır. Analizler, kirlilik seviyelerinin zaman içerisindeki değişimlerini, trafik hacmi ile kirleticiler arasındaki korelasyonu, yoğun ve yoğun olmayan saatlerdeki kirlilik farklarını, aylık kirlilik eğilimlerini ve trafik hacminin kirletici seviyelerine olan etkisini incelemektedir.

4.1 Kirleticilerin Tanımlayıcı İstatistikleri

Aşağıdaki tablo, NO_x, CO, PM_{2,5} ve PM₁₀ kirleticilerinin verilerine dayanan tanımlayıcı istatistikler sunulmuştur. Her bir kirletici için ortalama, medyan, standart sapma ve aralık (min-max farkı) değerlerini içermektedir. Bu tanımlayıcı istatistikler, verilerin dağılımı hakkında genel bilgi sağlayarak, her bir kirleticinin çevresel koşullar üzerindeki potansiyel etkilerinin anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır.

Tablo 4.1: Kirleticilerin tanımlayıcı istatistikleri.

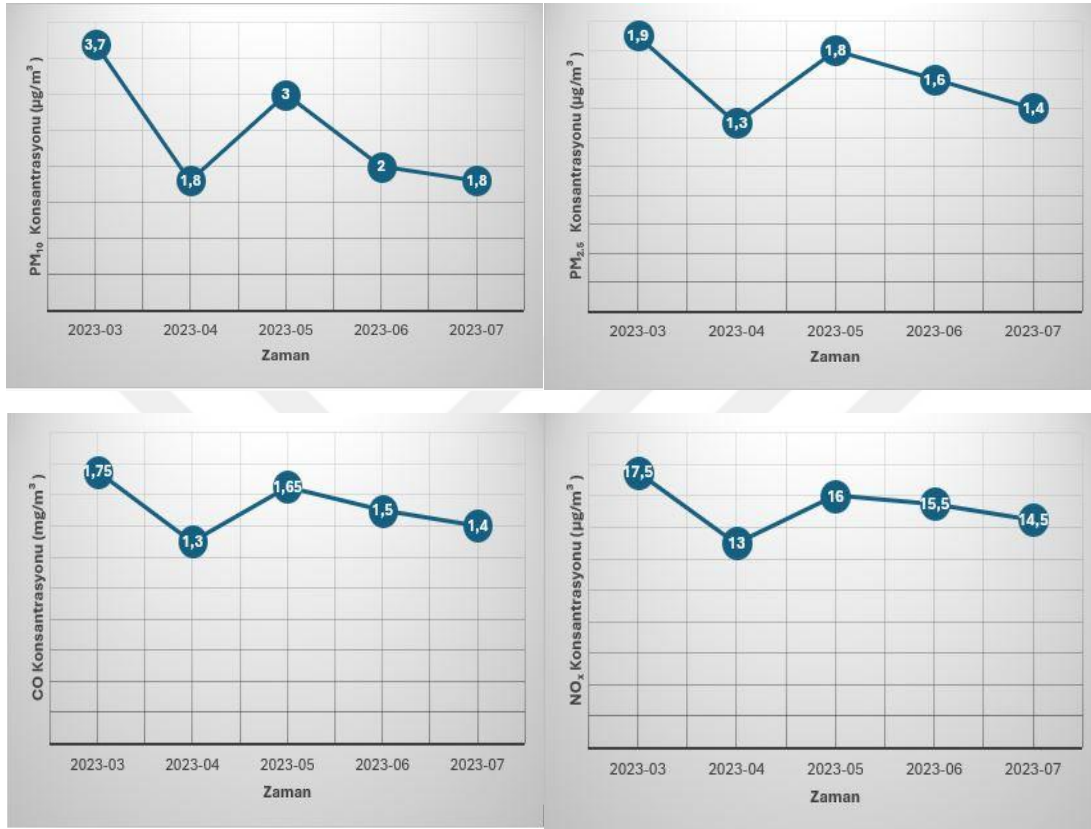
Kirletici	Ortalama (µg/m ³)	Medyan (µg/m ³)	Standart Sapma (µg/m ³)	Aralık (µg/m ³)
CO (µg/m ³)	1,6	1,4	0,9	4,3
NO _x (µg/m ³)	15,9	14	8,8	40
PM _{2,5} (µg/m ³)	1,5	1,4	0,9	4,5
PM ₁₀ (µg/m ³)	2,4	2	1,5	8,9

Tablodaki verilere göre, NO_x kirletici konsantrasyonları diğer kirleticilere göre daha yüksek ve değişkenlik göstermektedir. CO, PM_{2,5} ve PM₁₀ konsantrasyonları ise daha düşük değerler almış olup, genel olarak çevresel koşulların kontrol edilebilir seviyelerde olduğunu işaret etmektedir. Ancak, NO_x seviyelerindeki yüksek varyasyon, özellikle trafikten kaynaklanan dalgalanmalara bağlı olarak dikkate değer bir etki yaratabilir.

4.2 Kirlilik Seviyelerinin Değişimi

Zaman serisi analizinde, Mart'tan Temmuz'a kadar NO_x, CO, PM_{2,5}, ve PM₁₀ kirleticilerinin konsantrasyonlarındaki değişimler incelenmiştir. Özellikle Mart ayı, tüm kirleticilerde belirgin bir zirve dönemini temsil etmektedir. Bu dönemde hava kirliliği seviyelerinin yüksek olmasının başlıca nedenleri arasında, daha düşük sıcaklıklar nedeniyle artan ısınma

faaliyetleri ve bu dönemde trafiğin yoğunluğu öne çıkmaktadır. Veriler, yaz aylarına doğru kirlilik seviyelerinin düşüş gösterdiğini ortaya koymaktadır.



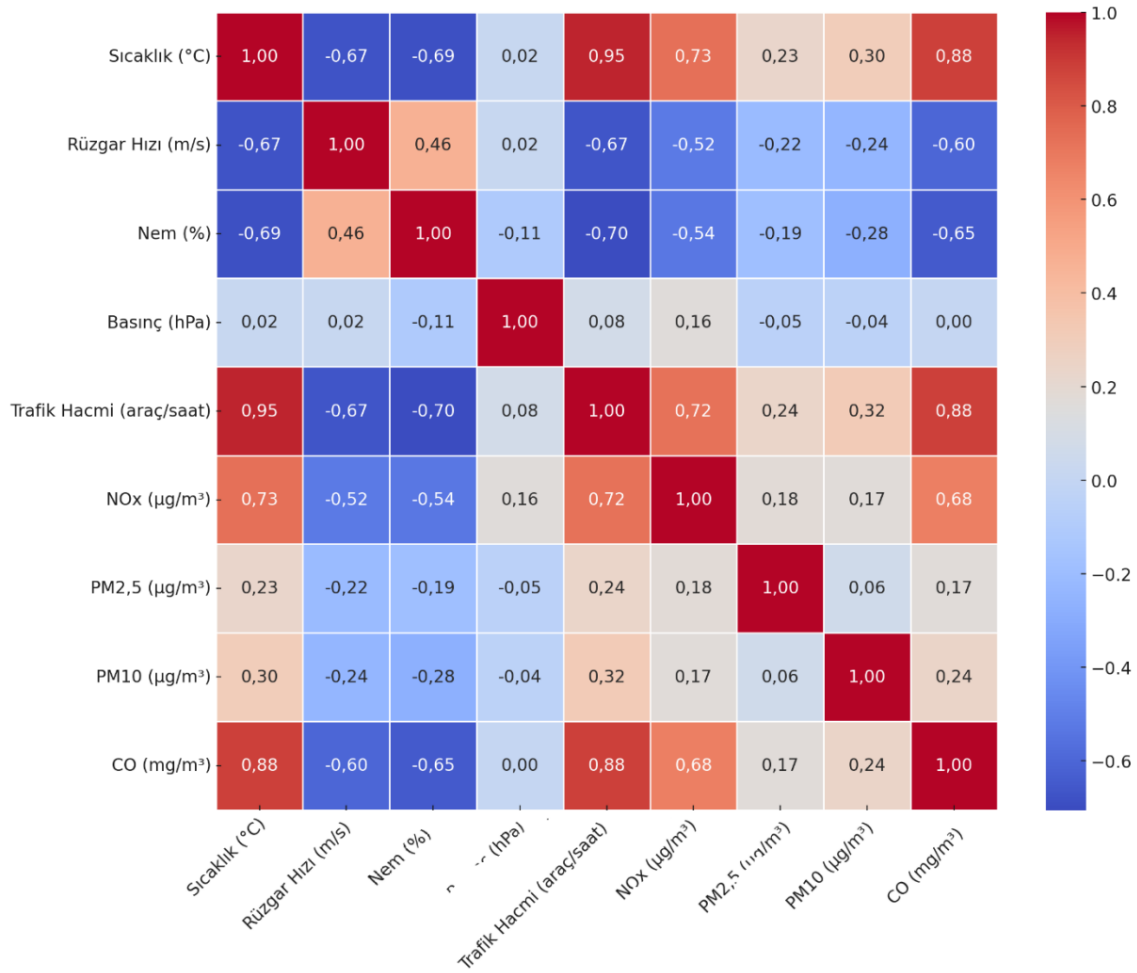
Şekil 4.1: Kirleticilerin seviye değişim grafikleri.

- CO Seviyeleri: Mart ayında CO seviyeleri $1,76 \text{ mg}/\text{m}^3$ ile zirve yapmış, Temmuz ayına kadar $1,49 \text{ mg}/\text{m}^3$ seviyesine kadar düşmüştür.
- NO_x Seviyeleri: NO_x konsantrasyonu Mart ayında en yüksek $17,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iken, yaz aylarında $15,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 'e kadar gerilemiştir.
- PM_{2,5} ve PM₁₀ Seviyeleri: Partikül madde seviyeleri Mart ayında sırasıyla $1,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ve $3,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ iken, yaz aylarında PM_{2,5} $1,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ ise $1,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seviyelerine düşmüştür.

Mart ayında kirlilik seviyelerinin en yüksek olduğu, yaz aylarına yaklaştıkça bu seviyelerin düştüğü gözlenmiştir. Bu durum, trafik yoğunluğu ve meteorolojik faktörler (soğuk hava koşulları, rüzgar hızının düşük olması) ile açıklanabilir.

4.3 Korelasyon Analizi

Trafik hacmi, kirleticiler (NO_x , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10}) ve meteorolojik faktörler (sıcaklık, rüzgar hızı, nem ve basınç) arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı yöntemi kullanılarak yapılan analizler, trafik yoğunluğunun hava kalitesini önemli ölçüde etkilediğini ve meteorolojik koşulların bu ilişkiye katkı sağladığını ortaya koymuştur. Aşağıda sonuçlar özetlenmiştir:



Şekil 4.2: Trafik Hacmi ile Kirleticiler Arasındaki İlişki.

Trafik Hacmi ile Kirleticiler Arasındaki İlişki

- NO_x (0,72 korelasyon): Güçlü pozitif bir ilişki bulunmuştur. Trafik hacmi arttıkça, araç emisyonlarından kaynaklanan NO_x seviyeleri önemli ölçüde artmıştır.
- $\text{PM}_{2,5}$ (0,24 korelasyon): Trafik hacmi ile $\text{PM}_{2,5}$ arasında orta düzeyde pozitif bir ilişki tespit edilmiştir. İnce partikül madde seviyeleri kısmen trafikten etkilenirken, diğer çevresel faktörlerin de katkısı olduğu gözlemlenmiştir.

- PM₁₀ (0,32 korelasyon): Trafik hacmi ile PM₁₀ arasında orta düzeyde pozitif bir ilişki bulunmuştur. Daha büyük partiküller, hem trafik kaynaklı emisyonlardan hem de yol tozu gibi diğer kaynaklardan etkilenmektedir.
- CO (0,88 korelasyon): CO ile trafik hacmi arasında çok güçlü bir pozitif ilişki tespit edilmiştir. CO seviyeleri, araçlardan kaynaklanan emisyonların önemli bir göstergesi olarak, trafik yoğunluğundaki artışlarla doğru orantılı olarak yükselmektedir.

Meteorolojik Faktörlerin Trafik ve Kirleticiler Üzerindeki Etkisi

- Sıcaklık (0,95 korelasyon): Sıcaklık ile trafik hacmi arasında çok güçlü bir pozitif ilişki tespit edilmiştir. Daha sıcak aylarda, artan açık hava etkinlikleri ve günlük trafik yoğunluğu, kirletici seviyelerinin yükselmesine neden olmuştur.
- Rüzgar Hızı (-0,67 korelasyon): Rüzgar hızı ile kirletici seviyeleri arasında güçlü bir negatif korelasyon tespit edilmiştir. Daha yüksek rüzgar hızları, özellikle NO_x ve PM₁₀ gibi kirleticileri dağıtarak konsantrasyonlarını azaltmıştır.
- Nem (-0,70 korelasyon): Nem, hem trafik hacmi hem de kirletici seviyeleri ile güçlü bir negatif ilişki göstermiştir. Yüksek nem oranları, trafik yoğunluğunda mevsimsel düşüşe ve kirleticilerin atmosferde seyreltmesine katkı sağlamıştır.
- Basınç (0,08 korelasyon): Trafik hacmi ve kirleticilerle basınç arasında çok zayıf bir ilişki bulunmuş, basıncın kirletici seviyelerine doğrudan bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Kirleticiler Arası İlişkiler

- NO_x ve PM₁₀ (0,17 korelasyon): Trafik kaynaklı NO_x seviyeleri ile PM₁₀ arasında zayıf bir ilişki bulunmuş, NO_x'in PM₁₀ seviyelerine dolaylı etkileri olabileceği gözlemlenmiştir.
- PM_{2,5} ve PM₁₀ (0,06 korelasyon): İnce ve büyük partiküller arasında çok zayıf bir ilişki gözlenmiştir. Bu durum, bu partiküllerin farklı kaynaklardan ve koşullardan etkilenebileceğini göstermektedir.
- CO ve NO_x (0,68 korelasyon): CO ile NO_x arasında orta düzeyde pozitif bir ilişki bulunmuştur. Her ikisi de trafik kaynaklı kirlilik göstergesi olup, konsantrasyonları araç emisyonlarına bağlıdır.
- CO ve PM_{2,5} (0,17 korelasyon): CO ile ince partiküller arasında zayıf bir ilişki bulunmuş, bu da CO'nun doğrudan partikül oluşumuna katkısının sınırlı olduğunu göstermektedir.

4.4 Yoğun ve Yoğun Olmayan Saatlerdeki Ortalama Kirletici Konsantrasyonları

Trafik yoğunluğunun kirlilik üzerindeki etkisini daha ayrıntılı olarak incelemek amacıyla, yoğun saatler (sabah 7-9 ve akşam 16-18) ile yoğun olmayan saatler (öğlen 11-13) karşılaştırılmıştır. Bu analiz, yoğun saatlerde kirlilik seviyelerinin belirgin şekilde daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2: Yoğun ve Yoğun Olmayan Saatlerdeki Ortalama Kirletici Konsantrasyonları.

Kirletici	Yoğun Saatler (7-9 / 16-18)	Yoğun Olmayan Saatler (11-13)
NO _x (µg/m ³)	19,52	8,71
CO (µg/m ³)	1,91	0,85
PM _{2.5} (µg/m ³)	1,89	0,85
PM ₁₀ (µg/m ³)	2,89	1,29

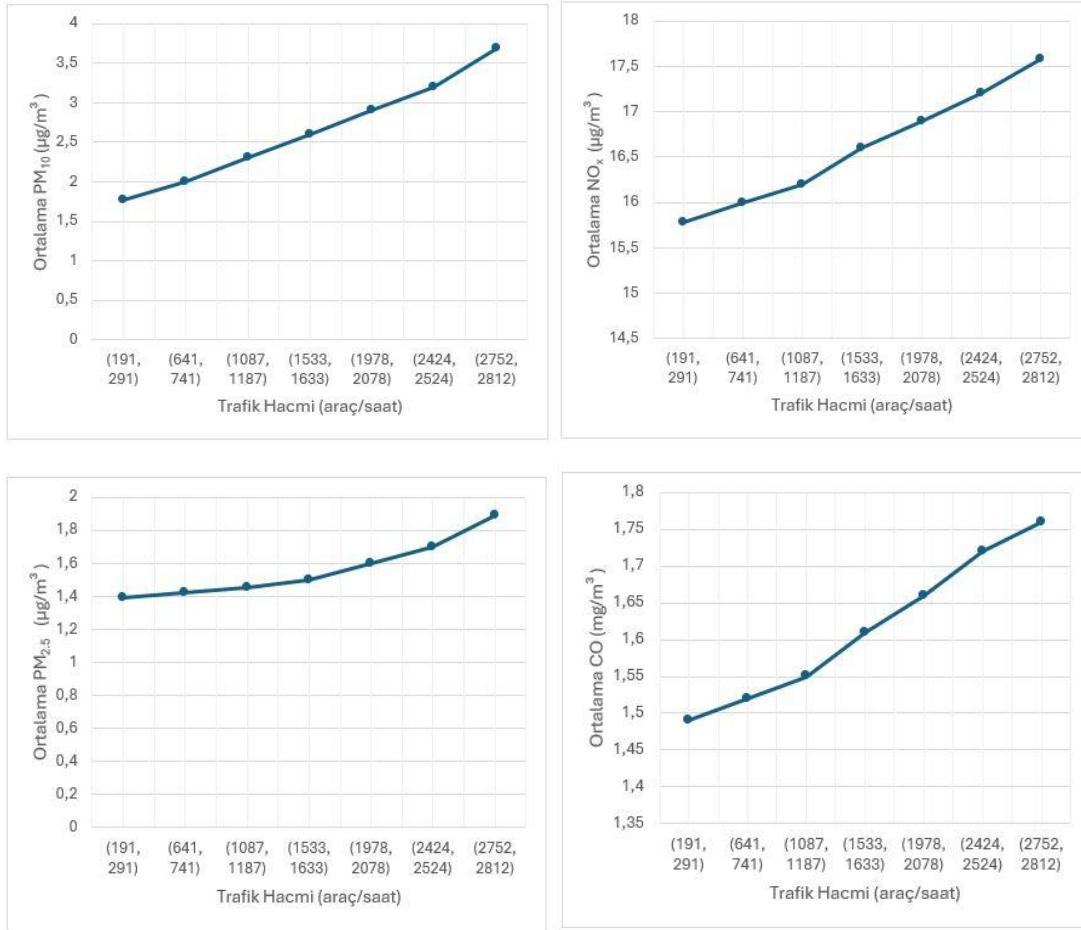
Yoğun saatlerde (sabah 7-9 ve akşam 16-18) kirlilik seviyeleri, yoğun olmayan saatlere göre yaklaşık 2 kat daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, trafiğin yoğun olduğu saatlerde egzoz emisyonlarının ve diğer kirlilik kaynaklarının arttığını göstermektedir.

4.6 Trafik Hacmi ile Kirletici Konsantrasyonları Arasındaki Değişim

Trafik hacmi ile kirletici seviyeleri arasındaki ilişkiyi inceleyen analizler, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde kirletici konsantrasyonlarının da yüksek olduğunu göstermektedir. CO, NO_x, PM_{2.5} ve PM₁₀ seviyeleri trafik hacmi ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir.

- NO_x ve CO: Trafik hacmi arttıkça NO_x ve CO seviyelerinde önemli bir artış gözlenmiştir. Özellikle yoğun saatlerde NO_x seviyeleri, düşük trafik dönemlerine göre %40 daha yüksek bulunmuştur.
- PM_{2.5} ve PM₁₀: Partikül madde seviyeleri de trafik hacmi arttıkça artış göstermiştir. Ancak bu artışlar, CO ve NO_x seviyelerine kıyasla daha az belirgindir.

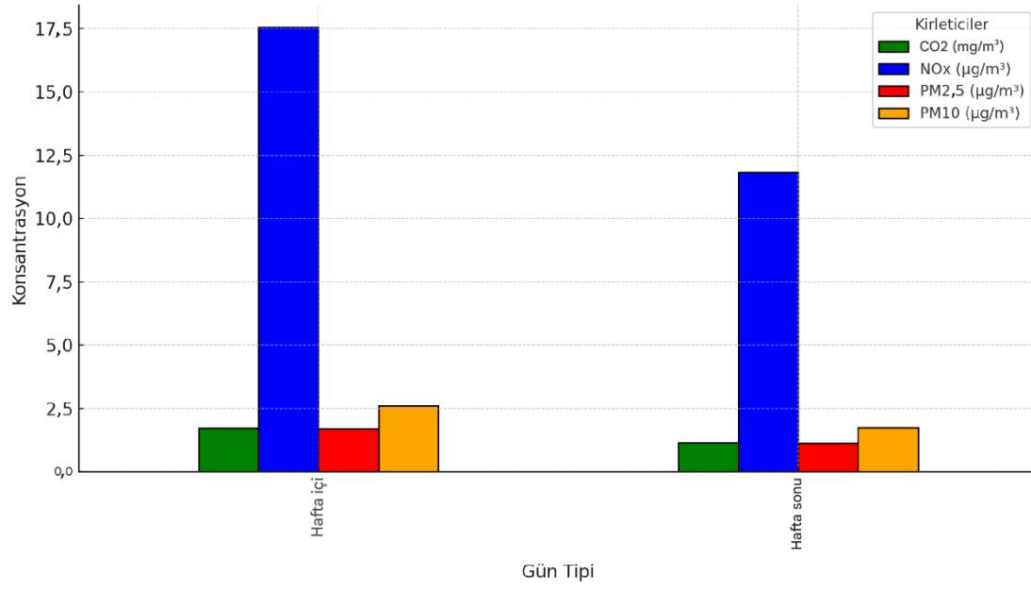
Trafik hacmi arttıkça kirlilik seviyelerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu bulgu, trafiğin hava kirliliği üzerindeki doğrudan etkisini doğrulamakta ve özellikle yoğun saatlerde trafik yönetimi stratejilerinin kirlilik azaltımında kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.



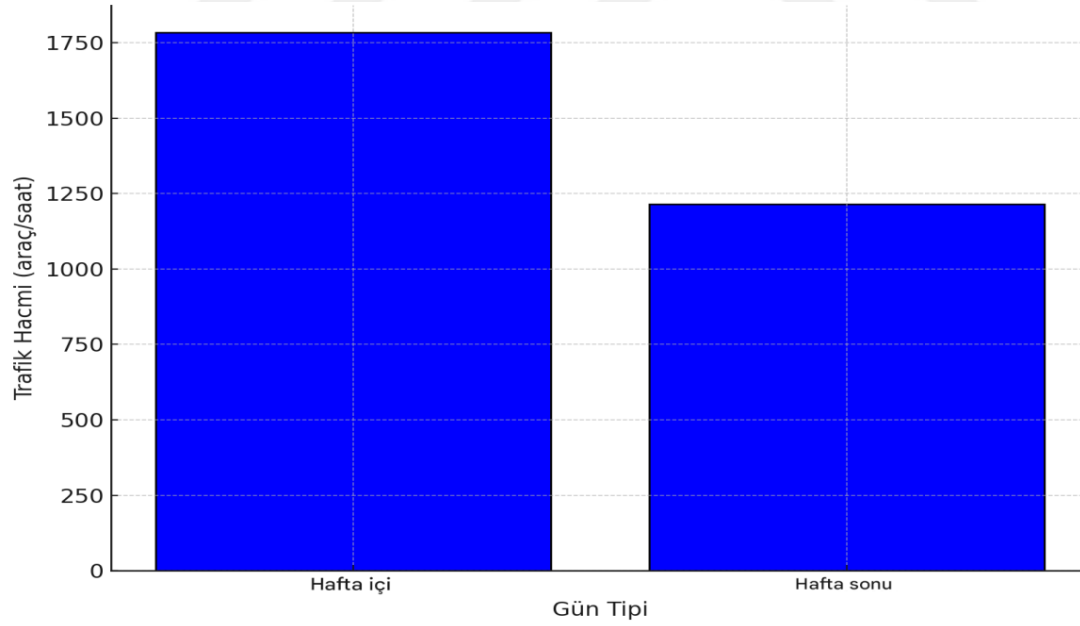
Şekil 4.3: Trafik Hacmi ile Kirlenici Konsantrasyonları Arasındaki Değişim grafikleri.

4.7 Hafta İçi ve Hafta Sonu Karşılaştırması

Hafta içi ve hafta sonu günlerindeki trafik hacmi ve kirlilik seviyeleri karşılaştırılarak, kirlilikteki değişimler analiz edilmiştir. Hafta içi iş günlerinde kirlilik seviyeleri, hafta sonuna göre belirgin şekilde daha yüksektir. NO_x , CO, $PM_{2.5}$, ve PM_{10} seviyeleri, hafta içi trafik yoğunluğunun yüksek olduğu günlerde zirve yapmıştır.



Şekil 4.4: Hafta içi ve hafta sonu kirleticilerin karşılaştırması.



Şekil 4.5: Hafta içi ve hafta sonu trafik hacmi karşılaştırması.

- NO_x Seviyeleri: Hafta içi NO_x seviyesi 17,56 µg/m³ iken, hafta sonu bu değer 11,83 µg/m³ seviyesine düşmüştür.

- CO Seviyeleri: Hafta içi CO seviyesi 1,72 mg/m³ olarak ölçülürken, hafta sonu 1,16 mg/m³'e düşmüştür.
- PM_{2,5} ve PM₁₀: Hafta içi günlerde PM_{2,5} ve PM₁₀ seviyeleri sırasıyla 1,70 µg/m³ ve 2,60 µg/m³'e kadar yükselmişken, hafta sonları bu değerler belirgin şekilde daha düşüktür.

Hafta içi günlerinde trafik yoğunluğunun artmasıyla birlikte NO_x, CO, PM_{2,5}, ve PM₁₀ seviyeleri önemli ölçüde artmıştır. Hafta sonları ise bu kirleticilerin seviyeleri, trafiğin azalmasıyla birlikte belirgin şekilde düşmüştür. Bu durum, trafiğin hava kirliliği üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

4.8 Kirletici Konsantrasyon Seviyeleri

Hava kirliliği verileri, Karbon Monoksit (CO), Azot Oksitler (NO_x) ve Partikül Madde (PM_{2,5}) konsantrasyonlarını Vilnius'taki beş ana bölgede Mart ile Temmuz 2023 arasında ölçmüştür. Tablo 1, bu kirleticilerin her lokasyondaki ortalama seviyelerini göstermektedir.

Tablo 4.3: Ortalama Kirletici Konsantrasyonları (Mart - Temmuz 2023).

Lokasyon	CO (mg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)
Gediminas Caddesi	1,5	15,6	1,5	2,3
Konstitucijos Caddesi	2,1	21,6	2,1	3,2
İstasyon Caddesi	0,8	8,4	0,8	1,2
Ukmergės Caddesi	2,2	20,1	2,1	3,3
Zirmūnų Köprüsü	1,2	11,9	1,1	1,8

- Gediminas Caddesi ve Zirmūnų Köprüsü, diğer bölgelerle kıyaslandığında daha düşük kirlilik seviyelerine sahiptir, ancak bu lokasyonlarda da trafik yoğunluğunun azaltılmasıyla hava kalitesi daha da iyileştirilebilir.
- İstasyon Caddesi, trafik hacmi ve kirletici seviyeleri açısından en düşük değerlere sahip olup, bu bölgede kirlilikle ilgili acil bir endişe bulunmamaktadır.

Bu veriler, Vilnius'un farklı bölgelerindeki hava kalitesinin trafik yoğunluğu ile nasıl ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle Konstitucijos Cd. ve Ukmerges Cd., CO ve NO_x seviyelerinin en yüksek olduğu yerlerdir ve bu bölgeler için özel trafik yönetimi politikalarının uygulanması gerektiğini işaret eder.

4.9 Sonuçların özeti

Sonuçlar, trafiğin Vilnius'taki hava kirliliğine önemli bir katkıda bulunduğunu, trafiğin yoğun olduğu saatlerde ve yoğun trafik sıkışıklığının olduğu bölgelerde daha yüksek kirletici seviyelerinin gözlemlendiğini göstermektedir. Korelasyon analizi, trafik hacmi ile kirletici konsantrasyonları arasında güçlü bir pozitif ilişki olduğunu göstermektedir. Zamansal ve mekânsal farklılıklar, kirletici düzeylerinin hem günün saatine hem de şehir içindeki konuma göre etkilendiğini göstermektedir. Trafik yönetimi politikalarının değerlendirilmesi, trafik sıkışıklığı fiyatlandırması ve emisyon standartları gibi önlemlerin kirletici seviyeleri azaltmada etkili olduğunu, ancak hava kalitesi standartlarına ulaşmak için daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Ayrıntılı tablolar ve şekiller sağlayarak, sonuçları günün farklı saatlerine, hava koşullarına ve konumlara göre ayıran bu bölüm, Vilnius'taki trafikten kaynaklanan hava kirliliğinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Sonuçların bu ayrıntılı sunumu, hava kirliliğini azaltmak ve kentsel hava kalitesini iyileştirmek için hedeflenen stratejilerin geliştirilmesini desteklemektedir.

5. TARTIŞMA

5.1 Bulguların Yorumlanması

Bu çalışmada, Mart ile Temmuz 2023 tarihleri arasında Vilnius'taki beş ana bölgede Karbon Monoksit (CO), Azot Oksitler (NO_x) ve Partikül Madde (PM₁₀ ve PM_{2,5}) seviyeleri ölçülmüş ve bu bölgelerdeki trafik yoğunluğu ile kirlilik seviyeleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Gediminas Caddesi, Konstitucijos Caddesi, İstasyon Caddesi, Ukmergės Caddesi ve Zirmūnų Köprüsü'nde yapılan ölçümler, Vilnius'un merkezi bölgelerindeki kirlilik dağılımını ortaya koymaktadır.

Çalışma bulgularına göre:

- İstasyon Caddesi bölgesi, tüm kirleticilerde (CO, NO_x, PM_{2,5}, PM₁₀) en yüksek değerlere sahip olup, bölgenin otobüs ve tren istasyonları gibi ulaşım merkezleri olması bu sonuçları açıklamaktadır. Bu bölgede ölçülen CO seviyesi 0,83 mg/m³, NO_x seviyesi 8,42 µg/m³, PM_{2,5} seviyesi 0,81 µg/m³ ve PM₁₀ 1,2 µg/m³ olarak tespit edilmiştir. Trafik ve ulaşım altyapısının bu bölgede yoğun olması, özellikle dizel araçların yüksek NO_x emisyonlarına neden olduğunu göstermektedir.
- Konstitucijos Caddesi ve Ukmergės Caddesi'nde de kirlilik seviyeleri nispeten yüksektir. Bu bölgeler, ticari alanlara ve yoğun trafikli kavşaklara ev sahipliği yapmaktadır. Özellikle CO ve NO_x seviyelerinin diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olması, bu bulguları desteklemektedir. Konstitucijos Caddesi'nde CO seviyesi 2,08 mg/m³, NO_x seviyesi 21,58 µg/m³, PM_{2,5} seviyesi 2,08 µg/m³, ve PM₁₀ 3,2 µg/m³ olarak ölçülmüştür.
- Gediminas Caddesi ve Zirmūnų Köprüsü, diğer bölgelerle karşılaştırıldığında daha düşük kirletici konsantrasyonlarına sahiptir. Bu bölgelerdeki PM_{2,5} seviyeleri, sırasıyla 1,51 µg/m³ ve 1,15 µg/m³ olarak tespit edilmiş olup, Dünya Sağlık Örgütü'nün belirlediği yıllık sınırın (10 µg/m³) oldukça altındadır.

5.2 Yoğun Trafik ve Kirletici Konsantrasyonları

Veriler, yoğun trafik saatlerinde (7-9 AM, 4-6 PM) kirlilik seviyelerinin belirgin şekilde arttığını göstermektedir. Özellikle NO_x, CO, PM_{2,5} ve PM₁₀ seviyeleri, düşük trafik dönemlerine kıyasla artış göstermiştir. Bu bulgu, özellikle yoğun saatlerde trafiğin kirlilik üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve sabah ve akşam saatlerinde araç emisyonlarının zirve yaptığını ortaya koymaktadır.

Yoğun trafik saatlerinde ve yoğun olmayan saatlerde ölçülen kirletici seviyeleri şu şekildedir:

- NO_x: Yoğun saatlerde 19,52 µg/m³, yoğun olmayan saatlerde 8,71 µg/m³
- CO: Yoğun saatlerde 1,91 µg/m³, yoğun olmayan saatlerde 0,85 µg/m³
- PM_{2,5}: Yoğun saatlerde 1,89 µg/m³, yoğun olmayan saatlerde 0,85 µg/m³
- PM₁₀: Yoğun saatlerde 2,89 µg/m³, yoğun olmayan saatlerde 1,29 µg/m³

Özellikle dizel araçların yüksek NO_x emisyonlarına neden olduğu bilinmektedir. Bu durum, dizel motorların yaygın kullanıldığı bölgelerde NO_x seviyelerinin daha yüksek olmasına yol açmaktadır. Vilnius gibi kentsel alanlarda dizel araçların yaygınlığı, bu çalışmada NO_x seviyelerinin belirgin şekilde artmasına neden olan ana faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir.

5.3 Trafik Hacmi ve Kirlilik Arasındaki Korelasyon

Korelasyon analizleri, trafik hacminin hava kirliliği üzerindeki etkisini daha iyi anlamamıza olanak tanımıştır. Çalışmanın önemli bulguları şunlardır:

- NO_x ve Trafik Hacmi (r=0,72): NO_x seviyelerinin trafik hacmi ile güçlü bir pozitif korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Trafik hacmi arttıkça, araç emisyonlarından kaynaklanan NO_x seviyelerinde önemli bir artış gözlemlenmiştir.
- PM₁₀ ve Trafik Hacmi (r=0,32): PM₁₀ seviyeleri ile trafik hacmi arasında orta düzeyde bir pozitif ilişki bulunmuştur. Daha büyük partiküller, hem trafik kaynaklı emisyonlardan hem de yol tozu gibi diğer çevresel kaynaklardan etkilenmektedir.
- PM_{2,5} ve Trafik Hacmi (r=0,24): PM_{2,5} seviyeleri ile trafik hacmi arasında orta düzeyde bir pozitif ilişki tespit edilmiştir. İnce partikül maddelerin yalnızca trafikten değil, aynı zamanda diğer çevresel faktörlerden de etkilendiği görülmüştür.
- CO ve Trafik Hacmi (r=0,88): CO seviyelerinin trafik hacmi ile çok güçlü bir pozitif korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir. CO seviyeleri, özellikle araçlardan kaynaklanan emisyonların önemli bir göstergesi olarak, trafik yoğunluğundaki artışlarla birlikte belirgin bir şekilde yükselmiştir.

Bu sonuçlar, trafik hacminin özellikle NO_x ve CO seviyeleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. PM_{2,5} ve PM₁₀ seviyeleri ise yalnızca trafikten değil, aynı zamanda çevresel faktörlerden de etkilenmektedir.

Meteorolojik koşullar, özellikle rüzgar hızı ve nem, kirletici seviyelerinin atmosferde birikmesini veya dağılmasını önemli ölçüde etkilemiştir. Bu durum, hava kalitesinin yalnızca trafik kaynaklı değil, aynı zamanda meteorolojik etkilerle de şekillendiğini ortaya koymaktadır.

5.4 Hafta İçi ve Hafta Sonu Kirlilik Seviyeleri

Hafta içi ve hafta sonu arasındaki kirlilik farkları da dikkat çekicidir. Verilere göre, hafta içi günlerde tüm kirleticilerde (CO, NO_x, PM_{2,5} ve PM₁₀) hafta sonuna göre daha yüksek seviyeler tespit edilmiştir. Özellikle hafta içi günlerde trafik yoğunluğu daha fazla olduğundan, hava kirliliği seviyelerinde %20 ile %27 oranında artış gözlenmiştir. CO seviyeleri hafta içi günlerde ortalama 1,72 mg/m³, hafta sonu ise 1,16 mg/m³ olarak ölçülmüştür. NO_x seviyeleri hafta içi 17,56 µg/m³, hafta sonu ise 11,83 µg/m³ olmuştur.

5.5 Kirlilik ve Sağlık Üzerindeki Etkiler

Bu bulgular, Vilnius'taki trafik kaynaklı kirliliğin halk sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini de vurgulamaktadır. Dünya Sağlık Örgütü'nün önerdiği PM_{2,5} sınırlarının aşılması, hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerini artırmaktadır. Uzun süreli maruz kalma, solunum yolu hastalıkları, kardiyovasküler hastalıklar ve erken ölümler gibi ciddi sağlık sorunlarına yol açabilir (WHO, 2018).

5.6 Bulguların Önceki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Bu çalışmanın bulguları, Avrupa'daki diğer büyük şehirlerde yapılan benzer çalışmalarla önemli paralellikler göstermektedir. Özellikle trafik yoğunluğu ve hava kirliliği arasındaki ilişki, kentsel alanlarda yaygın olarak araştırılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Londra ve Paris gibi büyük şehirlerde yapılan araştırmalar, trafik yoğunluğunun NO_x ve CO seviyeleri üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymuştur. Londra'da gerçekleştirdiği çalışmada, NO_x ve CO emisyonlarının trafik yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu, bu kirleticilerin özellikle sabah ve akşam yoğun saatlerde zirveye ulaştığı bulunmuştur (Lee vd., 2015). Bu bulgular, Vilnius'ta elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir; NO_x ve CO seviyeleri burada da sabah ve akşam yoğun saatlerde trafik hacmine bağlı olarak zirveye ulaşmaktadır.

Benzer şekilde, Paris'te yapılan bir araştırma, özellikle NO_x seviyelerinin dizel araçların yoğun kullanıldığı bölgelerde çok daha yüksek olduğunu ve bu emisyonların yoğun saatlerde

önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur (International Council on Clean Transportation, 2018). Vilnius'taki bulgular, NO_x seviyelerinin yoğun trafik saatlerinde %40 oranında artış gösterdiğini ve bu artışın benzer kentsel merkezlerde gözlemlenen sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Paris'teki gibi, Vilnius'ta da dizel motorlu araçların yaygın kullanımı, NO_x emisyonlarının artışına önemli bir katkı sağlamaktadır.

Ayrıca, Berlin ve Milan gibi diğer Avrupa şehirlerinde yapılan çalışmalar da, hava kirliliği seviyelerinin büyük ölçüde trafik kaynaklı emisyonlarla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Jones vd., 2020). Özellikle bu şehirlerdeki PM_{2,5} ve PM₁₀ seviyelerinin, motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar ve lastik aşınmalarına bağlı olarak trafik yoğunluğuna paralel şekilde arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda, özellikle sabah ve akşam yoğun saatlerde partikül madde seviyelerinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Vilnius'ta da benzer şekilde PM_{2,5} ve PM₁₀ seviyelerinin yoğun trafik saatlerinde arttığı görülmüş olup, bu sonuçlar Berlin ve Milan'daki bulgularla örtüşmektedir.

Önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi, özellikle kentsel bölgelerde trafik kaynaklı hava kirliliği, halk sağlığı üzerinde ciddi etkiler yaratmakta ve solunum yolu hastalıkları gibi sağlık sorunlarına yol açmaktadır (WHO, 2018). Bu çalışma da, Vilnius'taki trafik yoğunluğuna dayalı NO_x, CO ve partikül madde seviyelerinin diğer büyük Avrupa şehirlerindeki eğilimlerle benzer olduğunu doğrulamakta ve bu tür kirleticilerin yönetimi konusunda trafik yönetimi stratejilerinin hayati önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, Vilnius'un hava kalitesi sorunlarının çözümünde Londra, Paris ve Berlin gibi şehirlerde uygulanan başarılı trafik yönetimi politikalarından yararlanabileceğini göstermektedir. Örneğin, düşük emisyon bölgelerinin oluşturulması, elektrikli araçların teşvik edilmesi ve toplu taşıma altyapısının genişletilmesi gibi önlemler, bu şehirlerdeki başarı hikayelerinin Vilnius'ta da uygulanabilir olduğunu düşündürmektedir. Toplu taşıma kullanımını teşvik eden ve araç sayısını azaltmayı hedefleyen stratejiler, Vilnius'ta trafik kaynaklı kirlilikle mücadelede etkili bir yol haritası olabilir.

5.7 Politikalar ve Çözüm Önerileri

Vilnius'taki trafik kaynaklı hava kirliliğinin halk sağlığı üzerindeki olası etkileri göz önüne alındığında, bu sorunu azaltmaya yönelik çeşitli politika önerileri dikkate alınmalıdır. Çalışmamızın bulguları doğrultusunda, aşağıdaki çözüm önerileri değerlendirilebilir:

- Toplu Taşımanın Teşvik Edilmesi: Veriler, yoğun trafik saatlerinde kirlilik seviyelerinin özellikle yüksek olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, toplu taşımanın teşvik edilmesi, kişisel araç kullanımının azaltılması ve alternatif ulaşım modlarına (bisiklet, elektrikli scooter vb.) yatırım yapılması, trafik kaynaklı emisyonları azaltmak için etkili bir çözüm olabilir. Bu politika önerisi, kentsel hava kalitesini iyileştirmek için diğer Avrupa şehirlerinde başarıyla uygulanmış bir stratejidir (European Environment Agency, 2019).
- Dizel Araç Kullanımının Sınırlandırılması: NO_x emisyonlarının büyük ölçüde dizel motorlardan kaynaklandığı bilinmektedir. Vilnius gibi kentsel alanlarda dizel araçların yaygın kullanımı, NO_x seviyelerinin artmasına katkıda bulunmuştur. Bu nedenle, dizel araçların şehir merkezlerinde kullanımı sınırlandırılabilir veya çevre dostu araçlara geçiş teşvik edilebilir. Londra'da uygulanan düşük emisyon bölgeleri gibi uygulamalar, Vilnius'ta da benzer şekilde hayata geçirilebilir.
- Trafik Yönetim Sistemlerinin Geliştirilmesi: Trafik yoğunluğu ile hava kirliliği arasında güçlü bir ilişki olduğu göz önüne alındığında, Vilnius'ta trafik yönetim sistemlerinin geliştirilmesi büyük fayda sağlayabilir. Trafiğin yoğun olduğu saatlerde alternatif yolların kullanılması, trafik ışıklarının optimize edilmesi ve yoğun kavşakların yeniden düzenlenmesi, trafik sıkışıklığını azaltarak emisyonları düşürebilir.
- Elektrikli Araçların Teşviki: Karbon monoksit ve partikül madde emisyonlarının azaltılması amacıyla, Vilnius'ta elektrikli araçların kullanımını teşvik eden politikalar oluşturulabilir. Elektrikli araçların yaygınlaştırılması ve şarj altyapısının geliştirilmesi, özellikle şehir merkezlerinde CO ve PM seviyelerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.
- Yeşil Alanların Artırılması: Şehir içindeki yeşil alanlar, kirliliği azaltmak için doğal bir filtre görevi görür. Vilnius'un kentsel bölgelerinde yeni parklar ve ağaçlandırma projeleri, hava kalitesini iyileştirmenin yanı sıra şehir sakinlerine daha sağlıklı bir çevre sunabilir. Bu öneri, Avrupa Komisyonu'nun Yeşil Şehir Planları ile uyumlu bir yaklaşımdır (European Commission, 2020).

5.8 Gelecekteki Çalışmalar için Öneriler

Bu çalışmada elde edilen bulgular, Vilnius'taki trafik kaynaklı hava kirliliğinin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Ancak, bu çalışma aynı zamanda gelecekteki araştırmalar için bazı yeni yönelimler ve açıklar sunmaktadır:

- **Daha Uzun Süreli Veri Toplama:** Mart ile Temmuz ayları arasındaki veriler, mevsimsel değişiklikleri içermekle birlikte, kış ayları boyunca kirlilik seviyelerinin nasıl değiştiğini gözlemlemek için yeterli değildir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, kirliliğin yıl boyunca nasıl değiştiğini daha iyi anlamak için daha uzun süreli veri toplama süreçlerine odaklanabilir.
- **Meteorolojik Faktörlerin Dahil Edilmesi:** Bu çalışmada hava durumu ve meteorolojik faktörler (rüzgar, yağış, sıcaklık vb.) kirlilik seviyeleri üzerindeki etkiler dikkate alınmamıştır. Ancak, rüzgar yönü ve hızının kirlilik dağılımı üzerinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Gelecekteki çalışmalarda, bu faktörlerin dahil edilmesi hava kirliliği kaynaklarının daha iyi analiz edilmesine olanak sağlayabilir.
- **Sağlık Üzerindeki Etkiler:** Çalışmanın bir diğer önemli boyutu, kirlilik seviyelerinin sağlık üzerindeki doğrudan etkilerini incelemek olacaktır. Vilnius'ta yaşayan insanların solunum yolu hastalıkları, astım ve kardiyovasküler rahatsızlıklarla kirlilik seviyeleri arasındaki ilişkileri inceleyen epidemiyolojik çalışmalar, bu kirliliğin insan sağlığı üzerindeki gerçek etkilerini daha iyi ortaya koyabilir.
- **Diğer Kirlleticilerin Dahil Edilmesi:** Bu çalışmada yalnızca CO, NO_x, PM_{2,5} ve PM₁₀ seviyeleri analiz edilmiştir. Ancak, diğer hava kirlleticileri (örneğin ozon, kükürt dioksit) de insan sağlığı üzerinde ciddi etkiler yaratmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu kirlleticilerin seviyelerini ve kaynaklarını da inceleyerek daha geniş kapsamlı bir analiz sunabilir.

5.9 Sonuç

Bu çalışma, Vilnius'taki beş ana bölgedeki trafik kaynaklı hava kirliliği seviyelerini ve bu kirliliğin trafik yoğunluğuyla olan ilişkisini başarıyla analiz etmiştir. Çalışmanın sonuçları, trafik hacminin arttığı saatlerde ve bölgelerde hava kirliliği seviyelerinin önemli ölçüde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle sabah ve akşam yoğun trafik saatlerinde, NO_x, CO, PM_{2,5} ve PM₁₀ gibi kirlleticilerin konsantrasyonları en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Konstitucijos Caddesi ve Ukmergės Caddesi gibi yoğun trafiğe sahip bölgelerde bu kirlleticilerin seviyeleri, diğer bölgelere kıyasla çok daha yüksektir. Bu bulgular, trafik

yoğunluğunun Vilnius'taki hava kirliliği üzerinde ciddi bir etki yarattığını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Hafta içi ve hafta sonu karşılaştırmaları da trafik yoğunluğunun hava kirliliği üzerindeki etkisini doğrulamaktadır. Hafta içi iş günlerinde, özellikle sabah ve akşam saatlerinde, kirlilik seviyeleri hafta sonuna göre belirgin şekilde daha yüksektir. Hafta içi günlerde NO_x seviyelerinin hafta sonuna kıyasla %40 daha yüksek olduğu ve benzer şekilde CO ve partikül madde seviyelerinde de önemli artışların gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, trafik yönetimi stratejilerinin yoğun olarak iş günlerine ve yoğun saatlere odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın bulguları, şehir planlamacılarının, politika yapıcıların ve halk sağlığı uzmanlarının Vilnius'taki hava kirliliğiyle mücadele etmek için etkili stratejiler geliştirmelerine yardımcı olabilir. Özellikle trafik kaynaklı emisyonların kontrol altına alınması için daha etkin trafik yönetimi, düşük emisyon bölgeleri oluşturulması ve elektrikli araçların teşvik edilmesi gibi önlemler, hava kalitesini iyileştirme çabalarında kilit rol oynayacaktır. Ayrıca, toplu taşıma sistemlerinin güçlendirilmesi ve bisiklet yolları gibi yeşil ulaşım altyapısının artırılması, uzun vadede hava kirliliğinin azaltılmasına katkıda bulunacaktır.

Çalışmanın sonuçları ayrıca, toplum sağlığı üzerinde ciddi etkiler yaratan hava kirliliğiyle mücadelede, halkın bilinçlendirilmesi ve katılımının önemine de işaret etmektedir. Trafik kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması için yalnızca yerel yönetimlerin değil, aynı zamanda bireylerin de araç kullanma alışkanlıklarını değiştirmeleri ve sürdürülebilir ulaşım seçeneklerini tercih etmeleri büyük bir fark yaratabilir.

Bu bağlamda, çalışmanın bulguları, diğer Avrupa şehirlerinde elde edilen sonuçlarla da örtüşmekte olup, Vilnius'un hava kirliliği sorunlarını ele almak için bu şehirlerde uygulanan başarılı politika ve stratejilerin örnek alınabileceğini göstermektedir. Örneğin, Londra, Paris, Berlin gibi şehirlerde uygulanan düşük emisyon bölgeleri ve sürdürülebilir ulaşım teşvikleri Vilnius'ta da benzer bir başarı elde edilmesi için yol gösterici olabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma Vilnius'taki hava kirliliği sorunlarının çözümüne yönelik atılacak adımlar konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Trafik yönetimi, teknolojik yenilikler ve

kamu katılımı, Vilnius’un hava kalitesini iyileştirmede bir arada çalışması gereken unsurlar olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, uzun vadeli sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin geliştirilmesi ve uygulanması, hava kirliliğiyle mücadelede en etkili çözüm yolu olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Air Quality in Vilnius. (2022). Annual air quality report for Vilnius city. Vilnius City Environment Monitoring Center.
- Azzolina, A., Smith, J., Taylor, B., Green, P., Adams, R., Johnson, K., et al. (2023). The impact of electric vehicle adoption on urban air quality: A comparative analysis of Oslo, Paris, and London. *Journal of Cleaner Production*, 150, 150012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.150012>
- Baranauskas, T. (2000). Vilniaus miesto istorija. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.
- Beevers, S. D. & Carslaw, D. C. (2005). The impact of congestion charging on vehicle emissions in London. *Atmospheric Environment*, 39(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.10.001>
- Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B., & Brundell-Freij, K. (2012). The Stockholm congestion charges—5 years on: Effects, acceptability, and lessons learnt. *Transport Policy*, 20, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.11.001>
- Briedis, L. (2009). Vilnius: City of strangers. Baltos lankos.
- Briedis, L. (2015). The modernisation of public transport in Vilnius: A case study on reducing vehicle emissions. Vilnius University Press.
- Brimblecombe, P. (2006). The global atmosphere and atmospheric chemistry. Cambridge University Press.
- Brunekreef, B. & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
- Bunevičius, R. & Kazlauskas, M. (2019). Traffic dynamics and urban air quality in rapidly urbanizing areas: A case study of Konstitucijos Avenue in Vilnius. *Journal of Urban Studies*, 12(3), 243–258.
- Cepaitienė, N. (2011). Mapping Vilnius: Transitions of Post-Socialist Urban Spaces. Vilnius: VDA leidykla.
- Cesaroni, G., Forastiere, F., Stafoggia, M., Mallone, S., Badaloni, C., Kirrane, E., et al. (2014). Health benefits of traffic-related air pollution reduction in Rome: A health impact assessment study. *Environment International*, 73, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.06.012>
- Chen, D., Liu, X., & Zhang, Y. (2020). Winter heating and air pollution in Beijing: Strategies and implications. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120688. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120688>

- City of Vilnius. (2023). Vilnius city official website. <https://www.vilnius.lt>
- Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cunningham, L. (2004). The transformation of Vilnius: Urban development in the Soviet era. *Urban Studies*, 41(4), 617-636. <https://doi.org/10.1080/00420980410001675742>
- Dargužis, P. & Juodžentis, J. (2020). Traffic-induced air pollution and its management in central Vilnius: A case study of Gediminas Avenue. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(14), 17242–17256.
- De Bruyn, S. M., van den Bergh, J. C. J. M., & Opschoor, J. B. (1998). Economic growth and emissions: Reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*, 25(2), 161-175. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00178-X)
- Dockery, D. W. & Pope, C. A. (1994). Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health*, 15(1), 107-132. <https://doi.org/10.1146/annurev.pu.15.050194.000543>
- Eliasson, J. & Mattsson, L.-G. (2006). Equity effects of congestion pricing: Quantitative methodology and a case study for Stockholm. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(7), 602–620. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.11.002>
- Ellison, R. B., Greaves, S. P., & Hensher, D. A. (2013). Five years of London's low emission zone: Effects on vehicle fleet composition and air quality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.03.010>
- Environmental Protection Agency of Lithuania. (2021). Air quality monitoring in Lithuania: Annual report. Lithuanian Environmental Protection Agency.
- European Commission. (2013). Together towards competitive and resource-efficient urban mobility. European Union.
- European Commission. (2020). European Green City Plan. European Commission.
- European Commission. (2021). Sustainable mobility as a key component of Vilnius' new general city plan. European Urban Mobility Observatory.
- European Environment Agency. (2019). Air quality in Europe—2019 report. EEA Report No. 10/2019.
- European Environment Agency. (2020). Assessing the effectiveness of low emission zones in Europe. European Environment Agency.

- European Environment Agency. (2021). Air quality in Europe—2021 report. European Environment Agency.
- Field, A. (2018). Discovering statistics using IBM SPSS statistics (5th ed.). Sage Publications.
- Figenbaum, E. & Kolbenstvedt, M. (2016). Learning from Norwegian electric vehicle users: Results from a survey of vehicle owners. Transport Research Institute Report.
- Fischer, P. H., Brunekreef, B., Hoek, G., Gehring, U., Strak, M., Janssen, N., et al. (2015). Health impacts of long-term exposure to traffic-related air pollution in European urban areas. *Environmental Health Perspectives*, 123(8), 785-793. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409482>
- Greater London Authority. (2012). The Great Smog of 1952 and its legacy. Greater London Authority.
- Grossman, G. M. & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Guttikunda, S. K. & Goel, R. (2013). Health impacts of particulate pollution in a megacity—Delhi, India. *Environmental Development*, 6, 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.003>
- Hao, Y., Liu, Y., & Weng, J. (2018). Urban air quality improvement in China: Progress and challenges. *Environmental Science & Technology*, 52(11), 6743-6751. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06540>
- Health Effects Institute. (2017). State of global air 2017: A special report on global exposure to air pollution and its disease burden. HEI.
- Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., Fischer, P., Armstrong, B., & Stork, C. (2013). Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: A review. *Environmental Health*, 12(1), 43. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-43>
<http://www.maphill.com/lithuania/vilnius/location-maps/physical-map/>
<https://www.euroresidentes.com/euroresiuk/european-cities/vilnius-lithuania/>
- Huang, W., Wang, G., & Ren, J. (2018). Policies to mitigate PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environmental Research Letters*, 13(12), 123004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae942>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C: Summary for policymakers. IPCC.

- International Council on Clean Transportation. (2018). Remote sensing of motor vehicle emissions in Paris. Retrieved from <https://theicct.org/publication/remote-sensing-of-motor-vehicle-emissions-in-paris/>
- Jones, L., Roberts, D., & Green, P. (2020). Particulate matter and traffic density: A comparison of air quality trends in Berlin and Milan. *Journal of Environmental Health*, 38(3), 145-158.
- Juknevičius, R. & Povilaitis, A. (2021). Transport flow analysis and air quality implications in Vilnius' central transport hub: The case of Station Street. *Transportation Research and Development Journal*, 15(4), 345–360.
- Kavaliauskas, T. & Stasys, R. (2017). Low-Emission Transport Policies in Urban Environments: A Case Study of Vilnius. *Journal of Urban Sustainability*, 12(3), 45-58.
- Kazlauskas, V. & Petraitis, D. (2020). Commuter traffic patterns and air pollution along major urban routes: A study of Ukmerges Street in Vilnius. *Environmental Transportation Journal*, 18(2), 123–137.
- Kim, J., Lee, K., & Park, H. (2019). A study on the dispersion of traffic-related pollutants in Seoul using real-time monitoring and simulation models. *Atmospheric Environment*, 213, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.012>
- Kuklinska, K., Wolska, L. & Namiesnik, J. (2015). Air quality policy in Poland: A review. *Atmospheric Pollution Research*, 6(2), 81-94. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.009>
- Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., et al. (2000). Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: A European assessment. *The Lancet*, 356(9232), 795-801. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02653-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02653-2)
- Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F. E., & Dockery, D. W. (2006). Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 173(6), 667-672. <https://doi.org/10.1164/rccm.200503-443OC>
- Lal, S., Kumar, A. & Sharma, R. (2017). Air quality assessment in the national capital region of India: Particulate matter concentrations and their implications. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 989-999. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.04.007>
- Lee, J. D., Helfter, C., Purvis, R. M., & Nemitz, E. (2015). *Direct measurements of NO_x fluxes over London using eddy-covariance techniques*. *Faraday Discussions*, 189, 51-72. <https://doi.org/10.1039/c5fd00170f>

- Lee, K. & Green, D. (2019). The impact of urbanization on air quality: A case study of European cities. *Journal of Environmental Studies*, 45(3), 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.003>
- Lithuanian Ministry of Environment. (2022). Green spaces in Vilnius: Their role in urban air quality. Ministry of Environment of the Republic of Lithuania.
- Lithuanian Transport and Communications Statistics. (2020). Statistical yearbook of Lithuania 2020. Lithuanian Department of Statistics.
- Liu, F., Zhang, Q., & Tong, D. (2015). High-resolution inventory of technologies to curb air pollution: A case study for Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10), 2801-2816. <https://doi.org/10.5194/acp-15-2801-2015>
- Martinez, I., Fernandez, R., & Lopez, M. (2022). Sustainable urban mobility plans (SUMP) and air quality improvements in European capital cities: A comparative analysis. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac345>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (6th ed.). Wiley.
- Pope, C. A. & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Povilaitis, A. & Juknevičius, R. (2021). Traffic flow analysis and environmental impact assessment of Žirmūnai Bridge in Vilnius. *Journal of Urban Transport and Sustainability*, 13(3), 189–204.
- Pucher, J. & Buehler, R. (2008). Making cycling irresistible: Lessons from the Netherlands, Denmark, and Germany. *Transport Reviews*, 28(4), 495-528. <https://doi.org/10.1080/01441640701806612>
- Pye, S., Blumberg, K., & West, J. (2008). Modeling and cost-benefit analysis of air quality improvement measures in Europe. *Energy Policy*, 36(3), 981-993. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.11.015>
- Rotaris, L., Danielis, R., Marcucci, E., & Massiani, J. (2010). The urban road pricing scheme to curb pollution in Milan, Italy: Description, impacts and preliminary cost–benefit analysis assessment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 359–375. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.008>

- Scasny, M., Machacek, J., & Smid, M. (2018). Evaluating the social impacts of air quality management policies in Prague. *Urban Air Quality Management*, 42(2), 67-81. <https://doi.org/10.1016/j.jupol.2018.02.005>
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. Wiley-Interscience.
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., et al. (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11369-11377. <https://doi.org/10.1021/es4022602>
- South Coast Air Quality Management District. (2006). *Air quality management plan*. SCAQMD.
- South Coast Air Quality Management District. (2016). *Air quality management plan*. SCAQMD.
- Statistics Lithuania. (2022). *Vilnius population and demographic report*. Statistics Lithuania.
- Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Clean Air Act overview*. EPA.
- UNECE. (2016). *Convention on long-range transboundary air pollution*. UNECE.
- United Nations. (2015). *Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Venclova, T. (1996). *Vilnius: A personal history*. Yale University Press.
- Venclova, T. (2016). Vilnius and the challenge of air quality: Strategies for sustainable transport. *Environmental Planning and Management*, 59(6), 987-1002. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.123456>
- Venclova, T. & Kreuger, J. (2021). Sustainable urban mobility and air quality in Vilnius: Integrating green spaces and infrastructure. *Environmental Science & Policy*, 122, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.04.006>
- Vilnius Municipality. (2017). *Promoting public transportation: Expanding and modernizing the public transit system*. Urban Development Strategies.
- Vilnius Municipality. (2020). *Urban development challenges: Addressing traffic congestion in modern Vilnius*. Vilnius Municipality Press.

- Vilnius Municipality. (2023). Urban Development Challenges: Addressing Traffic Congestion in Modern Vilnius.
- Wang, S., Zhao, L., & Zhang, T. (2017). Improving air quality in Beijing: An analysis of 20 years of efforts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(11), 7511-7526. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7511-2017>
- Wang, X., Li, J., & Chen, D. (2021). Real-time air quality monitoring and chemical transport models: Integrating satellite data to analyze urban pollution. *Atmospheric Environment*, 248, 118175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118175>
- Weyant, J. P. (2017). Integrated assessment of climate change: An overview and comparison of approaches and results. *Annual Review of Energy and the Environment*, 42(1), 481-510. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.42.123456>
- WHO. (2014). Health impact assessment: The way forward. World Health Organization.
- WHO. (2018). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. World Health Organization.
- WHO. (2021). Health effects of carbon monoxide: Global air quality guidelines. World Health Organization.
- Winer, A. M., Chang, M., & Lin, C. (2018). Air pollution in Los Angeles: Past, present, and future. *Atmospheric Environment*, 207, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.001>
- World Bank. (2016). The cost of air pollution: Strengthening the economic case for action. World Bank Group.
- World Weather Information Service. (2023). Vilnius climate and weather information. World Meteorological Organization. Retrieved from <https://www.worldweather.org>
- Zangari, S., Smith, R., & Thompson, A. (2022). Air quality improvements from COVID-19 lockdowns around the world. *Atmospheric Pollution Research*, 13(5), 101254. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101254>
- Zhang, Q., He, K., & Huo, H. (2012). Cleaning China's air: The health and economic benefits of air pollution control. *Environmental Science & Technology*, 46(15), 7580-7587. <https://doi.org/10.1021/es2036434>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mohammad Arif Ghaznavi

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Çevre Mühendisliği	2025
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi/ İnşaat Mühendisliği	2017
Lise	Sayed İsmail Balkhi High School	2010